
Statische Berechnung und Qualitätssicherung der Verbundfuge bei der Einschaligen Spritzbetonbauweise

STRUCTURAL DESIGN AND QUALITY ASSURANCE OF THE JOINT BETWEEN OUTER AND INNER LAYER WHEN USING THE SINGLE-SHELL SHOTCRETE LINING METHOD

JÜRGEN SCHWARZ

Bei der üblicherweise im Tunnelbau ausgeführten zweischaligen Bauweise aus Spritzbetonaußenschale und Ortbetoninnenschale wird die Tragfunktion der Außenschale im Endzustand nicht berücksichtigt. Bei der Einschaligen Spritzbetonbauweise wird in der statischen Berechnung die tragende Funktion der Erstsicherung an der Abtragung aller Lasten des Endzustandes angesetzt. Dazu ist es notwendig, einen definierten Verbund zwischen Außenschicht (= Erstsicherung) und Innenschicht herzustellen und nachzuweisen. Die Verbundfuge wird durch die Lastfälle "Temperatur" und "Schwinden" mit Zugspannung, durch die äußere Belastung zusätzlich mit Schubspannungen beansprucht. Eine kombinierte Zug-Schub-Belastung ist versuchstechnisch in situ nur schwer darstellbar, der Nachweis der Qualität der Verbundfuge für diese Beanspruchung nicht möglich. Unverzichtbar für die Genehmigungsfähigkeit der Einschaligen Bauweise ist jedoch ein zweifelsfreier Nachweis der Qualität der Verbundfuge. Im statischen Nachweis wird deshalb die Zug-Schub-Belastung in eine reine Zugbeanspruchung umgerechnet. Für diese Belastung sind einfache Versuche der Abreißfestigkeit möglich. Diese können in ausreichender Anzahl durchgeführt und statistisch ausgewertet werden. Erfahrungen über die notwendige Vorreinigung der Schichten sowie die erreichten Haftzugfestigkeiten werden mitgeteilt.

Traditional double-shell tunnel linings consisting of a shotcrete outer lining and a cast-in-place concrete inner lining do not take account of the load-bearing function of the outer shell in the final state.

When using the single-shell shotcrete lining method, by contrast, the structural design adequately considers the load-bearing function of the primary support for the transmission of all loads in the final state. For this purpose, it is necessary to establish and verify a defined bond between outer layer (= primary support) and inner layer.

Tensile stresses due to the load cases "temperature" and "shrinkage" as well as shear stresses due to external loads act on the joint between outer and inner layer. As it is quite difficult to simulate combined tensile-shear stresses by means of in-situ tests, the performance of the joint in this respect cannot be demonstrated.

However, for the single-shell method to pass the qualification test, it is indispensable to prove the reliability of the joint. Therefore, in the structural analysis the tensile-shear stresses are converted into pure tensile stresses. For this type of loading a sufficient number of simple adhesive strength tests can be performed and be evaluated statistically. Experience gained with respect to the required pre-cleaning of layers and the adhesive strength obtained will be reported in the paper.

1. Die "Einschalige Spritzbetonbauweise"

Bei der üblicherweise im Tunnelbau ausgeführten zweischaligen Bauweise aus Spritzbetonaußenschale und Ortbetoninnenschale wird die Tragfunktion der Außenschale (= Tunnelsicherung) im Endzustand nicht berücksichtigt. Bei der "Einschaligen Bauweise" wird ein definierter Verbund zwischen der Tunnelsicherung - hier als "Außenschicht" bezeichnet - und der oder den "Innenschichten" hergestellt. Alle Lasten des Endzustandes werden vom Verbundquerschnitt aus Außenschicht und Innenschicht abgetragen.

Eine richtungsweisende Anwendung dieses Konzeptes erfolgte 1991 durch die Dyckerhoff & Widmann AG auf einer 60 m langen Strecke in dem Münchner U-Bahnlos 6 West 5, unter Beratung des Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Innsbruck [1].

Kennzeichnend für diese Entwicklung der Einschaligen Spritzbetonbauweise sind vier Merkmale:

- Zeitlicher Versatz von Außenschichten und Innenschichten
- Hochdruckreinigung der Verbundflächen
- Fugenlose Tunnelröhre
- Innenschichten aus Spritzbeton hoher Qualität

Beim U-Bahn-Tunnel Los 6 West 5 wurde jede Phase der Herstellung der Schale meßtechnisch überwacht [2]. In *Tabelle 1* sind die wesentlichen Meßergebnisse für die Innenschichten zusammengestellt.

Druckfestigkeit	55 MN/m ²	28 Tage
E-Modul	31000 kN/m ²	28 Tage
Spaltzugfestigkeit	4,7 MN/m ²	28 Tage
Wassereindringtiefe	18 mm	28 Tage
Schwindmaß	0,4 ‰	40 Tage
Abkühlung	12 °C	300 Stunden

Tabelle 1: Messungen an den Innenschichten

Die Durchmesser-/Dickenverhältnisse des Tunnels sind in *Tabelle 2* angegeben.

Ausbruchquerschnitt	38 - 52 m ²
Mittlerer Durchmesser	7,90 m
Außenschicht	0,15 m
Innenschichten	0,20 m

Tabelle 2: Geometrie

2. Beanspruchung der Verbundfuge

Entscheidend für den Erfolg der Einschaligen Spritzbetonbauweise ist der Nachweis, daß alle Kräfte zwischen den einzelnen Schichten der Auskleidung durch Haftverbund, ohne Bewehrung, übertragen werden. Im folgenden werden die einzelnen Belastungskomponenten zusammengestellt.

2.1 Temperatur und Schwinden

Nach Aufbringen der Innenschichten erhöht sich die Temperatur im Frischbeton durch die Entwicklung der Hydrationswärme. Beim folgenden Abkühlungsvorgang verkürzt sich die Innenschicht gegenüber der Außenschicht. Außenschicht und Innenschicht sind statisch betrachtet ein gekoppeltes elastisches 2-Schichten-System.

Bei der gemessenen Abkühlung von $\Delta T = 12^\circ$ wird die Verbundfuge mit einer radialen Zugspannung von

$$\sigma_{r,T} = 0,05 \text{ MN/m}^2$$

beansprucht.

Das Schwinden der Innenschicht erzeugt, nach demselben statischen System, ebenfalls Zugspannungen in der Verbundfuge. Das gemessene Schwindmaß von 0,4 ‰ erzeugt eine radiale Zugspannung von

$$\sigma_{r,S} = 0,20 \text{ MN/m}^2.$$

2.2 Porenwasserdruck

Verfahrensbedingt hat die Innenschicht eine geringere Wasserdurchlässigkeit als die Außenschicht. Deshalb muß man davon ausgehen, daß der Porenwasserdruck vollständig in der Verbundfuge aufzunehmen ist und dort radiale Zugspannungen erzeugt.

Bei einem Druck von 5 m Wassersäule ergibt sich somit die Zugspannung

$$\sigma_{r,w} = 0,05 \text{ MN/m}^2.$$

2.3 Äußere Belastung: Gebirgsdruck

Im Bauzustand wird die Gebirgsbelastung vollständig von der Außenschale (= Spritzbetonsicherung) aufgenommen. Die Verbundschale insgesamt bekommt Lasten aus:

- Kriechumlagerung von der Außenschicht auf die Gesamtschale
- Zusätzlicher Wasserdruck
- Zusätzliche Belastung, z. B. aus Verkehr oder seitlicher Abgrabung.

Aus diesen Lastfällen ergibt sich die Belastung der Gesamtschale mit Normalkräften, Biegemomenten und Querkäften, die mit den üblichen Mitteln der Tunnelstatik berechnet werden.

Wesentliche Beanspruchung der Verbundfuge liefern nur die Querkäfte, als Schubbeanspruchung der Verbundfuge mit:

$$\tau_t = \frac{1,5 * Q}{d_a + d_i} \left(1 - \frac{d_a - d_i}{d_a + d_i}\right)^2$$

Die Tunnelschalen werden in der Stützlinie konstruiert, Momente und Querkäfte sind deshalb untergeordnet gegenüber der Normalkraftbelastung. Aus den daher relativ kleinen Querkäften ergibt sich im U-Bahntunnel 6 West 5 die Verbundschubspannung zu

$$\tau_t = 0,30 \text{ MN/m}^2.$$

3. Bemessungskonzept

Das Konzept des rechnerischen Nachweises wird in [3] ausführlich dargestellt.

Um eine sinnvolle statistische Auswertung der Messungen der Qualitätssicherung zu ermöglichen und um Sicherheitsbeiwerte festlegen zu können, beruht das Bemessungskonzept auf den charakteristischen Festigkeitswerten, das sind die 5 %-Fraktile-Werte der Festigkeiten.

Mit dieser Voraussetzung kann aus zahlreichen Schubversuchen belegt werden, daß die charakteristische Schubfestigkeit mindestens so groß wie die charakteristische Zugfestigkeit ist. Die Zug- und die Schubbelastungen der Verbundfuge werden - auf der sicheren Seite - addiert.

$$\sigma = \Sigma \sigma_r + \tau_t$$

Der zu fordernde Sicherheitsbeiwert für die Verbundfuge hängt von den möglichen Folgen des Versagens ab. Wenn die Standsicherheit des Tunnels auch ohne Verbund nachgewiesen werden kann, geht es nur noch um den Nachweis der Gebrauchsfähigkeit, nämlich der Wasserdichtigkeit des Tunnels. Hierfür genügt ein Sicherheitsbeiwert von

$$\gamma = 1,25.$$

Damit ist die erforderliche Haftzugfestigkeit der Verbundfuge als charakteristischer (5 %-Fraktile) Wert nachzuweisen mit

$$\text{erf } \beta_{ZC} = 1,25 * (\Sigma \sigma_r + \tau_t).$$

Der praktische Nachweis der Haftzugfestigkeit erfolgt zum größten Teil mit Abreißversuchen, in situ nach der Hochdruckreinigung. Hierzu eignen sich

die aus der Betoninstandsetzung bekannten Geräte [4]. Einige Versuche sollten zusätzlich als Abreißversuche an nach Fertigstellung aller Schichten entnommenen Bohrkernen durchgeführt werden.

4. Bemessungsbeispiel

Für die Anwendung im U-Bahn-Los 6 West 5 ergeben sich für den statischen Nachweis folgende Werte: erf $\beta_{ZC} = \gamma (\Sigma \sigma_r + \tau_t) = 1,25 * (0,20 + 0,05 + 0,05 + 0,30)$
erf $\beta_{ZC} = 0,62 \text{ MN/m}^2$.

In situ wurden 54 Haftzugmessungen der vorgereinigten Oberfläche durchgeführt. Die statistische Auswertung ergab einen Mittelwert von 1,87 MN/m² und einen 5 %-Fraktile-Wert von

$$\beta_{ZC} = 0,87 \text{ MN/m}^2.$$

Insgesamt 30 Abreißversuche am Bohrkern ergaben einen Mittelwert von 2,55 MN/m² und einen 5 %-Fraktile-Wert von

$$\beta_{ZC} = 1,33 \text{ MN/m}^2.$$

Hieraus sieht man, daß die weniger aufwendigen Haftzugmessungen Werte auf der sicheren Seite liefern.

5. Bemessung und Prüfung

Nach den Versuchen am U-Bahntunnel 6 W5 kann eine Verallgemeinerung und Vereinfachung von Bemessung und Prüfung vorgeschlagen werden:

a) Erforderliche Haftzugfestigkeit

- Grundwert aus Temperatur und Schwinden: $\sigma_{r,TS} = 0,25 \text{ MN/m}^2$
- Porenwasserdruck: $\sigma_{r,P} = P$
(P = Außenwasserdruck)

- Schubspannung aus Querkraft:
- Sicherheitsbeiwert:

$$\tau_b = \frac{1,5 * Q}{d_a + d_i} \left(1 - \frac{d_a - d_i}{d_a + d_i}\right)^2$$

- Verbund für Standsicherheit erforderlich

$$\gamma_C = 2,0$$

- Verbund nur für Wasserdichtigkeit erforderlich

$$\gamma_C = 1,25$$

Damit ergibt sich: erf $\beta_{ZC} = \gamma_C * (0,25 + P + \tau_t)$

b) In-situ-Nachweis der Haftzugfestigkeit

- Nachweis der Reinigung der Außenschicht mit Abreißversuchen nach ZTV-SIB 9 Stück je 1000 m², aber mindestens 15 Stück

Die erforderliche charakteristische Festigkeit gemäß statischer Berechnung ist nachzuweisen.

- Güteüberwachung der Zugfestigkeit aus Bohrkernen
1 Stück je 1000 m², aber mindestens 3 Stück. Jeder Bohrkernversuch muß über der charakteristischen Festigkeit liegen, sonst sind weitere Nachprüfungen, gegebenenfalls auch eine statistische Auswertung, erforderlich.

5. Zusammenfassung

Mit der Schematisierung der Bemessung und Prüfung einer in "Einschaliger Spritzbetonbauweise" hergestellten Tunnelauskleidung wird ein Mittel zur Vereinfachung einer prüffähigen Berechnung dieser Bauweise zur Verfügung gestellt. Der Berechnungsaufwand entspricht der üblichen Statik, der Versuchsaufwand ist kaum höher als die Güteüberwachung einer normalen BII-Baustelle. In der Ausführung sind weitere Optimierungen erforderlich. Wenn dies gelingt, wird es weitere Anwendungen der innovativen Bauweise und eine Fortentwicklung der Technologie geben.

6. Literatur

- [1] Honnefelder, N.; Theimer, G. U.:
Einschalige Spritzbetonbauweise im Münchener U-Bahn-Bau - Erfahrungen und Entwicklungen. Bauingenieur 69 (1992) September 1992.
- [2] Neeb, J.; Schwarz, J.:
Einschalige Spritzbetonbauweise im Münchener U-Bahn-Bau: Ausführung einer Teststrecke im Baulos U6-West 5. Versuchsbericht der Dyckerhoff & Widmann AG, München, 1991.
- [3] Kupfer, H.; Kupfer, H.:
Statische Wirkungsweise und Verbundverhalten der Spritzbetonschichten des einschaligen Tunnelbaues. Spritzbeton-Technologie, 3. Internationale Fachtagung, Innsbruck-Igls, 1990.
- [4] ZTV-SIB 87:
Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Bundesminister für Verkehr, 1987.