

---

# Konstruktive und wirtschaftliche Lösungen für den einschaligen Tunnelausbau

---

## CONSTRUCTIVE AND ECONOMICAL SUGGESTIONS FOR THE LINING OF SINGLE SHELL TUNNELS

### JÖRG SCHREYER

Bei der unterirdischen Herstellung von Verkehrstunneln gelangt in Deutschland in großem Umfang die Spritzbetonbauweise zur Anwendung. Dabei wird die Tunnelauskleidung üblicherweise zweischalig ausgeführt. Eine erste Spritzbetonschale dient der Hohlraumsicherung. Es wird angenommen, daß diese Spritzbetonschale mit der Zeit verrottet. Die nachfolgend eingebrachte Rüttelbeton-Innenschale muß daher für die Gesamtlasten statisch bemessen werden.

Da aus baubetrieblichen Gründen bei der zweischaligen Bauweise die äußere Spritzbetonschale in einigen Fällen über Monate allein den unterirdischen Hohlraum sichern muß bis die Innenschale eingebaut wird, liegt der Gedanke nahe, die Anwendung einer einschaligen Spritzbeton-Tunnelauskleidung näher zu untersuchen.

Im Beitrag wird auf verschiedene Ausführungsvarianten der einschaligen Tunnelbauweise, die Problematik der Wasserundurchlässigkeit und die Kosten solcher Auskleidungen eingegangen.

*For the underground excavation of traffic tunnels the shotcrete method is mostly used in Germany. Normally the tunnel lining is built out of two shells. The outer shotcrete shell secures the excavated underground cavity. It is assumed that this shotcrete shell will wear a way over the years. Therefore the second shell made of cast in situ concrete has to be designed statically for all possible loads.*

*However, during the process of construction the outer shotcrete lining alone has to secure the excavated underground cavity for a long time, in some cases for several months. So the idea was put forward of investigating in detail the application of a single shotcrete lining.*

*In this paper the variety of possible constructions, the problem of watertightness and construction costs of single shell tunnel linings are explained.*

### 1. Einleitung

Bei der bergmännischen Herstellung von Verkehrstunneln gelangt in Deutschland in großem Umfang die Spritzbetonbauweise zur Anwendung. Dabei wird die Tunnelauskleidung üblicherweise zweischalig ausgeführt. Eine erste Spritzbetonschale dient der Hohlraumsicherung. Dabei wird ange-

nommen, daß diese Spritzbetonschale mit der Zeit verrottet. Die anschließend eingebrachte Ortbeton-Innenschale muß daher für die Gesamtlasten statisch bemessen werden.

Die Wasserdichtigkeit des Tunnels kann durch die Anordnung einer Hautabdichtung zwischen der äußeren Spritzbetonsicherung und der Innenschale

erreicht werden oder durch die Ausführung der Innenschale als WU-Beton (Bild 1). Diese zweischalige Bauweise hat sich bewährt. Nachteilig ist jedoch z.B. der hohe Masseneinsatz durch Einbau von großen Betonwanddicken von insgesamt etwa

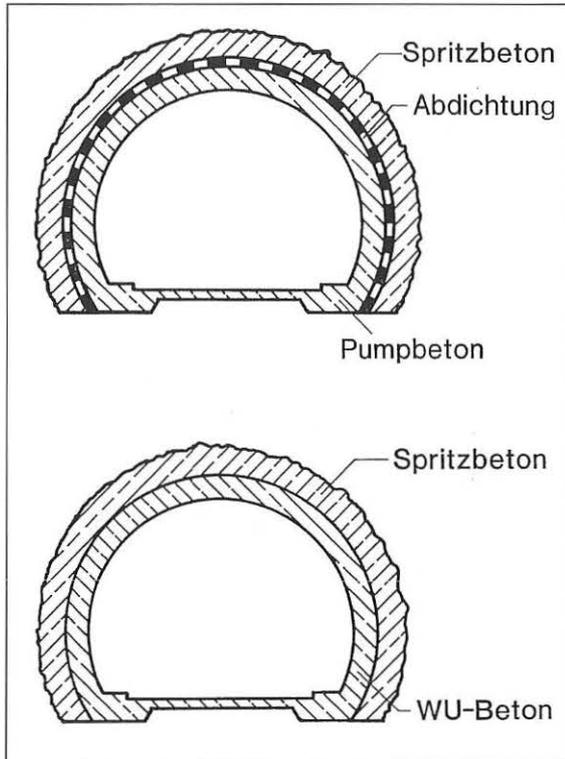


Bild 1: Zweischalige Tunnelbauweise mit Hautabdichtung bzw. mit WU-Beton

50 cm und mehr für Spritzbeton und Ortbeton [1]. Da aus baubetrieblichen Gründen bei der zweischaligen Bauweise die äußere Spritzbetonschale in einigen Fällen über Monate allein den unterirdischen

Hohlraum sichern muß bis die Innenschale eingebaut wird, liegt der Gedanke nahe, die Anwendung einer einschaligen Spitzbeton-Tunnelauskleidung näher zu untersuchen. Problematisch hierbei ist jedoch die Sicherstellung der Wasserdichtigkeit solcher Tunneln. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene einschalige Tunnelauskleidungen erprobt (Tabelle 1). Den einschaligen Ausführungsvarianten ist gemeinsam, daß angestrebt wird, durch den Einbau einer dünneren Innenschale und den dadurch verminderten Bodenaushub Kosten und Zeit einzusparen.

## 2. Definition der einschaligen Ortbetonbauweise

Nachfolgend werden einschalige Tunnelauskleidungen mit Tübbingn nicht betrachtet, sondern nur Ausführungen in Verbindung mit Spritzbeton. Bei der einschaligen Ortbeton-Bauweise wird angenommen, daß die äußere Spritzbetonsicherung nicht vollkommen verrottet, sondern daß sie im Endzustand anteilig Lasten übernehmen kann. Die inneren Betonlagen müssen dann nur noch die Restlasten übernehmen und können entsprechend wirtschaftlicher dimensioniert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß zwischen der gebirgsseitigen und der tunnelseitigen Lage der einschaligen Tunnelauskleidung ein guter Haftverbund besteht, damit zwischen den beiden Lagen eine Schubübertragung und somit eine Verbundwirkung bei Biegebeanspruchung möglich ist. Unter einer einschaligen Tunnelauskleidung soll daher im nachfolgenden eine einschalige Auskleidung verstanden werden, die aus mehreren Ortbeton-Lagen besteht, die entsprechend den zeitlichen Erfordernissen des Bauablaufes eingebaut werden und eine Schubkraftübertragung zulassen [1].

Baustelle (Bau- los)	Bochum (D1/C1a)	Bochum (C1a)	Bochum (D6)	Bielefeld (2312)	Bielefeld (2312)	Dortmund (K6a)	Dortmund (S4)	Gelsenkirchen	München (U6)
Jahr	1981-1983	1982	1984-1987	1987-1989	1987-1989	1989-1990	1989-1992	1981	1991
Art des Tunnels	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger S-Bahntunnel	einleisiger Stadtbahntunnel	einleisiger U-Bahntunnel
Tunnellänge einschalig	1000 m	ca. 100 m	500 m	450 m	1 x 104 m	80 m	einige Blöcke	ca. 100 m	60 m
Gestein	Sandsiein/ Mergel	Sandstein/ Mergel	Mergel	Tonstein	Tonstein	fester Mergel	fester Mergel	Emschermergel	Kies, Mergel
maximale Über- deckung	10 m	6 m	6 m	10 m	10 m	9,3 m	19 m	8 m	7,5 m
Wasserdruck über der Firste ca.	0,5 bar	0,5 bar	0,5 bar	0,6 bar	0,6 bar	0 bar	1,2 bar	0,5 bar	0 bar
Schalenaufbau 1. Lage	12 cm bewehr- ter Spritzbeton	15 cm bewehr- ter Spritzbeton	14 cm bewehr- ter Spritzbeton	15 cm bewehr- ter Spritzbeton	15 cm bewehr- ter Spritzbeton	15 cm bewehr- ter Spritzbeton	ca. 20 cm bewehrter Spritz- beton	5 cm Mörtel und 12,5 cm be- wehrt Spritz- beton	15 cm bewehr- ter Spritzbeton
Schalenaufbau 2. Lage	25 cm bewehr- ter Rüttelbeton	10 cm bewehr- ter Spritzbeton	25 cm bewehr- ter Rüttelbeton	25 cm bewehr- ter Rüttelbeton	10 cm Stahlfas- erspritzbeton	25 cm Stahlfas- erschaltbeton	35 cm Stahlfas- erschaltbeton	12,5 cm be- wehrt Spritz- beton	2 x 10 cm be- wehrt Spritz- beton
Gesamte Schalendicke	37 cm	25 cm	39 cm	40 cm	25 cm	40 cm	55 cm	30 cm	35 cm

Tab. 1: Tunnel in einschaliger Ortbetonbauweise (Übersicht)

3. Ausführungsvarianten der einschaligen Tunnelbauweise in Ortbeton

Verschiedentlich wurden Tunnel bzw. Versuchsstrecken in einschaliger Bauweise ausgeführt. Hierzu gehören u.a. folgende Ausführungen (Tabelle 1).

1. Konventioneller Spritzbeton

Zur Ausführung in dieser Bauweise kam ein 100 m langer, eingleisiger Tunnelabschnitt in Bochum im Baulos C1a. In diesem Versuchstunnel wurden unter wissenschaftlicher Leitung der STUVA folgende Varianten erprobt (Bild 2).

- a) Spritzbetonschale mit einlagiger, gebirgsseitiger Mattenbewehrung und Gitterträgern im Kalotten- und Ulmenbereich
- b) Spritzbetonschale mit zweilagiger Mattenbewehrung und Gitterträgern im Kalotten- und Ulmenbereich
- c) Spritzbetonschale mit zweilagiger Mattenbewehrung ohne Gitterträger
- d) Herstellung der Spritzbetonschale mit dem Naßspritzverfahren im Dünnstrom anstelle des sonst durchweg eingesetzten Trockenspritzverfahrens
- e) Einspritzen von zwei außenliegenden Dehnungsfugenbändern im Abstand von ca. 8 m (Bilder 2 und 3) und Herstellen eines Fugenspalts zur Aufnahme eines Kompressionsprofils.

10 cm Dicke. Erfolgreich konnten außenliegende Dehnungsfugenbänder eingespritzt und ein nutart-

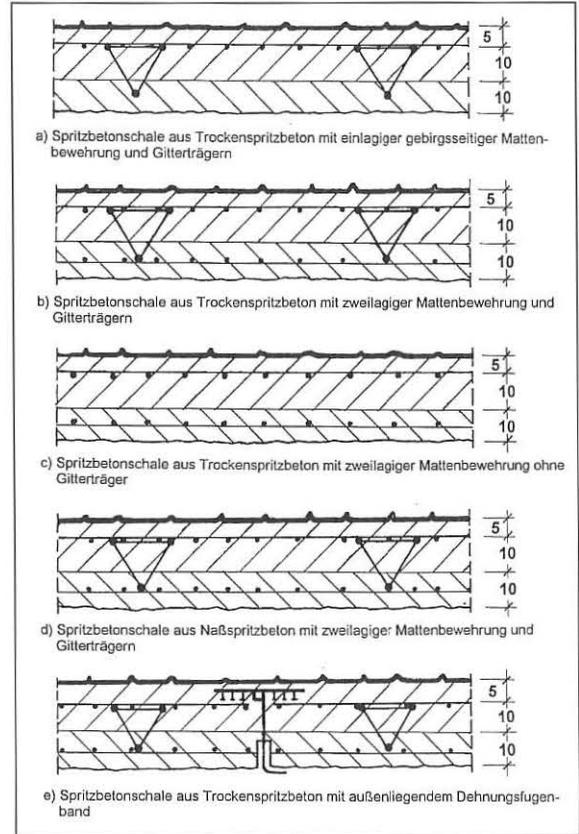


Bild 2: Varianten der einschaligen Spritzbetontunnelauskleidung im Versuchstunnel (Bochum, Baulos C1a)

Die Spritzbetonschale bestand aus einer 5 cm dicken gebirgsseitigen Versiegelungsschicht und zwei nachfolgend aufgetragenen Spritzbetonlagen aus je

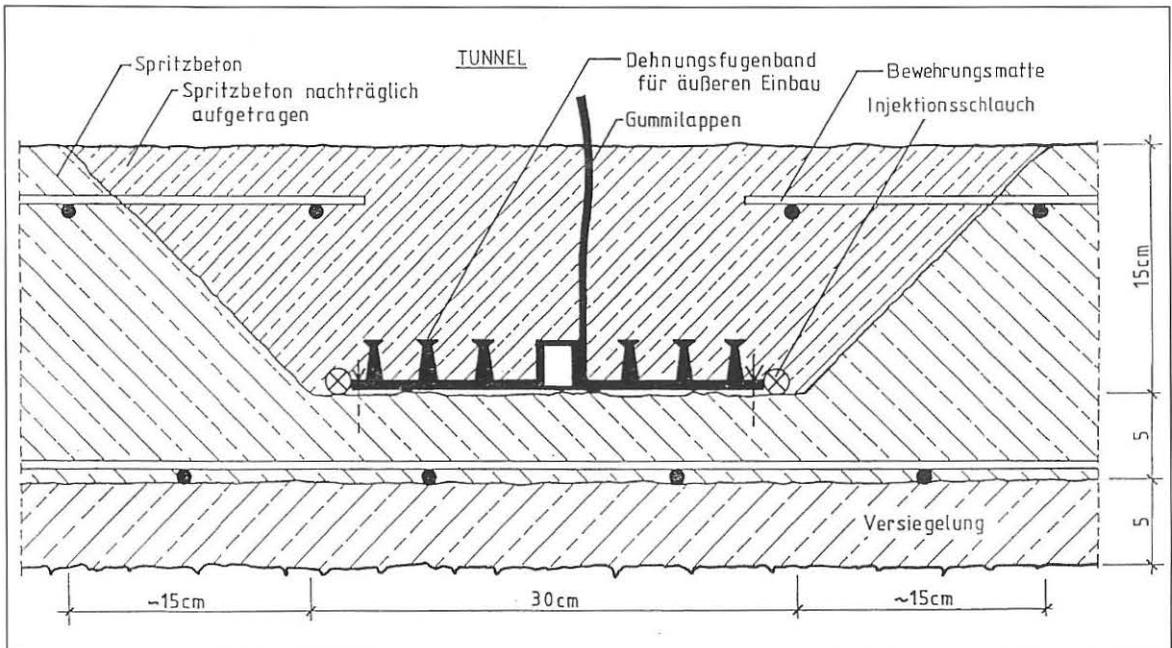


Bild 3: Anordnung eines Dehnungsfugenbandes in der einschaligen Tunnelauskleidung (Bochum Baulos C1a; Versuchsstrecke)

iger Fugenspalt zur Aufnahme eines Klemmprofils in der Spritzbetonschale hergestellt werden.

Risse in der Spritzbetonschale konnten bei allen Versuchsvarianten festgestellt werden. Die Risse traten erwartungsgemäß vornehmlich im Bereich der Gitterträger und in den Arbeitsfugen Kalotte/Ulme und Ulme/Sohle auf. Auch die Spritzbeton-Schalenabschnitte ohne Gitterträger und diejenigen mit Dehnungsfugen enthielten Risse. Die Spritzbetonschale wurde zunächst über Injektionsschläuche, die an den Gitterträgern bzw. der Mattenbewehrung befestigt waren, mit Wasserdruck (ca. 1 bar) belastet, um Leckagen auch in den Bereichen in denen kein Grundwasser anstand, aufzuzeigen. Nur so konnten die unterschiedlichen Schalenaufbauten objektiv bewertet werden. Es zeigten sich in allen Schalenabschnitten Undichtigkeiten insbesondere dort wo bereits Risse festgestellt worden waren. Nachfolgend wurde mit Hilfe der Injektionsschläuche der Versuchstunnel mit Polyurethan abgedichtet. Bereits wenige Monate nach der Injektion konnten wiederum Feuchtbereiche und vereinzelt Tropfwasserstellen festgestellt werden. Die Versuche haben ergeben, daß keine der ausgeführten Versuchsvarianten im Hinblick auf die Wasserundurchlässigkeit der Spritzbetonschale als besonders geeignet bezeichnet werden kann. Zur Herstellung der Wasserdichtigkeit des Tunnels wurde später eine Innenschale aus Rüttelbeton im Bereich der Versuchsstrecke eingebaut [2, 3, 4].

Eine weitere Ausführung in dieser Bauweise ist aus München bekannt geworden. Die eingleisige Versuchsstrecke mit einer Gesamtlänge von 60 m liegt im Baulos U6 West-5, Bahnhof Klinikum Großhadern. Die Spritzbetonschale besteht aus einer Erstsicherung aus Spritzbeton mit einer Dicke von 15 cm und zwei weiteren Spritzbetonlagen mit je einer Dicke von 10 cm. Im Rahmen dieser Versuchsstrecke wurden große Anstrengungen unternommen, um einen qualitativ sehr guten Spritzbeton herzustellen. Die geforderte Wasserundurchlässigkeit wurde durch die Verwendung von Mikrosilica erreicht. Um Risse durch hohe Abbinde Temperaturen möglichst zu vermeiden, wurde bei den bei den inneren Spritzbetonlagen auf die Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern verzichtet [5, 6, 7].

## 2. Konventioneller Spritzbeton in Kombination mit Rüttelbeton

Diese Konstruktionsvariante wurde u.a. in Bochum (z.B. Baulose D1/C1a, D6 und C3) und Bielefeld (Baulos 2312) ausgeführt [8, 9, 10, 11, 25]. Zunächst wird die äußere Spritzbetonlage hergestellt und nachfolgend ähnlich wie bei der zwei-

schaligen Bauweise die Lage aus Rüttelbeton. Der Unterschied zur zweischaligen Bauweise besteht in folgenden wesentlichen Punkten:

a) In der Statik sind folgende drei Lastanteile zu berücksichtigen [12]:

- die Belastung des vorlaufenden Spritzbeton-Schalenteils,
- die zeitlich bedingten Umlagerungskräfte nach Fertigstellung des inneren Schalenteils und
- die auf die Verbundschale wirkenden Laständerungen.

b) Ein guter Haftverbund zwischen den Betonlagen aus Spritzbeton und Rüttelbeton muß hergestellt werden.

c) Die Dicke der Betonkonstruktion (Spritzbeton und Rüttelbeton) kann um bis zu ca. 30 % reduziert werden. Hierdurch ergeben sich entsprechende Kostenvorteile (vgl. Punkt 6).

Der Haftverbund wurde im Baulos D1/C1a in Bochum dadurch erreicht, daß aus der gebirgsseitig angeordneten Spritzbetonschale Gitterträger hervorstanden, die in die nachfolgend hergestellte Innenlage aus Rüttelbeton integriert wurden (Bild 4). Nachteilig hierbei ist, daß entlang der Bewehrungsseile der Gitterträger Wasser bis in den Rüttelbeton gelangen kann. Später durchgeführte Schubversuche haben dann jedoch ergeben, daß auf eine spezielle Schubbewehrung, z.B. bei eingleisigen U-Bahnquerschnitten, verzichtet werden kann [1, 13, 19, 23]. In vielen Fällen wird ein ausreichender Schubverbund bereits dadurch erreicht, daß auf die saubere Spritzbetonschale der Rüttelbeton betoniert wird (Bild 4). So z.B. im Baulos D6 (Bochum) und Baulos 2312 in Bielefeld.

## 3. Stahlfaserspritzbeton

Die Auskleidung des eingleisigen, ca. 100 m langen Stadtbahn-Tunnels im Baulos Ebertstraße in Gelsenkirchen besteht aus einem gebirgsseitig aufgetragenen porösen Mörtel von ca. 5 cm Dicke und aus zwei nachfolgend eingebauten jeweils etwa 12,5 cm dicken (insgesamt 25 cm dick) Stahlfaserspritzbetonlagen. Die Mörtelschicht diente zur nachträglichen Injektion, um die Wasserundurchlässigkeit der Tunnelschale sicherzustellen. Nach Schließen der Baudröna geigten sich anfangs insbesondere im Bereich der Gitterträger Undichtigkeiten, die aber zum größten Teil nach etwa einem halben Jahr zugesintert waren. Zurück blieben nur noch wenige Feuchtestellen [14, 24].

## 4. Spritzbeton in Kombination mit Stahlfaserspritzbeton

Diese Ausführungsvariante wurde in Bielefeld im Los 2312, Jöllenbecker Straße, auf einem Ab-

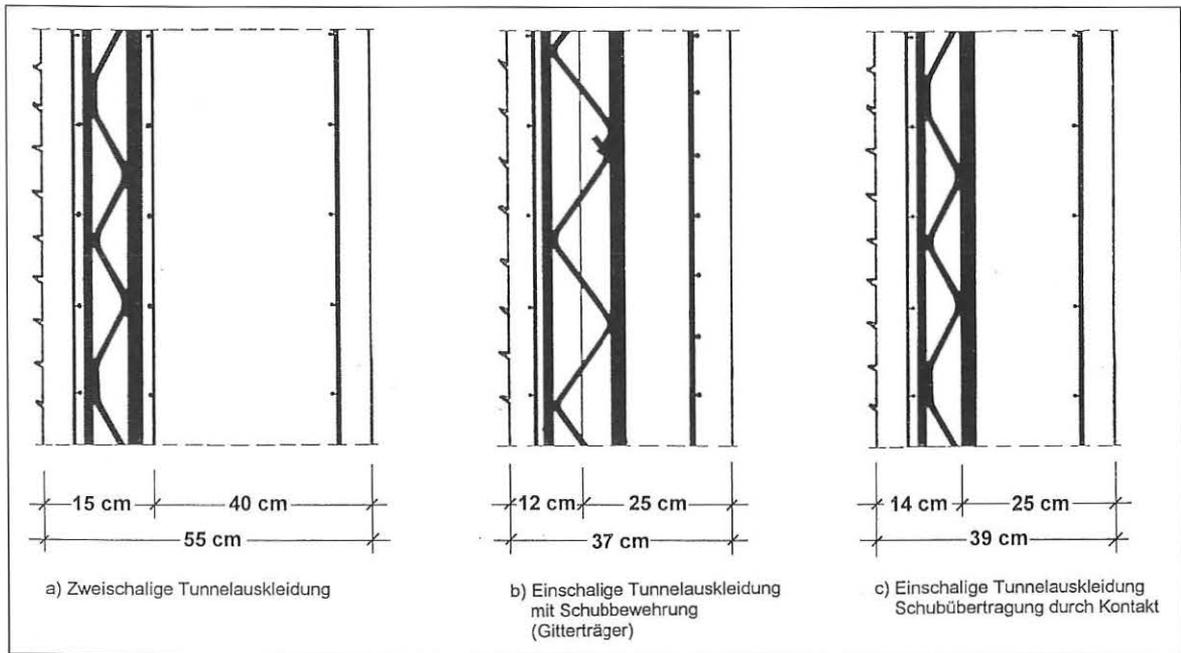


Bild 4: Aufbau und Dicke der zweischaligen und einschaligen Ort beton-Tunnelauskleidungen

schnitt von etwa 100 m als Sondervorschlag ausgeführt. Es handelt sich hier um eine reine Spritzbetonkonstruktion. Die erste Lage besteht aus 15 cm dickem konventionellem Trockenspritzbeton (ohne Faserzugabe) mit Gitterträgern und die zweite Lage aus einer 10 cm dicken fugenlosen Stahlfaserspritzbetonlage aus Naßspritzbeton. Die Gitterträger wurden so niedrig ausgebildet, daß sie in der ersten Lage vollständig eingespritzt werden konnten. Hierdurch sollten Wasserwegigkeiten entlang der Gitterträger vermieden werden. Bei unzureichender Dichtigkeit des Tunnels kann eine ca. 25 cm dicke Rüttelbeton-Innenschale nachträglich eingebaut werden. Bis auf einzelne Durchfeuchtungen und Tropfstellen ist die Spritzbetonschale bisher dicht geblieben [15].

#### 5. Spritzbeton in Kombination mit Stahlfaserpumpbeton

Im eingleisigen Stadtbahntunnel in Dortmund, Baulos K6a, wurde ein ca. 80 m langer Tunnelabschnitt in einschaliger Bauweise ausgeführt. Die gebirgsseitige Lage bestand aus ca. 15 cm dickem konventionellem Spritzbeton, der durch Gitterträger und einer Lage Mattenbewehrung verstärkt war. Die tunnelinnenseitige Lage wurde aus ca. 25 cm dickem Stahlfaser-Pumpbeton hergestellt. Die gesammelten Erfahrungen mit diesem Schalenaufbau sind insgesamt sehr positiv, so daß diese Konstruktion im S-Bahn-Los S4 in Dortmund sogar unter relativ schwierigen hydrologischen Randbedingungen (Wasserdruck ca.

1,2 bar über der Firste) in einigen Blöcken ausgeführt werden konnte. Die Spritzbetonlage wurde hier auf insgesamt 20 cm und die Stahlfaser-Pumpbetonlage auf 35 cm Dicke festgelegt [16].

#### 4. Wasserundurchlässigkeit einschaliger Spritzbetontunnel

Generell können bei einschaligen Ort beton-Tunnelauskleidungen Ausführungsvarianten unterschieden werden, bei denen alle eingebauten Lagen aus Spritzbeton (konventioneller Spritzbeton bzw. Stahlfaserspritzbeton oder eine Kombination aus beiden) oder die äußere Lage aus Spritzbeton und die innere Lage aus konventionellem Rüttelbeton (Normalbeton bzw. Stahlfaserbeton) bestehen. Die zuletzt genannte Ausführungsvariante wird Verbundbauweise genannt. Hier übernimmt normalerweise die WU-Beton-Innenschale die Aufgabe, den Tunnel abzudichten. Diese Tunnel können bei fachgerechter Ausführung und Einhaltung der Anwendungsgrenzen ausreichend abgedichtet werden. Es liegen sowohl für zweischalige Tunnel als auch für einschalige Tunnel in Verbundbauweise umfangreiche Erfahrungen vor [17].

Bei reinen Spritzbetonausführungen hingegen ergeben sich u.U. Probleme, den Tunnel ausreichend abzudichten. Grundsätzlich läßt sich Spritzbeton in kleinformatischen Proben wasserundurchlässig im Sinne von DIN 1045 herstellen. Eine großflächige, wasserundurchlässige Spritzbetonschale im Tunnelbau kann hingegen nicht ohne weiteres erreicht werden. Die Spritzbetonschale bleibt vielfach wasser-

durchlässig, z.B. an Rissen, Fehlstellen und Arbeitsfugen. Als maßgebende Ursache für Risse und Fehlstellen auch in einer fachgerecht ausgeführten Spritzbetonschale sind zu nennen [2]:

a) Äußere Belastung

Der junge Spritzbeton muß relativ früh einen Teil seiner äußeren Belastung, z.B. aus dem Gebirgsdruck, aufnehmen. Hierdurch verformt sich die Spritzbetonschale und es kommt zu Rissen, wenn der junge Spritzbeton die aus der Belastung entstehenden Zugspannungen nicht mehr schadlos aufnehmen kann.

b) Temperatur

Durch verschiedene Temperatureinflüsse (z.B. Hydratation, klimatische Temperaturänderungen) wird der Spritzbeton belastet. Im Tunnelbau kann sich in diesem Zusammenhang die Verwendung eines Erstarrungsbeschleunigers negativ auswirken. Der Erstarrungsbeschleuniger führt u.U. im Spritzbeton zu einem schnellen Anstieg der Wärmeentwicklung und hierdurch bedingt zu entsprechenden Rissen. Auf die Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers bei der Herstellung der gebirgsseitigen Spritzbetonschicht kann jedoch nicht verzichtet werden, da aus Gründen z.B. der Arbeitssicherheit für diesen Spritzbeton eine hohe Frühfestigkeit (z.B. 5 N/mm<sup>2</sup> nach 6 Stunden) gefordert wird.

c) Bewehrungsführung

Wenn die Spritzbetonschale wie bei der zweischaligen Bauweise hergestellt wird, dann sind Spritzschatten (Hohlräume) entlang der Bewehrung unvermeidbar. Diese Spritzschatten können eindringendes Wasser gleichmäßig in der Spritzbetonschale verteilen. Dieses Wasser kann dann an verschiedenen Stellen in den Tunnel eindringen und u.U. zur Korrosion führen. Um unnötige Fehlstellen in der Tunnelauskleidung zu vermeiden, ist bei der Bauausführung einer wasserundurchlässigen Spritzbetonschale mehr Sorgfalt und damit ein grösserer Arbeits- und Zeitaufwand zu veranschlagen als für die Spritzbetonschale bei der zweischaligen Bauweise. Das bisherige Abrechnungssystem für die Vortriebsmannschaften muß dementsprechend den Anforderungen der einschaligen Bauweise angepaßt werden. Eine besondere Schulung des Düsenführers für die Herstellung von einschaligen Spritzbeton-Auskleidungen erscheint unverzichtbar. Hiefür eignet sich z.B. der von der Tiefbau-Berufsgenossenschaft unter Beteiligung der STUVA durchgeführte Spritzbetonbauer-Lehrgang. Ferner müssen zur Kontrolle der ausgeführten Spritzbetonarbeiten einfache Meßmethoden gefunden werden, damit

zweifelsfrei der Nachweis erbracht werden kann, daß die Bewehrung fachgerecht eingespritzt worden ist. Allerdings zeigten Wasserundurchlässigkeitsversuche der STUVA nach DIN 1048, daß selbst unterschiedliche Bewehrungseisen, die parallel zur Spritzdüsenachse angeordnet waren, nicht wasserdicht mit herkömmlichen Mitteln (Betonzusammensetzung, Düsenführung, usw.) eingespritzt werden konnten. Der Spritzbeton ohne Bewehrung war hingegen im Sinne von DIN 1045 wasserundurchlässig (Bild 5). Auch die Vergleichsprobe aus normalem Rüttelbeton mit Bewehrung ließ keine Wasserwegigkeiten erkennen.

Dieses Untersuchungsergebnis wird auch durch Versuche am Materialprüfungsamt der Technischen Universität München bestätigt. Die Versuche zeigten dort, daß zwar die Festigkeit des Spritzbetons und die Verbundwirkung zwischen Spritzbeton und den eingespritzten Gitterträgern befriedigend waren, daß aber dennoch kein wasserundurchlässiger Spritzbeton mit Bewehrung hergestellt werden konnte [26].

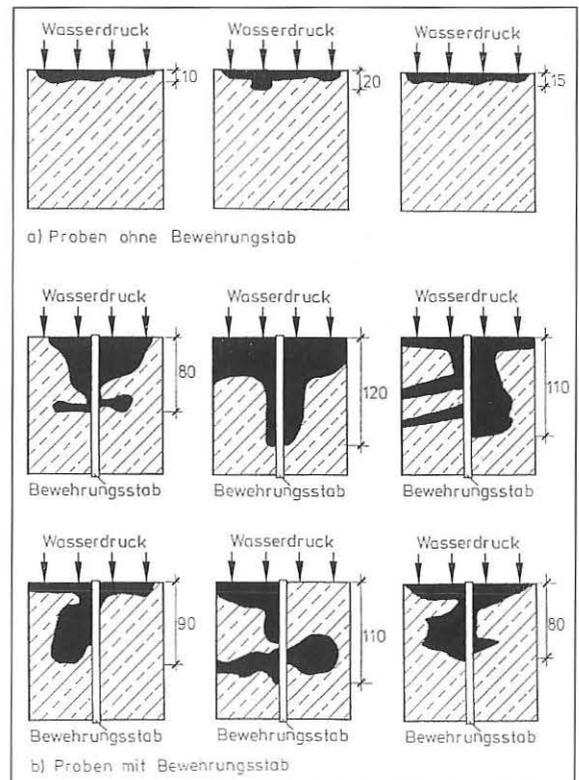


Bild 5: Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsprüfung von Spritzbetonproben ohne und mit Bewehrung (Die Achse der Spritzbetondüse wurde parallel zum Bewehrungsstab ausgerichtet, um möglichst wenig Spritzschatten zu erhalten)

d) Fugen

Bei langgestreckten Bauwerken aus wasserundurchlässigem Rüttelbeton werden wasserdicht ausgebildete Bewegungsfugen angeordnet, um Risse und damit Undichtigkeiten im Beton infolge von Temperaturänderungen, Schwinden usw. zu vermeiden. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Wirksamkeit von Fugen und deren Herstellung können z.B. wegen der Teilvertriebe (Kalotte, Strosse, Sohle) und die damit verbundenen vielen Arbeitsfugen nicht direkt auf die gebirgsseitige Spritzbetonauskleidung übertragen werden (Bild 6).

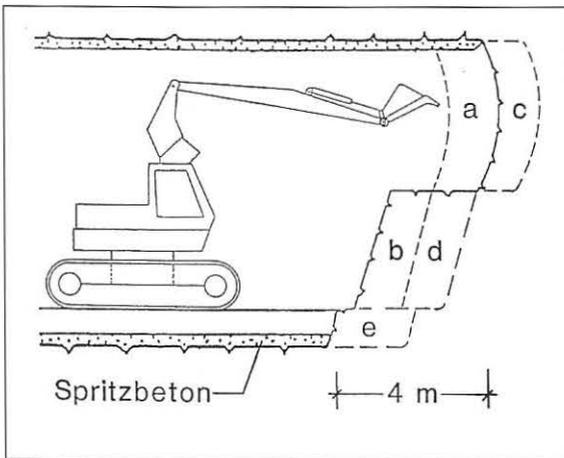


Bild 6: Zeitliche Abschlagsfolge bei der Spritzbetonbauweise

Die Erfahrungen im Versuchstunnel in Bochum haben deutlich gezeigt, daß auf die Anordnung von Dehnfugen in Spritzbetonauskleidungen verzichtet werden sollte [2]. Dies bedeutet aber, daß eine zusätzliche Bewehrung anzuordnen ist, um z.B. die Belastungen aus Schwinden sicher aufnehmen zu können.

Die Überlegungen zeigen, daß die Wasserdichtigkeit von einschaligen Spritzbetontunneln, wenn überhaupt, dann nur mit großem Aufwand sichergestellt werden kann. Eventuell sind spezielle Abdichtungsmaßnahmen (z.B. aufspritzbarer Flüssigkunststoff) erforderlich. Zu beachten ist jedoch, daß die Abdichtung nicht als Trennschicht zwischen den Spritzbetonlagen wirken darf, da dann der erforderliche Verbund nicht gegeben ist. Dies bedeutet, daß entweder das Abdichtungsmaterial so gewählt wird, daß eine gute Verzahnung zwischen der ersten Lage Spritzbeton, der Abdichtung und der zweiten Lage Spritzbeton gegeben ist (z.B. durch Verwendung von modifiziertem Kunstharz-Spritzbeton) oder daß die Abdichtung gebirgsseitig angeordnet wird. Die Abdichtung darf nicht durch den nachträglich

aufgebrachten Spritzbeton zerstört werden. Ferner muß der Spritzbeton an der Abdichtung gut haften können, um den Rückprall und damit auch die Kosten gering zu halten. Beim Auftrag von Flüssigkunststoffen im Tunnel müssen im besonderen Maße die bestehenden Vorschriften zum Gesundheitsschutz (z.B. Aerosole) und zur Arbeitssicherheit beachtet werden.

Hautabdichtungen sind für diesen Anwendungsfall nur z.B. mit spritzseitig befestigtem Gewebe als Haftverbesserung geeignet, und nur dann, wenn viele Nahtverbindungen vermieden werden können [1, 18]. Alternativ sind in speziellen Anwendungsfällen auch einschalige Tunnelauskleidungen in Verbindung mit einer wasserdichtenden Stahlhaut möglich (Bild 7) [20, 21].

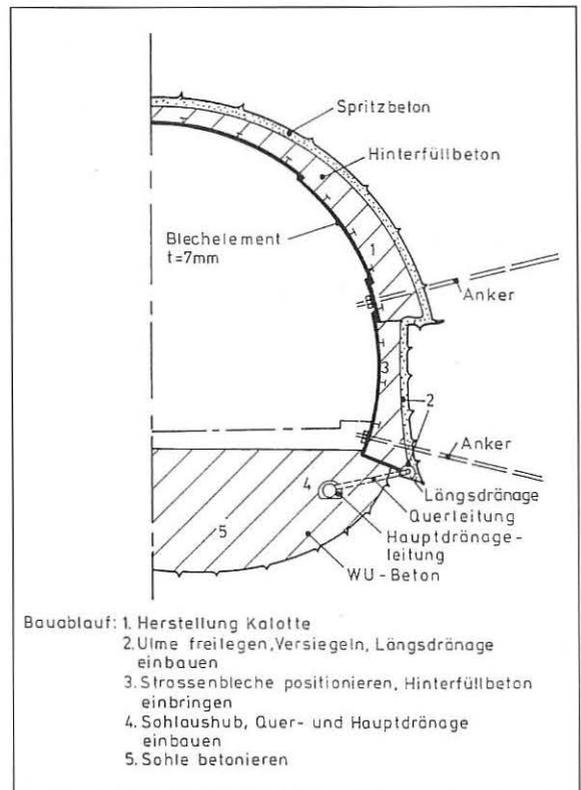


Bild 7: Einschalige Tunnelauskleidung mit Stahlblechelementen

Nach Auffassung der STUVA sollten daher einschalige Tunnel aus Spritzbeton (ohne Rüttelbeton) nur in Bereichen hergestellt werden, in denen kein Grundwasser oder nur ein sehr geringer Wasserandrang vorliegt, um die Dichtigkeit dieser Tunnel garantieren zu können. Weitere Einsatzgrenzen für die einschalige Spritzbetonbauweise sind bei asymmetrischen Belastungen (z.B. hervorgerufen durch Gebirgsdruck, Abgrabungen und Oberflächenbelastungen) und schlechten geologischen Verhältnissen gegeben.

## 5. Anforderungen an einschalige Ortbetontunnel

Aufgrund der gesammelten Erfahrungen sind folgende generelle Anforderungen an einschalige Tunnel aus Ortbeton (Spritzbeton und Rüttelbeton) zu stellen [1].

### 1. Wasserdruck

Der Bau von einschaligen Tunneln sollte nur bis zu einem anstehenden Wasserdruck von maximal etwa 1,5 bar in Erwägung gezogen und für diese Verhältnisse entsprechend dimensioniert werden.

### 2. Gebirgsseitige Lage aus Spritzbeton

Der Spritzbeton soll mindestens der Festigkeitsklasse B25 nach DIN 1045 entsprechen. Damit die Spritzbetonsicherung frühzeitig wirksam wird, ist eine hohe Druckfestigkeit erforderlich. Sie sollte z.B. nach 6 Stunden mindestens 5 N/mm<sup>2</sup> betragen. Bei der Herstellung und Prüfung des Spritzbetons sind die Anforderungen der DIN 18551 einzuhalten.

Die mittragende gebirgsseitige Spritzbetonlage erfordert bei der einschaligen Bauweise eine höhere Ausführungsqualität als bei der zweischaligen Bauweise. Durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Bereitstellungsgemisch, Geräteausstattung, Fachpersonal und Überwachung muß deshalb eine möglichst gleichmäßige Qualität des Spritzbetons sichergestellt werden.

### 3. Tunnelseitige Lage aus Spritzbeton

Es sollte durch besondere Maßnahmen (z.B. durch die Zugabe von Mikrosilica und den Wegfall von Erstarrungsbeschleunigern) sichergestellt werden, daß die Spritzbetonschale möglichst dicht ist.

Eine einschalige Tunnelauskleidung nur aus Spritzbeton sollte mindestens etwa 30 cm dick sein.

### 4. Rüttelbeton

Die Anforderungen an den Rüttelbeton der einschaligen Bauweise entsprechen denen für die wasserundurchlässige Innenschale bei der zweischaligen Bauweise. Die Betonrezeptur muß jedoch zusätzlich auf die besonderen Anforderungen der Verbundkonstruktion abgestellt sein (z.B. geringere Hydratationswärme, geringes Schwinden und Kriechen).

Die Dicke der tunnelseitigen WU-Rüttelbetonlage sollte bei der einschaligen Bauweise mindestens etwa 25 cm betragen.

### 5. Verbund

Der Verbund kann entweder durch Kontaktverzahnung oder durch eine Schubbewehrung erreicht werden. Bei einer WU-Beton-Innenschale sollte der Verbund möglichst nur durch Kontaktverzahnung erfolgen, um eine Wasserwegigkeit entlang der Schubbewehrung zu vermeiden.

In jedem Fall muß die Spritzbetonoberfläche vor

dem Aufspritzen oder Gegenbetonieren der nächsten Lage gesäubert werden (z.B. mit Hochdruckwasserstrahlen), um eine gute Haftung zu erzielen.

### 6. Bewehrung

Zur Vermeidung bzw. Verminderung der Ribbildung in der Betonschale ist die Bewehrung möglichst gleichmäßig zu verteilen (keine Bewehrungskonzentration).

Die Betondeckung der Bewehrung in der gebirgsseitigen Spritzbetonschicht soll mindestens 5 cm betragen. Es ist darauf zu achten, daß die Betondeckung tunnelseitig von 4 cm möglichst genau eingehalten wird, da mit größer werdender Betondeckung die Ribbreite überproportional anwächst [22].

### 7. Fugenanordnung

Aufgrund der Erfahrungen beim Bau des einschaligen Versuchstunnels in Bochum sollte bei einer Ausführung aller Lagen der Tunnelschale nur in Spritzbeton (ohne Rüttelbeton) auf Dehnfugen verzichtet werden [2, 3, 4, 17]. Die Bewehrung muß dann entsprechend verstärkt werden, um z.B. die Schwindbelastungen aufnehmen zu können [5]. Die Anzahl der Arbeitsfugen im tunnelseitigen Spritzbeton ist auf ein Minimum zu reduzieren. Die Arbeitsfugen in den einzelnen Lagen sollten stets gegeneinander versetzt werden.

Im Rüttelbeton hingegen sind in Abständen von ca. 8 m bis 10 m Dehnfugen mit Fugenbändern anzuordnen.

Die oben genannten allgemeinen Anforderungen an einschalige Tunnelauskleidungen aus Ortbeton müssen für den jeweiligen konkreten Anwendungsfall noch durch spezielle Anforderungen ersetzt bzw. ergänzt werden.

## 6. Kostenvergleich zwischen zweischaligen und einschaligen Tunnelauskleidungen aus Ortbeton

Ein erster Kostenvergleich zwischen der zweischaligen Bauweise und verschiedenen Ausführungsvarianten der einschaligen Bauweise wurde durchgeführt [1, 23]. Bei der Ermittlung der überschlägigen Kosten wurden folgende Annahmen getroffen:

- Es wurden nur die Kosten für die Herstellung der Tunnelschale angesetzt. Die Kosten für die Planung, Statik, Baustelleneinrichtung usw. bleiben unberücksichtigt.
- Auch die Gemeinkosten der Baustelle, allgemeine Geschäftskosten, Wagnis und Gewinn, wurden in den Vergleich nicht einbezogen.
- Es wurde ein eingleisiger U-Bahntunnel mit Kreisquerschnitt (Querschnitt ca. 36 m<sup>2</sup>) betrachtet.

Nr.	Variante	Kosten (geschätzt)	Bemerkung
1.	Zweischalige Bauweise 1. Lage: 15 cm Spritzbeton 2. Lage: 40 cm WU-Rüttelbeton	100 %	Bewährte Tunnelauskleidung
2.	Verbundbauweise 1. Lage: 15 cm Spritzbeton 2. Lage: 25 cm WU-Rüttelbeton	85 %	Stand der Technik bei Wasserdrücken bis ca. 1,5 bar und Querschnitten bis ca. 40 m <sup>2</sup>
3.	Spritzbetonschale 1. Lage: 15 cm Spritzbeton 2. Lage: 15 cm Spritzbeton	80 %	Nur bei geringen Auflasten und niedrigem Wasserdruck. Bisher noch nicht ausgeführt.
4.	Spritzbetonschale 1. Lage: 15 cm Spritzbeton 2. Lage: 10 cm Spritzbeton 3. Lage: 10 cm Spritzbeton	85 % - 90 %	Nur bei geringen Auflasten und niedrigem Wasserdruck. Bisher nur als Versuchsstrecke ausgeführt.
5.	Spritzbetonschale Gebirgssicherung mit 5 cm Spritzbeton Abdichtung 1. und 2. Lage mit je 12,5 cm	85 %	Nur bei geringen Auflasten und niedrigem Wasserdruck. Bisher noch nicht ausgeführt.
6.	Stahl tunnel Stahlhaut: 7 cm 30 cm unbewehrter Hinterfüllbeton	125 %	Bisher noch nicht ausgeführt.

Tab. 2: Kostenvergleich von Tunnels in ein- und zweischaliger Ortbetonbauweise ohne Stahlfaserzugabe

Die überschlägige Berechnung zeigte, daß die Kosten für einschalige Tunnelauskleidungen aus Stahlbeton je nach Ausführungsvariante bis zu ca. 20 % unter denen der herkömmlichen Tunnelschale (zweischalige Bauweise) liegen können. Spezielle Ausführungen z.B. mit einer Stahlhaut können auch teurer als zweischalige Tunnel werden (Tabelle 2). Bei der Beurteilung der ermittelten Kosten muß jedoch beachtet werden, daß die Kalkulation sich vor allem auf die einzubauenden Massen der Haupttitel Spritzbeton, Rüttelbeton, Stahl und Abdichtungsmaterial stützt. Diese Überlegungen wurden durch Kostenabschätzungen bestätigt, die in München für den dortigen U-Bahnbereich durchgeführt wurden. Hier wurden mögliche Kosteneinsparungen durch den Bau von einschaligen Spritzbetontunneln zu ca. 10 % [6] bzw. maximal etwa 15 % [5] abgeschätzt.

Der Kostenvorteil für die einschalige Tunnelauskleidung aus Stahlbeton erklärt sich insbesondere durch die insgesamt geringere Schalendicke (Bild 4) und den hierdurch bedingt verringerten Bodenaushub. Die ersten überschlägigen Kostenabschätzungen zeigen, daß im Verkehrstunnelbau mindestens ca. 10 % Kosteneinsparungen möglich sind, wenn ein-

schalig statt zweischalig gebaut wird. In den nächsten 10 Jahren (bis zum Jahr 2005) sind in Deutschland für die bisher übliche zweischalige Bauweise Tunnelrohbauposten von ca. 10 bis 15 Milliarden DM aufzuwenden. Geht man davon aus, daß nur die Hälfte des Tunnelbauvolumens einschalig erstellt werden kann, so erscheinen Einsparungen von ca. 1 bis 2 Milliarden DM möglich. Vor diesem Hintergrund ist es dringend erforderlich, die z.Z. noch offenen Fragen für die Herstellung von einschaligen Tunnelauskleidungen zu klären. Hierzu gehört bei reinen Spritzbetonausführungen insbesondere die Abdichtung der einschaligen Tunnel.

Kritisch anzumerken sei an dieser Stelle, daß in die Kostenbetrachtungen auch die Bauwerksqualität und die Kosten für die Instandhaltung mit einbezogen werden müssen. Diese Gesichtspunkte blieben bei den durchgeführten Kostenabschätzungen jedoch unberücksichtigt.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Einschalige Tunnel aus Ortbeton können in unterschiedlichen Ausführungsvarianten hergestellt wer-

den. Einschalige Ausführungen in der Kombination Spritzbeton mit Rüttelbeton (Verbundbauweise) sind fachgerecht und in ausreichender Qualität herstellbar. Ferner liegen Erfahrungen z.B. für die Instandhaltung seit etwa 10 Jahren z.B. in Bochum vor. Darüber hinaus sind auch erfolgreich Stahlfaserbetonausführungen in z.B. Dortmund und Bielefeld realisiert worden [1, 27]. Vorteilhaft sind hier in jedem Fall Ausführungen, bei denen Stahlfaserpumpbeton als Innenlage verwendet wird. Diese Beispiele zeigen deutlich, daß bereits einschalige Ortbetontunnel Stand der Technik sind. Es gilt nun, dort, wo diese Ausführungen eingesetzt werden können, die jeweiligen Bauherren für die einschalige Bauweise zu gewinnen.

Anders hingegen liegen die Verhältnisse bei Ausführungsvarianten, die ausschließlich in Spritzbeton ausgeführt werden. In diesem Bereich wurden bisher nur Tunnelabschnitte, z.B. in Gelsenkirchen, Bochum, Bielefeld und München ausgeführt. Diese Beispiele haben zu teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnissen geführt. Äußerst schwierig erscheint es, einschalige Spritzbeton-Tunnel dauerhaft abzudichten. Erste Ansätze zu einer Umsetzung in die Praxis wurden gemacht. Vorteilhaft kann diese Ausführungsvariante insbesondere bei kurzen Tunnelängen (z.B. Querschläge, Treppenaufgänge) oder bei Tunnelabschnitten mit sich veränderndem Tunnelquerschnitt eingesetzt werden, da in diesen Fällen die aufwendige Handschalung entfällt. Auch in einigen Bereichen, in denen eine besonders stark dimensionierte gebirgsseitige Spritzbeton-Sicherung erforderlich ist, sollte überlegt werden, ob eine einschalige Tunnelauskleidung vorteilhaft ist. Dies gilt z.B. für Spritzbetonauskleidungen in Druckluftvortrieben, die nach dem Absenken der Druckluft nicht mehr vom Luftdruck gestützt werden und deshalb dann nicht nur den gesamten Erddruck, sondern auch noch den Wasserdruck aufnehmen müssen.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, daß einschalige Tunnelbauwerke, die ausschließlich mit Spritzbeton hergestellt werden, zur Zeit noch nicht Stand der Technik sind. Weitere Erprobungen, insbesondere unter Verwendung von Stahlfaserbeton, sind erforderlich, um Tunnel zukünftig ohne nennenswerte Qualitätseinbußen wirtschaftlicher (z.B. mit Spritzrobotern) bauen zu können.

## 8. Literatur

- [1] Schreyer J.; Maidl, B.; Koenning, R.; Klönne, H.: Konstruktive und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Herstellung von Tunneln in einschaliger Bauweise. Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bonn, 1989 und 1990.
- [2] Schreyer, J.; Laue, G.: Einschalige Spritzbetonbauweise - Probleme der Wasserundurchlässigkeit. Forschung + Praxis, Band 29, Seiten 51 - 54; Herausgeber: STUVA, Köln; Alba-Buchverlag, Düsseldorf, 1982.
- [3] Schreyer, J.: Einschalige Spritzbetonbauweise in Bochum. Fachtagung: Spritzbeton-Technologie, Innsbruck, BMI 1985, Seiten 97 - 100.
- [4] Schreyer, J.: Forschungsvorhaben "Einschalige Spritzbetonbauweise" - nennenswerte Ergebnisse und Empfehlungen. Bochumer Querschnitte, (Dokumentation des Stadtbahnbaus in Bochum von 1973 bis 1989) 1990, Seiten 144 - 153.
- [5] Gebauer, B.: Die einschalige Spritzbetonbauweise im Stollen- und Verkehrstunnelbau, ein Ergebnis aus praxisorientierter Forschung und Ausführung. Baumaschine - Baugerät - Baustelle, Heft Nr. 4/1991, Seiten 16 - 21.
- [6] Weber, J.: Die einschalige Spritzbetonbauweise aus der Sicht des Auftraggebers. 3. Internationale Fachtagung Spritzbeton-Technologie, Innsbruck, BMI 1990, Seiten 19 - 27.
- [7] Kusterle, W.; Lukas, W.: Einschalige Spritzbetonbauweise - Einsatz beim U-Bahnbau München. Beton Nr. 3, 1992, Seiten 135 - 140.
- [8] Sager, H.-J.: Entwicklung für einschalige Bauverfahren mit Anwendungsbeispielen beim Stadtbahnbau in Bochum. Mitteilungen Nr. 85-6, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1985, Seiten 73 - 86.
- [9] Laue, G.; Schultz, H.; Klönne, H.: Wirklichkeitsnahe Bemessung von oberflächen-nahen Tunnelbauwerken im Locker- und Felsgestein; 6. Internationaler Kongreß für Felsmechanik, Montreal, 1987.
- [10] Schmidt, A.: Berechnung von zweischaligen Tunnelauskleidungen unter Berücksichtigung des Verbundes zwischen Spritz- und Pumpbeton. Bauingenieur 61 (1986), Seiten 63 - 72.

- [11] Sager, H.-J.:  
Baulos D1/C1a - Entwicklung für einschalige Bauverfahren; Bochumer Querschnitte. (Dokumentation des Stadtbahnbaus in Bochum von 1973 bis 1989) 1990, Seiten 136 - 141.
- [12] Schmidt-Schleicher, H.; Lippert, D.:  
Zur Berechnung und Konstruktion von einschaligen Verkehrstunnelbauten aus Stahlbeton im oberflächennahen Bereich. Konstruktiver Ingenieurbau Berichte, Heft 40, 1982, Seiten 17 - 23.
- [13] Klönne, H.:  
Entwicklungen im oberflächennahen Tunnelbau Bochumer Querschnitte. (Dokumentation des Stadtbahnbaus in Bochum von 1973 bis 1989) 1990, Seiten 142 - 143.
- [14] Westhaus, K.-H.; Flöttmann, H.:  
Einschaliger Tunnel in Stahlfaser-Spritzbetonbauweise - Erfahrungsbericht und Empfehlung für weitere Ausführungen. Forschung und Praxis, Band 29, Herausgeber: STUVA, Köln; Alba-Buchverlag, Düsseldorf, 1982.
- [15] Brogi, E.:  
Neuere Entwicklungen beim Stadtbahnbau in Bielefeld. Beton Nr. 3, 1992, Seiten 119 - 123.
- [16] Maidl, B.:  
Technische und wirtschaftliche Vorteile von einschaligen Konstruktionen aus Stahlfaserbeton zur Sicherung von Hohlräumen. 7. Internationaler Kongress über Felsmechanik, Aachen, 1991, Tagungsband, Seiten 1151 - 1155.
- [17] Klönne, H.:  
Entwicklungen im oberflächennahen Tunnelbau. Bochumer Querschnitte, (Dokumentation des Stadtbahnbaus in Bochum von 1973 bis 1989) 1990, Seiten 58 - 65.
- [18] Schreyer, J.:  
Abdichtung einschaliger Tunnel. Tunnelbau-Taschenbuch 1990, Glückauf-Verlag, Seiten 237 - 261.
- [19] Koenning, R.:  
Untersuchung von Verbundfugen einschaliger Tunnelsicherungen unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen. Mitteilungen Konstruktiver Ingenieurbau 91-4, Bochum 1991.
- [20] Schreyer, J.; Heffels, P.:  
Einschalige Tunnelauskleidung aus Stahlblechen und unbewehrtem Hinterfüllbeton, STUVA-Forschungsbericht 20/1986.
- [21] Schreyer, J.; Heffels, P.:  
Überlegungen zu einer neuartigen Tunnelauskleidung aus Stahlblechen und Hinterfüllbeton. Tunnelbau-Taschenbuch, 1989, Seiten 253 - 281, Glückauf-Verlag, Essen.
- [22] Deutscher Beton-Verein:  
Stahlbetoninnenschalen. DBV-Sachstandsbericht Stahlbetoninnenschalen im U-Bahnbau, Oktober 1994.
- [23] Schreyer, J.:  
Konstruktive und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Herstellung von Tunneln in einschaliger Bauweise. Vortrag auf dem Internationalen Symposium "Forschung und neue Technologien im Verkehr", Juni 1988, Hamburg, Tagungsband, Seiten 110 - 120.
- [24] Peters, H.L.:  
Einschaliger Tunnelbau in Stahlfaserspritzbetonbauweise. Deutscher Betontag 1983 in Berlin, Tagungsband, Seiten 484 - 496.
- [25] Schmidt-Schleicher, H.; Schulz, H.; Klönne, H.; Lippert, D.:  
Stadtbahntunnel in Verbundbauweise - Untersuchungen und Erfahrungen. Taschenbuch für den Tunnelbau 1988, Glückauf-Verlag, Seiten 161 - 214.
- [26] Eber, A.:  
Gutachterliche Stellungnahme über Qualitätsuntersuchungen der Verbundbauweise Spritzbeton-Gitterträger. (unveröffentlicht).
- [27] Maidl, B.:  
Stahlfaserbeton. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1991.