

Andreas Rath, Christof Haberland

Baulicher Brandschutz unterirdischer Verkehrsbauwerke

Herstellung und Einsatz von PP-Faserbeton für wasserdichte Innenschalen

DI Andreas Rath, Bauleiter
PORR Tunnelbau GmbH, Wien

DI Christof Haberland, Bauleiter
PORR Tunnelbau GmbH, Wien



Abb. 1: Durchführung Großbrandversuch

Im Westen Wiens werden auf dem Bauabschnitt Lainzer Tunnel West zur Erhöhung der Brandbeständigkeit unterirdischer Betonbauwerke seit knapp einem Jahr systematisch Polypropylen-Faserbetone eingesetzt. Verwendet werden sie hier hauptsächlich für bewehrte wasserdichte Innenschalen (WDI), wie sie u.a. im innerstädtischen, bergmännischen Verkehrstunnelbau mittels Gewölbeschalwagen hergestellt werden. Auf dem Baulos LT 22 – Bierhäuselberg setzten diesbezüglich Auftraggeber, Betonhersteller sowie die ausführenden Firmen und deren Forschungsabteilungen gemeinsam zahlreiche Entwicklungsschritte. Erstmals werden auch in den bergmännischen Tunnelabschnitten Gewölbe-Innenschalen mittels PP-Faserbeton (Bezeichnung laut RL in Ausarbeitung – FaB BB G) gefertigt.

Ausgangssituation

Das Thema „Erhöht brandbeständiger Faserbeton“ beschäftigt die Verantwortlichen für das Baulos LT22 – Bierhäuselberg bereits seit Mitte 2002. Damals begannen die Planungen für die Durchführung von Großbrandversuchen an Kalottenelementen (FFF-Projekt 806201, Abb. 1). Ziel war es, das Praxisverhalten von PP-Faserbeton zur Herstellung von erhöht brandbeständigem

(Innenschalen-)Beton zu untersuchen. Nach der Betonierung der ersten Versuchskörper Ende 2003 war klar, dass für eine systematische Umsetzung der Idee der Herstellung erhöht brandbeständigen PP-Faserbetons technologisch noch umfassende Entwicklungsarbeit zu leisten sein würde.

Nach dem positivem Abschluss der Großbrandversuche Ende Mai 2003 wurde zwischen AG und AN vereinbart, zwei Blöcke des Tunnel-Innenschalengewölbes

(Nachläufer bei Betonieren „auf Lücke“) in In situ-Versuchen mit FaB BB G herzustellen (Abb. 2 und 3). Ausgangsbasis waren die Betonzusammensetzung für den projektgemäß eingesetzten Innenschalenbeton B30/300(56) HS 375 WDI GK22 K5 sowie die Beigabe von 2 kg PP-Fasern (Faserlänge 6 mm, Durchmesser < 20 µm) pro Kubikmeter Normalbeton. Hinsichtlich der Betonherstellung und -verarbeitung ergaben sich folgende Problemstellungen:

Abb. 2: Gewölbe-Schalwagen

alle Fotos und Grafiken: ARGE LT22 – Bierhäuselberg





Abb. 3: Bewehrte Innenschale „auf Lücke“

- Zielausbreitmaß im Bereich von 56 +/- 3 cm (F52/F59) nicht gewährleistet
- starke Schwankungen von Ausbreitmaß und LP-Gehalt zwischen Mischanlage und Einbaustelle
- Neigung des Betons zum Bluten und Entmischen bereits vor der Pumpe
- erschwerte Betoneinbringung bei (verdichteter) Bewehrung (ordnungsgemäßes Umschließen besonders der hinteren Bewehrungslagen, Verklausungen)
- Verdichtung des eingebauten Betons (dämpfende Wirkung der PP-Fasern, Wasserabsonderung bei Zufuhr der Verdichtungsenergie).

Die Analyse der Großbrandversuche und der beiden 1:1 -Anwendungsversuche lieferte folgende Problemfelder, die im ÖVBB-Arbeitskreis für die Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ für die praktische Umsetzung geklärt werden müssen:

- Optimierung der Betonzusammensetzung
- Optimierung der Betonherstellung
- gleichmäßige Verteilung der Fasern
- geeignete Baustellen-Prüfmethoden für die Bestimmung von Fasergehalt und -verteilung
- Optimierung der Betonanlieferung und -förderung
- Anpassung von Betoneinbringung und Verdichtungskonzept.

Optimierung der Betonzusammensetzung

Betontechnologische Kernprobleme bei der Herstellung von FaB BB G der Konsistenzklassen F52 und F59, wie sie für die Betonierung von Gewölbe-Innenschalen mit Stahlschalwagen und Schalungsrüttlern zielführend sind, waren von Anfang an die ausgeprägte Tendenz zur Wasserabsonderung und Entmischung (Abb. 4 und 5) sowie das Erlangen der erforderlichen Lieferkonstanz. Konsistenzen im Bereich unter F52, die z.B. bei offenen Bauweisen und beim Einbau mit Innenrüttlern zum Einsatz gelangen, konnten mit vergleichsweise geringen Rezepturanpassungen erzielt werden.

Folgende Parameter wurden sowohl im Labor als auch in Baustellenversuchen auf ihre Einzel- und Wechselwirkungen hin untersucht:

- Sieblinie Zuschlagstoffe
- unterschiedliche Produktlinien der Zusatzmittel (Fließmittel, LP-Mittel)
- Zusammenwirken der Ausgangsstoffe
- Einsatz von Stabilisierer und Kombinationsprodukt Fließmittel-Stabilisierer
- PP-Fasern unterschiedlicher Lieferanten.

Der durch die hohe Gesamtoberfläche der PP-Fasern (16 µm Durchmesser, 2 kg/m³ Beton) bedingte hohe Wasseranspruch führt zu einer Veränderung der rheologischen Eigenschaften und zum Ansteigen der Fließgrenze. Bei Energiezufuhr (Pumpen, Ver-

dichten) wird das an der Faseroberfläche gebundene Wasser großteils wieder abgegeben. Wesentliche Verbesserungen wurden durch den Einsatz eines Stabilisierers, die Erhöhung der Menge des Zusatzstoffes (als Füller), der Wassermenge sowie der des LP-Anteils erreicht.

Die zur Überprüfung der Stabilität des Betons zwischen Mischanlage und Einbauort durchgeführten Frischbetonprüfungen erfolgten

- aus dem Mischwagen (vor dem Nachmischen, nach zehn Minuten Nachmischen sowie nach 30, 60 und bis zu 90 Minuten mit kurzem Aufmischen vor Entnahme)
- bei Übergabe sowie vor und nach jeder Betonpumpe
- am Ende des Füllschlauches und
- am eingebauten Beton.

Die Prüfungsergebnisse bezüglich Ausbreitmaß und LP-Gehalt ergaben bei gleichbleibender Rezeptur und Mischdauer starke, teilweise gegen den Trend der Zusatzmitteldosierung verlaufende Schwankungen (Abb. 6 und 7). Der Beton war unter Einhaltung der richtlinienkonformen Mischzeiten einerseits nicht ausgemischt, andererseits zeigte sich eine äußerst schmale günstige Bandbreite der Rezeptur, die zum Teil unter der Dosiergenauigkeit der Mischanlagen liegen dürfte. Gleichzeitig musste zur Kenntnis genommen werden, dass die im Labor gewonnenen Erkenntnisse nicht vollständig auf die Praxis übertragbar sind.



Abb. 4: Wasserabsonderung vor FB-Prüfungen



Abb. 5: Entmischung bei Konsistenzprüfung

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass mit den in den Ö-NORMEN eingeführten Frischbetonkennwerten Konsistenz und Luftgehalt keine ausreichende Erfassung der Frischbetoneigenschaften („Verarbeitbarkeit“) speziell bei PP-Faserbetonen im Bereich über F52 möglich ist. Hinweise auf die Stabilität und Verarbeitbarkeit von FaB BB G können auf der Baustelle die Korrelation und der Verlauf von Konsistenz und Luftgehalt zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten und an verschiedenen Prüf-orten derselben Charge liefern. Diesbezüglich sind weiterführende Versuche (z.B. Untersuchung und Prüfung rheologischer Eigenschaften) zielführend.

Optimierung der Betonherstellung

Für die weitere Betonherstellung wurden neben der Rezeptoptimierung folgende Parameter näher untersucht:

- Mischertyp und Eintrag der Mischenergie
- Mischdauer im Zwangsmischer
- Nachmischdauer im Fahrmischer.

Die zwei auf den beiden Baulosen Lainzer Tunnel West im Einsatz befindlichen Baustellmischanlagen bieten die Möglichkeit des direkten Vergleiches zwischen Doppelwellen- und Teller-Zwangsmischer mit Wirbler. Der in Versuchen ermittelte bessere Eintrag der Mischenergie beim Tellermischer mit Wirbler konnte im Regelbetonierbetrieb bis dato nicht bestätigt werden. Wesentliche Verbesserungen wurden durch beinahe drei Mal längere Nassmischzeiten, eine Reduktion der Chargengröße sowie eine mindestens zehnminütige Nachmischzeit im Fahrmischer auf hoher Drehzahl erzielt. Der Füllgrad der Fahrmischer wurde zur Verbesserung der Nachmischwirkung auf ca. 75 Prozent begrenzt. Die Lieferkapazitäten reduzieren sich dadurch erheblich. Die Gesamtmischdauer für 6 m³ FaB BB G beträgt zurzeit inklusive Nachmischzeit etwa 20 Minuten.

Die zahlreichen Einstellversuche zeigten ebenfalls, dass der Einfluss der unterschiedlichen Parameter der Betonherstellung einzeln und in Kombination aufgrund der schmalen, günstigen Bandbreite der Rezeptur derart groß ist, dass etwa die direkte Übertragbarkeit voreingestellter Rezepturen zwischen den beiden Mischanlagen nicht gegeben ist.

Faserverteilung

Bei der Überprüfung der Kalottenelemente für die Großbrandversuche wurden zum Teil Faserverteilungen außerhalb der angestrebten Bandbreiten ermittelt. Um das Vorhaltemaß zur Gewährleistung eines Mindestfasergehaltes minimieren zu können, musste also eine gleichmäßige Faserverteilung garantiert werden. Eine wesentliche Verbesserung ergab diesbezüglich bereits die Verlängerung der Haupt- und Nachmischzeiten. Darüber hinaus wurde von der durchaus üblichen Dosierung der Fasern auf die Zuschlag-Förderbänder abgegangen. Zur Minimierung des Schwundes (Verblasen, Verschütten) wurde festgelegt, dass die Zugabe der Fasern jedenfalls in ein geschlossenes System (Vorsilo, Zwangsmischer) der Mischanlage erfolgt. Um die Fasern möglichst gleichmäßig einbringen zu können, verzichtete man auf selbst auflösende Verpackungen. Die Verpackung wurde auf 1 kg-Papiertüten geändert. Bei manueller Dosierung in den Zwangsmischer (Abb. 8) werden damit durchwegs zufrieden stellende Wiederfindungsraten im Frisch- und Festbeton erzielt. Ein wesentlicher Bestandteil der ausgearbeiteten Mischanweisung ist eine lückenlose Dokumentation der Faserzugabe pro Charge und Bauteil.

Überprüfung von Fasergehalt und -verteilung

Unabdingbar für den gesicherten Einsatz und die Erhöhung der Brandbeständigkeit durch PP-Faserbetone war die Entwicklung baustellentauglicher Prüfmethode zur Bestimmung von Fasergehalt und Faserverteilung bereits am Frischbeton. Die entwickelten Verfahren basieren im Wesentlichen auf der Separierung der Fasern durch Aufschlännen sowie anschließender Trocknung und Wägung. Die Streuung mehrerer Fasergehaltsbestimmungen aus einem Mischwagen ist ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Faserverteilung. So können nach ca. 20 bis 30 Minuten verlässliche Aussagen über den Fasergehalt getroffen werden. Da diese Zeitspanne in der Praxis nicht abgewartet werden kann, wird der Beton bei der Übernahme vor der Pumpe visuell auf seinen Fasergehalt hin überprüft (Abb. 9). Aufgrund eines straffen Qualitätssicherungskonzeptes für die Faserbetonherstellung können die Verantwortlichen auf der Baustelle bei augenscheinlichem Erkennen von Fasern grundsätzlich vom Vorhandensein des festgelegten Fasergehalts ausgehen. Fehllieferungen ohne PP-Fasern können so ausgeschlossen werden. Durch die Fasergehaltsbestimmung am Frischbeton erfolgen auf der Baustelle so rasch wie möglich die erforderliche Verifizierung und Dokumentation des Fasergehaltes sowie die Rückkoppelung zur Faserdosierung.

Optimierung von Betonanlieferung und -förderung

Die erforderlichen Nachmischzeiten im Fahrnischer, die Reduktion des Füllgrades sowie die Festlegung, dass die Fahrzeit nicht 1:1 auf die Nachmischzeit angerechnet werden darf, erfordern für die Betonanlieferung eine Anpassung der Kapazitäten.

Abgesehen von einem etwas höheren Pumpwiderstand konnte bei Leitungslängen bis zu etwa 300 m kein wesentlicher Ein-

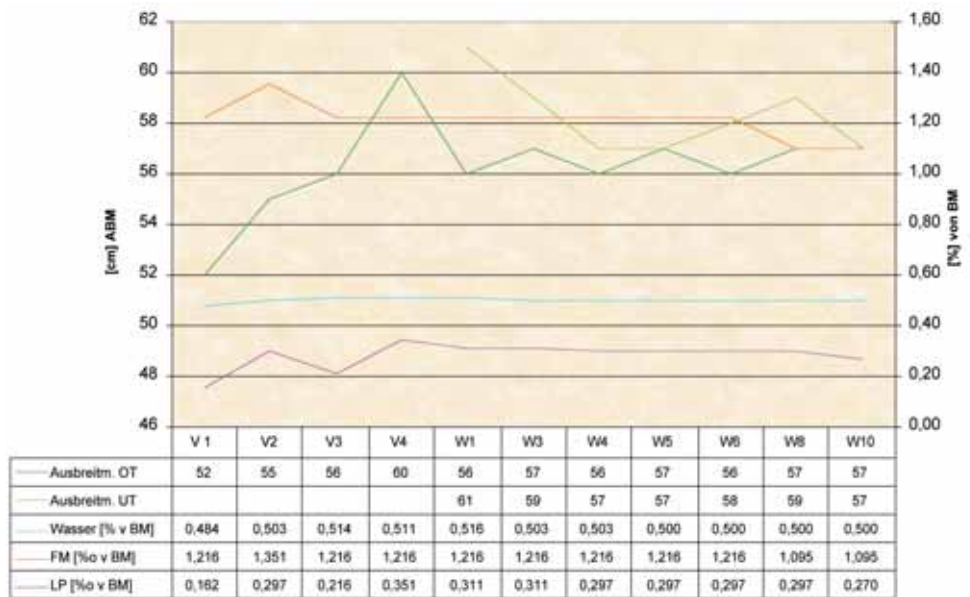


Abb. 6: Beispiel Verlauf Ausbreitmaß vor Übergabe („OT“) und nach Pumpleitung („UT“)

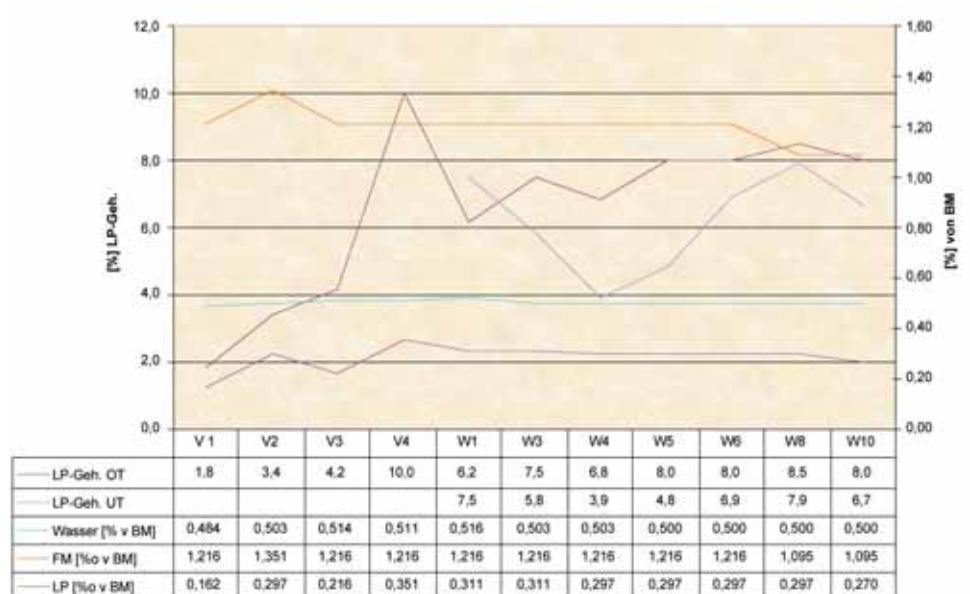


Abb. 7: Beispiel Verlauf LP-Gehalt vor Übergabe („OT“) und nach Pumpleitung („UT“)

fluss auf die Pumpbarkeit festgestellt werden. Bei größeren Förderweiten und den damit verbundenen höheren Pumpendrücken waren bereits Entmischungen in der Rohrleitung erkennbar. Die Stabilität der eingesetzten Rezepturen reicht unter diesen Bedingungen nicht aus, das Auspressen

von Wasser und Feinteilen zu verhindern. Erhöhte Aufmerksamkeit ist jedenfalls auf die Reinigung und Wartung der eingesetzten Betonpumpen zu richten, da die PP-Fasern zu Verklebungen neigen und auch in geschlossene Anlagenteile eindringen können (Durchmesser 16 µm).



Abb. 8: Manuelle Faserdosierung



Abb. 9: Frischbeton mit PP-Fasern (2 kg/m³)

Anpassung von Betoneinbringung und Verdichtungskonzept

Die Neigung von FaB BB G zu Verkläusungen bei dichter Bewehrungsführung (Stabstahlzulagen, Nischen, Fugenbandeinfassungen), zu Wasserabsonderung und Entmischung bei Energiezufuhr sowie zum Eintrag von Grobluft über die Fasern erfordert eine Anpassung der Betoneinbringung und des Verdichtungskonzeptes.

Auf der Baustelle wurden insgesamt vier Versuche zur Optimierung der Verdichtungsenergie durchgeführt („Rüttelversuche“, Abb. 10 und 11). Ziel war die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Rüttelkonzepte mit Druckluft-Schalungsrüttlern (Varia-

tion von Rüttlertyp, Anordnung und Rüttelintervallen) auf das Einbauverhalten (Verdichtbarkeit, Tiefenwirkung, Wasserabsonderung) von FaB BB G mit Ausbreitmaßen von 56 +/- 3 cm.

Durch die Verwendung von Schalwagenelementen wurde durch die Betonierung gegen eine starre Wand eine Gewölbebetonierung simuliert. Die Betoneinbringung wurde sowohl drückend über die Betonierstützen als auch über die Betonierfenster untersucht.

Direkt auf die Schalhaut montierte Rüttler bzw. kurzes „Intervallrütteln“ (Simulieren der Verdichtung durch kurzes energiereiches „Klopfen“ = Stochern bei hohen Konsis-

tenzen) führten hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit und Wasserabsonderungen zu den schlechtesten Ergebnissen. Zusammenfassend kann diesbezüglich jedoch festgehalten werden, dass der Einfluss unterschiedlicher Rüttlertypen und -anordnungen auf eine ordnungsgemäße Verdichtung als gering eingestuft wird. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass jeweils kleinere Mengen abgerüttelt werden und die Rüttelenergie gezielt eingebracht wird. Eine einzelne Ansteuerung der Rüttler anstelle der Schaltung von „Rüttelbenen“ konnte erfolgreich umgesetzt werden. Wiederholtes Umschlagen bei der Betoneinbringung ist daher ebenfalls erforderlich.

Abb. 10: Versuchsanordnung „Rüttelversuche“

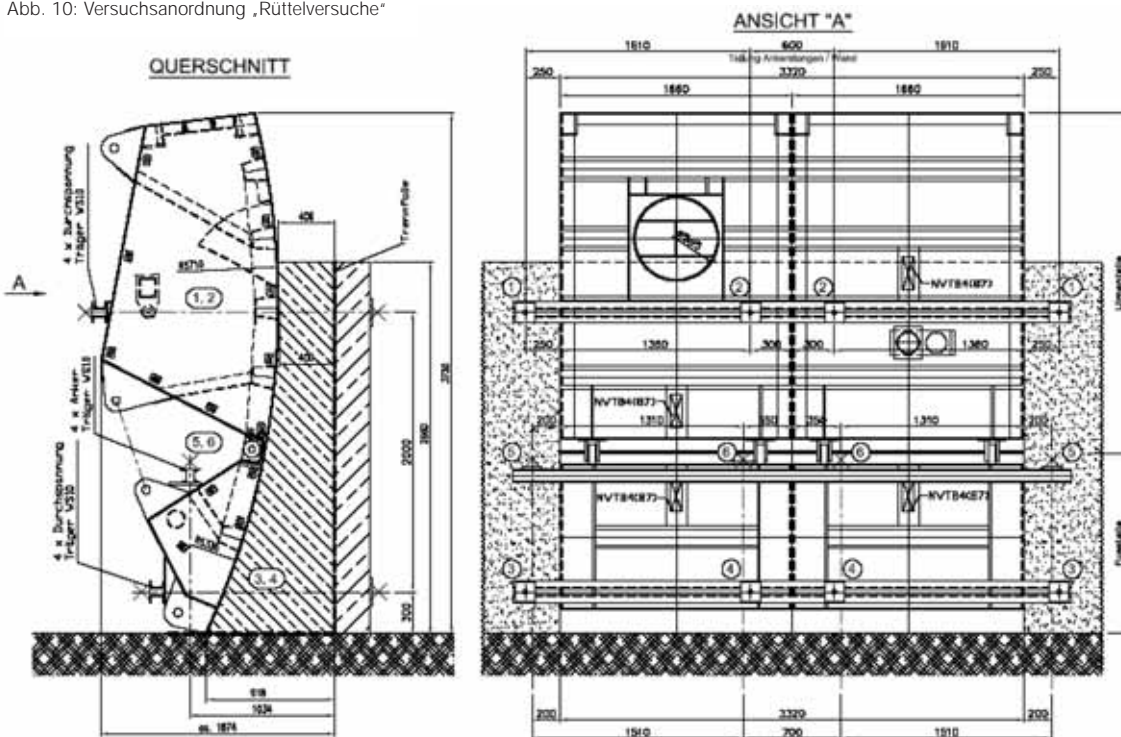




Abb. 11: Schalung bewehrter Probekörper



Abb. 12: Überrütteln, Wasserabsonderung

Zusammenfassung

Im Lainzer Tunnel, Projekt LT 22 – Bierhäuselberg, wird zurzeit ein 705 m langer Streckenabschnitt der WDI mit FaB BB G hergestellt. Die Umsetzung des an zahlreichen Baustellen und in Laborringversuchen ermittelten Verbesserungspotenziales ermöglicht einen Regelbetonierbetrieb, der jedoch nur durch einen hohen betontechnologischen Betreuungsaufwand realisiert werden kann.

Nach dem derzeitigen Stand der Kenntnis sind im Speziellen Konsistenzen im Bereich über F52, wie sie für bewehrte Innenschalen zweckmäßig und erforderlich sind, nur durch den hohen Einsatz von Zusatzmitteln (Hochleistungsfließmittel, Luftporenbildner, Stabilisierer) möglich. Die Verarbeitbarkeit wird wesentlich von der schmalen Bandbreite einer laufend zu optimierenden Zusatzmittelkombination bestimmt. Bereits geringe Änderungen einzelner Parameter der Ausgangsstoffe sowie der Umgebungsbedingungen können die grundsätzliche Tendenz zu Wasserabsonderung bis hin zur Entmischung verstärken.

Die vorliegenden Ergebnisse und Erkenntnisse hinsichtlich der Herstellung und Verarbeitung von erhöht brandbeständigem FaB BB G für WDI beruhen derzeit im Wesentlichen auf den Erfahrungen aus nur einem Projekt und sind nicht 1:1 auf Folgeprojekte übertragbar. Die bisherigen Betonierungen können als erfolgreich bezeichnet werden (Abb. 13). Damit die Herstellung von FaB BB G als betontechnologisch ausgereift bezeichnet werden kann und bis ein annähernd routinemäßiger Betonierbetrieb möglich sein wird, sind jedoch weitere Optimierungen erforderlich.

Da das Nachfahren der im Labor angewendeten FaB-Rezepturen bei den angestrebten Konsistenzklassen erfahrungsgemäß keine verlässlichen Aussagen für den Einsatz vor Ort liefert, werden weitere Praxis-einsätze (In situ-Vorversuche und Probebetonierungen) vonnöten sein.

Grundsätzlich sollten alle Projektbeteiligten dazu beitragen, durch die Betrachtung des Gesamtsystems Betonbauwerk günstige Voraussetzungen für einen ordnungsgemäßen Einbau von PP-Faserbetonen zu schaffen. Dazu gehören die Festlegung der Geo-

metrien, die Detailausbildungen von Bewehrungsführungen bei verdichteter Bewehrung (z.B. Nischen, Fugenbänder) und die Ermöglichung geeigneter Transportwege und Umgebungsbedingungen durch den Projektanten. Die ausführenden Firmen wiederum haben einen Einfluss auf die Auswahl und Handhabung des Schalungs- und Betoniergerätes. Schließlich bestimmen der Betonhersteller und -lieferant bei der anlagetechnischen und betontechnologischen Abstimmung den Betoniererfolg wesentlich mit.

Durch die enge Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten mit den Teilnehmern des Arbeitskreises für die Erstellung der ÖVBB-Richtlinie „Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ konnte das Produkt erhöht brandbeständiger (Innenschalen-)Beton beim Baulos LT 22 nicht nur aus der Taufe gehoben werden, sondern es kommt hier auch erstmals umfassend zum Einsatz. Der Dank gilt allen, die bei der praktischen Umsetzung mitgewirkt haben. Um das Produkt FaB BB G zur Serienreife zu entwickeln, sind im Detail jedoch noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten.

Abb. 13: Fertige Innenschale mit erhöht brandbeständigem Beton (WDI FaB BB G)

