
Spritzbeton bei Tunnelinstandsetzung und als Brandschutzschicht mit Einsatz von Spritzrobotern

SHOTCRETE FOR TUNNEL REHABILITATION AS WELL AS FIRE PROTECTION APPLIED BY ROBOTIC MANIPULATOR

GÜNTER VOGL, BERNHARD TATZL, ROLAND MAYR

Durch das Alter vieler in Österreich vorhandenen Straßentunnels und die Diskussionen über Sicherheitsaspekte in Tunnelbauwerken wurden in den letzten Jahren und werden auch zukünftig viele solcher Bauwerke einer Generalsanierung unterzogen. Dies betrifft sowohl die bauliche Instandsetzung als auch die Anpassung der sicherheitstechnischen Ausstattung an das geforderte Niveau.

Der Tätigkeitsbereich der Fa. H. Junger Bauges.m.b.H. erstreckt sich von der Erfassung des baulichen Zustands, den allenfalls erforderlichen Abtrag von geschädigtem bzw. chloridverseuchtem Beton bis zur Wiederherstellung der Oberfläche mit Spritzbeton und Beschichtung.

Der Betonabtrag erfolgt hier mit Höchstdruckwassertechnik mit bis zu 2500 bar und entsprechenden Abtragsgeräten, die an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden.

Daneben besteht die Forderung nach einer erhöhten Brandbeständigkeit von Tunnelkonstruktionen, um im Brandfall das Versagen von Konstruktionsteilen zu verhindern. Zur Erhöhung der Brandbeständigkeit konnte von unserer Firma der Auftrag der ÖBB Infrastruktur Bau AG zur Auskleidung eines Teilstückes des Lainzer Tunnels mit einer Brandschutzschicht angenommen werden, die erste Ausschreibung dieser Art in Österreich.

Für diesen Zweck kommt ein speziell entwickelter Faserspritzbeton zum Einsatz. Die Applikation dieser Schicht erfolgt mit einem Spritzroboter um die erforderlichen Schichtstärken und Genauigkeiten zu gewährleisten.

Der Manipulator Meyco Logica 15 ist ein computergesteuerter Spritzroboter für den automatisierten Auftrag von Spritzbeton oder Brandschutzmörtel. Die Maschine kann entweder frei stationiert mit Laserscanner eingesetzt werden oder bei wiederkehrenden, fixen Profilen mit Zwangsführung über Schienen. Der Hauptvorteil liegt in der Geschwindigkeit des Auftrages sowie der genauen Kontrolle über die aufgetragene Schichtstärke.

The ongoing discussions on tunnel safety as well as the current condition of many road tunnels in Austria is resulting in rehabilitation and upgrading works for tunnels in the last and coming years. The H. Junger company is dealing with the assessment of the current conditions as well as the removal of damaged or chloride contaminated concrete and rehabilitation by sprayed mortar and final coatings. The removal of the concrete is done by means of high pressure water jet with working pressures up to 2500 bar and suitable nozzle systems adjusted for the prevailing conditions. To prevent the construction from failure during fire or of massive damages after tunnel fires additional requirements regarding fire protection

have become indispensable. Our company was awarded the first significant contract in Austria for the fire protection of a part of the Lainzer tunnel by the client ÖBB Infrastruktur Bau AG.

A dry mix shotcrete with PP fibres, which was developed for the purpose of fire protection, is used in this project. The application is done by means of the robotic manipulator "Meyco Logica 15". The Logica system is a computerized spray robot for the application of shotcrete and fire protection mortar with a defined thickness and uniformity. The robot is either positioned free in the tunnel on a carrier or, like in this case, working rail guided on a gantry. The main advantage is the speed of application and achieved accuracy of layer thickness.

1. Allgemeines

Durch die bekannten Brandkatastrophen nach Verkehrsunfällen entstand seit einigen Jahren die Diskussion über Sicherheitsaspekte in Tunnelbauwerken. Daraus folgte die Forderung nach einer Erhöhung bzw. Anpassung (Nachrüstung) der sicherheitstechnischen Ausrüstung in Verkehrstunnels.

Im baulichen Bereich wurde der Brandschutz zu einem wesentlichen Thema sowohl in der Tunnelinstandsetzung als auch im Neubau.

Eine Gefährdung im Brandfall in einem Verkehrstunnel ist neben Rauch- und Hitzeentwicklung einerseits durch die Gefahr des Versagens der gesamten Konstruktion, als auch durch den teilweisen Einsturz von Bauteilen (Abplatzungen, Versagen der Bauteile) gegeben.

Durch jahrelange Erfahrung der Fa. H. Junger Bauges.m.b.H. in der baulichen Instandsetzung von Straßentunnels ergab sich hier ein weiteres innovatives Betätigungsfeld, was speziell den Abtrag geschädigten Betons und die Sanierung unter Verwendung von automatisierten Spritzbetontechniken betrifft. Diese neue Technologie soll im Weiteren anhand des Bauvorhabens Lainzer Tunnel (ÖBB Infrastruktur Bau AG) vorgestellt werden.

2. Brandschutz von Tunnelbauwerken

Neben der verkehrstechnischen und elektrotechnischen Ausrüstung bzw. Nachrüstung von Tunnelbauwerken zur Verbesserung des Brandschutzes kommen spezielle Maßnahmen zur Anwendung, wie geeignete Konstruktionen, als auch neuartige Betone, die für diesen Zweck entwickelt wurden. Im Wesentlichen umfassen diese Entwicklungen die Anwendung spezieller Faserbetone als Pumpbetone als auch für die Verwendung im Bereich Spritzbeton.

Als Fasern gelangen solche aus Polypropylen zur Anwendung, deren Form, Größe und Menge genau für diese Zwecke angepasst sind.

Die Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten dieser Betonrezepturen wurde unter anderem in [1] untersucht.

3. Eigenschaften von PP- Faserbeton

Grundsätzlich kann die Wirkungsweise von PP-Fasern im Beton unter Brandeinwirkung folgendermaßen beschrieben werden:

Bei herkömmlichen Rezepturen entstehen im Brandfall durch die sehr rasch steigenden Temperaturen - 1200 °C nach 10 Minuten - im Beton neben Veränderungen des Zementsteins und der Gesteinskörnungen derartige Dampfdrücke und Temperaturspannungen, dass es bei herkömmlichen Beton nicht möglich ist, diese Drücke ausreichend rasch abzubauen. In der Folge kommt es zu Abplatzungen. Des Weiteren kann ein Versagen der Konstruktion eintreten da eine fortschreitende Querschnittsminderung eintritt und der Schutz der Bewehrung vor der Temperatureinwirkung nicht gewährleistet bleibt. Es werden nun als wichtigstes Ergebnis der zuvor angeführten Forschungen, dem Beton PP-Fasern mit einer Menge von 2,00 kg/m³ beigemischt. Dadurch werden, bei Temperaturen, die für das Betongefüge noch nicht gefährlich sind Transportwege für den Wasserdampf geschaffen. In der Folge bilden sich zusätzliche Hohlräume, über die sich der Dampfdruck sukzessive abbauen kann. Dadurch werden Zerstörungen verhindert und das Temperatureindringverhalten wesentlich verringert. Teilweise werden Innenschalen im Tunnelbau bereits mit solchen Rezepturen hergestellt. Im Anschluss soll eine weitere Anwendung dieser Technologie, anhand des Bauvorhabens Lainzer Tunnel LT 22 - 25 der ÖBB Infrastruktur Bau AG, ausführlicher erläutert werden.

4. Brandschutzmaßnahmen am Objekt Lainzer Tunnel

Als Verbindungsstrecke zwischen Süd-, West- und Donauländebahn im Zuge des Ausbaues als zu-

künftige Hochleistungsstrecke wird der Lainzer Tunnel im 14. Wiener Gemeindebezirk hergestellt. Die gegenständlichen Baulose LT 22 - LT 25 befinden sich im Bereich Hadersdorf und werden in Deckelbauweise mit ober- als auch unterirdischer Gleisführung ausgeführt.

Die Trasse führt durch bebauten Gebiet, mit Straßen- als auch Gewässerunterführungen, was deutlich macht, dass gerade hier ein ausreichender Brandschutz der Deckenkonstruktion unerlässlich wird, um ein etwaiges Versagen im Katastrophenfall sicher zu verhindern.

Die angeführten Baulose waren nun Objekt der Ausschreibung der ehemaligen HL-AG vom November 2004 zur Ausstattung mit Brandschutzschichten. Ausschreibungsinhalt ist es, den Großteil der Tragwerksunterseiten sowie teilweise die vorhandenen Wandflächen mit verschiedenen Brandschutzsystemen auszustatten.



Bild 1: Lainzer Tunnel LT 23

Die Gesamtlänge der betroffenen Bereiche beträgt rd. 1800 m, die Gesamtfläche rd. 43.000 m², wovon ca. 13.000 m² mit Brandschutzplatten verkleidet werden, der Großteil wird mit PP-Faserspritzbeton versehen.

Der größte Anteil der Spritzbetonflächen, rd. 23.000 m², befindet sich im Baulos LT 23, was ebenfalls den anspruchsvollsten Teil der Arbeiten im Hinblick auf die Applikation mit Hilfe eines Spritzbetonroboters darstellt, da hier eine Breite des Tunnelquerschnittes von rd. 24 m und eine lichte Höhe von rd. 12 m vorliegen.

Als besondere Herausforderung stellte sich jedoch der vorhandene Querschnitt der Deckenunterzüge in Form eines so genannten Hammerkopfprofils (Bild 1 bzw. Bild 2) dar, was sich einerseits auf die Förderung und Verarbeitung auswirkte, und andererseits eine speziell angepasste steuerungstechnische Lösung des Roboters erforderlich machte.



Bild 2: LT 23, Deckenunterzug - Vorversuch

Im Zuge der Arbeitsvorbereitung wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Meyco am Firmenstandort ein komplettes Modell im Maßstab 1:1 hergestellt und daran die Software und der geplante Ablauf der Spritzbahnen ermittelt und optimiert (Bild 2).

4.1 Untergrundvorbereitung - Spritzbeton

Auf die Flächen, deren Schutz mit Brandschutzplatten durchgeführt werden soll, wird im Rahmen dieses Artikels nicht näher eingegangen. Es kommt ein geprüftes System von Platten entsprechender Dicke und mit Edelstahlübelen zur Anwendung, deren Montage keine besonderen Anforderungen darstellt.

Was die Untergrundvorbereitung der Spritzbetonflächen betrifft, wurde auf die Methode des Hochdruckwasserstrahlens mit Drücken von bis zu 2500 bar zurückgegriffen. Dadurch konnte eine weitgehende Automatisierung der Bearbeitung erzielt werden.

Dazu kam ein Portalgerüst zum Einsatz, auf welchem auf entsprechenden Kranbahnen das Wasserstrahlgerät mit konstanter Bahngeschwindigkeit und Abstand die Flächen bearbeitete. Dadurch konnte eine gleich bleibende Untergrundbehandlung mit gleichförmiger Qualität für den Spritzbetonauftrag erzielt werden. Kriterien sind die erreichte Haftzugsfestigkeit ($\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$) und die mittlere Rautiefe ($\geq 1,0 \text{ mm}$). Diese Anforderungen erforderten einen Abtrag der Zementschlämme und das Freilegen des Korngerüsts. Bild 3 zeigt beispielhaft die Anordnung der Wasserstrahlgerätschaft am Gerüst.

Die Gerüstung wurde von der Fa. H. Junger entsprechend den Angaben des Geräteherstellers eigens angefertigt, um eine möglichst stabile Arbeitsplattform und damit Bahngenaugigkeit für die späteren Spritzbetonarbeiten zu bieten.

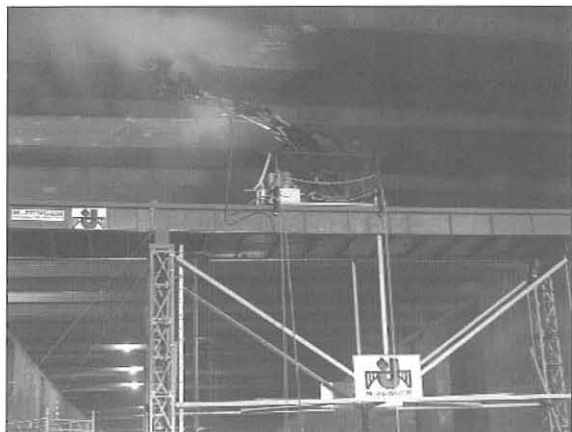


Bild 3: HDW Untergrundvorbereitung LT 23

Die entstehenden Abwässer der Untergrundvorbereitung wurden in einer Reinigungsanlage behandelt und abgeleitet. Aufgrund des Alters der Flächen wurden die laufenden Kontrollen hauptsächlich im Hinblick auf absetzbare Stoffe und pH-Wert Messungen durchgeführt.

Qualitätskontrollen der Betonflächen sind alle 500 m² durch eine akkreditierte Prüfanstalt vorgesehen, wobei Haftzugfestigkeit und mittlere Rautiefe ermittelt werden. Beide Anforderungen stellen bei der angewendeten Methode der Untergrundvorbereitung kein Problem dar.



Bild 4: Untersicht Decke, Rautiefemessung

Bild 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis der HDW-Behandlung mit Rautiefemessung. Die Abstandhalter sind sichtbar, das Korngerüst wurde freigelegt und eine bestmögliche Haftung des Spritzbetons gewährleistet.

4.2 Faserspritzbeton - Material

In den letzten Jahren wurde im Bereich des Brandschutzes von Tunnelbauwerken und der Entwicklung von brandbeständigen Betonen viel unternommen und entsprechende Versuche angestellt. Im Rahmen

der Ausführung des Lainzer Tunnels wurden Innenschalen aus Faserbeton ausgeführt und an verschiedenen Rezepturen zahlreichen Brandprüfungen durchgeführt [1]. Diese stellten die Basis der Ausschreibung des gezeigten Projekts dar. Es war dies die erste dieser Art in Österreich, mit dem einzigen Zweck der Ausstattung eines Eisenbahntunnels mit Brandschutzschichten.

In den Projektbeschreibungen und den Anforderungen wurden die Kriterien, welche das einzusetzende Material zu erfüllen hat, sehr genau beschrieben, wobei alternativ der Einsatz von Brandschutzmörteln mit Leichtzuschlägen neben Faserspritzbeton zulässig waren. Dieser musste jedoch auch den strengen Kriterien betreffend Frostbeständigkeit entsprechen. Das stellte sich für die in Frage kommenden Produkte letztendlich als noch nicht nachweisbar heraus, wobei der Brandschutz an sich für keinen Leichtmörtel ein Problem darstellte.

Für die Brandversuche wurde als höchste Stufe die Prüfung nach der niederländischen RWS - Temperaturkurve mit einer Maximaltemperatur von 1350 °C ausgeschrieben, und diese auf 180 Minuten verlängert. In der Grenzschicht Untergund - Spritzbeton durften 350 °C und in der ersten Bewehrungslage 250 °C nicht überschritten werden, was beim Einsatz von Spritzbeton naturgemäß nur mit höheren Schichtstärken zu erreichen war.

Demgemäß war an den meisten Flächen eine Bekleidung mit 8 cm vorgesehen, Deckenuntersichten zwischen den Unterzügen mit 6 cm. Ein gleichwertiger Schutz wäre durch Leichtmörtelprodukte mit einer Schichtstärke von 4 - 5 cm möglich gewesen. Eine geforderte Lebensdauer des Brandschutzes aufgrund der Bauwerksnutzung von 100 Jahren sprach ebenfalls für die Anwendung von Beton.

Aus Sicherheitsgründen ist die Montage einer Systembewehrung in der Brandschutzschicht vorgesehen. Die Anforderungen an diese Bewehrung, in Form einer funktionalen Ausschreibung, waren:

- Beständigkeit auf Lebensdauer,
- Standfestigkeit bei kompletten Ausfall der Haftung des Spritzbetons zum Untergrund
- Sogbelastung durch Zugverkehr von 3,6 kN/m² (dynam. Belastung),
- Brandbeständigkeit, Korrosionsschutz
- nur zugelassenen Systeme,
- Sicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite 1,5.

Durch Eigengewicht, Sogbelastung und Sicherheitsbeiwert ergeben sich Lasten von rd. 8,0 kN/m². Es mussten Anker für Zugzonenbelastung verwendet werden, ohne selbstverständlich bei der Montage die Bewehrung der Konstruktion zu verletzen.

Weiters durften die Dübel ausschließlich auf zentrischen Zug belastet werden und eine geeignete Methode der Montage des Bewehrungsgitters an die Anker musste gefunden werden, die den obigen Kriterien entsprach. Dies gelang schließlich durch Einzelzulassungen einzelner Bauteile und verstärkte Prüfungen.

Zur Ausführung kam als Brandschutz der Faserspritzbeton Novimontan der Fa. Schretter & Cie, mit einem PP-Fasergehalt von $2,0 \text{ kg/m}^3$. Die Fasern der Fa. Bekaert hatten bereits im Jahr 2003 eine Brandprüfung an der TU Wien nach der RWS-Kurve bestanden.

Dieser Spritzbeton stellte sich nach mehreren Versuchen im Hinblick auf Förderleistung, Oberfläche und der Anwendung des Spritzroboters als geeignet heraus.

5. Auftrag mit Spritzbetonroboter

Im Zuge der Bearbeitung der Ausschreibung und der Auseinandersetzung mit den Themen Brandschutz und Automatisierung in der Spritzbetontechnik wurde die Anwendung eines Roboters für dieses Objekt als optimale Variante angesehen.

Ebene Untergründe, konstante Geometrien, Spritzleistung und gleich bleibende Qualität waren ausschlaggebend. Dazu kommen Vorteile im Ablauf der Baustelle und Erfahrungen der ausführenden Firma mit Automatisierungsverfahren in der Hochdruckwassertechnik beim Betonabtrag.

Bei dem Anforderungskatalog kam letztlich nur eine Maschine der Fa. Meyco, Typ Logica 15, in Frage, da sich hier die Möglichkeit ergibt, Flächen mittels Laserscanner einzulesen und anschließend vollautomatisch zu bearbeiten, als auch händisch als Spritzmanipulator einzugreifen.

Das größte Problem im Zusammenhang mit der Robotersteuerung war jedoch, eine geeignete Methode des Spritzens der Hammerkopfunterzüge zu finden, da dies mittels Laserscanner aufgrund der Geometrie nur eingeschränkt möglich ist und damit unwirtschaftlich wird.

Zu diesem Zweck wurde in enger Zusammenarbeit der Beteiligten eine spezielle Software für diesen Anwendungsfall, ähnlich einer Werkzeugmaschine, entwickelt.

Ausgangspunkt dieser Steuerung sind die genauen Abmessungen der Flächen und deren Winkel zueinander. Startpunkte, Winkelstellung und Abstände der Spritzdüse und Spritzbahnen müssen über diese Software (Bild 5) via Laptop definiert werden, um die wesentlichen Parameter festzulegen.

Selbstverständlich mussten im Zuge von Versuchen Vorschubgeschwindigkeit, Förderleistung und Ge-

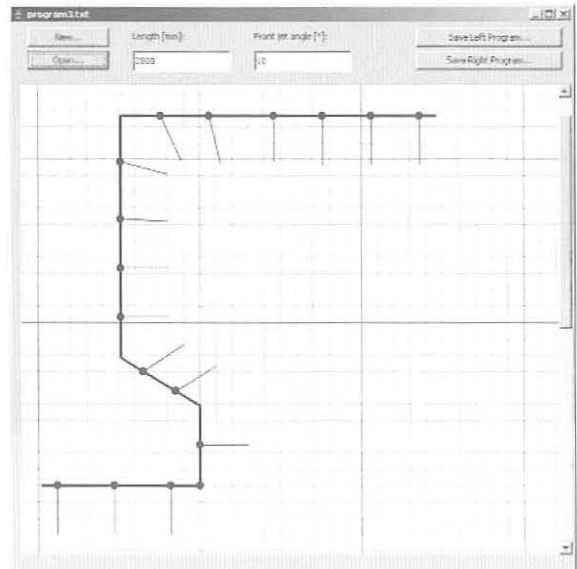


Bild 5 : Geometriedaten am Roboter

windigkeit der Taumelbewegung der Düse noch exakt justiert werden um das Spritzergebnis zu optimieren.

Die folgenden Bilder (Bilder 6 - 8) geben einen Überblick über das Gerät und die Arbeitsweise.

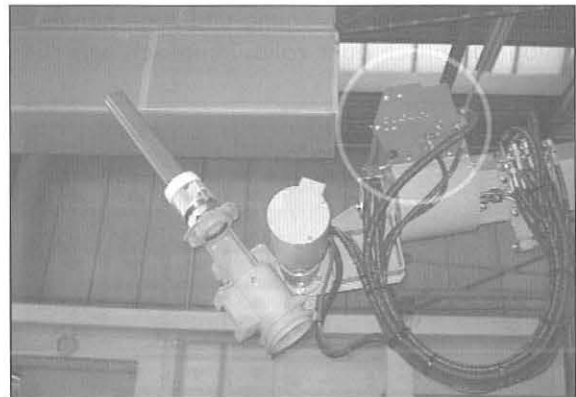


Bild 6 : Spritzkopf mit Laserscanner (Kreis)



Bild 7 : Spritzversuch LT 23