
Erfahrungen aus zwei Vortrieben in einschaliger Spritzbetonbauweise - Betontechnologie, Wirtschaftlichkeit -

THE SINGLE-SHELL SHOTCRETE METHOD APPLIED AT TWO TUNNELLING SITES - CONCRETE TECHNOLOGY AND ECONOMIC VIABILITY

KONRAD HÖHN

An zwei Baustellen - Abwasserstollen Frasdorf und Versuchsstrecke U-Bahn - Los 6 West 5 in München - wurde die "Einschalige Spritzbetonbauweise" eingesetzt und mit Erfolg ausgeführt.

Die einschalige Bauweise besteht ebenso wie der zweischalige Ausbau aus einer sofort nach dem Ausbruch zur Sicherung des geöffneten Hohlraumes eingebauten Spritzbetonschale, mit allen weiteren, je nach Gebirgsverhältnissen erforderlichen Sicherungs- und Stützelementen und einer oder mehrerer zusätzlichen Spritzbetonlagen, die mit Betonstahlmatten bewehrt sind. Hochdruckreinigung und spezielle betontechnologische Maßnahmen sowie eine effektive Betonnachbehandlung gewährleisten den Verbund zwischen den nacheinander aufgetragenen Schichten.

Dieses Bauverfahren bietet wirtschaftliche Vorteile und auch eine geringere Umweltbelastung. Ausbruch und Betonbedarf werden verringert, Schalwagen und aufwendige Sonderschalungen bei Tunnelaufweitungen oder Querschlägen entfallen.

On two sites - waste water tunnel Frasdorf and test stretch in the construction of the Munich subway - the single-shell method was employed successfully.

After tunnel driving the support means for the single-shell method are the same as for the double-shell method. Sprayed concrete with all necessary support means and in addition one or several layers of sprayed concrete with reinforcement are applied. To get the best bond between the following different layers, adequate measures should be taken: cleaning by high pressure water jet, adapted concrete technology and effective curing of the concrete.

This construction method offers economical advantages as well as reduced effects on the environment. The quantities of excavation material and concrete can be reduced, and costly formwork for connecting tunnels and transition sections can be avoided.

1. Allgemeines

Seit dem Siegeszug des Spritzbetons im Tunnelbau, besteht der Wunsch, den zweischaligen Ausbau

durch nur eine Schale Spritzbeton zu ersetzen. Mehrere Objekte wurden schon in einschaliger Bauweise erstellt. Der Erfolg war nicht voll befriedigend. Bis 1989 wurde diese Bauweise nur bei

Vortrieben in Fels angewendet. Die Erkenntnisse einer verbesserten Betontechnologie sowie eine Vereinbarung über intensive Beratung und Betreuung durch das BMI der Universität Innsbruck ließ unsere Firma eine Ausführung der einschaligen Spritzbetonbauweise in "Lockergestein" an zwei Baustellen wagen.

Es handelt sich hierbei um den Abwasserstollen Frasdorf mit ca. 3,1 km Länge und eine 60 m lange Aufweitungsstrecke des U-Bahn Loses 6 West 5 in München.

Ein Arbeitskreis "Einschalige Spritzbetonbauweise", bestehend aus Professoren der TU München, Vertretern des U-Bahn-Referates München sowie Vertretern des BMI und DYWIDAG, begleiteten das zuletzt genannte Bauvorhaben.

Die Ausbruchquerschnitte betragen: in Frasdorf 11 m² (Bild 1) in München 38 bis 52 m² (Bild 2).

Aus den Abbildungen sind die verschiedenen Spritzbetonlagen zu ersehen und ihre Aufgaben im Gesamtsystem definiert. Die erste Lage Spritzbeton hat im Zusammenwirken mit den üblichen Sicherungsmitteln den Hohlraum zu stützen, wie auch in

der zweischaligen Bauweise. Eine wesentliche Forderung der Spritzbetonbauweise - oder wie häufiger genannt der "Neuen Österreichischen Tunnelbauweise" - ist der schnelle Ringschluß und gleichzeitig eine hohe Frühfestigkeit des Spritzbetons. Diese Forderungen ließen einen Verzicht auf BE-Mittel während der Bauausführung (1986 - 1990) bei dieser Schicht nicht zu. Um die Kriterien des WU-Betons bei den inneren Spritzbetonlagen zu erfüllen, müssen höherwertige Spritzbetone hergestellt werden. Neben den o.g. Kriterien sind bei der Betonherstellung auch die zeitliche Verschiebung des Aufbringens der inneren Lagen mit allen Problemen durch Schwinden, Verbundanforderungen usw. zu berücksichtigen. Es gelang für alle Probleme eine Lösung zu finden, um die Bauwerke vertragsgemäß herzustellen.

2. Spritzbetontechnologie

2.1 Grundsätzliches

Aufgrund durchgeführter baubetrieblicher Studien beim Stollen Frasdorf zeigte sich, daß Zuschlag-

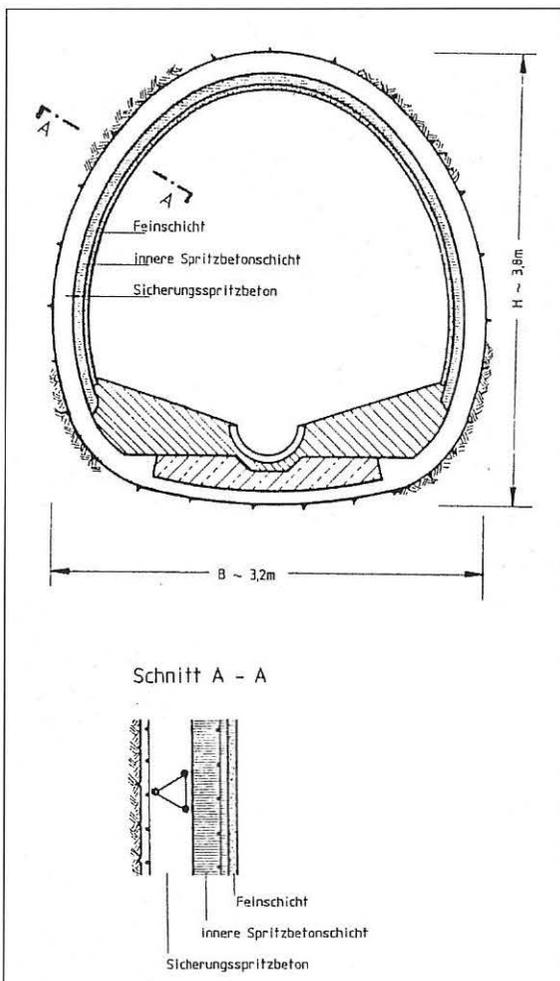


Bild 1: Stollenquerschnitt Frasdorf

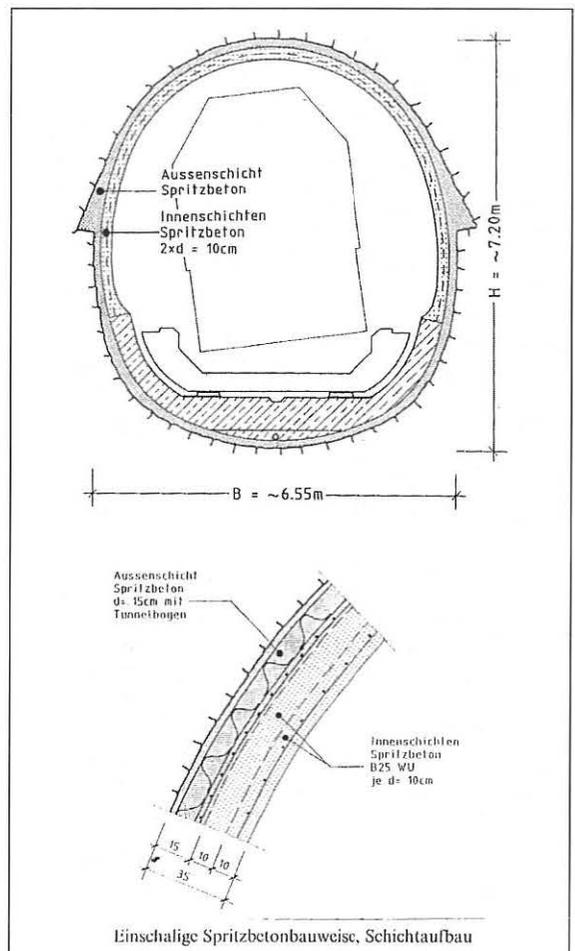


Bild 2: Einschalige Spritzbetonbauweise, Regelquerschnitt München

stoffe für die Herstellung des Spritzbetons mit einer natürlichen Restfeuchte nicht eingesetzt werden konnten, da sonst die geforderte hohe Spritzbetonqualität in Frage gestellt gewesen wäre.

Gründe hierfür waren:

- bei dem langen Förderweg und nicht auszuschließenden Betriebsstörungen konnte ein frühzeitiges Ansteifen des Betons nicht vermieden werden;
- beim Stollenvortrieb an der Ortsbrust waren jeweils nur relativ kleine Spritzbetonmengen zu verarbeiten und
- die beengten Platzverhältnisse bei dem kleinen Stollenquerschnitt machten eine Herstellung der Mischung vor Ort unmöglich.

Diese Gründe sprachen für den Einsatz von ofengetrockneten Zuschlagstoffen, die werkseitig sofort mit der erforderlichen Zementmenge vermischt wurden, und in Zementsilowagen als fertige, staubtrockene Mischung angeliefert und in die vorhandenen Baustellensilos eingeblasen wurden. Vorteile dieses Verfahrens sind:

- hohe Homogenität der Spritzbetonmischung durch laufende Kontrolle im Labor,
- nahezu unbegrenzte Lebensdauer der Mischung,
- weitgehende Unabhängigkeit zwischen Baubetrieb und Zulieferung des Mischgutes,
- keine Verluste durch vorzeitig angesteiften Spritzbeton.

Da sich diese Wahl des Spritzbetongemisches in Frasdorf voll bewährte, wurde es prinzipiell für die Versuchsstrecke bei der U-Bahn München übernommen.

2.1.1 Anmerkungen zu den Spritzbetonschichten

2.1.1.1 Äußere temporäre Sicherung

Wie schon erwähnt, wurde bei dieser ersten Spritzbetonschicht nicht auf den Einsatz von Erstarungsbeschleunigern verzichtet. Um den negativen Einfluß der BE-Mittel auf die Endfestigkeit des Spritzbetons zu minimieren, wurde eine möglichst niedrige aber gleichmäßige BE-Mittel-Dosierung und ein etwas erhöhter Zementgehalt der Spritzbetonmischung gewählt. Es kam pulverförmiger Erstarungsbeschleuniger (Guttacrete) zum Einsatz und wurde über eine Dosiereinrichtung der Trockenmischung zugegeben. Verwendet wurde folgende Spritzbetonmischung:

- 400 kg/m³ Zement
- 1.800 kg/m³ ofengetrocknete Zuschlagstoffe mit den Größtkorn 8 mm
- 20 kg/m³ Guttacrete

2.1.1.2 Innere Spritzbetonschichten

Die an die nachträglich zu ergänzenden Spritzbetonschichten gestellten höheren Qualitätsanforderungen waren:

- Endfestigkeit mußte > B 25 nach DIN 1045 sein
- Sicherung des Verbundes zwischen äußerer und innerer Spritzbetonschicht durch ausreichende Haftzugfestigkeit und Haftscherfestigkeit
- WU-Beton nach DIN 1045 bzw. ZTV-UBR München
- Beständigkeit bei schwach chemischem Angriff (nicht für U-Bahn)
- glatte Oberfläche

Diese Forderungen wurden mit folgenden Maßnahmen erfüllt:

1. Reinigung der Oberfläche der äußeren temporären Spritzbetonschicht um die Verbundeigenschaften zwischen der äußeren und der inneren Spritzbetonschicht zu verbessern.
2. Verbesserung der Betoneigenschaften durch Verzicht auf BE-Mitteln
3. Verbesserung der Spritzbetonqualität durch Zugabe von Microsilica
4. Gezielte Nachbehandlung des Betons, um das Schwinden zu verringern.

Noch einige Anmerkungen zu Microsilica. Es fällt als Abfallprodukt in der Industrie an und ist ein extrem feinkörniger Staub mit einer sehr großen spezifischen Oberfläche (18 - 22 m²/g) und besteht zu 85 - 98 % aus amorphem SiO₂. Das Produkt wird in Pulverform oder als Suspension geliefert und mit einem Anteil von 5 - 20 % des Zementgewichtes der Betonmischung zudosiert. Bei unserem gewählten Trockenspritzverfahren hat sich die Zugabe als Suspension an der Düse bewährt. Die Frischbetoneigenschaften änderten sich wie folgt:

- die größere Oberfläche der Mischung erfordert eine größere Wasserzugabe; gleichzeitig tritt ein Kugellagereffekt ein und es stellt sich bei der Mischung eine weichere Konsistenz ein
- die Mischung erhält eine größere Kohäsion und dies führt zu einer besseren Umhüllung von Bewehrung und anderen Einbauteilen, zu weniger Rückprall und zur Staubreduzierung, es wird der Einbau größerer Schichtstärken in einem Arbeitsgang ermöglicht
- die Neigung zur Entmischung wird verringert, das Bluten des Frischbetons reduziert.

Nachstehende Verbesserungen bei den Frischbetoneigenschaften traten auf:

- deutliche Erhöhung der Druckfestigkeiten
- erhöhte Haftzugfestigkeitswerte

- geringere Wasserdurchlässigkeit und bessere Chemikalienbeständigkeit durch reduzierte Porosität.

Trotz aller Vorteile stellte sich auch ein Nachteil - nämlich die Neigung zum Frühschwinden - ein. Aber eine gute Nachbehandlung hielt diesen Nachteil in unschädlichen Grenzen.

Es kamen folgende Mischungen zum Einsatz:

Frasdorf:

- 380 kg/m³ Zement PZ 45 F
- 1640 kg/m³ ofengetrockneter Zuschlagstoff, Größtkorn 8 mm
- 55 kg/m³ Microsilica-Slurry

U-Bahn-München:

- 380 kg/m³ Zement PZ 45
- 1740 kg/m³ ofengetrockneter Zuschlagstoff, Größtkorn 8 mm
- 60 kg/m³ Microsilica-Slurry

2.1.1.3 Feinschicht

Diese Schicht soll, wo gefordert, die Ebenflächigkeit der Oberfläche verbessern und außerdem die Beständigkeit gegen chemische Aggressivität erhöhen. Folgende Mischung wurde für diese Schicht eingesetzt:

- 400 kg/m³ Zement PZ 45 F
- 1690 kg/m³ ofengetrocknete Zuschlagstoffe, Größtkorn 2 mm
- 40 kg/m³ Microsilica-Slurry

Die zur Ausführung vorgeschlagenen Mischungen mußten eingehender Eignungsprüfungen und laufender Güteprüfungen unterzogen werden. Nachfolgend wird über die Prüfungen und Ergebnisse sowie über zusätzliche Versuche berichtet.

3. Eignungsprüfungen

3.1 Anforderungen

Grundlagen sind DIN-Normen und zusätzliche technische Vertragsbedingungen

- DIN 18551 Spritzbeton, Herstellung und Prüfung
- DIN 1045 Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung
- ZTV-UBR München

Danach ergeben sich zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen nachstehende Kriterien:

3.1.a) Endfestigkeit

Die DIN 1045 schreibt für die 28-Tage-Druckfestigkeit folgende Werte vor:

- Nennfestigkeit = 25 N/mm²
- Serienfestigkeit = 30 N/mm²

Bei der Eignungsprüfung ist die Serienfestigkeit β_{ws} mit einem Vorhaltemaß von ca. 5 N/mm² zu er-

höhen; d.h. die Serienfestigkeit der Eignungsprüfung muß mind. 35 N/mm² betragen.

3.1.b) Wasserundurchlässigkeit

Die Wassereindringtiefe bei der Prüfung nach DIN 1048 darf den Wert von 50 mm nicht überschreiten. Bei der U-Bahn ist der Wert von 30 mm max. Wassereindringtiefe nach ZTV-UBR einzuhalten. Der Wasserzementwert muß kleiner 0,60 sein.

3.1.c) Hoher Widerstand gegen chemischen Angriff

Diese Bindung war nur für den Abwasserstollen einzuhalten. Nach den Ausschreibungsbedingungen war ein hoher Widerstand gegen "schwachen" chemischen Angriff nach DIN 4030 gefordert. Die Widerstandsfähigkeit hängt weitgehend von der Dichtigkeit des Betons ab. Im vorliegenden Fall galten gemäß DIN 1045 die gleichen Kriterien wie für die Wasserundurchlässigkeit: Wassereindringtiefe kleiner 50 mm und W/Z-Wert kleiner 0,60.

3.1.d) Haftverbund

Um die Verbundwirkung der einzelnen Spritzbetonschichten sicherzustellen, wurde für die Haftzugfestigkeit und die Haftscherfestigkeit ein Mindestwert von 1,5 N/mm² festgelegt.

3.2 Ergebnisse der Eignungsprüfung Frasdorf

Die Prüfungen wurden nach den in DIN 18551, DIN 1048 und DIN 52171 festgelegten Grundsätzen und Prüfverfahren unter Baustellenbedingungen durchgeführt. Da die inneren Spritzbetonschichten von besonderem Interesse sind, wird an dieser Stelle nur über diese Schichten berichtet.

Beim Stollen Frasdorf bestand die Möglichkeit an einem 14 m langen Abschnitt des Ausziehtollens in Situ-Versuche als Ergänzung zu dem Versuchsprogramm der DIN 18551 durchzuführen. Schwerpunkt der Versuche war die Erprobung des maschinentechnischen Konzeptes und weitere Untersuchungen zur Verbundwirkung der einzelnen Spritzbetonschichten.

Die gerätetechnische Erprobung brachte manche maschinellen Probleme an den Tag, die dann im Ablauf der Versuche reduziert werden konnten und eine wesentliche Verbesserung der Verfahrenstechnik ermöglichten.

Trotz aller Probleme funktionierte das Spritzen zeitweise sehr gut und führte zu einem ausgezeichneten Spritzbild.

Diese Umstände erklären die relativ große Schwankungsbreite der Versuchsergebnisse im Ausziehtollen.

Alle Versuchsergebnisse zur Beurteilung des vorhergehenden Verfahrens und der Eignung der einzelnen Spritzbetone sind in den Untersuchungsbe-

richten des BMI der Universität Innsbruck dokumentiert. Hier werden nur die festgestellten Mittelwerte für beide Baustellen aufgeführt.

3.2.1 Ausgangsmischung

Zur Feststellung der Gleichmäßigkeit des Trockenmischgutes wurde Material an verschiedenen Stellen des Materialflusses entnommen und abgeseibt. Die Ergebnisse lagen, bis auf wenige Proben beim Stollen Frasdorf, im Schwankungsbereich nach DIN 1145. Für die Eignungsprüfung war die Mischung des angelieferten Spritzgutes zufriedenstellend.

3.2.2 Wasserzementwert

Unmittelbar nach dem Spritzen wurden Proben aus den Prüfkörpern entnommen, um den Wassergehalt durch Trocknen zu ermitteln. Der W/Z-Wert der Prüfkörperbetone wurde mit 0,60 festgestellt.

3.2.3 Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte an Bohrkernen \varnothing 10 cm mit einem Abmessungsverhältnis $h/d = 1$.

a) Als Mittelwert der Eignungsprüfung ergab sich:

Abmessung	\varnothing 99 mm, H = 99,2 mm
Rohdichte	2,327 kg/dm ³
Bruchlast	342,0 kN
Druckfestigkeit	44,54 N/mm ²

b) Werte von Bohrkernen aus dem Ausziehstollen
Es wurden 16 Probekörper untersucht. Die Druckfestigkeiten lagen zwischen $\beta_w = 37,46$ N/mm² und $\beta_w = 46,42$ N/mm².

Nach statistischer Auswertung ergab sich ein Mittelwert von $\beta_w = 42,64$ N/mm² mit einer Standardabweichung $s = 2,49$ N/mm² und einem Variationskoeffizienten von 5,48 %.

3.2.4 E-Modul nach 28 Tagen

a) Werte der Eignungsprüfung

Spritzbeton 0 - 8	Mittelwert E = 25099 N/mm ²
Spritzbeton 0 - 2	Mittelwert E = 27084 N/mm ²

b) Werte aus Proben des Ausziehstollens

Mittelwert E = 23412 N/mm ²
--

3.2.5 Wassereindringtiefe

Die Größtwerte bei der Prüfung nach DIN 1048 betragen

a) bei Probekörpern der Eignungsprüfung
Spritzbeton 0 - 8 mm: z = 15 mm
Spritzbeton 0 - 2 mm: z = 10 mm

b) bei Proben des Ausziehstollens

Kiste	z = 9 mm
Wand	z = 20 - 40 mm

3.2.6 Haftscherfestigkeit

Zur Ermittlung der Haftscherfestigkeit in der Fuge zwischen äußerer und innerer Spritzbetonschicht wurden aus Bohrkernen \varnothing 100 mm Probekörper mit einer Höhe von 100 mm hergestellt und im Rahmenschergerät Direktscherversuche mit einer Normalspannung von 0,25 N/mm² bzw. 0,50 N/mm² durchgeführt.

a) Werte der Eignungsprüfung

Normalspannung	0,25 N/mm ²	0,50 N/mm ²
Anzahl der Proben	13 St	6 St
Scherfestigkeit		
Minimalwert	2,93 N/mm ²	2,22 N/mm ²
Maximalwert	4,38 N/mm ²	4,11 N/mm ²
Standardabweichung	0,55 N/mm ²	0,61 N/mm ²
Variationskoeffizient	17,7 %	17,7 %

b) Werte bei Probekörpern des Ausziehstollens

a) Werte Außen-Innenschale

Minimalwert	1,73 N/mm ²
Maximalwert	3,61 N/mm ²

β) Werte Innenschale - Feinschicht

Minimalwert	3,21 N/mm ²
Maximalwert	3,70 N/mm ²

3.2.7 Haftzugfestigkeiten

Zur Prüfung der Haftzugfestigkeit wurden Bohrkerne \varnothing 50 mm gezogen, an beiden Enden eine Stahlplatte aufgeklebt und dann auf Zug bis zum Bruch belastet. Biegespannungen im Probekörper wurden durch die doppelt kardanisches gelagerten Lastangriffspunkte vermieden.

a) Werte bei Proben der Eignungsprüfung

Haftzugfestigkeiten nach 28 Tagen	
Spritzbeton 0 - 8 mm	
Bruchlast minimal	1,70 kN
Bruchlast maximal	3,30 kN
Haftzugfestigkeit minimal	1,23 N/mm ²
Haftzugfestigkeit maximal	2,38 N/mm ²
Mittelwert	1,73 N/mm ²

Die Bruchstelle war bei allen Proben leicht verschmudgt.

Spritzbeton 0 - 2 mm	
Bruchlast minimal	1,80 kN
Bruchlast maximal	4,40 kN
Haftzugfestigkeit minimal	1,29 N/mm ²
Haftzugfestigkeit maximal	3,18 N/mm ²
Mittelwert	2,24 N/mm ²

Teilweise waren die Bruchstellen verschmutzt, bei einer Probe zeigte die Bruchstelle porösen Beton.

b) Werte aus Bohrkernen aus dem Ausziehstollen
Die Werte der Haftzugfestigkeiten schwankten sehr und eine statistische Auswertung war kaum sinnvoll durchzuführen.

Als Gründe für die Schwankungsbreite können genannt werden:

- die schon erwähnten maschinentechnischen Probleme mit der sich ergebenden Minderqualität beim Beton und
- die Auftragsflächen wurden nur mit Druckluft und Wasserstahl gereinigt.

Trotz dieser ungünstigen Voraussetzungen wurden Haftzugfestigkeitswerte um $1,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Diese Erfahrung zeigte auch, daß die Oberfläche zwischen den Schichten mit einem besseren bzw. einem effektiveren Verfahren gereinigt werden muß, um die gestellten Kriterien erreichen zu können.

3.3 Beurteilung der Eignungsprüfung

Sowohl die Betondruckfestigkeit B 25 als auch die Erfüllung der Anforderungen an die maximale zulässige Wassereindringtiefe belegten einen sehr dichten Beton. Mit einem W/Z-Wert kleiner 0,60 war damit die Wasserundurchlässigkeit und auch ein hoher Widerstand des Spritzbetons gegen schwach chemischen Angriff gegeben.

Die Haftscherfestigkeiten waren aufgrund der Prüfergebnisse als ausreichend anzusehen.

Die Haftzugfestigkeit zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten war abhängig von der Qualität des Altbetons, dessen Oberflächenvorbehandlung und von der Qualität des Neubetons. Die geforderte Haftzugfestigkeit von $1,5 \text{ N/mm}^2$ kann durch geeignete Maßnahmen erreicht bzw. überschritten werden.

4. Zusätzliches Versuchsprogramm beim Stollen Frasdorf

4.1 Zielsetzung

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" wurde in Ergänzung zu den Eignungs- und Güteprüfungen ein gezieltes Programm zusätzlicher Versuche für die innere Spritzbetonschicht des Stollen (Bild 3) erarbeitet und im Zuge der Arbeiten ausgeführt.

Im einzelnen waren zu untersuchen:

1. Einfluß und Abhängigkeiten beim Einsatz von Microsilica auf die Spritzbetonverarbeitung und die Qualität des Spritzbetons

2. Verhalten eingespritzter Bauteile im Hinblick auf die Wasserundurchlässigkeit des Spritzbetons
3. Temperaturverhalten des Spritzbetons
4. Wirkung einer gezielten Nachbehandlung des Spritzbetons
5. Schwind- und Rißverhalten des Spritzbetons.



Bild 3: Versuchsstrecke im Stollen

4.2 Ergebnisse des zusätzlichen Versuchsprogramms

4.2.1 Spritzbetonverarbeitung

Die Wirkung des Einsatzes von Microsilica auf die Spritzbetonverarbeitung wurde auf einer 10 m langen Versuchsstrecke im Stollen qualitativ durch Beobachtung und Überwachung der Spritzarbeiten sowie quantitativ durch eine Rückprallmessung festgestellt.

Durch die visuelle Beobachtung konnten bei dem angewandten Trockenspritzverfahren folgende Einflüsse festgestellt werden:

- Spürbare Reduzierung des Rückpralls
Die Auswertung der durchgeführten Rückprallmessung ergab in dem vorliegenden Fall einen Rückprallanteil von 15 %, gemessen über den gesamten Gewölbequerschnitt.
Dieser Wert liegt - auch unter Berücksichtigung möglicher Schwankungsbreiten - deutlich unter den bekannten Erfahrungswerten von ca. 35 %.
- Verringerung der Staubentwicklung und damit eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen vor Ort.
- Die größere Haftfähigkeit des Spritzbetons erlaubt größere Schichtstärken (bis 15 cm) in einem Arbeitsgang. Da jedoch der Spritzbeton durch den Entfall der Erstarrungsbeschleuniger langsamer ansteift, sollte zur Vermeidung von Ablöseerscheinungen des frischen Betons dieses Maß im Firstbereich nicht voll ausgeschöpft werden.
- Der Spritzbetonkörper an den Gitterstäben baut sich durch die höhere Kohäsion der Spritzbetonmischung schneller auf; d.h. es werden kürzere Einspritzzeiten erreicht.
- Die Betonoberfläche zeigt eine dichte Struktur.

4.2.2 Verhalten eingespritzter Bauteile

4.2.2.1 Allgemeines

Mit diesem Versuchsabschnitt sollte überprüft werden, wie sich der Einsatz von Microsilica auf das Spritzbetongefüge im unmittelbaren Bereich von eingespritzter Bewehrung, von Gitterbögen und Fugenbändern auswirkt.

Es wurden 1 m² große Versuchsplatten, mit verschiedenen Einbauteilen versehen, im Stollen unter Baustellenbedingungen hergestellt.

Nachfolgend aufgeführte Probekörper sind hergestellt worden:

Mischung	M 1 (Standard)	M 2	M 3
Zement	380 kg	380 kg	350 kg
Microsilica-Slurry	65 kg	-	55 kg

Einbauteile Nummer des Probekörpers

Betonstahl-Lagermatte Q 1 188	1	8	-
Betonstahl-Listenmatte 100 x 8,5 / 100 x 6,5	4	-	-
Betonstahl Ø 14 mm l = 15 cm	5	-	-
Pantex Gitterträger Typ 70/20/30	2	9	10
Bernold Gitterträger Typ III - 145 - 2	3	-	-
Fugenband b = 30 cm Gumba Typ 24/30	6	-	-
Fugenband b = 50 cm Gumba Typ 24/50	7	-	-

Auf eine größere Variationsbreite, die sicher aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswert wäre, wurde aus Kostengründen verzichtet, es wurden nur wesentliche Faktoren untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse schaffen eine Grundlage für weitere zielgerichtete Versuche in der Zukunft. Im Zuge dieses Artikels führt es zu weit alle Prüfkörper und entsprechende Schnittflächen auszuführen. Beispielhaft seien die Platten 2, 4 und 7 gezeigt (Bild 4 bis 6).

Zur visuellen Begutachtung der Probekörper kann gesagt werden:

4.2.2.2 Eingespritzte Bewehrung

Bei allen Schnittstellen der Versuchsplatten mit Betonstahlbewehrung war festzustellen, daß die eingebaute Bewehrung gut mit Beton umhüllt war.



Bild 4 Schnittfläche Versuchsplatte 4 - Detail



Bild 5: Versuchsplatte 2 - Schnittflächendetail

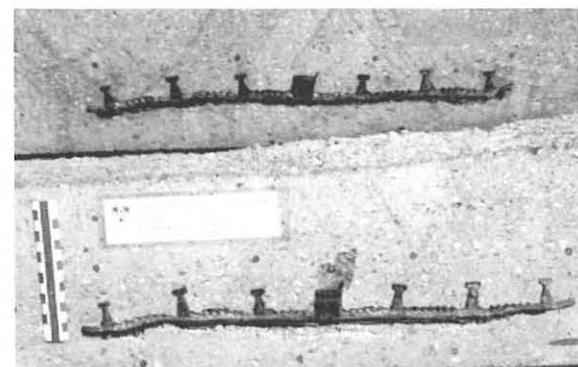


Bild 6: Versuchsplatte 7 - Schnittflächen

Spritzschatten waren nicht zu erkennen, die Schnittflächen wiesen eine gleichmäßige hohlraumfreie Spritzbetonstruktur auf.

Die visuelle Prüfung der Schnittfläche zeigte keinen erkennbaren Unterschied infolge Zugabe oder Entfalls von Microsilica auf.

4.2.2.3 Eingespritzte Tunnelausbaubögen

Sämtliche Schnittflächen der Probekörper 2 und 3, die mit der Betonmischung M 1 hergestellt wurden, wiesen eine gleichmäßige hohlraumfreie Spritzbetonstruktur auf. Die Gitterträger waren gut mit Beton umhüllt und keine Spritzschatten erkennbar.

Durch den Versuch Kunstharz einzupressen, konnte festgestellt werden, daß an den Gitterträgern weder Risse noch Umläufigkeiten aufgetreten waren. Die Probekörper, die mit der Betonmischung M II bzw. M III hergestellt wurden, zeigten in den Schnittflächen örtlich einige Hohlräume und auch Spritzschatten an den bergseitigen Gurtstäben auf. Als Ursache kommen einerseits der Einfluß der Betonmischung und andererseits die Spritzdüsenführung in Frage. Eine Abgrenzung der Einflußfaktoren ist nicht möglich.

Insgesamt zeigten die Gitterstäbe bei entsprechender Düsenführung ein gutes Einspritzverhalten.

4.2.2.4 Eingespritzte Fugenbänder

Diese Versuche wurden im Hinblick auf die im Tunnelbau notwendigen konstruktiven Übergänge und Bauabschnittunterteilungen durchgeführt. Bei der einschaligen Spritzbetonbauweise kommt dem Einspritzen von Fugenbändern eine wichtige Bedeutung zu. Verfahrensbedingt können nur außenliegende Fugenbänder verwendet werden. Je nach Aufgabenstellung können dies Arbeits- oder Dehnfugenbänder sein.

Bei den Schnittflächen der Probekörper konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden: Die Fugenbänder wurden auf einer unebenen Spritzbetonschicht lose aufgelegt und nur am Rand fixiert, es ergaben sich hinter dem Fugenband Hohlräume. Hierdurch löste sich das Fugenband (fehlendes Widerlager) leicht vom aufgetragenen Spritzbeton. Dennoch ist deutlich zu sehen, daß das gesamte Profil des Fugenbandes gut mit Spritzbeton umhüllt ist und an den Stegen keine Spritzschatten aufgetreten waren. Die Wirksamkeit des Fugenbandes wurde bestätigt.

Bei Ausführungen muß beachtet werden, daß die Auflagerfläche des Fugenbandes eben ist, und das Fugenband flächig darauf befestigt wird.

4.2.3 Festigkeitsverhalten

Da sich meist BE-Mittel negativ auf die Endfestigkeit des Spritzbetons auswirken, wurde im Rahmen der vorbeschriebenen Versuche auch die Wirkung von Microsilica auf das Frühfestigkeitsverhalten untersucht.

Während der ersten 12 Stunden wurden die Spritzbetonfestigkeiten nach der Penetrations- und der Setzbolzenmethode ermittelt. Weitere Festigkeitswerte nach 24 und 36 Stunden bzw. 7 und 28 Tagen wurden an Bohrkernen ermittelt.

Die Festigkeitsentwicklung ist in Bild 7 dargestellt.

Obwohl kein direkter Vergleich über die wechselseitige Wirkung von Microsilica und BE-Mittel auf das

Festigkeitsverhalten durchgeführt werden konnte, da zum Zeitpunkt der Versuche aus verfahrenstechnischen Gründen kein BE-Mittel eingesetzt wurde, wird dennoch in Bild 8 die Wirkung unterschiedlicher BE-Mitteldosierung dargestellt.

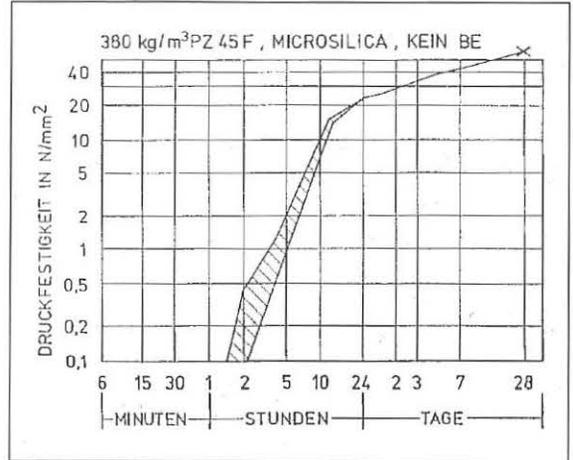


Bild 7: Verlauf der Festigkeitsentwicklung für die Standardmischung (M1)

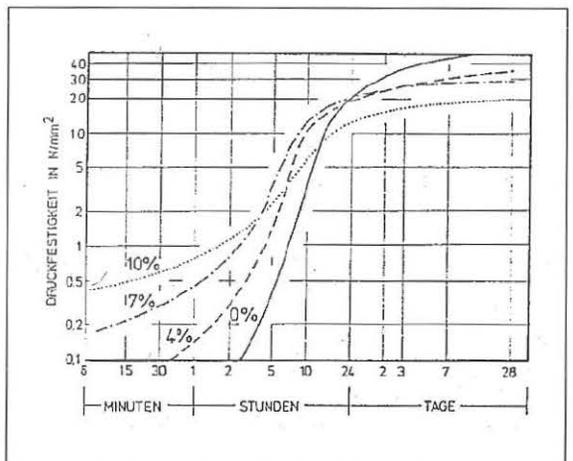


Bild 8: Festigkeitsverhalten von Spritzbeton mit unterschiedlicher BE-Mitteldosierung (alkalihalting)

Um den Einfluß der drei verwendeten Spritzbetonsorten, wie unter 4.2.2.1 aufgeführt, auf die Betonfestigkeiten wenigstens tendenziell abschätzen zu können, wurden von jeder Mischung Probekörper hergestellt und die Druck- bzw. Spaltzugfestigkeiten ermittelt. Aus jeweils drei Prüfkörpern ergaben sich folgende mittlere Festigkeitswerte:

Spritzbetonmischung	Druckfestigkeit Prüfalter 14 Tage	Spaltzugfestigkeit Prüfalter 28 Tage
M 1	43,35 N/mm ²	5,6 N/mm ²
M 2	44,67 N/mm ²	5,2 N/mm ²
M 3	48,97 N/mm ²	5,4 N/mm ²

Der Vergleich der vorstehenden Werte zeigt eine relativ hohe Streubreite, die sicher auf Schwankungen der verschiedenen Einflußparameter zurückzuführen ist.

4.2.4 Verformungsverhalten unter Last

Für drei Prüfkörper der Spritzbetonmischung M 1 wurden im Labor der Universität Innsbruck die Spannungsdehnungslinien ermittelt. Diese sind in Bild 9 dargestellt.

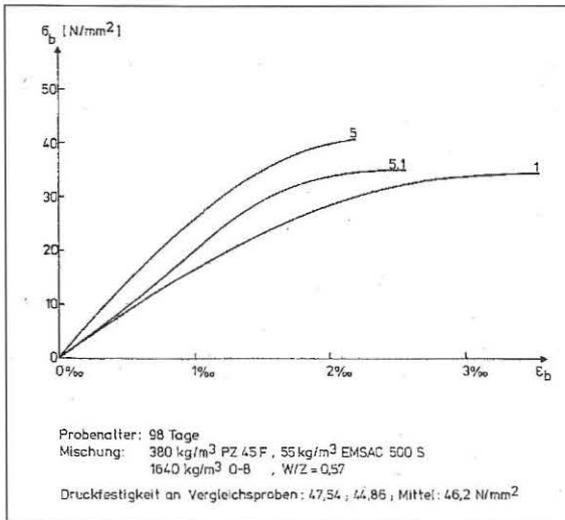


Bild 9: Spannungsdehnungslinie für Spritzbetonmischung M1 (Standard) bis zum Bruch

Die Bruchfestigkeiten liegen zwischen 35 - 40 N/mm². Bei 2 ‰ Dehnung ergeben sich höhere Spannungen als die in DIN 1045 für B 35 bzw. B 45 zugrunde gelegten Rechenfestigkeiten von 23 - 27 N/mm². Kurve 1 weist ein hohes Arbeitsvermögen aus, wohin gegen sich bei Kurve 5 ein höherer E-Modul des Spritzbetons ergibt.

4.2.5 Schwindverhalten

Der Einfluß von Microsilica auf das Schwinden des Spritzbetons wurde an je drei Probekörpern (b/h/l = 10/10/30 cm) der Mischungen M 1 und M 2 (siehe 4.2.2.1) gemessen.

Die Prüfkörper 1, 2, 4 und 5 lagerten sofort an der Luft, während die Prüfkörper 3 und 6 vor der Luftlagerung zuerst 6 Tage feucht gehalten wurden. (Wasserlagerung).

Die gemessenen Längenänderungen in gewissen Zeitabständen der jeweiligen Prüfstrecken auf der Oberfläche der Prüfkörper ist als Ergebnis im Bild 10 aufgetragen.

Bei Feuchtlagerung quellen zunächst die Probekörper und schwinden danach wesentlich weniger als nicht feucht gehaltene Probenstücke.

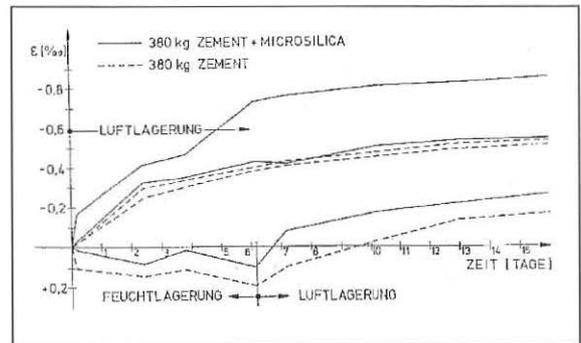


Bild 10: Spritzbeton mit und ohne Microsilica Schwindverhalten bei Feucht- und Luftlagerung

Dieses Verhalten zeigt, daß eine gute Nachbehandlung von großer Bedeutung ist.

Es scheint, daß Spritzbetone mit Microsilicazusatz zu etwas größerem Schwinden neigen. Diese Ergebnisse, aufgrund einer geringen Anzahl von Proben, ließen nur eine Tendenzaussage zu. Bild 11 zeigt die Messungen bei der U-Bahn.

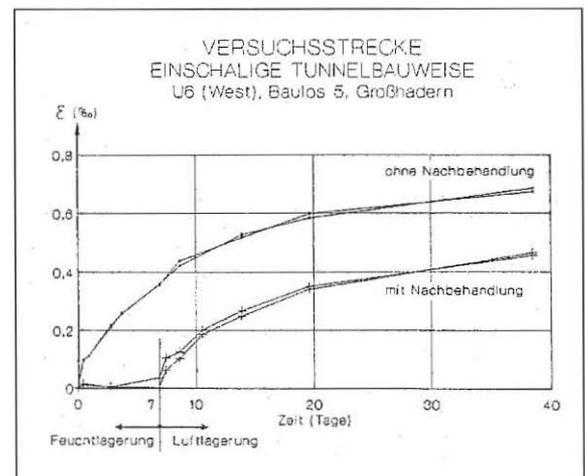


Bild 11: Schwindmessungen München

4.2.6 Temperaturverlauf und Rißbildung

Zur Ermittlung des zeitlichen Temperaturverlaufes in der Spritzbetonschale wurden in einem Meßquerschnitt des Stollens Temperaturfühler in die Innenschicht eingespritzt.

Den Temperaturverlauf zeigen zwei Meßpunkte im Stollenquerschnitt (Bild 12).

Wie erwartet stieg in Schichtmitte die Betontemperatur am stärksten an. Das Maximum wurde nach 10 - 12 Stunden erreicht und lag ca. 16 - 20 °C über der Ausgangstemperatur. Danach kühlte der Beton langsam ab und lag am Ende des Beobachtungszeitraumes (32 Stunden) noch ca. 5 - 8 ° über den Ausgangswerten. Die Lufttemperatur im Firstbereich des Stollens stieg durch die Wärmestrahlung

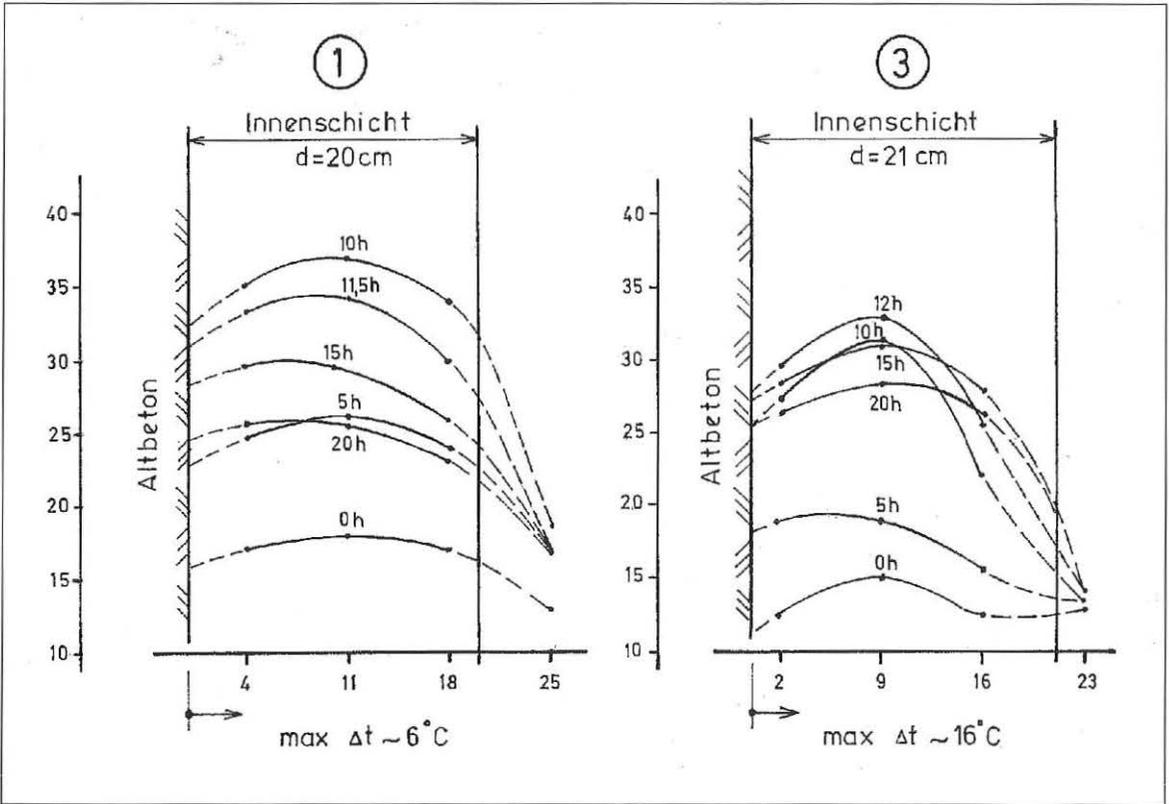


Bild 12: Verlauf des Temperaturgradienten im Betonquerschnitt zu diskreten Zeiten (Meßfühler 1 und 3)

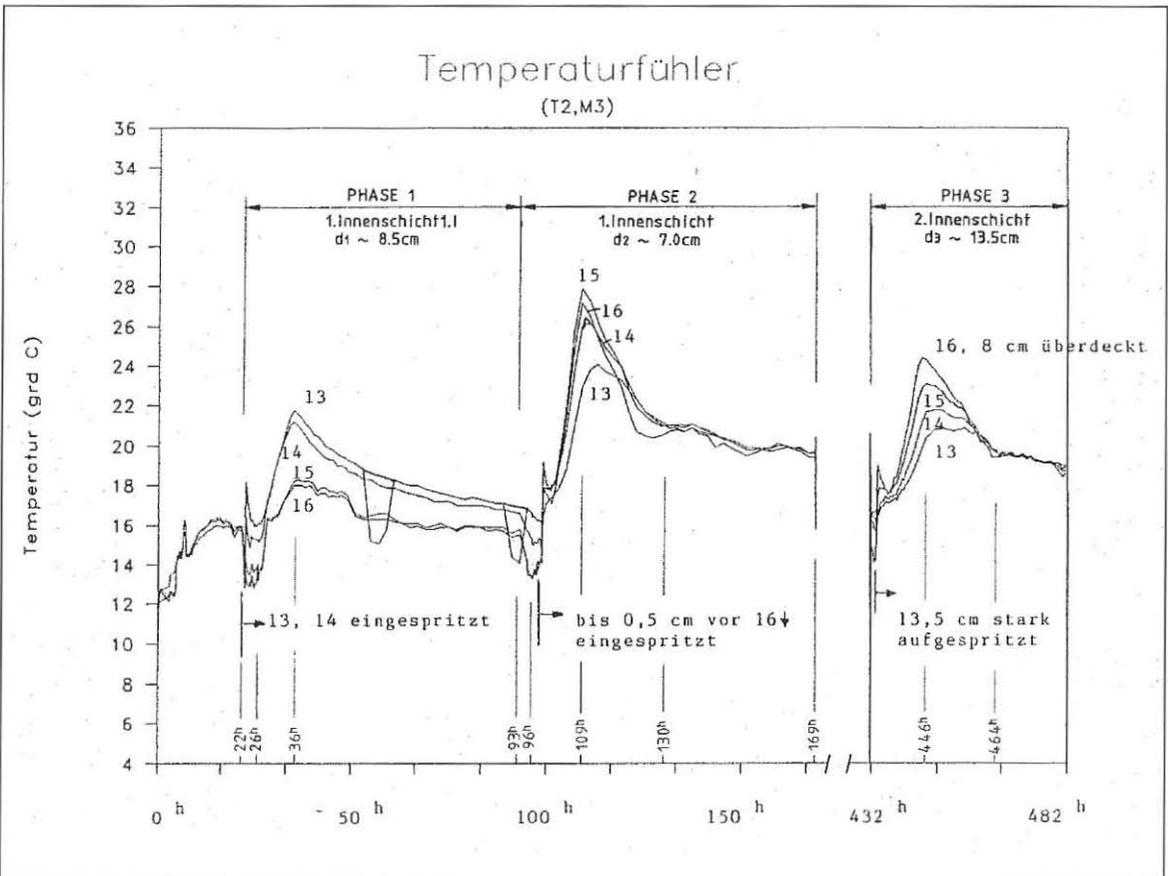


Bild 13a: Temperaturverlauf in den einzelnen Thermoelementen des Meßfühlers T2 - M3

lung des Spritzbetons während der Beobachtungszeit um ca. 10 ° C an.

Ähnliche Werte wurden auch bei der U-Bahn gemessen.

Die Ribfbildung im Stollen wird, abgesehen von den aus dem Gebirge resultierenden Spannungen, maßgeblich durch die entstehenden Abbinde Temperaturen und das Schwindverhalten des Spritzbetons beeinflusst. Eine gezielte Nachbehandlung verhinderte im vorliegenden Fall Risse, die die Gebrauchsfähigkeit beeinflussten.

Wenige Risse mußten nachverpreßt werden.

Bild 13 a und 13 b zeigen beispielhaft gemessene Temperaturverläufe bei der U-Bahn!

5. Güteüberwachung und deren Ergebnisse bei der Versuchstrecke U-Bahn München

5.1 Allgemeines

Die nach den DIN-Normen vorgeschriebenen Qualitätsprüfungen wurden durchgeführt und dokumentiert. Die Ergebnisse für Druckfestigkeit, Verbundfestigkeit und Wasserundurchlässigkeit überschritten bzw. unterschritten die festgelegten Werte. Dies trifft sowohl für den Abwasserstollen als auch für die Probestrecke der U-Bahn zu. Im Kapitel Eignungsprüfung wurden schon erreichte Werte genannt und so sollen hier nur noch über ausgewählte Prüfergebnisse, die bei der Probestrecke U-Bahn ermittelt wurden, berichtet werden.

5.2 Qualitätskontrollen

5.2.1 Zement

Der verwendete Zement wurde im Zuge der werkseitigen Eigenüberwachung durch das Labor des Zementwerkes Rohrdorf geprüft. Die Proben wurden im Betonwerk der Firma Junkies, Neubauern entnommen. Die Prüfergebnisse zeigten, daß die Anforderungen nach DIN 1164 eingehalten wurden.

5.2.2 Zuschlagstoffe

Die verwendeten, ofengetrockneten Zuschlagstoffe wurden ebenfalls den Silos im Lieferwerk entnommen und geprüft.

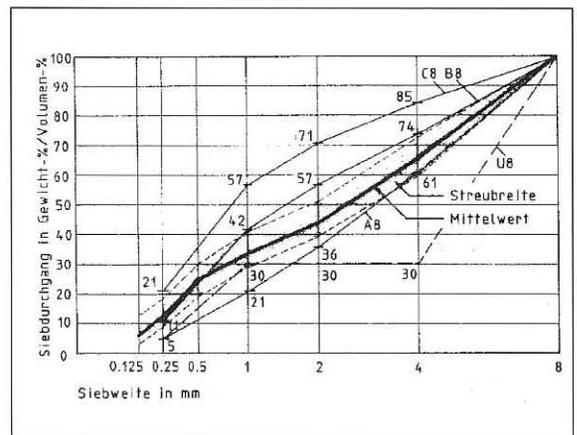


Bild 14: Sieblinie der Zuschlagstoffe

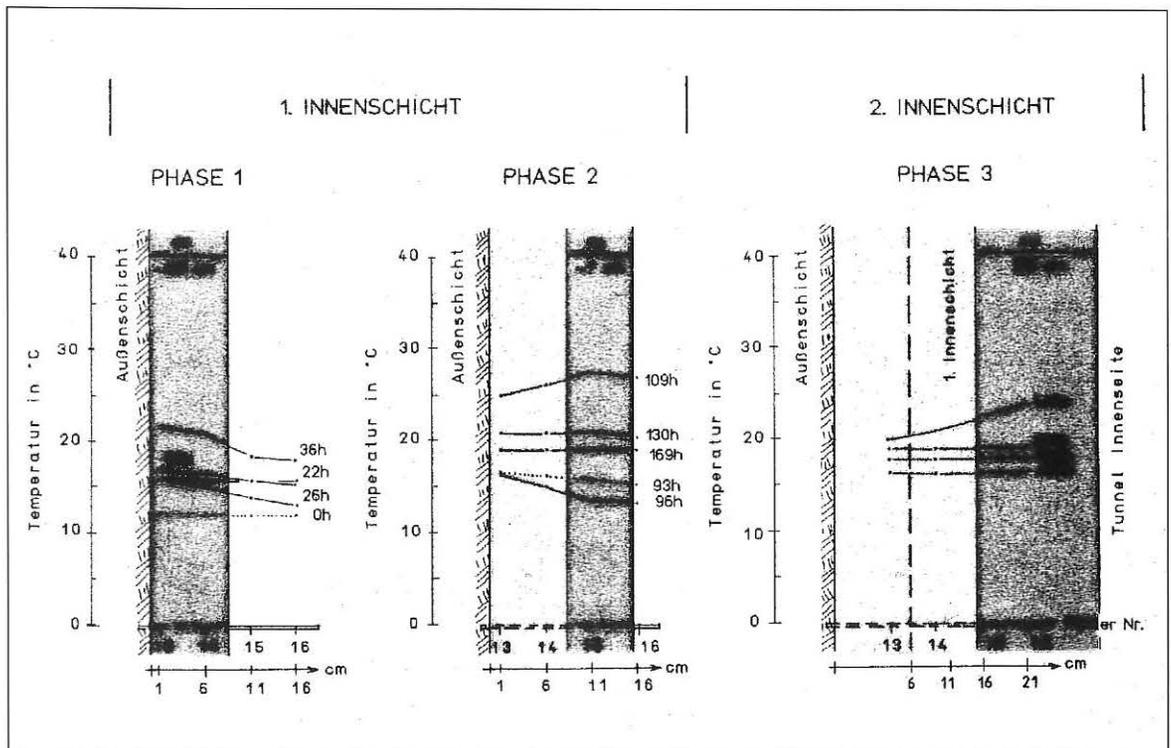


Bild 13b: Verlauf des Temperaturgradienten im Meßfühler T2 - M3

Das Bild 14 zeigt, daß die aufgezeigte Bandbreite der Siebkurven im geforderten Sieblinienbereich A 8 - B 8 lag und die gestellten Anforderungen erfüllte.

5.2.3 Microsilica

Durch Prüfungen im firmeneigenen Labor bzw. im Labor des Zementwerkes Rohrdorf wurde die Zusammensetzung der Microsilica-Suspension auf die Zusammensetzung gemäß Zulassungsbescheid PA VII - 21/304 untersucht.

Die Zusammensetzung lag innerhalb der zulässigen Grenzen.

5.2.4 Zugabewasser

Das Wasser wurde aus dem öffentlichen Trinkwassernetz entnommen und wurde keiner weiteren Prüfung unterzogen.

Die Wassertemperatur lag bei 12 - 14 ° C, der Wasserdruck an der Druckerhöhungsanlage schwankte zwischen 7 - 9 bar.

5.3 Prüfung des vorgefertigten Bereitstellungsgemisches

Anhand der Lieferscheine wurde geprüft, ob das bestellte Mischgut Sorte 61, Spritzbeton 0 - 8 zur Baustelle gebracht wurde.

Die Temperaturen des Mischgutes konnten aus technischen Gründen nur am Abzug des Silos gemessen werden. Die Temperaturen lagen ohne Vorbefeuchtung zwischen 24 und 57 ° C, i.M. bei 40 ° C, nach Vorbefeuchtung i.M. bei 34 ° C. Die Schwankungen sind durch die unterschiedlichen Anlieferzeiten und Wochenendpausen bedingt.

Um die Gleichmäßigkeit des Bereitstellungsgemisches zu prüfen, wurden Proben mit einem definierten Wassergehalt ($W/Z = 0,58$) hergestellt und auf Konsistenz, Rohdichte, Luftporengehalt sowie Vergleichsfestigkeit überprüft.

Die Prüfung brachte folgendes Ergebnis:

Rohdichte	
Frischbeton	2,17 - 2,31 kg/dm ³
LP-Gehalt	3,8 - 10,2 %
Konsistenz	
a	34 - 42 cm
v	1,09 - 1,57
Vergleichsfestigkeiten	
1 Tag	10 - 22 N/mm ²
7 Tage	23 - 38 N/mm ²

Es wurde außerdem das Gemisch Zugabewasser/Microsilica an der Spritzdüse untersucht und die Fördermenge gemessen.

Die mittlere Dichte betrug 1,106 kg/dm³, der Feststoffgehalt lag bei 19,7 %.

Die geringen Schwankungen der Meßwerte belegten die gleichmäßige Dosierung des Gemisches.

5.4 Prüfung der Geräte und Anlagen

Alle für die Spritzbetonherstellung notwendigen Geräte wurden vor Inbetriebnahme auf Sauberkeit, Funktionsfähigkeit und richtige Dosierung geprüft. Stetige Überwachung der Geräte während des Spritzbetonauftrages gewährleistete stetige Materialströme und eine gleichbleibende Spritzbetonqualität.

5.5 Hochdruckreinigung und Prüfen der Auftragsflächen

5.5.1 Hochdruckreinigung

Aufgrund gemachter Erfahrungen beim Stollen Frasdorf wurde auf die Reinigung der äußeren Spritzbetonschale größte Sorgfalt gelegt. Zur Reinigung war, um die geforderten Verbundfestigkeiten zu erreichen, der Einsatz eines Hochdruckwasserstrahlverfahrens mit mind. 400 - 600 bar Wasserdruck erforderlich.

Nach dem Räumen der temporären Fahrsole sowie dem Einbau eines Ausgleichbetons und einer Drainage in der Sohle wurden die Arbeiten von einem erfahrenen Nachunternehmer mit leistungsfähigem Gerät ausgeführt.

Auf einem Unimog wurde eine Reinigungseinheit montiert und an einem hydraulisch verstellbaren Ausleger war ein Drehdüsenbalken (Ø 70 cm) befestigt, der die gesamte Tunnelaibung bestreichen konnte. Der Düsenstrahl wurde durch zwei auf dem Drehdüsenbalken angeordneten Rundstrahldüsen erzeugt. Der eingesetzte Wasserdruck der beiden Düsen betrug 750 bar, die verwendete Wassermenge ca. $2 \times 50 = 100$ l/min. und die Rotorgeschwindigkeit lag bei ca. 1000 U/min.

Die Spritzbetonoberfläche wurde mit dieser Einheit in horizontalen Streifen von 65 - 70 cm Breite gereinigt. Vom Drehjet nicht vollständig erreichbare Randbereiche wurden unter Beibehaltung von Wasserdruck und Intensität mit Handlanzen gereinigt.

Die Wasserversorgung erfolgte über einen mobilen 10.000 l-Wassertank mit einer WOMA-Hochdruckpumpe (Antrieb 450 PS) 1000 bar Förderdruck, max. Fördermenge 140 l/min.

Die Reinigung der Spritzbetonoberfläche (ca. 800 m²) einschl. Einrichtung, dem Herstellen und Prüfen der Probestfläche sowie dem Abtransport des abgetragenen Betons dauerte zwei Tage.

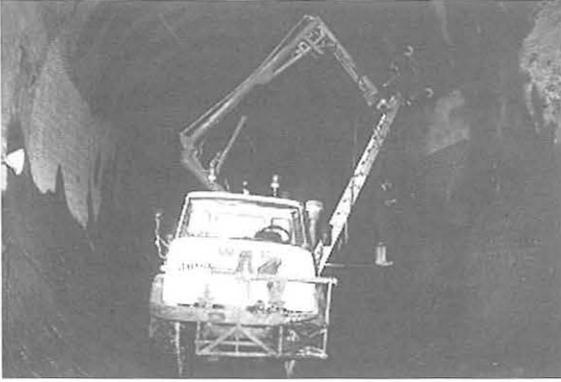


Bild 15: Reinigungseinheit



Bild 17: Prüfung der Oberflächenhaftzugfestigkeit

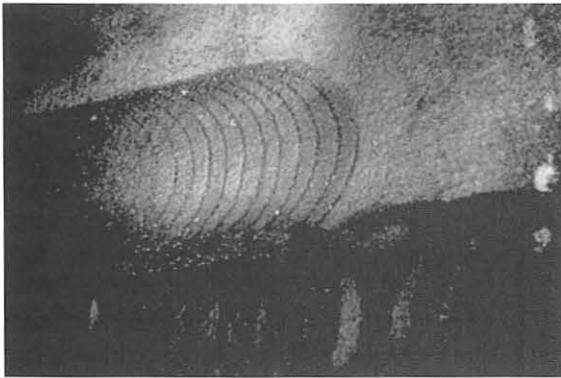


Bild 16: Darstellung des Reinigungseffektes

5.5.2 Prüfen der Auftragsflächen

Nach der Hochdruckreinigung wurde die Spritzbetonoberfläche vom BMI der Universität Innsbruck geprüft. Die Prüfung umfaßte eine Sichtprüfung der Spritzbetonoberfläche sowie eine Prüfung der Oberflächenhaftzugfestigkeit an mehr als 50 Stellen, über die gesamte Fläche verteilt.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Sichtprüfung bestätigte, daß die Oberfläche des Spritzbetons optisch sauber war und das Korngerüst des Betons freigelegt wurde.
2. Die Prüfung der Oberflächenhaftzugfestigkeit erbrachte, daß eine ausreichende Vorbereitung der Spritzbetonoberflächen nach ZTV-SIB 87 durchgeführt wurde und die interne Vorgabe der Oberflächenhaftzugfestigkeit ($1,5 \text{ N/mm}^2$) mit einem Mittelwert von $1,87 \text{ N/mm}^2$ sicher eingehalten wurde.

Die positiven Ergebnisse erlaubten das Aufbringen der inneren Spritzbetonschichten.

Um die angestrebte hohe Verbundfestigkeit zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten zu errei-

chen, war ein ausreichendes Vornässen der vorhergehenden Spritzbetonschicht und eine Vorbehandlung der Arbeitsfugen nach längerer Arbeitspause (12 - 14 Stunden) erforderlich.

Eine lagegenaue Befestigung der notwendigen Gewölbebewehrung mußte vor dem Spritzbetonauftrag genau geprüft werden.

5.6 Prüfungen während des Spritzbetonauftrages

5.6.1 Düsenführung und Rückprall

Durch den Rückprall weicht der Düsenführer instinktiv zurück. Die Korrektur eines falschen Spritzabstandes mußte mehrere Male durchgeführt werden.

In einem definierten Abschnitt wurde eine Rückprallmessung für den Gesamtquerschnitt vorgenommen und bestätigte mit 16 % Rückprall den Wert früherer Messungen.

5.6.2 Staubmessung

Die durchgeführten Staubmessungen der TBG lassen keine eindeutige Aussage zu, da zum einen eine Referenzmessung beim Einbau von Spritzbeton ohne Microsilica aus baubetrieblichen Gründen nicht möglich war und zum anderen die Analyse der einzelnen Staubbestandteile im Labor noch Schwierigkeiten bereitete.

Eine signifikante Staubreduzierung war nicht aus den Messungen nachweisbar, obwohl der visuelle Eindruck das Gegenteil vermittelte.

5.6.3 Messung der Schichtstärken

Zum Nachweis ausreichender Schichtstärken, der Lage der Bewehrung und der Einhaltung der Bautoleranzen wurden nach jedem Arbeitsgang detaillierte Profilmessungen durchgeführt. Die Genauigkeit der angewandten Meßmethode war mit 0,5 cm pro gemessenem Punkt anzusetzen.

- Festgestellt wurde, daß
- die Mindestschichtdicke der ersten und zweiten Innenschicht eingehalten wurde
 - die Bewehrung mit ausreichender Lagegenauigkeit eingebaut wurde und deren Betonüberdeckung über dem Mindestwert von 4 cm lag
 - die Bautoleranzen eingehalten wurden.

5.7 Betonnachbehandlung

Damit der Erfolg der einschaligen Spritzbetonbauweise sichergestellt werden konnte, wurde auf eine intensive Betonnachbehandlung besonderer Wert gelegt. Dieser wichtige Arbeitsschritt hilft die Schwindneigung des Betons zu verringern und Risse im Bauwerk zu vermeiden. Im Ausführungsfalle wurde jede der beiden Innenschichten 7 Tage lang durch mehrmaliges Besprühen mit vorgewärmtem Wasser feucht gehalten. Eine längere Zeit der Nachbehandlung wäre wünschenswert ist aber aufgrund der vorgegebenen kurzen Bauzeit nicht realisierbar. Den zeitlichen Verlauf der Spannungen zeigt Bild 18.

6. Bewertung der Ausführungen

Bei beiden Baustellen gelang es, ein Bauwerk in "Einschaliger Spritzbetonweise", nach den gültigen

DIN-Vorschriften und der ZTV-München für den U-Bahnbau, herzustellen.

Die Ergebnisse der Güteprüfungen bestätigen:

- Die für diese Bauweise erforderlichen Verbundfestigkeiten zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten wurden erreicht und liegen weit über den statischen Anforderungen.
- Die Spritzbetonqualität ist, wie die hohen Festigkeiten und die niedrigen Wassereindringtiefen beweisen, ausgezeichnet.
- Das Einspritzen von Einbauteilen ist ohne Hohlräume und Wasserwegigkeiten gelungen.
- Die beiden Bauwerke sind der konventionellen Bauweise technisch gleichwertig, da sie in allen Belangen denselben Anforderungen des Bauherrn unterlagen.
- Die "Einschalige Spritzbetonbauweise" ist eine fugenlose Bauweise mit allen Vorteilen einer einfachen Konstruktion.
- Bei den beiden Bauwerken traten einzelne wasserführende Risse auf. Diese sind hauptsächlich auf die Zwangsbeanspruchung infolge Schwindens zurückzuführen. Etwas verstärkt machte sich dies, in der kurzen Teststrecke der U-Bahn, durch den schnellen Bauablauf bemerkbar.

Die Probleme der Zwangsbeanspruchung können mit einer noch gezielteren Nachbehandlung, einem

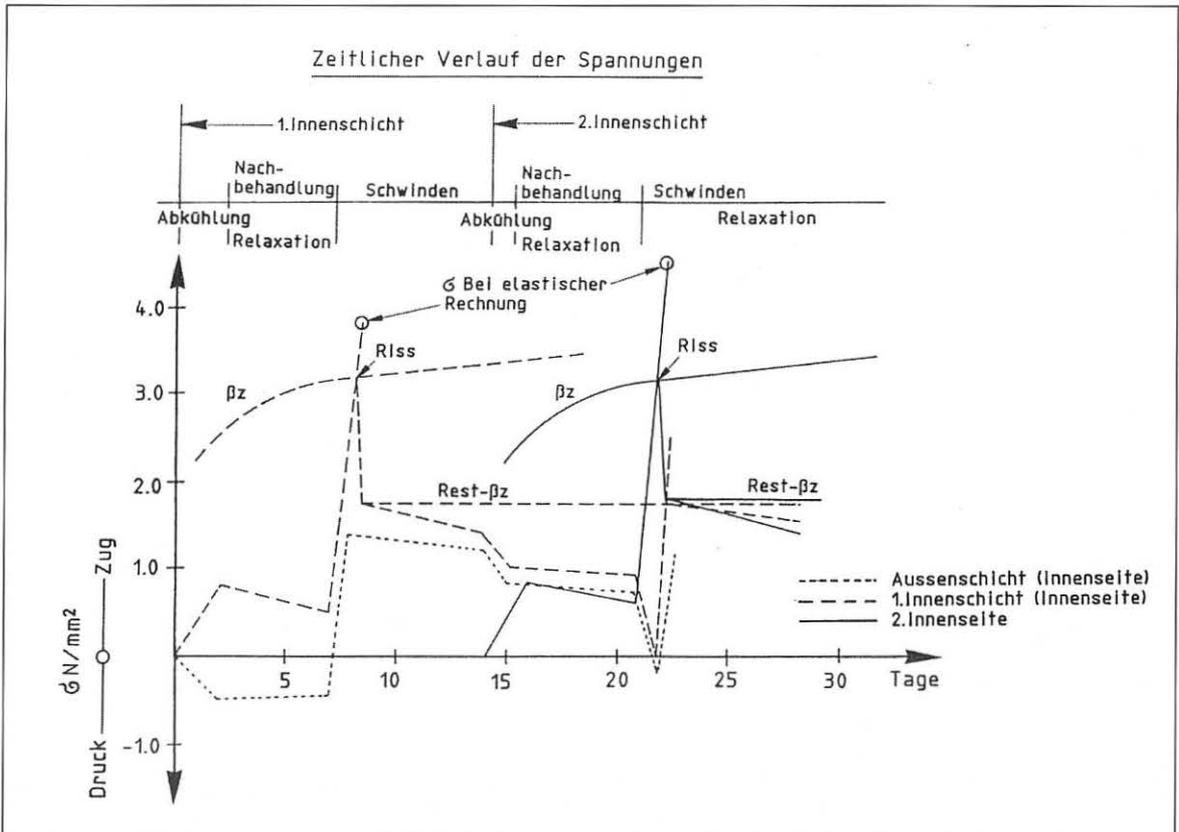


Bild 18: Zeitlicher Verlauf der Spannungen



Bild 19: Fertige Tunnelröhre der Teststrecke U6 West-5

abgestimmten Bauablauf und mit der Anordnung einer ausreichenden Mindestbewehrung beherrscht werden.

7. Wirtschaftlichkeit

Durch das erstmalige Ausführen dieser Bauweise und durch die bei der Ausführung aufgetretenen Problemen gelang es noch nicht, einen vollen wirtschaftlichen Erfolg zu erzielen. Bei weiteren Objekten wird unter Berücksichtigung der gemachten Erfahrungen und des vorhandenen Einsparungspotentials ein gutes wirtschaftliches Ergebnis erreichbar sein.

Als wesentliche Einsparungen sind anzusehen:

1. Kleinerer Ausbruchquerschnitt
Der geringere Querschnitt ergibt sich ohne den Nutzquerschnitt zu verringern aus der Gesamtkonzeption der "Einschaligen Spritzbetonbauweise".
2. Durch den kleineren Querschnitt verringern sich die Abtransportmassen und somit auch die Kosten hierfür. Die verringerten Ausbruchmassen liegen in einer Größenordnung von ca. 10 %.
3. Wegen der geringeren Ausbruchmassen ergeben sich auch Vorteile für die Umwelt, da weniger Deponieraum benötigt wird.

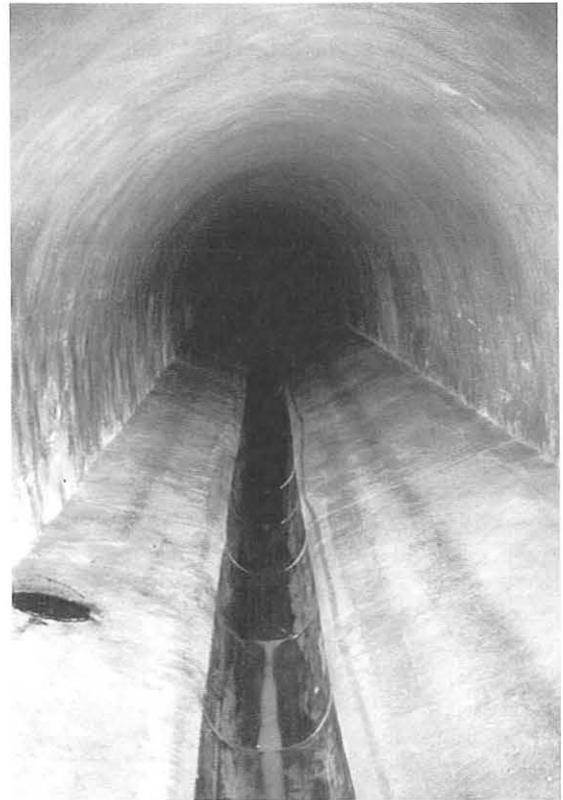


Bild 20: Fertiger Stollen Frasdorf

4. Des Weiteren erfordert die Gesamtkonstruktion geringere Betonabmessungen (ca. 20 - 25 %) Weniger Betonverbrauch nützt auch wieder unserer Umwelt.
5. Der Einsatz jeglicher Schalung kann entfallen. Dies wirkt sich besonders deutlich bei variablen Querschnitten, z.B. Verziehungen oder Querschnittssprüngen, aus.
6. Der Gesamtbedarf an Betonstahl für die inneren Spritzbetonschichten verringert sich um ca. 20 - 30 %.

Diesem Einsparungspotential stehen aber auch Mehrkosten, die verfahrenstechnisch bedingt sind, gegenüber. Es handelt sich hierbei um:

- Hochdruckreinigung
- Haftverbundprüfungen
- Einbau von Spritzlehren.

Insgesamt kann gesagt werden, daß die "Einschalige Spritzbetonbauweise" eine technische und wirtschaftliche Alternative zur konventionellen zweischaligen Tunnelauskleidung ist.

Der wirtschaftliche Erfolg wird zukünftig sicher durch technische Weiterentwicklungen geprägt sein und damit sicher erreichbar werden. Besonderes Augenmerk wird auf die neuen Spritzbetonbindemittel, die den Entfall von BE-Mitteln zulassen, zu

richten sein. Daneben wird sicher eine weiterentwickelte Gerätetechnik, die den Einsatz von Spritzzementen mit erdfuchten Zuschlagstoffen ermöglicht, zu beachten sein. Außerdem kann durch den Einsatz von Spritzmanipulatoren eine höhere Spritzleistung erzielt werden. Ebenso wird eine automatische Spritzbetondickenmessung zu entwickeln sein, um die aufwendigen Spritzlehren entfallen lassen zu können. Daneben werden Organisation der Baustelle und eine Optimierung aller Bauabläufe zum wirtschaftlichen Erfolg beitragen.

Alle Erfahrungen für die "Einschalige Spritzbetonbauweise" beruhen im Augenblick nur auf dem Einsatz des Trockenspritzbetons.

Eingehende Überlegungen und Untersuchungen mit Naßspritzbeton für diese Bauweise wären sicher wünschenswert.

Das Aufzählen dieser wenigen Punkte zeigt, daß eine stete neue Erkenntnis bei den einsetzbaren Materialien und Geräten gegeben und zu beachten ist.

Es gibt also noch viel zu tun, um diese Bauweise zu einer "üblichen" Bauweise werden zu lassen und hoffentlich gibt es in Zukunft genügend Ingenieure mit Pioniergeist, um der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" zum Durchbruch zu verhelfen.

8. Literatur

- [1] Neeb, J.; Schwarz, J.:
Einschalige Spritzbetonbauweise im Münchner U-Bahn-Bau; Ausführung einer Teststrecke im Baulos U 6 West-5. Versuchsbericht der Dyckerhoff & Widmann AG, NL München 1991.
- [2] Kusterle, W.:
Ein kombiniertes Verfahren zur Beurteilung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Beton- und Stahlbeton 79 (1984) 251 -253.
- [3] Neeb, J.:
Einschalige Spritzbetonbauweise Stollen Frasdorf. Versuchsbericht der Dyckerhoff & Widmann AG, NL München 1989.
- [4] Bock, O.:
Microsilica in der modernen Betontechnologie - Symposium in Konstanz am Bodensee. Bauingenieur 67 (1992) 68.
- [5] Hettler, A.; Pich, J.; Falkowski, E.:
Erfahrungen mit Spritzbeton und Kieselsäure bei Baugrubensicherungen. Bauingenieur 67 (1992) 107 - 113.
- [6] Haack, A.:
Jüngste Forschungs- und Entwicklungsergebnisse im Tunnelbau: Beispiele für den einschaligen Spritzbetonausbau. Tunnel 4 (1989) 176 - 186.
- [7] Kusterle, W.; Lukas, W.:
Single-Shell Shotcrete Method, Shotcrete for Underground Support VI, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Niagara-on-the-Lake, Canada May 1993, published by ASCE.
- [8] Honnefelder, N.; Theimer, G.U.:
Einschalige Spritzbetonbauweise im Münchner U-Bahn Bau. Bauingenieur 67 (1992) 393 - 399.