

Der Bau der Save-Brücke in Belgrad, Serbien

Besonderheiten der Ausführung in betontechnischer Sicht

Text | Martin Steinkühler, Patrick Wagner

Bilder | © Ogranak Sava Most

Belgrad als Hauptstadt Serbiens ist nicht nur Wirtschaftszentrum und Magnet für die arbeitssuchende Landbevölkerung, sondern auch Kreuzungspunkt wichtiger Verkehrswege, wie die unter dem Namen „Autoput“ bekannte Hauptverkehrsader Südeuropas E75 und der Flüsse Save und Donau. Im Stadtgebiet stehen zurzeit nur zwei Brücken zur Verfügung. Die rasant wachsende Verkehrsbelastung macht eine neue Save-Querung erforderlich. Die neue Brücke über die Save soll im Wesentlichen den innerstädtischen Verkehr entlasten und ist auch zur Aufnahme zweier Gleise einer zukünftigen Belgrad-Metro vorgesehen. Gleichzeitig soll die neue Brücke ein Zeichen in einem nach Europa strebenden Land setzen.

Einleitung

Die aktuelle Verkehrssituation ist geprägt von der 90%igen Nutzung der internationalen Autobahn E75 durch den innerstädtischen Nahverkehr einschließlich Linienbussen. Von den zwei derzeit zur Verfügung stehenden Brücken ist eine eine zweigleisige Trambahnbrücke, die auch für KFZ-Verkehr genutzt wird.

War Neu-Belgrad früher ein Teil von Österreich-Ungarn, am nördlichen Ufer der Save lange Zeit nur Wohngebiet und der Stadtkern um Alt-Belgrad am südlichen Save-Ufer früher ein Teil des Osmanischen Reiches, Wohn- und Geschäftsviertel, haben sich mittlerweile Verkehrsflüsse in beide Richtungen ergeben.

2007 wurde ein internationaler Wettbewerb ausgeschrieben, den der vorliegende Entwurf gewann. Anschließend wurde das Projekt Save-Brücke ausgeschrieben. Den Auftrag bekam 2008 ein Konsortium angeführt von PORR mit DSD (Deutschland) und SCT (Slowenien). Die Bauarbeiten begannen im April 2009.

Das am häufigsten herangezogene Kriterium zur Bewertung von Schrägseilbrücken ist die Länge des Hauptfeldes. Dieses Ranking wird von der „Sutong“-Brücke in China und der „Stonecutter's“-Brücke in Hongkong mit den welt-

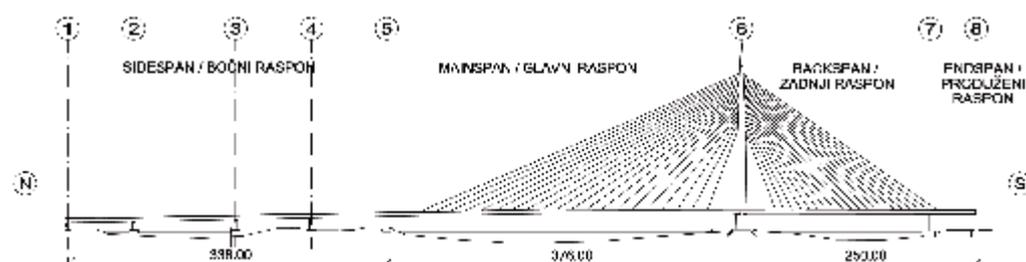
weit längsten Hauptfeldern von 1.088 m bzw. 1.018 m angeführt. Dies sind jedoch zweipylonige Brücken. In der Kategorie Schrägseilbrücken mit einem Pylon ist die Sava-Brücke mit einer Hauptspannweite von 376 m, einer Überbaubreite von 45 m und einem 200 m hohen Pylon zurzeit die größte asymmetrische Schrägseilbrücke auf der Welt. Die Gesamtbrückenfläche beträgt 43.515 m².

Pylongründung

Bei der Gründung des Pylons wurde eine sogenannte Topfgründung gewählt. Hierzu wurde eine kreisförmige Schlitzwand $d = 100$ cm, die sowohl zur Lastabtragung als auch zur gleichzeitigen Baugrubenumschließung und -sicherung dient, mit einem Durchmesser von 36 m bis zu einer Tiefe von 39 m hergestellt. Innerhalb des Schlitzwandringes wurden 113 Bohrpfähle $d = 150$ cm im Raster bis zur Gründungstiefe der Schlitzwand hergestellt. Nur für diese Gründungsarbeiten wurden bereits 16.000 m³ Beton verbaut. Beim Aushub diente die Schlitzwand als Baugrubenverbau.

Die 8 m dicke Pfahlkopfplatte mit einer Gesamtbetonmenge von ca. 7.000 m³ verteilt die Lasten in Pfähle und Schlitzwand. Die Pfahlkopfplatte war in 3 Abschnitte unterteilt.

Übersichtsplan Save-Brücke



Alleine für die Pylon-gründung wurden bereits 16.000 m³ verbaut.



Betonage Pfahlkopfplatte Pylon, 2.700 m³ erster Abschnitt



Materiallandienung für den Pylon mit Barge

Für diese massigen Bauteile wurde eine Hitze- und Spannungssimulation erarbeitet und die voraussichtliche Kerntemperatur ermittelt. Die Abbinde Temperaturen des Betons wurden mit Wärmesonden sowohl im Kern des Bauteiles als auch oberflächennah gemessen und deckten sich mit den zu erwartenden Ergebnissen der Simulation.

Pylonbetonage mit 3 m³-Kübel



Pylon

Der 200 m hohe Pylon hat eine Kegelform. Auf dem Fundament beträgt der Radius 8 m, und er verjüngt sich kontinuierlich bis auf 0,75 m in 200 m Höhe. Es wurden in Summe 6.400 m³ Beton eingebaut, C45/55 für die Stiele und C55/67 für den Verankerungsbereich der Schrägseile. Dazu wurden 1.300 t Bewehrung eingebaut.

Eine besondere Herausforderung war die Logistik der Pylonbaustelle. Es war vertraglich nicht erlaubt die Straßen der als Naherholungsgebiet genutzten Halbinsel Ada Ciganlija für den Materialtransport zu nutzen. Sämtliche Baumaterialien vom Aushub bis hin zum Beton wurden mit Pontons auf die angeschüttete Arbeitsplattform des Pylons gebracht.

Dabei erwiesen sich schräge Rampen an Land und Pontons mit entsprechend klappbaren Rampen als die beste Lösung der Zuwegung, die auch bei unterschiedlichen Wasserständen funktionierten.

Die insgesamt 60 Betonierabschnitte des Pylons wurden bis in 40 m Höhe mit einer normalen Mobilpumpe und dann mittels Turmdrehkran und einem 3-m³-Betonkübel mit Fernsteuerung betoniert. Diese Betonandienung für den 175 m hohen Betonpylon wurde intensiv diskutiert. Die Betonpumpenhersteller waren sehr interessiert, für dieses exponierte Bauteil eine maßgeschneiderte Lösung

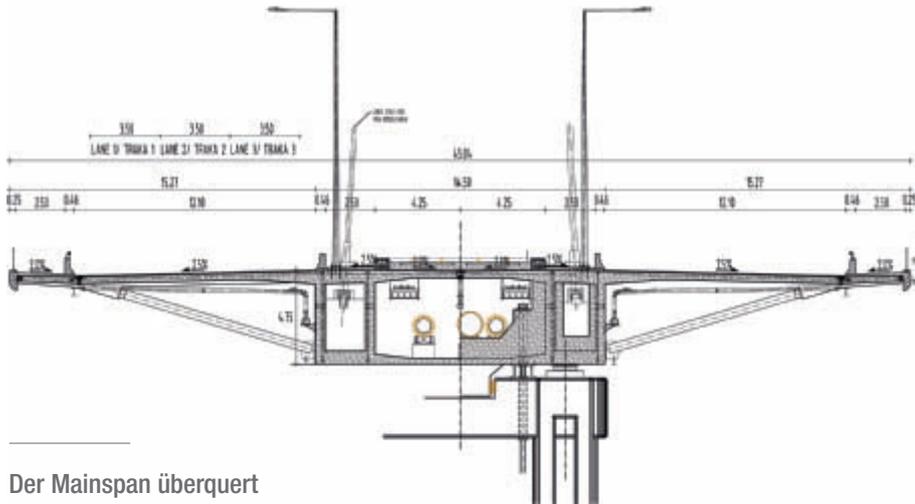
anzubieten. Letztlich entschied sich die Baustelle gegen eine Betonpumpenlösung. Das Risiko eines Stopfers im heißen Sommer, die lange vertikale Leitung, die Vorhaltung über 13 Monate sowie die mit steigender Höhe größer werdende Verlustmenge sprachen dagegen.

Weil durch die gewählte Andienung die Einbaugeschwindigkeit sank, konnte die Kletterschalung auf einen günstigeren Schalungsdruck ausgelegt werden. Als Nebeneffekt wurde die Einbauqualität besser, weil mehr Zeit für das Verdichten verwendet wurde. Die hochwertige Oberfläche des Pylons rechtfertigte die Entscheidung. Ein einziges Mal kam es durch einen technischen Defekt am Turmdrehkran zu einer 3-stündigen Unterbrechung. Der Betonkübel konnte jedoch abgelassen werden, und die Betonage konnte nach Reparatur wegen des eingesetzten Verzögerers noch frisch auf frisch fortgesetzt werden.

Der Kran wurde je nach Baufortschritt geklettert und über Horizontalabspannungen an den Pylon verankert. Das größte Pylonsegment, an der Stelle, wo sich die beiden Pylonstiele vereinen, war Segment 22 mit fast 245 m³, und das kleinste war das letzte Segment 39 mit knapp 45 m³.

Der Turmdrehkran wurde für die Schrägseilmontage vorgehalten und diente auch dazu, am Ende der Seilmontage die 25 m hohe Pylonspitze aus Stahl aufzusetzen.

Regelquerschnitt Backspan



Der Mainspan überquert mit 376 m Spannweite die Save.

Freivorbau des Mainspans mit 320 t schweren Stahlsegmenten

Überbauten

Das Tragwerk unterteilt sich in Backspan, Mainspan und Sidespan. Der Überbau ist ein Durchlaufträger mit dem Pylon als Festpunkt. Der Backspan ist das rückwärtige Feld mit 200 m Spannweite bis zum Pylon und dient als Ballastfeld für den Mainspan. Er ist ein dreizelliger Hohlkasten aus Spannbeton, die Seitenkästen nehmen die Schrägseile auf. Die 15 m breiten Kragarme werden alle 4 m von Stahlstreben unterstützt. Der Überbau wurde von einer aufgeständerten Feldfabrik Richtung Pylon im Taktschiebverfahren hergestellt. Er wurde dabei von 4 temporären Hilfsstützen unterstützt, die nach dem Einbau aller Schrägseile rückgebaut werden mussten.



Da die Save-Brücke gemäß Vertrag ohne Beeinträchtigung der Wasserstraße und damit ohne Hilfspfeiler hergestellt werden musste, ergab sich daraus der Bauablauf. Erst nach Fertigstellung des Pylons bis zur ersten Schrägseilverankerung und gleichzeitigem Verbinden des Backspans mit dem Pylontisch konnte der Freivorbau des Hauptfeldes beginnen.

Der Mainspan überquert mit 376 m Spannweite die Save. Bei gleichen äußeren Abmessungen wird der Überbau aus 8.600 t Stahl hergestellt. Dazu werden auf einer benachbarten Halbinsel im Vorfertigungsbereich 16 m lange und 45 m breite Brückensegmente vorgefertigt und dann mit einem Gewicht von ca. 330 t mittels selbstfahrenden Schwer-



Taktschieben Sidespan



Halbfertigteile für Brückenkappen

lasttrolleys auf einen Ponton gefahren. Das Element wird nun unter dem Kragarm im Fluss positioniert, am Derrick angeschlagen und mit Litzenhebern hochgezogen. Nach dem Abschweißen des neuen Elementes wird der Derrick vorgefahren und das nächste Schrägseilpaar eingebaut. Dieser Freivorbau erfolgt im Zweiwochentakt.

Der Sidespan ist eine Vorlandbrücke auf nördlicher Seite. Er ist im Endzustand mit dem Mainspan verbunden. Der Querschnitt hat mit 45 m Breite und einem einzelligen Hohlkasten mit einer Höhe von 4,75 m die gleichen äußeren Abmessungen wie die Hauptbrücke. Auch hier wird

der Überbau im Taktschiebeverfahren im Zweiwochentakt über 18 Elemente mit einer Regellänge von 20 m über Hilfsstützen eingeschoben. Nach dem Ausbau der Hilfsstützen beträgt die Hauptspannweite 108 m. Da den Sidespan keine Schrägseile halten, muss der Überbau mit einer starken Sekundärvorspannung im Steg verlaufend verstärkt werden.

Zum Bauvertrag der Save-Brücke gehören auch die Auf- und Abfahrtsrampen auf beiden Seiten der Save. Diese werden als integrale Brückentragwerke konventionell als Plattenbalken aus Spannbeton hergestellt. Erwähnenswert sind bei der Rampe 4 der Südseite die Hohlkörper in

Feldmitte zur Reduzierung des Eigengewichtes des Überbaus. Die Rampe 5 wird als Verbundüberbau hergestellt. Grund sind die Überquerung einer 4-gleisigen elektrifizierten Eisenbahnstrecke sowie die geforderte kurze Bauzeit.

Ausbaugewerke

Da nach dem Lückenschluss aufgrund der Terminenge innerhalb eines Monats alle Kappen, Gehwege sowie Betonleitwände installiert werden mussten, kamen nur Fertigteile infrage. Dabei kann man mit der Herstellung der runden Kappen in einer Fertigteilfertigung eine hohe Oberflächenqualität erzielen. Die Halbfertigteile werden mit Stahlträgern und Gegengewicht montiert, am Überbaurand abgedichtet und die Fuge vergossen. Nach dem Aushärten hängt die Kappe am Kragarm, die Stahlträger werden entfernt und die Gehwege können betoniert werden.

Als Anprallschutz kommen New-Jersey-Schutzwände als Fertigteile zum Einsatz, die auf der Rückseite Anschlussbewehrung für die Gehwege haben. Damit werden Anpralllasten über den Gehweg in die Kappenbewehrung des Überbaus geleitet. Die Aufhaltestufe entspricht H 2. Die Brückenabdichtung entspricht den Anforderungen europäischer Normen und wird in Epoxidharz und einlagiger Membran ausgeführt.

Die Schrägseilverankerungen sind ebenfalls mit New-Jersey-Wänden geschützt. Die zukünftige zweigleisige Trambahn erhält die gleiche Abdichtung wie oben beschrieben, als Schutz der Membran jedoch einen 10 cm starken bewehrten Schutzbeton, der dann den Gleisschotter aufnimmt. Begrenzt wird der Gleisbereich von Fertigteilkabeltrögen.

Beton

Das Projekt Sava-Brücke wurde nach dem internationalen Vertragswerk Fidic Yellow Book ausgeschrieben. Dies bedeutet, dass sowohl die Planungsleistung als auch die Bauausführung vom Auftragnehmer zu erbringen ist.

Die technischen Anforderungen an den Beton waren in der Ausschreibung wie folgt beschrieben:

“The Contractor shall for all his concrete works submit for the Engineers approval concrete mix designs where beside it's structural properties, special attention will be brought to concrete corrosion, frost resistance and durability. The Contractors batching plant(s) will be subject the Engineers approval. This approval will depend on the batching plants equipment, personnel, general and specific experience. A constant supply of materials for concrete works which will provide a high quality finish of the same shade should be sought by the Contractor and approved by the Engineer.”

Besondere Anforderungen an die Betonoberflächen standen unter Bridge appearance and aesthetics: “Exposed concrete of the pylon and piers shall be a near white colour, high quality finish.

Da die in der Norm enthaltenen Expositionsklassen und die teilweise geforderten hohen Festigkeitsklassen in Serbien nicht vorhanden waren, war eine der ersten Herausforderungen die Entwicklung der erforderlichen Betonrezepturen. Es waren unterschiedliche Betone mit unterschiedlichen Eigenschaften erforderlich.

The concrete will be of a high standard to produce a constant near white colour using an approved source of materials. Finished surfaces shall be free of any mark or blemishes and be a smooth and of uniform texture.”

Im Vordergrund stand für die ARGE ein Baustoff, der mit lokalen Zuschlägen (Donaukies) die geforderten Festigkeiten erbrachte und eine möglichst helle Farbe hat. Die gleichbleibende Qualität musste für über 63.600 m³ Beton gewährleistet werden.

Die Normen, die gemäß Vertrag als Grundlage für die Planung und Ausführung herangezogen werden mussten, beziehen sich meist auf europäische EN-Normen und nicht auf lokale serbische Normen.

So ist auch die Betonnorm EN 206-1: „Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ Grundlage für die Betonarbeiten. Bei dieser Vertragsforderung und dem Bestreben lokale Mischwerke einzusetzen, gab es das Problem, dass der lokale Betonproduzent den serbischen Normen folgt. Diese Normen unterscheiden sich aber doch in einigen Punkten, speziell was Prüfumfang und Prüfhäufigkeit sowie Art und Weise der Fremdüberwachung betrifft.

Zusätzlich zu diesen Unterschieden war eine Vorgabe des Auftraggebers, dass von jedem Bauteil mindestens 3 Probewürfel für die 28-Tage-Druckfestigkeit genommen werden mussten, die dann in dem baustelleneigenen Betonlabor normgerecht gelagert, vermessen und geprüft wurden. Nur die Frostbeständigkeitsprüfungen wurden durch autorisierte lokale Institute (Technical University of Belgrad, „IMS“) durchgeführt, da die Anschaffung der erforderlichen Prüfeinrichtungen nicht wirtschaftlich gewesen wäre.

Als erster Schritt musste ein Betonwerk gefunden werden, welches die geforderten Kapazitäten und Ressourcen bereitstellen konnte sowie so zur Baustelle lag, dass eine kontinuierliche Betonandienung trotz des innerstädtischen Verkehrs gewährleistet war.

Da die in der Norm enthaltenen Expositionsklassen und die teilweise geforderten hohen Festigkeitsklassen in Serbien nicht vorhanden waren, war eine der ersten Herausforderungen die Entwicklung der erforderlichen Betonrezepturen. So waren für die Bohrpfähle, Schlitzwand, Fundamente und Pfeiler, Überbau, Kappen und den Pylon unterschiedliche Betone mit unterschiedlichen Eigenschaften erforderlich. In enger Zusammenarbeit mit dem örtlichen Beton-Lieferanten, seinem Zulieferer von Betonzusatzmitteln und unter Mitwirkung von firmenzugehörigen

österreichischen Betontechnikern wurden Betonsorten nach den Anforderungen der Baustelle entwickelt. Auf der einen Seite war es wichtig eine relativ rasche Frühfestigkeit zu erzielen, um die interne Vorspannung aufbringen zu können, damit der Bauablauf nicht gestört wird. Auf der anderen Seite ist die Wärmeentwicklung bei diesen höherfesten Betonen mit einem hohen Zementanteil von bis zu 460 kg/m^3 (Flugasche ist in Serbien nicht verfügbar) genau zu beobachten.

Auch bei in Österreich üblichen Vorgängen, wie das Abbinden durch Zugabe von Additiven zu verzögern, gibt es in Serbien wenig Erfahrung. Zu diesem Zweck wurden auf der Baustelle Probefelder betoniert und im Abstand von 30 Minuten das Ausbreitmaß gemessen, um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen. Natürlich wurde auch die Festigkeitsentwicklung kontrolliert, um zu sehen, ob die Zugabe des gewählten Additivs eine Auswirkung auf die 28-Tage-Festigkeit hat.

Wegen des geringen w/b-Wertes des Betons wurde auch ein Fließmittel zugegeben. Da diese Zusatzmittel je nach Temperaturbereich unterschiedlich reagieren, wurde ein „Winter-“ und ein „Sommerrezept“ entwickelt.

Die positiven Ergebnisse der Eignungsprüfungen sowie der Begehungen der Mischwerke führten zur Zustimmung durch den „Engineer“, der in FIDIC-Verträgen üblichen externen (hier britischen) Bauüberwachung.

Qualitätsüberwachung des Lieferbetons

Gemeinsam mit den Probewürfeln, die in der Mischanlage (nach serbischer Norm) genommen wurden und von lokalen Instituten geprüft wurden, sowie den Baustellenwürfeln, die im Baustellenlabor abgedrückt wurden, wurden alle Werte der Festigkeits-



Sidespan und Mainspan wachsen zusammen.



Pylon-Achse 6, Höhe 175 m

überwachungen gesammelt und wöchentlich an die Bauüberwachung übergeben. Zur Auswertung und Nachverfolgung der Betondruckfestigkeitswerte wurden die Daten und Prüfergebnisse aller Betonagen in einer Betondatenbank als Qualitätssicherungssystem aufgenommen. Monatlich konnten so die

7- und 28-Tage-Druckfestigkeiten aller geprüften Probekörper über Diagramme dargestellt, ausgewertet und analysiert werden. Diese Datenbank konnte auch zur Abrechnung mit dem Lieferwerk genutzt werden und gab wertvolle Hinweise über die verbrauchten Mengen.

Kühlen des Betons bei der Herstellung

Die serbische Norm sieht eine maximale Frischbetontemperatur von 30° C vor. Es ist deshalb erstaunlich, dass zur Zeit der Betonausschreibung in ganz Serbien keine einzige Mischanlage ein Kühlsystem installiert hatte. Das führte zu Betontemperaturen an heißen Sommertagen von bis zu 35° C und Mängelanzeigen der Bauüberwachung. Gemeinsam mit unserem lokalen Mischwerk wurde deshalb in ein Kühlsystem investiert. Bis jetzt gibt es in Belgrad nur dieses eine Betonmischwerk mit der Möglichkeit, Beton zu kühlen. Das Kriterium für die Auswahl des Kühlsystems war der hohe Zementgehalt von bis zu 460 kg/m³. Die Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass die Wasserkühlung oder Scherbeneisanlage keine wirklichen Alternativen sind. Daher ist die Entscheidung auf das Kühlen des Zementes mit Flüssigstickstoff gefallen. Dabei wird der Zement beim Einblasen in das Silo auf bis zu -20° C abgekühlt.

Ein Nachteil dieses Kühlsystems ist, dass sich der Zement im Silo wieder erwärmt und nicht mehr nachgekühlt werden kann. Das bedeutet, dass nur jene Menge an gekühltem Zement ins Silo eingeblasen werden darf, die auch dem Baufortschritt der Baustelle entspricht. Um dies logistisch zu bewältigen, wird dem Betonlieferanten am Ende jeder Woche ein Betonierprogramm der folgenden Woche übergeben.

Der gekühlte Zement wird in eigenen Silos gelagert und ausschließlich für die Baustelle Save-Brücke und deren Nachfolgeprojekte (südliche Anschlussrampen) verwendet. Auf die Nachbehandlung mit Curringmitteln, Abdeckmatten und -folien sowie – soweit es der enge Terminplan zuließ – längerer Verweildauer in der Schalung wurde besonderer Wert gelegt.

Anforderungen an die Farbe des Betons

Die besonderen vertraglichen Formulierungen hinsichtlich der Farbe des Betons wie „near white colour, constant white colour, same shade, etc. ...“ waren

jedoch schwierig zu erfüllen. Wenn an einem Bauwerk einer solchen Größenordnung rund um die Uhr bei den unterschiedlichsten Temperaturen und Witterungsbedingungen gearbeitet wird, dann führt das bei den einzelnen Betonierabschnitten zu unterschiedlichen Farbschattierungen/Grautönen. Letztlich

Die serbische Norm sieht eine maximale Frischbetontemperatur von 30° C vor. Es ist deshalb erstaunlich, dass zur Zeit der Betonausschreibung in ganz Serbien keine einzige Mischanlage ein Kühlsystem installiert hatte.

gelang es mithilfe des entwurfsverfassenden Architekten die natürlichen Schattierungen als besonderes Merkmal des Baustoffes Beton und als Unterschied zum angestrichenen Stahlbau für sich stehen zu lassen. Damit wird auch die Funktion des Backspans als Ballastfeld für den Stahl-Mainspan offensichtlich. Die Angabe einer RAL-Farbe als Leistungsziel für den Beton hätte keinen Auslegungsspielraum geboten und hätte wegen Unmöglichkeit zu einem kompletten Anstrich der Brücke zulasten der ARGE geführt. Dies ist bei hochwertigem Beton aber keine Qualitätsverbesserung, sondern führt zu erhöhten Wartungskosten für den Bauherren, da der Anstrich nicht so lange hält wie Beton.

Als Fazit ist festzuhalten, dass durch das Zusammenwirken der örtlichen und österreichischen Fachleute mit der Bauüberwachung die Leistungsziele eines hochwertigen und dauerhaften sowie rissfreien Betons mit glatten und dichten Oberflächen und weitgehend gleichmäßiger hellen Färbung erreicht wurde.

Ausblick

Der Lückenschluss zwischen Sidespan und Mainspan ist für den August geplant, die in Inbetriebnahme für Ende 2011. Der Baufortschritt kann mittels Webcams über Savabridge.com im Internet verfolgt werden.

Projektdaten:

Bauherr: Bauherr: City of Belgrade | **Statik:** Leonhardt, Andrä und Partner, Ponting (Prüfingenieur), Ste.p ZT-GmbH, Ibbs ZT-GmbH, Werner Consult (südliche Zufahrtsrampen) | **Bauüberwachung:** Louis Berger Group, Inc Washington D.C. | **Baufirma:** PORR (kaufmännisch und technisch federführend, DSD, Deutschland) | **Planungsbeginn:** Mai 2008 | **Baubeginn:** April 2009 | **Fertigstellung:** Verkehrsfreigabe Ende 2011, Bauende Mitte 2012 | **Lieferanten:** Brückenlager - Reisner&Wolff, Fahrbahnübergänge - Reisner&Wolff, Schalung - Doka

Autoren:

Martin Steinkühler (Projektleiter PORR),
Patrick Wagner (Oberbauleiter PORR)
► www.porr.at



Die **Intelligenz**, die in **Zement** steckt, ermöglicht **innovatives Bauen**.

LAFARGE
bringing materials to life

ENGINEERED BY LAFARGE
www.lafarge.at

MODERNES WOHNEN UND ARBEITEN ERFORDERN KREATIVE UND NACHHALTIGE LÖSUNGEN AUS BETON. SO WERDEN BAUSTOFFE TEIL UNSERES LEBENS.