

Einschalige Spritzbetonbauweise in Bochum

Dr.-Ing. Jörg SCHREYER
 STUVA, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Köln
 und Dipl.-Ing. Gert LAUE
 Stadtbauamt Bochum

1. EINLEITUNG

Bei der unterirdischen Herstellung von Verkehrstunneln gelangt in großem Umfang die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) zur Anwendung. Dabei wird die Tunnelauskleidung zur Zeit üblicherweise zweischalig ausgeführt. Eine erste Spritzbetonschale dient der Hohlraumsicherung. Die anschließend eingebrachte Gußbetoninnenschale nimmt die statischen Lasten auf und stellt die Wasserdichtigkeit sicher. Wenn die Spritzbetonschale als vorläufige und zugleich endgültige Tunnelauskleidung genutzt werden könnte, ließen sich erhebliche Einsparungen erreichen. Diese betreffen sowohl den Bodenaushub als vor allem auch Material- und Personalkosten. Letzteres beruht insbesondere darauf, daß ein Arbeitsgang entfällt, und die Bauzeit deutlich verkürzt würde.

Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens war es, die einschalige Spritzbetonbauweise näher zu untersuchen. Hierzu wurden unter anderem Versuche an Spritzbetonproben durchgeführt und ein Versuchstunnel einschalig aufgeföhrt. Die Stadt Bochum stellte einen 100 m langen eingeleisigen U-Bahn-Tunnelabschnitt im Stadtbahn Baulos Cla als Versuchstunnel zur Verfügung.

2. PROBLEME DER EINSCHALIGEN SPRITZBETONBAUWEISE

Grundsätzlich läßt sich Spritzbeton zumindest in kleinformatigen Proben wasserundurchlässig im Sinne von DIN 1048, Teil 1, herstellen. Eine großflächige wasserundurchlässige Spritzbetonschale im Tunnelbau kann hingegen zur Zeit nur mit Zusatzmaßnahmen (z.B. Injektionen) erreicht werden. Die Spritzbetonschale bleibt vielfach wasserundurchlässig z.B. an Rissen, Fehlstellen und Arbeitsfugen. Als maßgebende RiBursachen auch in einer fachgerecht ausgeführten Spritzbetonschale sind zu nennen:

2.1 Äußere Belastung

Anders als der normale Rüttelbeton im Hochbau muß im Tunnelbau der junge Spritzbeton relativ früh bereits einen Teil der äußeren Belastung z.B. aus dem Gebirgsdruck aufnehmen. Hierdurch verformt sich die Spritzbetonschale. Risse infolge solcher Verformungen treten

dann auf, wenn der junge Spritzbeton einerseits diesen Formänderungen nicht mehr plastisch zu folgen vermag und andererseits seine Zugfestigkeit noch zu gering ist, um Spannungen aus diesen Verformungen rissefrei aufnehmen zu können.

2.2 Temperatur

Eine Änderung der Betontemperatur bewirkt eine Volumenänderung des Betons. Sobald der Beton anfängt, zu erstarren und zu erhärten, kann er diesen Verformungen im allgemeinen nicht mehr ungehindert folgen. Es entstehen dann Zugspannungen im Beton. Man unterscheidet:

- Ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt (stärkere Abkühlung an einem oder beiden Rändern als im Kern des Bauteils)
- Änderung der mittleren Betontemperatur infolge Hydratation (Temperaturanstieg infolge Hydratation und anschließende Abkühlung auf Luftumgebungstemperatur)
- Klimatische Temperatureinflüsse (Einfluß der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen)

2.3 Schwinden

Unter Schwinden wird die Verkürzung des unbelasteten Betons während der Austrocknung verstanden. Dabei wird angenommen, daß der Schwindvorgang durch die im Beton wirkenden Spannungen nicht beeinflußt wird. Inwieweit das Schwinden der Spritzbetonschale auch zu Rissen führt, kann theoretisch nur schwer beurteilt werden.

a) Schwindrisse in der Spritzbetonschale werden begünstigt durch:

- Relativ hohen Zementgehalt im aufgetragenen Spritzbeton,
- ungleichmäßige Betonzusammensetzung (z.B. Wasser- und BE-Mittel-Zugabe, Rückprall),
- Verdunstungsmöglichkeit durch hohe Luftgeschwindigkeit im Bereich der Baulüftung,
- eventuellen Wasserentzug des Spritzbetons durch die Versiegelungsschicht,
- Verformungsbehinderung z.B. durch das Fehlen von Fugen oder die Verzahnung mit dem Gebirge.

- b) Die Gefahr von Schwindrissen in der Spritzbetonschale wird vermindert durch:
- Schnelle Erstarrung und Erhärtung des Spritzbetons (hohe Frühfestigkeit),
 - niedrigen W/Z-Wert (ca. 0,35 bis 0,5),
 - geringen Wassergehalt (ca. 160 l/m³),
 - geringe Verdunstungsmöglichkeit (hohe relative Luftfeuchte im Tunnel, keine Sonneneinstrahlung, Einfluß der Baulüftung siehe a),
 - Nachbehandlung des Spritzbetons durch Gebirgsfeuchte bzw. Grundwasser.

Um unnötig viele Fehlstellen in der Tunnelauskleidung zu vermeiden, ist bei der Bauausführung einer wasserundurchlässigen Spritzbetonschale für diese in jedem Fall mehr Sorgfalt und damit ein größerer Arbeits- und Zeitaufwand zu veranschlagen als für die Spritzbetonschale bei der zweisechaligen Bauweise. Das bisherige Abrechnungssystem für die Vortriebsmannschaften muß dementsprechend den Anforderungen der einschaligen Bauweise angepaßt werden. Eine Schulung des Personals, insbesondere des Düsenführers, erscheint dringend erforderlich.

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 aus folgenden Gründen nicht direkt auf die einschalige Spritzbetonbauweise übertragen werden:

- Die Spritzbetonschale weist zwischen zwei Fugen (Block), bedingt durch die geringe Abschlagslänge (etwa 1 bis 2 m) und die Teilvortriebe (Kalotten-, Strossen- und Sohlvortrieb), viele Arbeitsfugen auf. Bei einem fachgerecht hergestellten Rüttelbetonbauwerk entfallen solche unerwünschten Arbeitsfugen, an denen der Beton relativ leicht reißen kann.
- Durch die geringe Vortriebsgeschwindigkeit und die Teilvortriebe besteht der Spritzbetonblock aus abschnittsweise unterschiedlich altem Beton. Dies kann unter Umständen zu Eigenspannungen und damit unerwünschten Rissen im Spritzbeton führen. Eine Rüttelbetoninnenschale wird dagegen in der Regel in einem Arbeitsgang hergestellt. Das Alter dieses Betons kann deshalb über die gesamte Blocklänge als gleich angesehen werden.
- Der Spritzbeton wird direkt gegen das Gebirge aufgetragen und verzahnt sich je nach Gebirgsart und Ausbruchlaibung mehr oder weniger stark mit diesem. Diese Verbundkonstruktion verhindert eventuell eine Bewegung der Spritzbetonschale als Block zwischen den Fugen. Eine wasserundurchlässige Rüttelbeton-Innenschale, die gegen den Spritzbeton betoniert wird, kann sich dagegen als Block bewegen, wenn die Verzahnung hier gering gehalten wird (z.B. durch Zwischenlegen einer Folie).
- Wenn in die Spritzbetonschale Stahlbögen (Abstand ca. 1 m) eingebaut werden, ist an diesen Stellen der Betonquerschnitt entsprechend geschwächt. Vorzugsweise können hier Risse im Spritzbeton entstehen. Bei Rüttelbetonbauwerken ist im allgemeinen die

Bewehrung gleichmäßiger verteilt. Es treten daher solche Schwachzonen entweder überhaupt nicht oder in wesentlich abgeminderter Form auf.

- Abdichtungsprofile zur wasserdichten Fugenüberbrückung werden bei Rüttelbetonbauwerken in der Regel von vornherein einbetoniert. Die Dichtungsrippen müssen hierbei gut durch den Beton umhüllt werden, um die Funktionsfähigkeit des Profils zu gewährleisten. Bei der Spritzbetonbauweise müssen Fugenbänder dicht eingespritzt werden. Hierüber liegen zur Zeit in der Praxis keine Erfahrungen vor.

Ob auch bei der Spritzbetonbauweise durch die Anordnung von Dehnungsfugen Risse in der Betonschale verhindert bzw. in Zahl und Öffnungsweite vermindert werden, muß deshalb theoretisch bezweifelt werden. Entsprechende Versuche sollten hierüber jedoch genauer Auskunft geben.

3. GROSSVERSUCHE AUF DER BAUSTELLE

Ziel der Großversuche war es, erste Entscheidungshilfen für die Herstellung des 100 m langen Versuchstunnels zu erhalten. Hierzu wurden unter anderem Vorversuche an ca. 40 Spritzbetonproben (Abmessungen ca. 1,50 m x 1,0 m x 0,5 m) durchgeführt, um unter anderem die Einspritzqualität von Bewehrung (Gitterträger, Matten, Stabbewehrung), den Einbau von Fugenbändern und die Größe der Schwindverformung festzustellen. Die wichtigsten Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

3.1 Einspritzqualität der Bewehrung

Wasserleitende Spritzschatten entlang der Bewehrung ließen sich bei den durchgeführten Versuchen in allen Fällen nicht vermeiden. So gelang es z.B. nicht, durch

- die Geometrie des Gitterträgers (3-Gurt- bzw. 4-Gurt-Träger),
- die Spritztechnik (Spritzen nur von vorne bzw. von vorne und von den Seiten),
- das Spritzverfahren (Trockenspritz- bzw. Naßspritzverfahren im Dünnstrom),
- den Zementgehalt in der Spritzbetonausgangsmischung (360 bzw. 500 kg/m³),
- die Stahloberfläche der Bewehrung (glatt bzw. gerippt)

die Einbettung der Bewehrung im Hinblick auf die Wasserundurchlässigkeit der Spritzbetonprobe zu verbessern. Auch die Lage der Spritzbetonproben (Ulme bzw. Sohle) hatte keinen Einfluß auf das Prüfergebnis.

Bei vorgehängter Bewehrung (Matte, Gitterträger) wurden die Spritzbetonbereiche hinter der Bewehrung (vom Düsenführer aus gesehen) durch das Hindurchspritzen stark wasserundurchlässig.

3.2 Herstellung von Fugen in der Spritzbetonschale

Erfolgreich konnten außenliegende Dehnungsbänder eingespritzt werden. Die Spritzbetonoberfläche im Fugenbandbereich wies bei einem Prüfdruck von ca. 2 bar nur geringe Feuchtigkeitsflecken auf. Eine Bohrkernentnahme zeigt

te ebenfalls die gute Einbettung des Fugenbandes in den Spritzbeton.

Ferner konnte ein nutartiger Fugenspalt von 30 mm Breite und 120 mm Tiefe zur Aufnahme eines Klemmprofils in der Spritzbetonschale hergestellt werden. Die Fugenflanken wiesen nach Augenscheinprüfung keine nennenswerten Fehlstellen auf.

3.3 Größe der Schwindverformung

Die Messungen der Schwindverformungen des Spritzbetons wurden an Proben vorgenommen, denen als Unterlage eine Folie diente (keine Verformungsbehinderung durch den Untergrund). Die Probekörper wurden im Tunnel gelagert, um weitestgehend realistische Austrocknungsbedingungen zu schaffen (Lufttemperatur $\sim 20^\circ\text{C}$; relative Luftfeuchte ca. 95 %). Die gemessenen Längenverkürzungen infolge Schwindens waren vergleichsweise gering. Sie betrug maximal 0,2 mm/m. Der größte Teil der Schwindverkürzungen wurde bereits im Betonalter von drei Tagen erreicht.

4. HERSTELLUNG DES VERSUCHSTUNNELS

Von bisher ausgeführten Spritzbetonschalen ist bekannt, daß häufig Risse im Bereich der Stahlträger auftreten. Der Trägerabstand im 100 m langen Versuchstunnel beträgt überwiegend 1 m. Es mußte deshalb im ungünstigsten Fall von einem radialen Riß entlang der Gitterträger auf jeden Meter in der Spritzbetonschale ausgegangen werden. Im Hinblick auf eine einfache nachträgliche Abdichtung dieser Risse wurde ein Jektoschlauch eingespritzt, der in der Regel gebirgsseitig am Gitterträger befestigt wurde.

Der Jektoschlauch*) besteht aus zwei siebartigen Hüllen mit zwischenliegender Membran, die gemeinsam um eine zentral verlaufende Stützspirale aus Stahl angeordnet sind. Dieser Schlauch hat die Aufgabe, den späteren Hohlraum für das Injektionsmittel im Betoninnern freizuhalten. Die Hüllen schützen die Membran vor Beschädigung. Die äußere Hülle und die Membran verhindern das Eindringen des Betons in den Hohlkörper. Wenn ein Flüssigkeitsdruck im Jektoschlauch erzeugt wird, öffnen sich die siebartigen Hüllen und die Membran reißt. Hierdurch wird der Jektoschlauch auf seiner gesamten Mantelfläche durchlässig. Die im Jektoschlauch befindliche Flüssigkeit tritt aus und dringt in poröse Betonbereiche (Risse, Fehlstellen usw.) ein.

Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, bei der Oberflächenstruktur der Spritzbetonschale die vorhandenen feinen Risse überhaupt zu sehen. Das gilt insbesondere solange, wie durch eine Grundwasserabsenkung Wasser von der Tunnelauskleidung ferngehalten wird. Deshalb wurden die Jektoschläuche zur Sichtbarmachung der Risse und Fehlstellen vor der geplanten Abdichtungsinjektion mit Wasserdruck beaufschlagt. Nur so war es auch möglich, einen Vergleich der verschiedenen durchgeführten Ausführungsvarianten untereinander zu erhalten. Folgende Varianten wurden im Versuchstunnel untersucht:

1) Spritzbetonschale mit einlagiger, gebirgsseitiger Mattenbewehrung und Gitterträgern im Kalotten- und Ulmenbereich

- 2) Spritzbetonschale mit zweilagiger Mattenbewehrung und Gitterträgern im Kalotten- und Ulmenbereich
- 3) Spritzbetonschale mit zweilagiger Mattenbewehrung ohne Gitterträger
- 4) Herstellung der Spritzbetonschale mit dem Naßspritzverfahren im Dünnstrom anstelle des sonst durchweg eingesetzten Trockenspritzverfahrens
- 5) Einspritzen von zwei außenliegenden Dehnungsfugenbändern im Abstand von ca. 8 m und Abstellen eines Fugenspalts zur Aufnahme eines Kompressionsprofils

Außerdem wurden 10 Konvergenzmeßquerschnitte eingerichtet, um Verformungen der Spritzbetonschale messen zu können. Ferner wurden 50 Meßstreifen auf der Spritzbetonschale appliziert, um Längenänderungen in der Tunnelauskleidung parallel zur Tunnelachse, z.B. infolge Schwindens oder Temperaturänderungen, festzuhalten.

Die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Risse in der Spritzbetonschale konnten bei allen Versuchsvarianten festgestellt werden. Risse treten erwartungsgemäß vornehmlich im Bereich der Gitterträger und in den Arbeitsfugen Kalotte/Ulme und Ulme/Sohle auf. Risse sind gut an den weißen Aussinterungen zu erkennen. Auch die Spritzbetonschalenabschnitte, die ohne Gitterträger (Variante 3) und mit Dehnungsfugen (Variante 5) hergestellt wurden, enthielten Risse. Aus jetziger Sicht erwies sich keine der ausgeführten Versuchsvarianten im Hinblick auf die Wasserundurchlässigkeit der Spritzbetonschale als besonders geeignet.

2. Die Längenmessungen an der Spritzbetonschale ergaben Dehnungen von ca. 0,5 ‰ über den Gitterträgern und ca. 1,5 ‰ über den Dehnungsfugen sowie Verkürzungen von $\approx 0,5 \%$ in den Spritzbetonbereichen zwischen den Gitterträgern. Der größte Teil der Längenänderungen wurde bereits nach ca. 30 Tagen erreicht.

Die Versuche, bei denen Wasser in die Jektoschläuche gepumpt wurde, zeigten eindeutig, daß Injektionsmaßnahmen zum Abdichten der Spritzbetonschale mit Acrylharz, Polyurethan oder weichem Epoxidharz erforderlich sind. Theoretische Voruntersuchungen und entsprechende Modellversuche für die Abdichtung der Spritzbetonschale sind zur Zeit noch nicht abgeschlossen.

5. HINWEISE ZUR HERSTELLUNG EINER WASSERUNDURCHLÄSSIGEN SPRITZBETONSCHALE

Folgende Hinweise zum Bau einer wasserundurchlässigen einschaligen Spritzbetontunnelauskleidung ergeben sich aus den beschriebenen Versuchsergebnissen:

1. Risse in einer herkömmlich hergestellten Spritzbetonschale können nicht vermieden werden. Eine Abdichtung der Spritzbetonschale mittels geeigneter Injektionsmittel ist deshalb im voraus einzuplanen.
2. Die Spritzbetonversiegelungsschicht sollte möglichst ca. 5 cm dick sein, um das Grundwasser von vornherein aus der Spritzbetonschale weitestgehend fernzuhalten.

*) Geschütztes Warenzeichen der Firma Aquarius AG, Luzern/Schweiz

3. Beim Einspritzen der Bewehrung ist folgendes zu beachten:

- Das Betonspritzen durch eine vorgehängte Bewehrung auf ein Minimum reduzieren.
- Bewehrung in der Spritzbetonschale senkrecht zur Tunnellängsrichtung (z.B. radial geführte Bügel über die Schalendicke) vermeiden (Gefahr von Wassertransport) bzw. auf Bewehrung möglichst ganz verzichten.
- Nur saubere Bewehrung einspritzen (nicht vorher ungeschützt auf der Baustelle lagern: Verschmutzungsgefahr). Bei Auftragung der zweiten Spritzlage noch freiliegende Bewehrung vom Rückprall und losem Beton säubern.
- Gitterträger z.B. im Ulmenbereich von unten nach oben einspritzen.

4. Arbeitsfugen auf ein Minimum reduzieren.

5. Spezielle Ausbildung des Vortriebspersonals insbesondere des Düsenführers.

6. Die Ausgangsmischung des verwendeten Spritzbetons sollte nach den allgemein

anerkannten Regeln zur Herstellung von wasserundurchlässigem Rüttelbeton zusammengestellt werden.

7. Beim Trockenspritzverfahren ist darauf zu achten, daß nicht zu wenig Wasser an der Düse zugegeben wird.

Diese Hinweise sollten helfen, einen ersten "Schritt" in Richtung einschalige Spritzbetonbauweise zu tun. Es werden weitere Bemühungen und Erfahrungen erforderlich sein, um in der Zukunft einmal einschalig in Spritzbetonbauweise Tunnel bauen zu können.

6. SCHLUSSBEMERKUNG

Das vorgestellte Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung des Bundesforschungsministeriums in Bonn und der Stadt Bochum durchgeführt. Unter der Projektleitung der Stadt Bochum zeichnete für die statischen Berechnungen das Ingenieurbüro Zerna, Schultz & Partner verantwortlich, die Vortriebsarbeiten wurden von der ARGE Stadtbahn Bochum, Baulos Innenstadt, Philipp Holzmann AG, Polensky & Zöllner, ausgeführt, und die wissenschaftliche Leitung des Vorhabens lag bei der STUVA. Allen Beteiligten sei an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit gedankt.