

# Die einschalige Spritzbetonbauweise im Stollen- und Verkehrstunnelbau, ein Ergebnis aus praxisorientierter Forschung und Ausführung

THE SINGLE PERMANENT SHOTCRETE LINING METHOD FOR THE CONSTRUCTION OF GALLERIES AND TRAFFIC TUNNELS - THE RESULT OF PRACTICE-ORIENTED RESEARCH AND APPLICATION

**Oberingenieur Dipl.-Ing. Bernd Gebauer, Dyckerhoff & Widmann AG, München**

Spritzbeton wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts zur Felssicherung verwendet, später vor allem zur Bauwerkssanierung. Mit der unaufhaltsamen Weiterentwicklung des Stollen- und Tunnelbaues fand die Spritzbetontechnologie in den späten 40-er Jahren Eingang in den Hohlraumbau.

Spritzbeton, heute verbessert mit Siliciumdioxid, z. B. in Form des Zusatzmittels "Microsilica", ist ein Konstruktionsbeton, ein Beton, der hohen Qualitätsansprüchen gerecht wird, ein Beton, der nicht nur als Sicherungsmittel, sondern auch für die "Einschalige Spritzbetonbauweise" geeignet ist.

Erstmals konnte aufgrund ausführlicher technischer, betontechnologischer und insbesondere baubetrieblicher Überlegungen die einschalige Spritzbetonauskleidung an einem 3.200 m langen Abwasserstollen verwirklicht werden. Umfangreiche Versuche in diesem Abwasserstollen über Festigkeitsverhalten, Auftragen von Spritzbeton ohne Beschleuniger, Haftzugfestigkeiten und Verbundwirkung, E-Modul und Schwindverhalten haben gezeigt, daß die einschalige Stollen- und Tunnelbauauskleidung mit Spritzbeton qualitativ der zweischaligen Verbundbauweise gleichwertig und nicht nur wirtschaftlicher, sondern auch wegen dem geringeren Zuschlagstoffverbrauch umweltfreundlicher ist. Sowohl die erfolgreiche Fertigstellung der einschaligen Spritzbetonauskleidung in dem 3.200 m langen Abwasserstollen, als auch die günstigen Ergebnisse aus den Versuchen haben uns zum Vorschlag einer 60 m langen Teststrecke mit einschaliger Spritzbetonauskleidung beim Münchner U-Bahn-Bau veranlaßt. Ergänzende Überlegungen in Bezug auf Abdichtungsmaßnahmen, Einsparungen von 20 bis 30 % der Stollen- und Tunnelbaukosten und die verfahrenstechnischen Verbesserungen sind die Voraussetzungen der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" für den Stollen- und Tunnelbau.

Die Anwendung dieser Bauweise in den uns bevorstehenden großen Verkehrstunnelbaumaßnahmen der Schnellbahnstrecken und für den innerstädtischen Verkehrsausbau ist heute Realität.

*Shotcrete was first used for rock support at the beginning of the 20th century, later on mainly for repair work. With the rapid development of tunnelling, shotcrete technology was introduced for the construction of underground openings in the late 1940s.*

*Shotcrete, nowadays modified and improved by  $\text{SiO}_2$  - in the form of the additive "microsilica" for example - is structural concrete, concrete which meets high quality requirements, it can be used not only as a means of support, but also for the single permanent shotcrete lining method.*

*As the result of in-depth research work covering technical aspects, concrete technology and construction management, we succeeded in executing a 3200-m-long sewer tunnel with a single permanent shotcrete lining and thus pioneered this approach. Extensive tests were carried out in this sewer tunnel to study the strength behavior, the application of shotcrete without accelerators, the adhesive strength and bond performance as well as the modulus of elasticity and shrinkage. These tests have shown that - in terms of quality - single permanent shotcrete linings stand comparison with structures consisting of two linings. At the same time, however, they are more economical*

- /11/ Kusterle, W.:**  
Der Einsatz von Microsilica im Trockenspritzverfahren; Proceedings Symposium Microsilica in der modernen Betontechnologie, 28. und 29. September 1989, Technische Akademie Konstanz EV, 1989
- /12/ Müller, Thomas:**  
Spritzbetonversuche - Naßspritzverfahren im Hondrich-Tunnel; Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, Mai 1987
- /13/ Teichert, Pietro:**  
Eigenschaften des Spritzbetons und ihre Prüfung; Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 14/84 und 16/84
- /14/ Opsahl, O. A.:**  
Stålfiberarmert sprøytebetong til fjellsikring; NTNf- Prosjekt 1053.09511, Oslo 1982
- /15/ Studer, W.:**  
Prüfmethoden, Referate der Studententagung Spritzbeton, 24. Juni 1982, Zürich, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA-Dokumentation 56
- /16/ Teichert, Pietro:**  
Zehn Jahre Grundlagenforschung im Kleinen; Proceedings 2. internationale Fachtagung Spritzbetontechnologie, 15. und 16. Januar 1987, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck, 1987
- /17/ Ammon, Christian:**  
Spritzbeton und seine Eigenschaften, Vertiefte Untersuchungen von speziellen Eigenschaften, IBETH Projekt 042/84, Institut für Bauplanung und Baubetrieb ETH Zürich, März 1985
- /18/ Lutsch, H.:**  
Neue Erkenntnisse zum Auftragen des Spritzbetons; Dissertation Universität Innsbruck, 1977
- /19/ Wierig, H. J.:**  
Eigenschaften von "grünem, jungem" Beton. beton (1968), Heft 3
- /20/ Wischers, G.; Manns, W.:**  
Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton. beton (1973), Heft 4 und 5

der zulässigen Verbundspannungen. Damit konnte gezeigt werden, daß auch im Tunnelbau Spritzbeton hoher Güte eingesetzt werden kann.

380 kg/m <sup>3</sup> PZ 45F	
1640 kg/m <sup>3</sup> 0-8 getrocknet (39% 0-2, 26% 2-4, 35% 4-8)	
55 kg/m <sup>3</sup> EMSAC 500S	
<u>Eignungsprüfung (Mittelwerte):</u>	
$\beta_{D28}$	= 43 N/mm <sup>2</sup>
E	= 25 000 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_{HZ}$	= 1,7 N/mm <sup>2</sup>
$\beta_{SCHER}$	= 3,1 N/mm <sup>2</sup> (bei 0,25 N/mm <sup>2</sup> )
WU	= 15 mm
W/Z	= < 0,6

Bild 22: Mischungszusammensetzung und Ergebnisse der Eignungsprüfung der Innenschicht

<u>Güteprüfung (Mittelwerte):</u>	
T <sub>luft</sub>	= 14,3 °C
T <sub>FB</sub>	= 34,1 °C
Q <sub>FB</sub>	= 2,37 kg/dm <sup>3</sup>
W/Z	= 0,56
$\beta_D$	= 59 N/mm <sup>2</sup>
WU	= 19,4 mm
$\beta_{HZ}$	= 1,73 N/mm <sup>2</sup>

Bild 23: Ergebnisse der Güteprüfung der Spritzbeton-Innenschicht

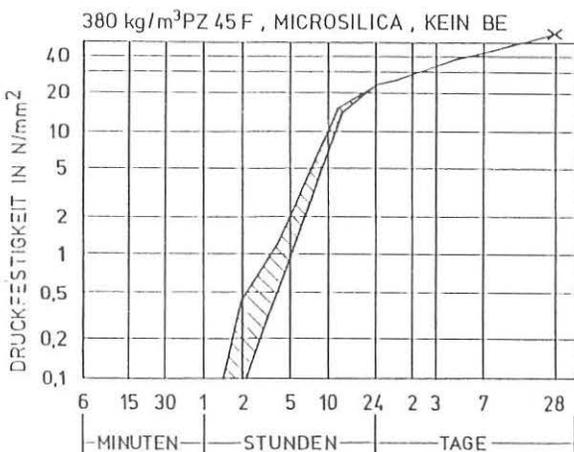


Bild 24: Festigkeitsentwicklung des Innenschicht-Spritzbetons. Frühfestigkeiten durch hohe Starttemperaturen und verwendeten Zement bedingt

## 10. Literatur

- /1/ **Schreyer, Jörg; Laue, Gert; Lukas, Walter (Herausgeber):**  
Einschalige Spritzbetonbauweise in Bochum; Proceedings der internationalen Fachtagung Spritzbetontechnologie, Innsbruck-Igls, 15./16. Januar 1985, Eigenverlag des Instituts für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck
- /2/ **Peters, Hans-Rudolf:**  
Einschaliger Tunnel in Stahlfaser-Spritzbetonbauart; Beton- und Stahlbetonbau (1984), Jahrgang 79, Nr. 4, Seite 97 - 101
- /3/ **Gebauer, Bernd:**  
Die einschalige Spritzbetonbauweise im Stollen- und Verkehrstunnelbau, ein Ergebnis aus praxisorientierter Forschung und Ausführung; Proceedings der 3. internationalen Fachtagung Spritzbetontechnologie, Innsbruck-Igls, 18. und 19. Januar 1990, Eigenverlag des Instituts für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck, 1990
- /4/ **Kupfer, Herbert; Kupfer, Helmut:**  
Statische Wirkungsweise und Verbundverhalten der Spritzbetonschichten des einschaligen Tunnelausbaues; wie /3/
- /5/ **Weber, Josef:**  
Die einschalige Spritzbetonbauweise aus der Sicht des Bauherrn; wie /3/
- /6/ **Richtlinie "Spritzbeton" des ÖBV, Österreichischer Betonverein, Wien, 1989**
- /7/ **Leuthold, Markus:**  
Auswirkungen von unterschiedlichen Spritzverfahren und Beschleunigern auf die Eigenschaften von Spritzbetonen in Verkehrstunnelbauten; Diplomarbeit Universität Innsbruck, 1989
- /8/ **Drs, J.:**  
SF-Spritzbeton im Trockenspritzverfahren, Zement und Beton 32, Heft 4, 1987
- /9/ **Kusterle, W.; Eccher, W.; Jodl, H. G. u.a.:**  
Arge Tunnelbetonforschung, 2. Jahresbericht, Innsbruck 1988, unveröffentlicht
- /10/ **Kusterle, W.:**  
Einflüsse auf Frühfestigkeit und Endfestigkeit des Spritzbetons; Zement und Beton, Heft 3, 1989

keine Haftzugfestigkeiten auf.

Eine weitere Prüfmöglichkeit der Verbundspannungen ist die Prüfung auf Haftscherfestigkeit. Dabei werden Proben in eine Scherbüchse eingespannt und unter einer gewissen, im Falle des Tunnelbaus, leichten Normalspannung abgesichert (Bild 20). Es zeigt sich, daß bei der rauhen Spritzbetonoberfläche die Haftscherfestigkeiten fast bis doppelt so hohe Werte ergeben als jene der Haftzugfestigkeit.

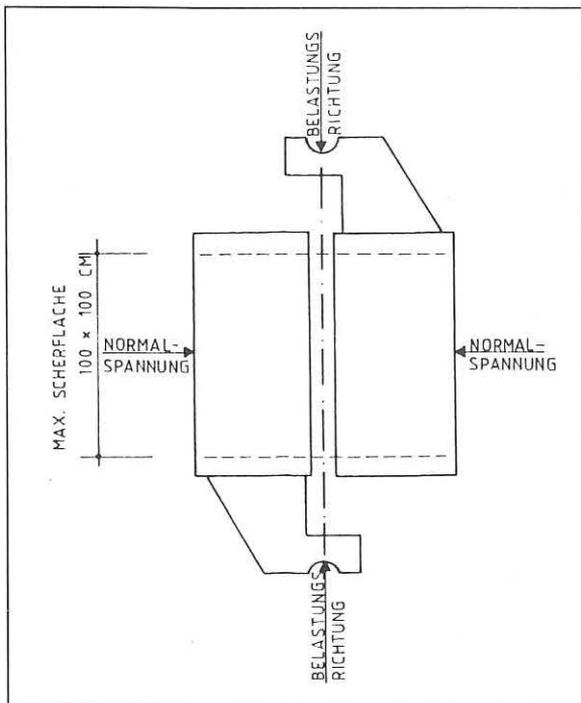


Bild 20: Prinzipskizze der Haftscherfestigkeitsprüfung

Schlußendlich stellt sich die Frage, was zu tun ist, wenn die vom Statiker angegebenen Grenzwerte nicht erreicht werden. Die beste Lösung, solche Probleme zu vermeiden, ist wohl die Prüfung und Kontrolle aller Arbeitsschritte, verwendeten Materialien und Einflußparameter. Dann kann es bei der Prüfung des Verbundsystems nicht zu Überraschungen kommen.

## 8. Erfahrungen bei einem ausgeführten Tunnelbauwerk

Ein 3,2 km langer Abwasserstollen (Bild 21) mit ca. 10 m<sup>2</sup> Ausbruchquerschnitt wurde in dieser Bauweise mit hochwertigem Spritzbeton errichtet /3/. Für die Außenschicht kam herkömmlicher Trockenspritzbeton (in diesem Fall als Fertigprodukt angeliefert) mit 400 kg/m<sup>3</sup> PZ 45 F, Zuschlag mit Größtkorn 8 mm und pulvrigen Erstarungsbeschleuniger zum Einsatz. Damit ließ sich ein B 25 herstellen. Alle Anforderungen an die Güte

der Innenschicht (Ausnahme: Druckfestigkeit) lagen höher. Die Prüfwerte der Eignungs- und Güteprüfung sind beiliegenden Abbildungen (Bild 22, 23, 24) zu entnehmen. Obwohl noch nicht alle der oben angeführten Maßnahmen in voller Konsequenz durchgeführt wurden, ist doch die geforderte Güte erreicht bzw. übertroffen worden. Gegenüber den Eignungsprüfungen vor Betriebsbeginn war die Anlieferungstemperatur der Spritzbeton-Siloware infolge des großen Durchsatzes mit etwa 60° C sehr hoch. Die Anfangstemperatur des Spritzbetons an der Tunnelaibung betrug somit 35° C. Trotzdem zeigen sich fast keine Risse an der fertigen Schale. Dies ist sicher der guten Nachbehandlung zuzuschreiben.



Bild 21: Erstellen der zweiten Spritzbetonlage im Abwasserstollen Frasdorf-Aschau

## 9. Zusammenfassung

Bei der einschaligen Spritzbetonbauweise ersetzt ein mehrschichtiger, zeitlich versetzter Spritzbetonauftrag, die Ort beton-Innenschale und eine eventuell vorgesehene, zwischen den Schalen liegende Isolierung. Durch den innigen Verbund der Spritzbetonschichten ist ein Zusammenwirken im Sinne einer Verbundkonstruktion sichergestellt. An einem 3,2 km langen Abwasserstollen konnte diese Bauweise ausgeführt werden. Dabei wurde der Sicherungsspritzbeton herkömmlich mit Erstarungsbeschleuniger hergestellt. Die weiteren Spritzbetonschichten wurden ohne Zusatz von Erstarungsbeschleuniger, aber dafür unter Zusatz von Si-Stoffen erstellt. Die Gleichmäßigkeit der Ausgangsmischung und die richtige Maschinenausrüstung sowie geübte Düsenführer ermöglichten die Herstellung von hohen Spritzbetongüteklassen. Die Nachbehandlung der Spritzbetone verbesserte die Güte desselben um ein weiteres und half vor allem, die Anzahl der Risse zu minimieren. Dadurch wurde die Wasserdichtigkeit der Spritzbetonschichten ermöglicht. Das hohe Qualitätsniveau aller Ausführungen ermöglichte auch das Einhalten

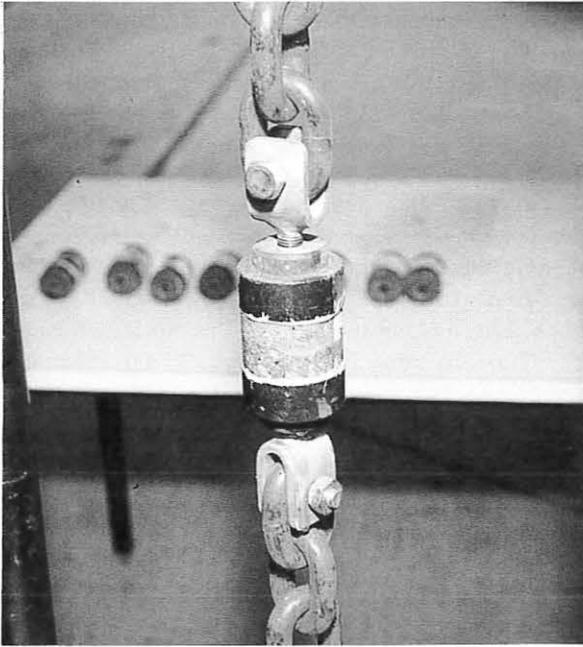


Bild 18: Prüfung der Zugfestigkeit des Systems Sicherungsspritzbeton - Spritzbetoninnenschicht bzw. der Abreißfestigkeit der Fuge

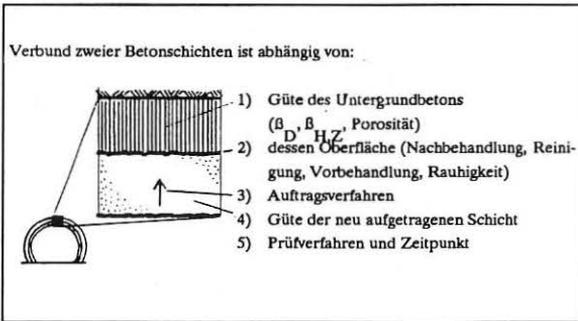


Bild 19: Einflußparameter der Verbundfestigkeit

Da die Haftzugfestigkeit von mehreren Parametern abhängig ist als die Druckfestigkeit, werden sich immer größere Streuungen der Prüfwerte ergeben. Wir haben es ja mit der Prüfung eines Verbundsystemes zu tun (Bild 19). Dabei spielt als erstes die Güte des Untergrundbetons eine Rolle. Bei Druckfestigkeiten unter B 25 kann auch keine Zugfestigkeit von  $1,5 \text{ N/mm}^2$  erwartet werden. Deshalb haben die Druckfestigkeit und die Haftzugfestigkeit des Untergrundes sowie dessen Porosität einen Einfluß auf die Zugfestigkeit des Verbundmaterials. Weiters spielen die Nachbehandlung, Reinigung, Vorbehandlung und Rauhgigkeit der Oberfläche des Untergrundbetones eine große Rolle. Es ist deshalb unerlässlich, an der Oberfläche vor dem Auftrag der neuen Schicht auch die Haftzugfestigkeit zu prüfen. Die Güte der später aufgetragenen Spritzbetonschicht bzw. die Güte des Auftragsverfahrens (vor allem Aufprallenergie)

sind ebenso von Bedeutung. Schlußendlich beeinflussen noch das Prüfverfahren und der Prüfzeitpunkt die Ergebnisse.

Bei der Sichtung der Literatur nach Angaben über die Abreißfestigkeit stößt man immer wieder auf den "Universalwert" von  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Oft wird nicht einmal angegeben, ob es sich dabei um einen Mittelwert oder eine 5 %-Fraktile handelt. Vielfach liegen keine statistischen Auswertungen vor, da nur wenige Autoren Ergebnisse von Reihenuntersuchungen bekanntgeben. Es ist daher vorteilhaft für jedes Bauwerk, für Stichproben und für eine große Probenmenge getrennte Grenzwerte anzugeben. Dabei spielt natürlich auch die Art der Auswertung eine Rolle (werden alle Prüfwerte herangezogen oder nur die Werte bei Bruch in einer bestimmten Schicht /15/). Teichert gibt (in /13/) für sandgestrahlten Beton (32 Stück, 29 - 45 Tage)  $0,7 - 3,3 \text{ N/mm}^2$ , (46 Stück, 180 Tage)  $0,5$  bis  $3,5 \text{ N/mm}^2$  sowie für schalungsrauhem Beton (29 Stück, 6,5 Jahre)  $1,1$  bis  $6,3 \text{ N/mm}^2$  an. In /16/ gibt er eine statistische Auswertung von Proben nach 28, 32 bis 171 Tagen und 1 bis 1 1/2 Jahren an. Die Probenanzahl beträgt dabei 218, 116 und 50 Stück. Während der Mittelwert von 2,27 und 2,20 auf  $4,43 \text{ N/mm}^2$  ansteigt, ist durchwegs ein Variationskoeffizient von 23 - 30 % feststellbar. Das bedeutet, daß bei diesen Proben, die doch hauptsächlich aus dem Bereich der Betoninstandsetzung stammen, die minimalen Werte der Probengesamtheit bei 0,6, 0,55 und  $1,3 \text{ N/mm}^2$  liegen.

Den Untersuchungen von Leuthold /7/, der Spritzbeton auf verschiedenen Untergründen auf die Haftzugfestigkeit geprüft hat, ist zu entnehmen, daß sich höhere Beschleunigerdosierungen vor allem vermindern auf die Haftzugfestigkeiten auswirken. In /17/ werden die Haftzugfestigkeiten von sandgestrahlten denen von nur gewaschenen Kontaktflächen gegenübergestellt. Dabei ist das Verbundsystem bei sandgestrahlter Auftragsfläche immer im Spritzbeton gebrochen. Es werden Haftzugfestigkeiten von  $0,7 - 1,4 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Bei gewaschener Kontaktfläche hat das Verbundsystem hauptsächlich an der Kontaktfuge versagt. In /12/ wird für das Naßspritzverfahren wiederum der Einfluß der Beschleunigerdosierung untersucht. Leider werden in dieser Arbeit nur Mittelwerte angegeben. Die Ergebnisse älterer Untersuchungen sind in /18/ zusammengefaßt. An unserem Institut liegen aus dem Bereich der Betoninstandsetzung sehr viele Werte vor. Da es sich dabei aber um unterschiedliche Materialien handelt, kann man schwer eine statistische Auswertung über die Gesamtprobenanzahl durchführen. Durchaus kann bis zu  $4 \text{ N/mm}^2$  Abreißfestigkeit erreicht werden. Andere Systeme versagen jedoch vollständig und weisen, speziell nach durchgeführten Temperatur-schock- und Frost-Tausalz-Beanspruchungen, fast

nungen vorhanden sind. Bekannterweise verändert sich auch die Bruchdehnung des Betons über die Zeit (Bild 14). Die geringsten Bruchdehnungen sind etwa im Alter zwischen 4 Stunden und einem Tag vorhanden. Gelingt es durch Minimierung der Hydratationswärmeentwicklung und Minimierung des raschen Temperaturabfalles die Temperaturspannungen bzw. durch Nachbehandlung die Zwängungsspannungen aus dem Schwinden in dieser kritischen Zeit unter der Zugfestigkeit des Betons zu halten, so bleibt der Beton weitgehend rissefrei (Bild 15). Reine Schwindrisse, die trotzdem entstehen, können bei schichtweisem Aufbau (nach /13/) durch darauffolgende Spritzbetonschichten wieder geschlossen werden. Dadurch sind mehrschichtig aufgebaute Teile wasserdichter als monolithisch gegossene (Bild 16).

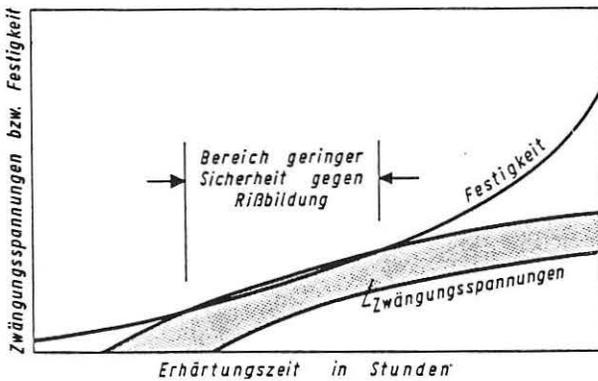


Bild 15: Entwicklung von Festigkeit und Zwängungsspannungen im jungen Beton (schematisch) /20/. Gelingt es, die Zwängungsspannungen zu diesen frühen Zeitpunkten klein zu halten, erfolgt keine frühe Ribbildung

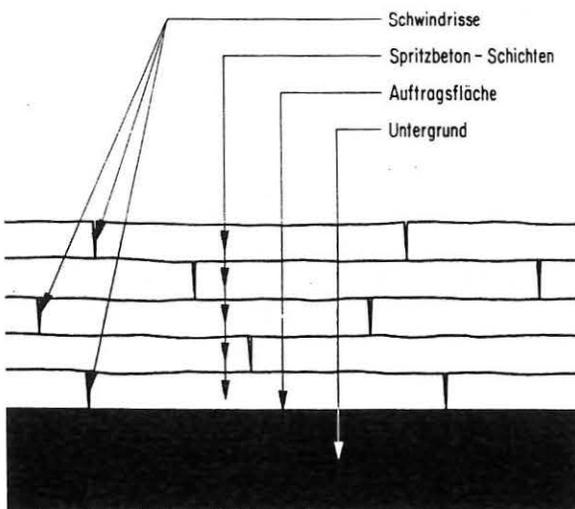


Bild 16: Schematisches Schwindrissebild des Spritzbetons bei fachgerechtem Schichtenaufbau /13/

Durch das Weglassen des Erstarrungsbeschleunigers und den Zusatz von Microsilica sind auch die einzuspritzenden Bewehrungseisen gut zu umhüllen (Bild 17). Es wird verhindert, daß Umläufigkeiten entlang der Eisen vorkommen. Von Vorteil ist auch, daß die Verbundspannungen zwischen den einzelnen Schichten allein durch den Beton ohne zusätzliche Schubbewehrung aufgenommen werden können. Senkrecht zur Schale plazierte Bewehrungseisen sind bekanntlich gerne Wege für eindringendes Wasser.

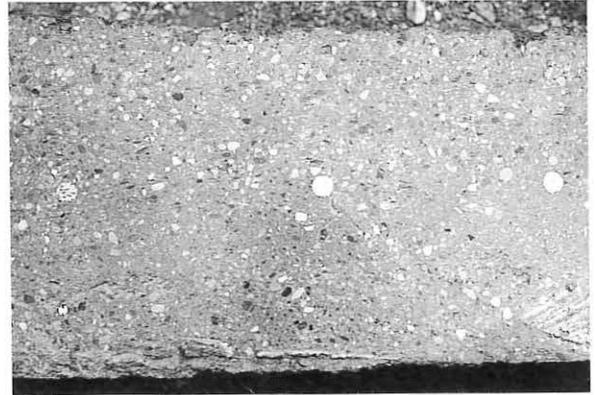


Bild 17: Vollständig mit Spritzbeton eingebettete Bewehrungsmatten

## 7. Verbundverhalten

Um die auftretenden Beanspruchungen in den Fugen zwischen Sicherungsspritzbeton und inneren Spritzbetonschichten aufnehmen zu können, müssen gewisse Mindestanforderungen an die aufnehmbaren Verbundspannungen gestellt werden. Als Hilfsgröße wird die Haftzug- oder Abreißfestigkeit geprüft.

Die Prüfung kann nicht mit den aus der Betonanierung bekannten Abreißgeräten erfolgen, da im vorliegenden Fall dickere Schichten geprüft werden und bei Verwendung von einseitig angebohrten Proben die Biegespannungen überwiegen würden. Wenn unbedingt vor Ort geprüft werden muß, ist zumindest in das Bohrloch eine Hülse einzuschieben, auf die das Prüfgerät aufgesetzt werden kann. Dadurch werden Biegespannungen im Prüfling vermieden /14/. Die andere Möglichkeit besteht darin, Bohrkern zu gewinnen, sie im Labor zuzuschneiden und auf beiden Seiten Stempel festzukleben. Dann wird die Probe, die beidseitig doppelt-kardanisch gelagert wird, auf ihre Zugfestigkeit geprüft (Bild 18). Wichtig ist, daß nicht nur die Festigkeit, sondern auch das Bruchbild, d. h. in welcher Schicht der Bruch erfolgte, festgehalten wird /15/.

Schwindspannungen bzw. durch schlecht eingespritzte Einbauten oder schlecht verarbeiteten Spritzbeton auftreten. Folgende Maßnahmen helfen neben den vorher angeführten Punkten zur Minimierung der Risseanfälligkeit:

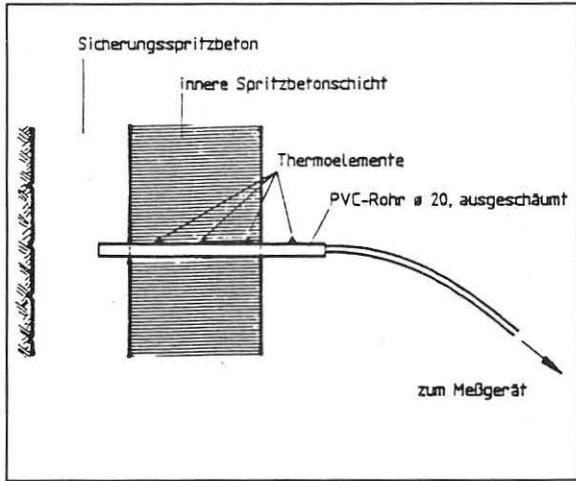


Bild 10: Anordnung der Thermoelemente im Spritzbeton

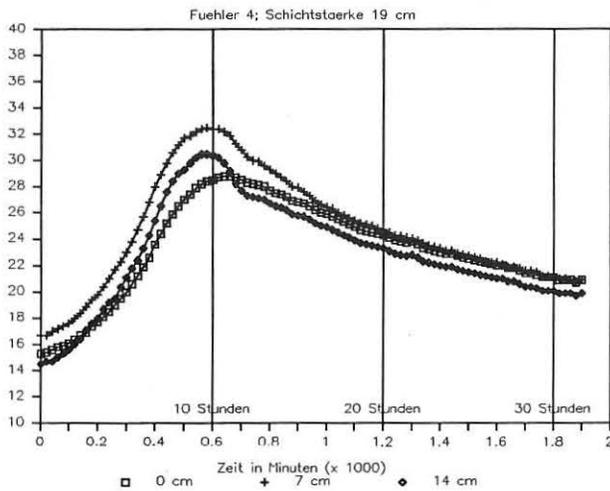


Bild 11: Temperaturentwicklung in einer Spritzbetonschicht mit 19 cm Stärke und einer Starttemperatur von 15° C über die Zeit

Gegenüber Ortbeton-Innenschalen weisen die Spritzbetonschichten der einschaligen Spritzbetonbauweise relativ dünne Schichtstärken auf. Dadurch werden die Temperaturerhöhungen infolge der Hydrationswärme nicht so groß wie bei dicken Ortbetonschalen (Bild 10 und 11). Durch die planmäßige Nachbehandlung kann in den ersten Tagen das Schwinden ganz vermieden werden. Nach Beendigung der Nachbehandlung wird insgesamt ein geringeres Endschwindmaß erreicht als dies ohne Nachbehandlung der Fall wäre (Bild 12 und 13). Verfolgt man die Temperaturentwicklung infolge der Hydratation, sieht man, daß im vorliegenden Falle durch die Temperatur-

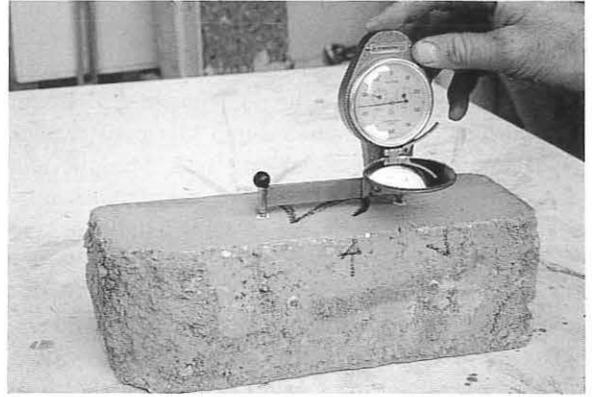


Bild 12: Messung der Schwindverformungen mit Setzdehnungsmesser an gespritzten Probekörpern

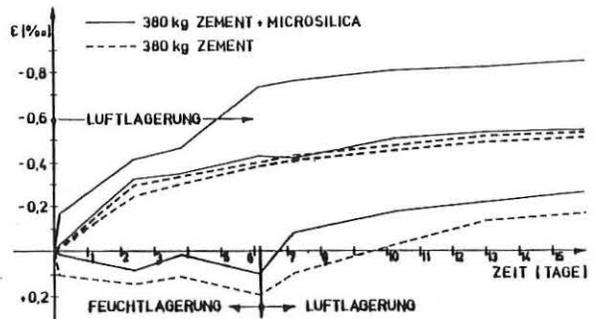


Bild 13: Schwindverformungen von gespritzten Probekörpern bei Luft- und Feuchtlagerung. Meßbeginn etwa 11 Stunden nach Herstellung, Mischungszusammensetzung aus Bild 22

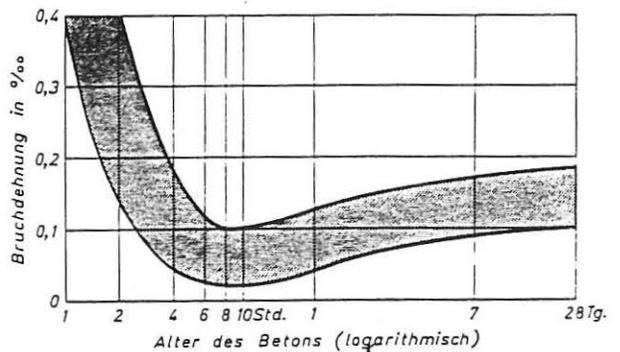
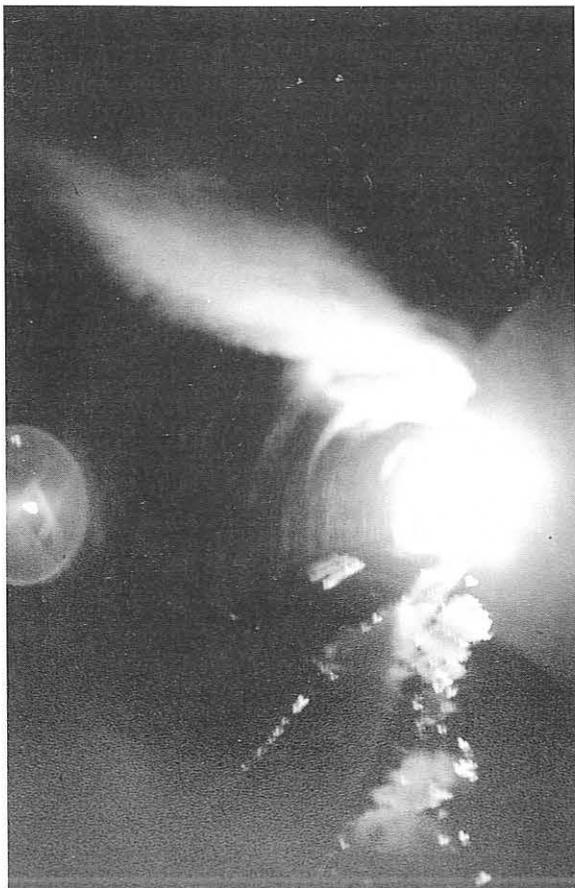


Bild 14: Bruchdehnung von Beton in Abhängigkeit vom Alter /19/

abkühlung ab etwa 10 bis 30 Stunden nach Herstellung Spannungen aufgebaut werden können. Deshalb ist es besonders wichtig, daß gerade zu diesem Zeitpunkt keine zusätzlichen Schwindspan-

die Schwindverformungen möglichst gering zu halten, ist der Beton durch Besprühen mit Wasser 7 Tage zu befeuchten (**Bild 8**). Diese Nachbehandlung, die im Tunnelbau - vor allem bei Spritzbeton - unüblich ist, sollte bald allgemein Verwendung finden. In Österreich schreibt die Ö-Norm B 4200, Teil 6, für Spritzbeton in der Betonsanierung bereits 7 Tage Nachbehandlung vor. Auch für frost-tausalzbeständigen Beton wird 7 Tage Nachbehandlung gefordert.



*Bild 8: Wasserabgabe der frisch aufgetragenen Spritzbeton schichten, ersichtlich am in der Firste abziehenden Wasserdampf. Dieses Wasser muß durch Nachbehandlungsmaßnahmen ersetzt werden*

- g) Reinigung mit Hochdruckwasserstrahl  
Die Oberfläche des Sicherungsspritzbetons (Außenschicht) ist nach längerem Bestand durch angesetzten Staub verschmutzt. Außerdem ist sie durch den Einsatz von Beschleuniger und schlechte Nachbehandlung teilweise von minderer Qualität. Deshalb muß diese Schicht mit Hochdruckwasserstrahl (400 - 1000 bar) gereinigt werden. Vor dem Auftrag der Innenschicht ist der Altbeton genügend lange vorzunässen. Unmittelbar vor dem Auf-

trag sollte jedoch kein Wasser an der Oberfläche stehen. So können die geforderten Haftzugfestigkeiten zielsicher eingehalten werden. Die Haftscherfestigkeiten sind wegen der rauhen Oberfläche (zusätzliche Verzahnung) bedeutend leichter einzuhalten.

## 5. Oberfläche

In befahrbaren Tunnels ist oft eine glatte Oberfläche erwünscht. Dies kann dadurch erreicht werden, daß als letzte Schicht ein Material mit Größtkorn 2 oder 4 mm aufgespritzt und das eventuell mit einem Besenstrich versehen oder zugerieben wird. In Straßentunnels wird vielfach auch Frost-Tausalz-Beständigkeit gefordert. Durch den Einsatz von frostausalzbeständigen Spritzmörteln, die als Sackware erhältlich sind, ist es möglich, die vom Tausalz beanspruchten Flächen beständig gegen Frost-Tausalz-Angriff auszuführen.

## 6. Wasserundurchlässigkeit - Risse



*Bild 9: Wassereindringtiefe an einem Spritzbeton-Bohrkern nach Wasserundurchlässigkeitsprüfung*

Es ist allgemein bekannt, daß es heutzutage nicht schwer ist, einen wasserundurchlässigen Beton nach den einschlägigen Normen herzustellen (**Bild 9**). Schwieriger ist es jedoch, ein Betonbauwerk nahezu rissfrei bzw. wasserundurchlässig zu errichten. Da die einschalige Spritzbetonbauweise ohne die oft übliche Isolationsschicht zwischen Sicherungsspritzbeton und Ort beton auskommen muß, ist den Maßnahmen zur Erhaltung der Dichtigkeit des Bauwerkes besondere Bedeutung beizumessen. Wenn der Spritzbeton wasserundurchlässig nach den einschlägigen Normen ist, können trotzdem Undichtigkeiten durch Risse infolge äußeren Belastungen, Temperatur oder

von über 20.000 m<sup>2</sup>/kg an und enthält in der Regel mehr als 90 % amorphes SiO<sub>2</sub>. Es wird als Betonzusatzstoff eingesetzt. Für das Trockenspritzverfahren erweist sich die Zugabe als Suspension an der Düse als vorteilhaft (Bild 4). Dadurch wird eine erhöhte Auftragsstärke in einer Schicht realisierbar. Dies ist hauptsächlich ein physikalischer Effekt, ermöglicht aber erst große Spritzleistungen (Bild 5). Außerdem werden sichtbarer Staub und Rückprall (Bild 6) deutlich reduziert. Dadurch entspricht der aufgetragene Spritzbeton auch in größerem Umfang als sonst üblich der Ausgangsmischung. Die Druckfestigkeiten, die Wasserundurchlässigkeit und der Widerstand gegen chemischen Angriff werden verbessert.



Bild 5: Erhöhte Haftung eines Mörtels bei Microsilicazusatz ermöglicht auch den Auftrag von Spritzbeton über Kopf ohne Zugabe von Erstarungsbeschleuniger

Versuchsreihe	ohne MSS	mit MSS	Bemerkung
Rückprallminimierung	21 %	9 %	Wand über Kopf gesamter Querschnitt
Einschaliger Tunnel	37 %	18 %	
Mannswörth /8/	15 %	8 %	Wand, Idealbedingungen
Wien /9/	16 - 20	9 %	Wand

Bild 6: Rückprallanteile beim Trockenspritzverfahren mit und ohne Microsilicazusatz in Suspensionsform (= MSS) nach verschiedenen Untersuchungen /11/

Microsilica hat einen positiven Einfluß auf die Druckfestigkeitsentwicklung. Da aber beim Spritzbeton eine Reihe von Faktoren auf die Festigkeit einwirken, ist die tatsächliche Festigkeitssteigerung durch Microsilica schwer abzuschätzen /10, 11/. Es hat den Anschein, daß der verwendete Zement einen großen Ein-

fluß auf den erzielbaren Festigkeitsgewinn durch Microsilicazusatz hat. Bei Vergleichen ist auch darauf zu achten, ob mit gleichem W/Z-Wert bzw. gleicher Konsistenz gemischt, ob Microsilica zugesetzt wurde oder es einen Teil des Zementes ersetzt hat. Beim Trockenspritzverfahren wird durch das Ein- und Ausschalten der Microsilicapumpe der Einfluß zusätzlicher Zugabe deutlich. Eine Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen zeigt, daß nach 28 Tagen ein Druckfestigkeitszuwachs durch Microsilicazusatz von 15 - 89 % möglich ist (Bild 7).

Versuchsreihe	Mischung 3 β <sub>D28</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Mischung 5 β <sub>D28</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Zuwachs (%)
Dünne Spritzbeton- auskleidung	450 + 25 MS 92,8	450 + 30 FA 56,1	65 %
Rückprallverminde- rung ohne BE	350 + 40 MSS 38,2	350 33,2	15 %
Unterschiedliche Spritzverfahren Trockenspritzverfahren ohne BE	380 + 27 MSS 48,4	380 36,8	32 %
Einschalige Spritzbetonbauweise ohne BE	380 + 55 MSS 55	380 40	38 %
Hondrichtunnel /12/ Naßspritzen	450 + 32 MS 41,7	430 32,7	27 %
Mannswörth /8/ Trockenspritzverfahren	350 + 35 MSS 36	380 19	89 %

MS = Microsilica als Pulver  
MSS = Microsilica als Slurry  
FA = Flugasche

Bild 7: Druckfestigkeiten von Spritzbetonen mit und ohne Microsilicazusatz nach verschiedenen Untersuchungen /11/

Der durch die Klebrigkeit des Spritzbetons mit Microsilica mögliche Wegfall des Beschleunigers erlaubt die bessere Umhüllung der Bewehrungseisen. Verformbarer Beton läßt sich besser um Hindernisse drücken als bereits abbindender. Ein negativer Aspekt der Microsilicazugabe ist das erhöhte Fröhschwinden durch die große Feinheit dieses Zusatzstoffes. Dem muß durch Nachbehandlung gegengewirkt werden.

- f) Planmäßige Nachbehandlung  
Um die geforderten Eigenschaften am Bauwerk zu erreichen bzw. zu übertreffen und um

#### 4. Weitere Schichten

Die dem Sicherungsspritzbeton folgenden innenliegenden Schichten sollen mit Spritzbeton hoher Güte hergestellt werden. Dabei wird gefordert, daß ein Auftrag auch über Kopf in Schichtstärken bis zu 5 - 10 cm möglich ist. Ein Haftverbund zwischen Sicherungsspritzbeton und Innenschichten sowie den Innenschichten untereinander muß gegeben sein. Eine geforderte Druckfestigkeitsklasse ist zu erreichen. Der Beton und das Bauwerk sollten wasserundurchlässig sein. Im vorliegenden Projekt war auch ein hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff gefordert, sowie eine nahezu glatte Oberfläche. Folgende Maßnahmen helfen, diese Anforderungen zu erfüllen:

a) Spritzbetonzusammensetzung

Um zu einer optimalen Spritzbetonzusammensetzung zu kommen, ist es erforderlich, rechtzeitig mit den zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffen die Vorprüfungen und Eignungsprüfungen durchzuführen. Verwendeter Zement, Sieblinie und Mischungszusammenstellung müssen optimiert und auf das Verfahren abgestimmt werden.

b) Gleichmäßiger Materialtransport

Beim Trockenspritzverfahren kann der Düsenführer einen konstanten W/Z-Wert nur dann einhalten, wenn er einen gleichmäßigen, ununterbrochenen Materialstrom an Trockengemisch zur Verfügung gestellt bekommt. Dazu ist es notwendig, daß das Mischgut in seiner Zusammensetzung konstant ist, und daß vor allem die Eigenfeuchte des Zuschlages immer gleich bleibt. Im vorliegenden Falle wurde dies dadurch erreicht, daß getrocknetes Zuschlagmaterial zum Einsatz kam. Auch die Materialaufgabe, die Spritzmaschine sowie die Spritzanlage müssen einen gleichmäßigen Transport gewährleisten. Das mindeste, was dabei verlangt werden kann, ist, daß alle Geräte sauber und betriebsbereit gehalten werden. Beim Naßspritzverfahren ist ein gleichmäßiger Materialtransport nur möglich, wenn der Ausgangsbeton gut genug pumpbar ist. Darauf ist schon bei der Spritzbetonzusammensetzung Wert zu legen.

c) Fachmännische Düsenführung

Ohne geschulten, erfahrenen Düsenführer kann die Einhaltung der restlichen Punkte zur Gütesicherung ohne Erfolg bleiben. Es ist daher notwendig, daß sich die Düsenführer mit dem Verfahren vertraut machen, daß sie Vertrauen in die Methode bekommen und daß sie über die betontechnologischen Zusammen-

hänge Bescheid wissen.

- d) Weglassen des Erstarrungsbeschleunigers  
Erstarrungsbeschleuniger heben die Frühfestigkeit des Spritzbetons an, verschlechtern aber fast alle Gütemerkmale des Festbetons ab etwa 1 Tag Alter (Bild 2). Leider besteht manchmal die Meinung: ohne "Spritzhilfe" kein Spritzbeton. Tatsächlich ist das Zusatzmittel im Vortrieb meist unentbehrlich. Für die Innenschicht der einschaligen Bauweise bewirkt jedoch der Verzicht einen großen Qualitätssprung nach oben. Im Falle des Naßspritzverfahrens wird es nur in Ausnahmefällen möglich sein, ohne Erstarrungsbeschleuniger größere Schichtstärken über Kopf aufzutragen. Deshalb muß bei diesem Verfahren mit einer möglichst geringen Dosierung das Auslangen gefunden werden.

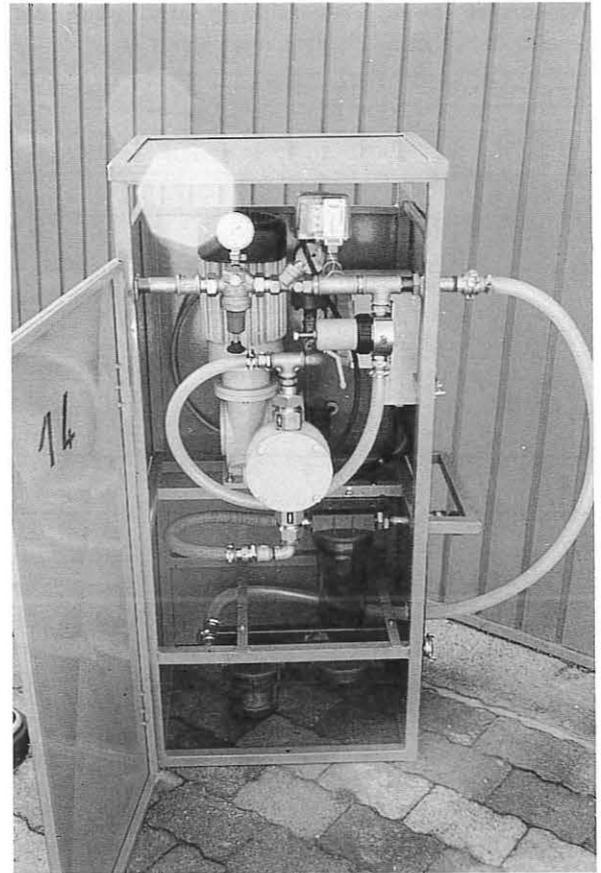


Bild 4: Dosierpumpe für die Zugabe der Microsilica-Suspension

e) Si-Stoffe (Mikrosilica)

Um trotz Weglassens des Erstarrungsbeschleunigers größere Auftragsstärken zu ermöglichen, müssen Si-Stoffe (Microsilica oder andere) zugegeben werden. Microsilica fällt als Filterstaub mit einer spezifischen Oberfläche

stand aufzubauen, damit außerplanmäßige Setzungen, z. B. in seichtliegenden Tunnels, vermieden werden können.

Durch Zusatz von Erstarrungsbeschleuniger wird die Festigkeit des jungen Spritzbetons so angehoben, daß sie den Anforderungen hinsichtlich früher Beanspruchung entspricht. In der österreichischen Richtlinie Spritzbeton sind diese Anforderungen bereits für jungen Spritzbeton definiert /6/. Die Anhebung der Frühfestigkeiten hat aber geringere Festigkeiten zu späteren Zeitpunkten, größere Porosität und damit Wasserdurchlässigkeit, und bei hohen und zu hohen Dosierungen des Erstarrungsbeschleunigers auch vermehrt Spritzfehler und erhöhte Rückprallanteile zur Folge. Deshalb ist es wichtig, die Festigkeitsanforderungen dem zeitlichen Verlauf der Beanspruchung anzupassen (Bild 2). Die Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers sollte so gering wie möglich gewählt werden. Wasserglas beim Naßspritzverfahren darf für diesen Zweck nicht eingesetzt werden /7/.

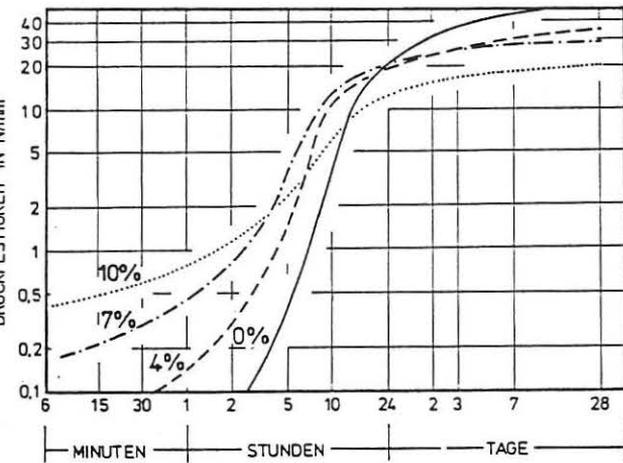


Bild 2: Auswirkung unterschiedlicher Beschleunigerdosierung auf die Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton sonst gleicher Zusammensetzung (bei Verwendung anderer Bindemittel oder Erstarrungsbeschleuniger erhält man ähnliche Ergebnisse)

Die Oberfläche des Sicherungsspritzbetons dient später als Auftragsfläche für die weiteren, innenliegenden Spritzbetonschichten. Zwischen diesen Schichten soll ein guter Haftverbund erzielt werden. Infolge unterschiedlicher Umgebungsbedingungen zwischen Betonkern und Betonoberfläche sind zwischen den beiden Bereichen meist Güteunterschiede feststellbar. Da der Sicherungsspritzbeton dauernd konstruktive Aufgaben übernehmen soll, muß die Oberfläche desselben nachbehandelt werden. Damit wird sichergestellt, daß die Oberfläche des Spritzbetons die gleichen Festigkeiten erreicht wie die Kernbereiche, und daß

die Oberflächenbereiche durch den Zusatz von Beschleuniger nicht "verbrennen" und damit mindere Güte aufweisen. Eine Verschmutzung der Oberfläche des Sicherungsspritzbetons im Laufe des weitergehenden Baufortschrittes ist fast nicht vermeidbar (Bild 3). Die Vorbereitung der Oberfläche für den Auftrag der nächsten Schicht wird unter Pkt. 4 behandelt.



Bild 3: Bohrkern aus Vorversuchen für die einschalige Spritzbetonbauweise. Deutlich ist die verschmutzte Oberfläche des Sicherungsspritzbetons zu erkennen, die nicht mit Hochdruckwasserstrahl gereinigt war.

### 3. Wasserandrang

Ist der Wasserandrang so stark, daß das Wasser mit dem Sicherungsspritzbeton nicht zurückgedrängt werden kann, sind diese Wasseraustrittsstellen abzuschlauchen, flächige Austritte unter Zusatz von Schnellbindern oder mit speziellen Konsolidierungsmörteln trocken-zulegen. Die weiteren Spritzbetonschichten sollten nicht auf Stellen mit Wasseraustritt aufgespritzt werden, da sie keinen Beschleuniger enthalten.

und der Einsatz von erfahrenem Personal bei der Spritzbetonverarbeitung zur erfolgreichen Ausführung der einschaligen Spritzbetonauskleidung beigetragen.

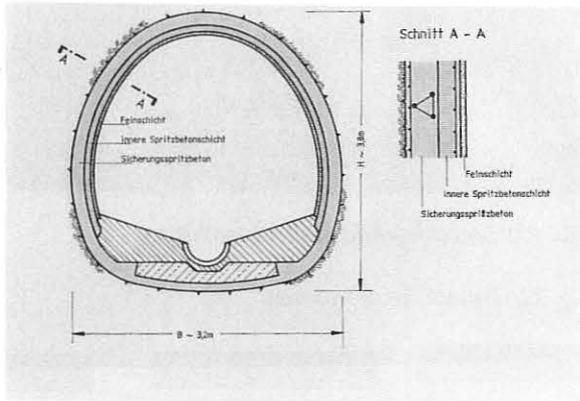


Bild 20: Ausbau des Abwasserstollens

Fig. 20: Installation of the Sewer Tunnel Shotcrete Lining

Im einzelnen gliedert sich der Einbau der innenliegenden Spritzbetonschichten in folgende Arbeitsprozesse:

1. Entfernen von Schmutz, Staub, Ruß aus Dieselbetrieb und Beseitigen von losen Teilchen bzw. Körnern an der Kontaktfläche. Die Reinigung erfolgte mit Hochdruckgeräten bis zu 600 bar Wasserstrahl. Damit konnte von Schicht zu Schicht ein ausreichender Haftverbund erreicht werden.



Bild 22: Montagebewehrung

Fig. 22: Erection Reinforcement

2. Parallel zur Hochdruckreinigung erfolgte der Einbau von Steckeseisen und Montagebewehrung.

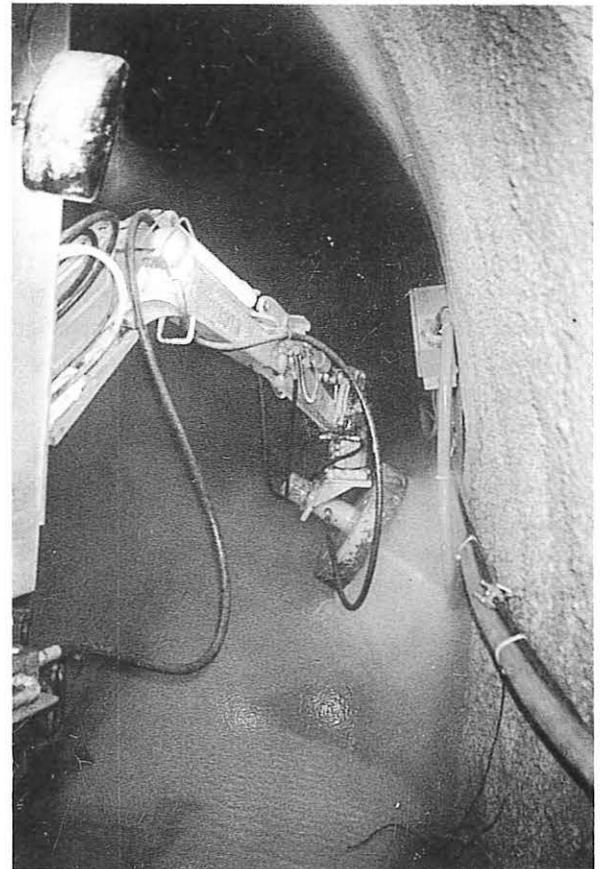


Bild 21: Rotierender Hochdruckreiniger am Baggerarm angebaut

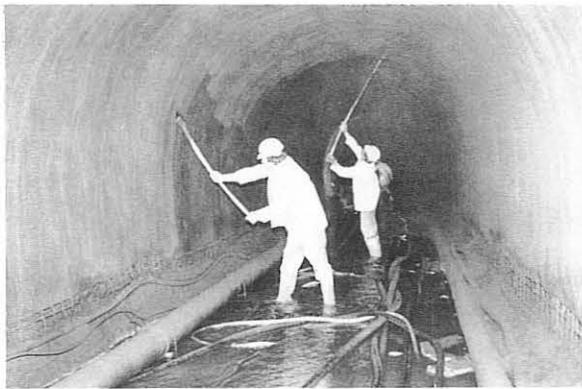
Fig. 21: Rotating High Pressure Cleaner Attached to the Excavator

In detail, the implementation of the inner shotcrete layers is divided into the following working processes:

1. Removal of dirt, dust, soot, produced by the use of diesel engines, and of loose particles or grains on the contact surfaces. The cleaning was done by means of high pressure equipment up to 600 bar water jet. Therefore, sufficient bonding between the individual layers could be obtained.
2. The reinforcement for stresses in erection was placed parallel to the high pressure cleaning. The reinforcement for stresses in erection - layed according to the given real measure - determines the placement of the statical reinforcement in longitudinal and radial direction, and further avoids vibrations of the reinforcement during the shooting of the shotcrete.

Die Montagebewehrung - entsprechend dem vorgegebenen Sollmaß verlegt - bestimmt die Lage der statischen Bewehrung in Längs- und Radialrichtung und verhindert zudem ein Schwingen der Bewehrung beim Auftragen des Spritzbetons.

3. Mit dem Spritzzug wurden dann die innenliegenden Schichten in Schichtstärken von i.M. 15 cm ohne Beschleuniger, allerdings mit Microsilica der Firma Elkem - welche als einzige über eine Zulassung in der BRD verfügt -, aufgespritzt.
4. Wegen der geforderten Ebenflächigkeit, erhöhter Anforderung an Abwasser- und Chemikalienbeständigkeit, wurde abschließend eine 2 cm starke Schicht aufgespritzt und mit einem Besenstrich die Oberfläche geglättet.

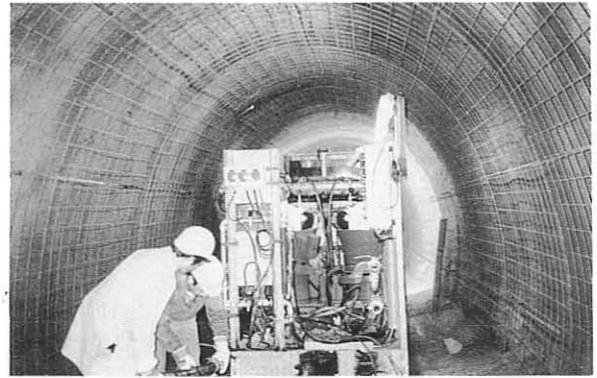


*Bild 24: Glätten der Spritzbetonoberfläche*  
*Fig. 24: Smoothing of the Shotcrete Surface*

Wegen des relativ kleinen Stollenquerschnittes (10 m<sup>2</sup>) und der sehr langen Transportwege wurde das Trockenspritzverfahren /5, 6/ angewendet. Der Spritzzug bestand aus zwei leistungsstarken Trockenspritzmaschinen der Firma Meynadier, Aufgabeschnecken mit Vorbefeuchtungsanlage, Aufgabeband und dem Spritzbetonbunkerwagen, Ladekapazität ca. 7 m<sup>3</sup> Trockenmischgut. Das Trockenmischgut bestand aus ofengetrockneten Zuschlagstoffen 39 %, 0 - 2; 26 %, 2 - 4; 35 %, 4 - 8 und 380 kg PZ 45 F.

In den Mischschnecken (Bild 26) erfolgte eine Vorbefeuchtung mit ca. 3 - 4 %. In der Spritzdüse wurde mit dem Anmachwasser über eigens konstruierte Membranpumpen Microsilica-Slurry zudosiert.

Innerhalb von nur drei Monaten konnten so ca. 28.000 m<sup>2</sup> bzw. 5.500 m<sup>3</sup> innenliegende Spritzbe-



*Bild 23: Innenliegende Stollenbewehrung*  
*Fig. 23: Tunnel Reinforcement*

3. Then the inner layers were sprayed on with an average thickness of 15 cm. They were shot without using an accelerator, but with microsilica produced by the company Elkem, who is the only licence holder in Germany.
4. Finally a 2 cm thick layer was sprayed on and the surface smoothed for the requested evenness and the increased requirements regarding sewage and chemical stability.



*Bild 25: Geräteausrüstung*  
*Fig. 25: Equipment*

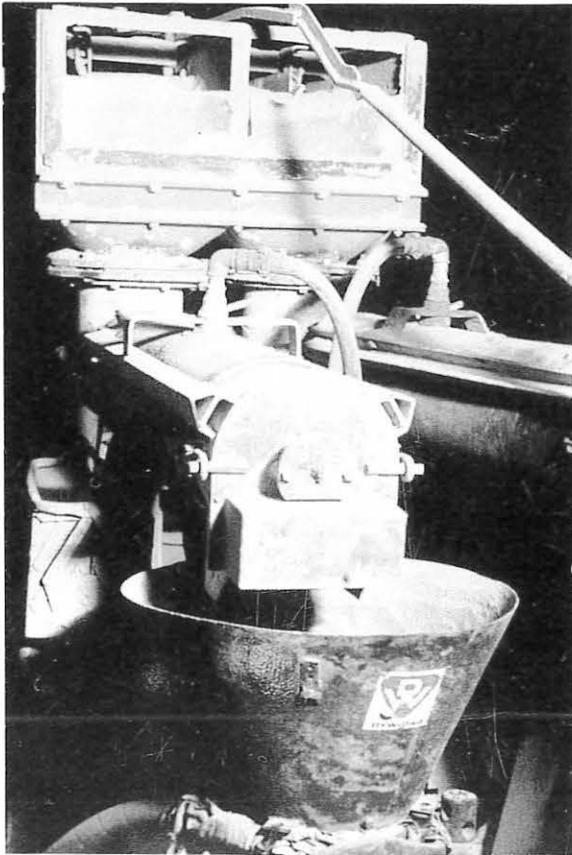
The dry shot method was employed /5, 6/ because of the relatively small tunnel cross-section (10 m<sup>2</sup>) and the very long transport distances. The shotcrete train consisted of two powerful dry shot machines manufactured by Maynadier, shotcrete screw conveyors with pre-moistening unit, a belt conveyor and the shotcrete bunker wagon; it had a loading capacity of about 7 m<sup>3</sup> dry mixing material. The dry mixing material consisted of kiln-dried additives 39 %, 0 - 2; 26 %, 2 - 4; 35 %, 4 - 8 and

tonschichten aufgetragen werden.

Die Spritzbetonoberflächen sind ebenflächig, weisen keine Schadstellen und keine sichtbaren Risse auf.

Die erläuterten statischen und technischen Überlegungen sowie das Bauen ohne Dehnfugen haben sich als durchführbar erwiesen.

Der Nachweis von ausreichendem Verbund, Druckfestigkeiten über  $30 \text{ N/mm}^2$  und Wassereindringtiefen  $< 20 \text{ mm}$  konnte an zahlreichen Bohrkernen innerhalb der Güteprüfung nach deutscher DIN-Norm erbracht werden.



*Bild 26: Mischschnecken mit Meynadier Spritzmaschinen GM 92*

*Fig. 26: Shotcrete Screw Conveyor with Meynadier Shot Gun GM 92*

### **5. Die "Einschalige Spritzbetonbauweise" für eine 60 m lange Teststrecke der Münchner U-Bahn**

Die im ersten Teil vorgestellten Versuchsergebnisse und die aus der "Einschaligen Spritzbetonauskleidung" des Abwasserstollens gewonnenen Erkenntnisse waren die Voraussetzung zur Planung

380 kg PZ 45 F (Portland Cement).

The shotcrete is pre-moistened with about 3 - 4 % in the shotcrete screw conveyors (fig. 26). In the spray jet microsilica-slurry, together with the mixing water, is added to shotcrete by means of membrane pumps.

Within only 3 months about  $28.000 \text{ m}^2$  or  $5.500 \text{ m}^3$  inner shotcrete layers could be shot this way.

The shotcrete surfaces are even and do not show faults or any visible cracks.

The described statical and technical considerations as well as the construction without expansion joints have proved to be possible.

Proof of sufficient bonding, compressive strengths above  $30 \text{ N/mm}^2$  and water penetration below  $20 \text{ mm}$  could be given at numerous drill cores during the quality control according to the German DIN-standard.

### **5. The Monocoque Shotcrete Tunnelling Method Employed for a 60 m Long Test Line of the Munich Subway**

The test results described in the first part and the findings gained from the "monocoque shotcrete lining" of the sewer tunnel were the preconditions for the planning of the 60 m long Munich subway test line.

Likewise to the shotcrete method, this test line is at first excavated by employing crown-, bench- and invert-drivage.

The spraying-on of the securing shotcrete is done during the drivage with a layer thickness of  $12 \text{ cm}$ . In the following working process the outer reinforcement of the monocoque lining is being installed and the first reinforcement completed by spraying on  $3 \text{ cm}$  more of shotcrete in order to reach the requested  $15 \text{ cm}$ .

The distance to the working face for this operation process depends on the geological conditions and the implemented securing means. If steel girders are applied in loose soil, the securing can e.g. be completed in a distance to the working face of about 2 to 3 times the tunnel diameter.

The early strengthening development of shotcrete containing microsilica (ca. 100 minutes after spraying on) equals the strengthening of shotcrete with 4% accelerator. This lead to new considerations for the application of securing shotcrete.

einer 60 m langen Teststrecke für den Münchner U-Bahn-Bau.

Diese Teststrecke wird zunächst - wie auch bei der Spritzbetonbauweise - bergmännisch im Kallotten-, Strossen- und Sohlvortrieb aufgeföhren.

Der Einbau des Sicherungsspritzbetons erfolgt während des Vortriebs mit einer Schichtstärke von 12 cm. In einem nachfolgenden Arbeitsgang wird die außenliegende Bewehrung der einschaligen Auskleidung verlegt und die Erstsicherung durch Auftragen von weiteren 3 cm Spritzbeton auf die geforderten 15 cm ergänzt.

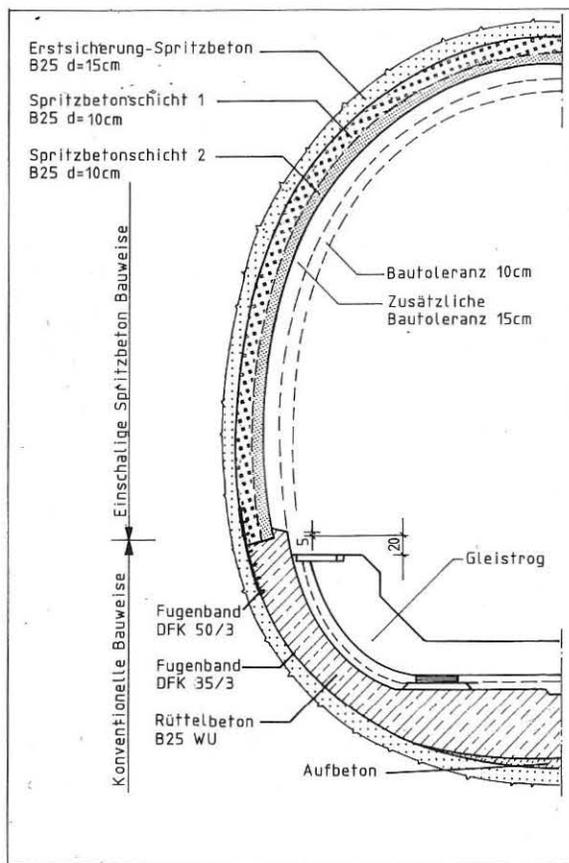


Bild 27: Aufbau der "Einschaligen Spritzbetonauskleidung" für eine Teststrecke

Fig. 27: The "Monocoque Shotcrete Lining" for the Test Line

Der Abstand zur Ortsbrust dieses nachfolgenden Arbeitsganges richtet sich nach den geologischen Verhältnissen und den eingesetzten Sicherungsmitteln. Bei Anwendung von Stollenbögen und Vollpfändung im Lockerboden kann z.B. die Ergänzung in einem Abstand von der Ortsbrust, der ca. dem zwei- bis dreifachen Tunneldurchmesser entspricht, erfolgen.

If mountain and water conditions in the driving section are favorable and operational stresses are low, the accelerator used for the first securing can be replaced by the admixture microsilica, which increases the concrete quality. The new shotcrete mixture with its suction and adhesion effect will compensate the unfavorable early strengthening development.

Nowadays special dose pumps are used for the admixture addition. When installing the first securing and the inner layers, either shotcrete containing microsilica or only an accelerator or containing both products can be used.

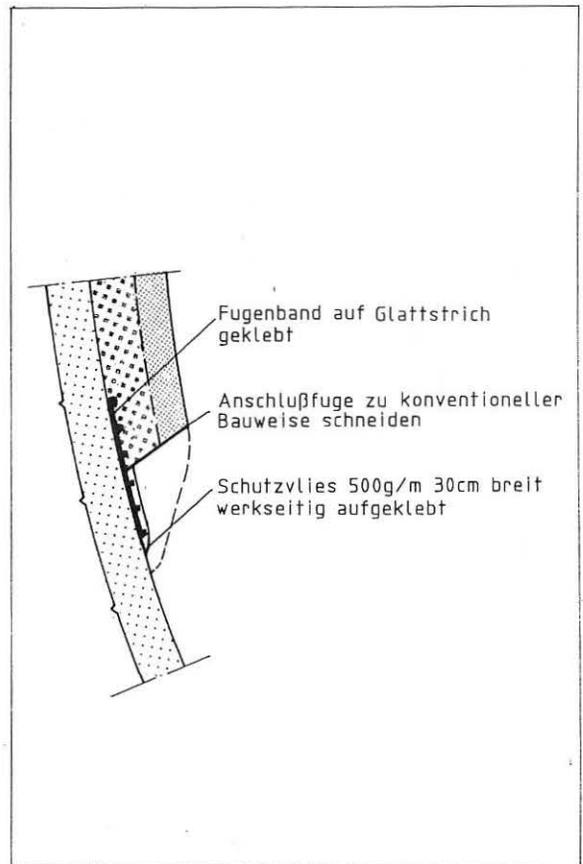


Bild 28: Anschlußdetail zwischen einschaliger Auskleidung und Sohlkonstruktion

Fig. 28: Connective Construction between the Monocoque Lining and Invert

Therefore, for the test line, microsilica is not only admixed to shotcrete when installing the inner layers, but is also used for the first securing. It finally depends on the early strengthening reaction of the shotcrete on the spot, whether only small quantities or no accelerator at all are used.

Da die Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons mit Microsilica bereits nach ca. 100 Minuten der eines Spritzbetons mit 4 % Beschleuniger gleichgesetzt werden kann, hat dies zu neuen Überlegungen bei der Anwendung von Sicherungsspritzbeton geführt.

Wenn nun das Gebirge, die Wasserverhältnisse im Vortriebsbereich und die baubetrieblichen Beanspruchungen es erlauben, wird bei der Erstsicherung auf den betonschädigenden Beschleuniger verzichtet und der qualitätsverbessernde Zusatzstoff Microsilica eingesetzt. Wegen der verminderten Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten 100 Minuten hat sich aus der Praxis ergeben, daß das ungünstigere Anfangsfestigkeitsverhalten durch den sogenannten Saug- und Klebeeffekt der neuen Spritzbetonzusammensetzung ausgeglichen wird.

Nachdem uns heute für die Zusatzmittelzugabe spezielle Dosierpumpen zur Verfügung stehen, kann beim Auftragen der Erstsicherung und innenliegenden Schichten, wahlweise Spritzbeton nur mit Microsilica oder nur mit Beschleuniger oder mit Microsilica und Beschleuniger aufgespritzt werden.

Microsilica wird daher innerhalb der Teststrecke nicht nur für die innenliegenden Schichten angewendet, sondern auch bei der Erstsicherung dem Spritzbeton zugegeben. Ob dann nur geringe Mengen oder gar kein Beschleuniger eingesetzt wird, ergibt sich aus dem Frühfestigkeitsverhalten des Spritzbetons vor Ort. Durch die Zugabe von Microsilica in der Erstsicherung wird in jedem Fall die Beschleunigerzugabe reduziert und so auch für die Erstsicherung eine höherwertige Spritzbetonqualität erreicht, die Verbundwirkung zwischen der Erstsicherung und der ersten innenliegenden Schicht verbessert.

Nach Beendigung der Vortriebsarbeiten erfolgt der Einbau der innenliegenden Spritzbetonschichten. Daß die einschalige Auskleidung innerhalb der Teststrecke nur oberhalb des Sohlbereiches vorgenommen wird, resultiert ausschließlich aus Termingründen für eventuell anfallende Abdichtarbeiten im Sohlbereich und gilt daher auch nur für die Teststrecke. Bei weiterer Anwendung der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" kann wahlweise der Sohlbereich einschalig mit Spritzbeton oder mit Spritzbeton und Rüttelbeton ausgekleidet werden.

Vor dem Aufspritzen der ersten innenliegenden Schicht werden die Auftragsflächen mit Hochdruckwasserstrahlern gereinigt. In weiteren Arbeitsgängen wird dann zunächst die erste innenlie-

Microsilica which is used for the first securing improves the shotcrete quality and increases the bond action between the first securing and the first inner layer.

After termination of the drive, the inner shotcrete layers are sprayed on. In the test line, the monocoque shotcrete lining is installed above the invert section. The reason for that are eventually necessary curing works in this invert section. When the "monocoque shotcrete tunnelling method" continues to be employed, it can also be applied for the invert lining, using shotcrete only, or shotcrete and vibrated concrete.

Prior to spraying on the first inner layer the relevant surfaces need to be cleaned by high pressure water jets. In subsequent processes, the first inner layer is sprayed on with a thickness of 10 cm, and then the second layer with a thickness of only 6 cm. Overlaps of 3 layers in the inner situated reinforcement are indispensable. In order to avoid unnecessary reinforcement concentration causing faults, mats with reduced reinforcement in the overlap section are used. After installation of this reinforcement, the second layer then is completed to the real thickness of 10 cm.

Comparable to the sewer tunnel, the subway test tunnel lining is watertight and is installed by shooting inner shotcrete layers without using expansion joints; the visible surfaces are left coarse.

The transition from the monocoque shotcrete lining to the invert section is effectuated by an outer joint ribbon (fig. 28). This joint ribbon is positioned on a mortar bed of the first securing and is protected in the vibrated concrete by a fleece.



*Bild 29: Definiertes Schneiden von Spritzbeton mit einer Steinsäge*

*Fig. 29: Shotcrete Cutting*

After cutting the connection joint into the

gende Schicht mit einer Schichtstärke von 10 cm und dann die zweite Schicht jedoch nur mit 6 cm Stärke aufgespritzt. Überlappungsstöße mit drei Lagen sind bei der innenliegenden Bewehrung unvermeidbar. Um nun unnötige Bewehrungskonzentrationen mit der Folge von Spritzschatten zu vermeiden, werden für den Einbau der innenliegenden Bewehrung Randsparmatten verwendet. Nach Verlegen dieser Bewehrung wird dann die zweite Schicht auf die geforderte Sollstärke von 10 cm ergänzt.

Ebenso wie der Abwasserstollen wird die Teststrecke ohne Dehnfugen mit innenliegenden Spritzbetonschichten wasserundurchlässig ausgekleidet und die sichtbaren Oberflächen spritzrauh belassen.

Der Übergang von der einschaligen Spritzbetonauskleidung zur Sohlkonstruktion erfolgt durch ein außenliegendes Fugenband (Bild 28). Dieses Fugenband wird auf einer Ausgleichsschicht auf der Erstsicherung verlegt und im Rüttelbetonbereich durch ein werkseitig aufgetragenes Vlies geschützt.

Nach Schneiden der Anschlußfuge im Spritzbeton wird das Vlies beseitigt und der Rüttelbeton bis hin zur Anschlußfuge eingebaut. Die Arbeitsfolge, einschalige Spritzbetonauskleidung und dann erst Einbau des Rüttelbetons im Sohlbereich, ergibt sich aus baubetrieblichen Überlegungen. Hilfsfahrsohlen können zum Einbau der Spritzbetonauskleidung genutzt, und der Sohlbereich muß nicht vor Rückprall mittels Abdeckmaßnahmen geschützt werden.

Nachdem die Spritzbetonauskleidung ohne Dehnfugen eingebracht wird, liegt die Bedeutung in der Minimierung der Rißbildung. Deshalb soll mit einer gezielten Nachbehandlung

- zu großer Feuchtigkeits- und Temperaturabfluß vermieden,
- die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite der Auskleidung
- und das Schwindverhalten gering gehalten werden.

Die Nachbehandlung erfolgt unmittelbar nach dem Aufspritzen der letzten innenliegenden Spritzbetonschicht durch Auftragen eines handelsüblichen Nachbehandlungsmittels.

Abgedichtet wird die Teststrecke mit wasserundurchlässigem Spritzbeton, d.h. beim Einbau der innenliegenden Schichten werden die betrieblich

shotcrete, the fleece is removed and the vibrated concrete installed up to the connection joint. The operation succession - the monocoque shotcrete lining and then the incorporation of vibrated-concrete in the invert section - results from construction operational considerations. Invert travelling can be used for the installation of the shotcrete lining, and the invert section does not need to be protected against rebound.

It is important to minimize the formation of cracks after the shotcrete lining is installed without usage of expansion joints. Specific curing is destined to:

- avoid too high moisture and temperature flow
- decrease too high temperature difference between the inner and outer part of the lining
- and reduce shrinking

Curing is effectuated immediately after implementation of the last inner shotcrete layer by spraying on a curing product.

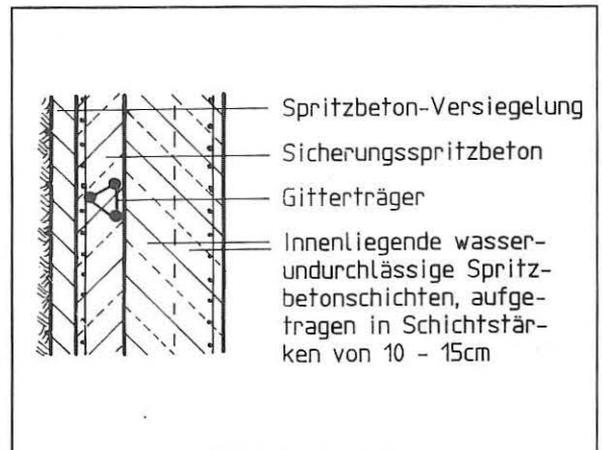


Bild 30: Abdichtung mit wasserundurchlässigen Spritzbetonschichten

Fig. 30: Sealing by Means of Watertight Shotcrete Layers

The test line is sealed by means of watertight shotcrete. This means that the working joints of the inner layer are staggered by defined spraying sections. The working joints are not superposed anymore, which in general results in an improved watertightness. Further sealing possibilities are summarized in the tunnel construction manual 1990.

Critical considerations, particularly concerning the realisation of the sealing proposals, are necessary for each single project.

bedingten Arbeitsfugen von Schicht zu Schicht durch definierte Spritzabschnitte versetzt. Die Arbeitsfugen der Schichten liegen damit nicht mehr übereinander, was insgesamt zur Verbesserung der Wasserundurchlässigkeit führt. Weitere Abdichtungsmöglichkeiten sind im Tunnelbau-Taschenbuch 1990 zusammengestellt.

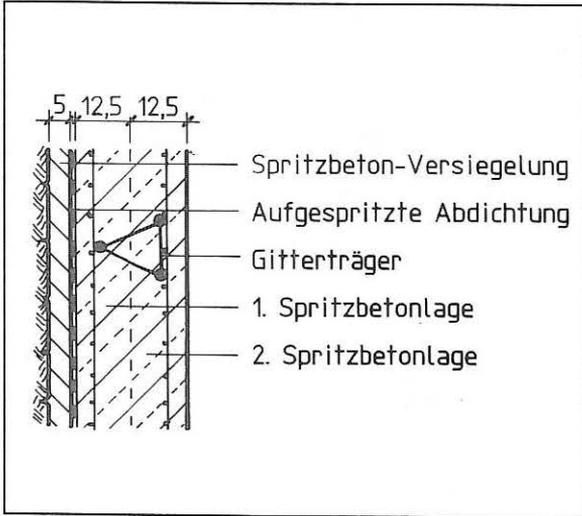


Bild 31: Abdichtung mit aufgespritztem Dichtungsmaterial

Fig. 31: Possible Shell Structure Using a Seal Made of Sprayed-on Reaction Resin

Eine kritische Betrachtung, insbesondere im Hinblick auf die Realisierbarkeit dieser Abdichtungsvorschläge, ist projektbezogen erforderlich.

Auf der Basis unserer technischen Überlegungen, vorliegenden Versuchsergebnissen und den gewonnenen Erfahrungen aus dem Abwasserstollen können der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" große Erfolgchancen eingeräumt werden.

Mitte 1990 wird die Teststrecke in dem Münchner U-Bahn-Baulos 6 West 5 unter technischer Federführung der Dyckerhoff & Widmann AG gebaut.

## 6. Schlußbemerkung

Spritzbeton benötigt die Rohstoffe Kies, Sand und Zement. Diese Rohstoffe sind in vielen Gebieten nur knapp vorhanden, müssen häufig mit großem Energieaufwand gewonnen und über große Transportweiten angefahren werden. Erhebliche Eingriffe in den Naturhaushalt entstehen. Die einschalige Spritzbetonbauweise reduziert den Rohstoffverbrauch und die Stollen- und Tunnelbaukosten verringern sich.

Based on our technical considerations, the test results and the experiences gained from the sewer tunnel, the "monocoque shotcrete tunnelling method" is considered to be very successful. In 1990, the Munich subway test line will be constructed under the technical responsibility of DYWIDAG, Munich.

## 6. Conclusion

For the production of shotcrete gravel, sand and cement are needed. In many regions these materials are rare, and often high energy expense is necessary to produce them; they also have to be transported over long distances. Their production has a significant impact on natural resources. The monocoque shotcrete tunnelling method reduces the consumption of raw materials and consequently also the tunnel construction costs.

### Einsparung bei der Anwendung der "Einschaligen Spritzbetonbauweise" im Stollen- und Verkehrstunnelbau bis zum Jahre 2000

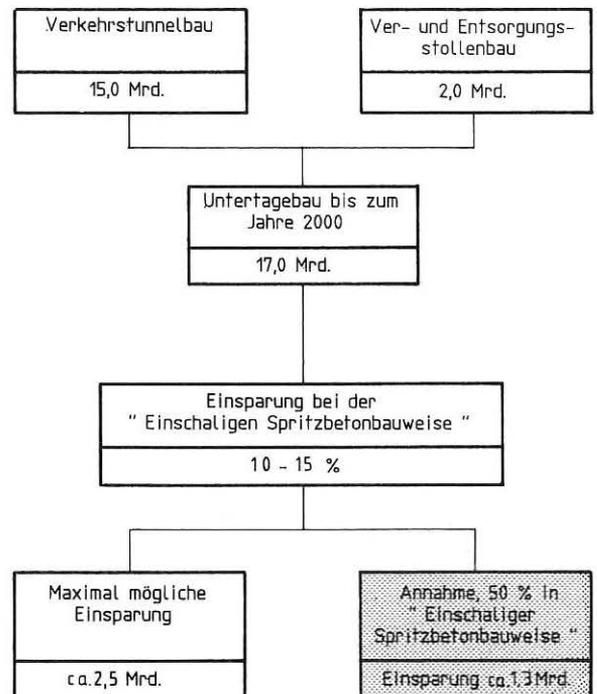


Bild 32: Geschätzte Einsparungen bei Anwendung der "Einschaligen Spritzbetonbauweise"

Fig. 32: Estimated Savings when Employing the "Monocoque Shotcrete Tunnelling Method"

The findings and test results gained from this construction method have further showed that the

Die bisherigen Erkenntnisse und Versuchsergebnisse aus dieser Bauweise haben darüber hinaus gezeigt, daß die Spritzbetonqualität heute bei Verwendung des Zusatzstoffes Microsilica erheblich besser wird und dieser Spritzbeton einem Konstruktionsbeton gleichgesetzt werden kann.

Dennoch unterliegen die qualitätsbestimmenden Kennwerte des Spritzbetons immer noch einem relativ hohen Streubereich. Dies liegt daran, daß der Düsenführer unter denkbar ungünstigen Arbeitsbedingungen einen Großteil der Spritzbetonqualität an der Spritzdüse bestimmt. Der Streubereich ist zwar heute wesentlich günstiger als bei konventionellem Spritzbeton, könnte aber durch die Automatisierung der Spritzbetonverarbeitung weiter minimiert werden.

Die "Einschalige Spritzbetonbauweise" ist insgesamt gesehen eine neue technische Herausforderung an Auftraggeber, Baufirmen, Maschinenhersteller und Wissenschaftler der Universitäten.

## 7. Literaturverzeichnis

- /1/ **Schmidt-Schleicher, H.; Schultz, G.; Klönne, H.; Lippert D.**  
Stadtbahntunnel in Verbundbauweise - Unternehmen und Erfahrung Tunnelbautaschenbuch 88, Verlag Glückauf Essen
- /2/ **Schmidt-Schleicher, H.; Lippert, D.; Zerra W.**  
Zur Berechnung und Konstruktion von einschaligen Verkehrs - Tunnelbauten aus Stahlbeton im oberflächennahen Bereich, Universität Bochum, Institut Oberflächennaher Tunnelbau Vulkan-Verlag Essen, 1982
- /3/ **Bomhard, H.**  
Wasserbehälter aus Beton - Möglichkeiten und Wirklichkeiten, Entwurfs-, Planungs- und Bemessungskriterien DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 33, yf. GW-Verlag 1983
- /4/ **Merkl, G.**  
Fugenloser, schlaffbewehrter 8.000 m<sup>3</sup> Trinkwasserbehälter der Stadtwerke Augsburg gwf. 127 (1986) H 10
- /5/ **Gebauer, B.**  
Moderne Tunnelbauweisen und Ausbaumethoden Vortrag 1985 an der Technischen Akademie Esslingen
- /6/ **Gebauer B.**  
Spritzbeton im modernen Tunnelbau Vortrag 1986 an der Technischen Akademie Esslingen

shotcrete quality nowadays is improved if the admixture microsilica is used and that this shotcrete is comparable to any construction concrete.

Nevertheless, the deviation of the quality determining shotcrete values is still relatively high. This is due to the fact that the shotcrete operator, who determines the bulk of the shotcrete quality at the shooting jet, has to work under quite unfavorable working conditions. Nowadays, the deviations are much more advantageous, but could still be minimized by the automation of the shotcrete application.

The "monocoque shotcrete tunnelling method" is a new technical challenge for purchasers, building companies, machine manufacturers and scientists at universities.

## 7. Bibliography

- /1/ **Schmidt-Schleicher, H.; Schultz, G., Kloenne, H.; Lippert, D.**  
Composite Subway Tunnel Construction - Execution and Experiences Tunnel Construction Manual 88, Verlag Glueckauf Essen
- /2/ **Schmidt-Schleicher, H; Lippert D.; Zerra W.**  
Calculation and Construction of Monocoque Traffic Tunnels Located near the Surface by Using Reinforced Concrete, University Bochum, Institute: Surface-near Tunnelling Vulkan Verlag Essen, 1982
- /3/ **Bomhard, H.**  
Water Containers made of Concrete - Possibilities and Realization, Criterias for Designing, Planning and Measuring DVGW-Issues Water Nr. 33, yf. GW-Verlag 1983
- /4/ **Merkl, G.**  
Jointless, Singly Reinforced 8.000 m<sup>3</sup> Drinking Water Container of the Stadtwerke Augsburg gwf. 127 (1986) H10
- /5/ **Gebauer, B.**  
Modern Tunnelling and Tunnel Lining Methods Presentation 1985 at the Technical Academy, Esslingen
- /6/ **Gebauer, B.**  
Shotcrete Used in Modern Tunnelling Presentation 1986 at the Technical Academy, Esslingen