

Die S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – ein unterirdisches Verkehrsbauwerk mit ganz besonderen Anforderungen

Das Bahnprojekt Stuttgart–Ulm (S21) ist das größte Ausbauprojekt für den öffentlichen Schienenverkehr in Baden-Württemberg seit dem 19. Jh. Es umfasst neben dem Neubau von zahlreichen Tunneln und Trassen auch eine komplette Umgestaltung des Eisenbahnknotens Stuttgart: Die Gleise des alten Kopfbahnhofs werden durch einen um 90° gedrehten, unterirdischen Durchgangsbahnhof ersetzt. Die neue, 447 m lange, 80 m breite und bis zu 12 m hohe Bahnsteighalle ist als fugenlose Massivbaukonstruktion ausgelegt. Sie besteht aus einem Trog aus Normalbeton und einem Schalendach aus Weißbeton, welches von den Trogwänden und 28 Kelchstützen getragen wird. Die Bodenplatte ist auf Ramm- und Bohrpfähle gegründet. Lediglich im Bereich des bestehenden S-Bahn-Tunnels überspannt sie diesen als Brückenkonstruktion: dies ist die sog. S-Bahn-Querung. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Besonderheiten dieses anspruchsvollen Tragwerks aus Sicht der beteiligten Ingenieure. Betrachtet werden hierbei neben der Konstruktion mit ihrer internen verbundlosen Vorspannung auch das über die normativen Anforderungen hinausgehende Bemessungskonzept sowie das konstante Monitoring des Bauwerks über seinen gesamten Nutzungszeitraum hinweg.

Stichworte Brückenbauwerk; Monitoring; Bemessung; Vorspannung; Bahnhof; S21

1 Geometrie und Tragwerk

Die S-Bahn-Querung ist als vorgespannte Brückenkonstruktion mit einer Spannweite von etwa 30 m in Bahnhofslängsrichtung ausgebildet, sodass das tiefer liegende Bestandstunnelbauwerk nicht von der neuen Bahnhofshalle belastet wird (Bild 2). Die Konstruktionshöhe der Brücke variiert über die Spannweite um etwa 0,5 m, da die Oberkante das leichte Gefälle der Bahnhofshalle aufnimmt, während die Unterseite horizontal ist. Im Mittel beträgt die Konstruktionshöhe 3 m (im Bereich der Bahnsteige) bzw. 2 m (im Bereich der Gleise). Das Brückentragwerk gründet auf neu erstellten Bohrpfehlwänden seitlich des S-Bahn-Tunnels. An den Stirnseiten des Brückentragwerks befindet sich jeweils ein Wartungsgang.

Auf dem Brückentragwerk stehen zwei Kelchstützen, die das Schalendach tragen (Bild 1). Außerdem mussten in der Trogplatte an dieser Stelle auch Treppenabgänge zum S-Bahn-Tunnel platziert werden (Bilder 3, 4), wodurch vier große Durchbrüche entstanden.

Aus den Kelchstützen resultiert eine abzuleitende Last von jeweils 60 MN im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

The S-Bahn crossing in Stuttgart's new S21 underground station – an underground transport structure with very special requirements

The competition for the new construction of Stuttgart's main railway station was decided in 1997 – but for various reasons it took more than ten years until realisation could actually begin in February 2010. Now that the preparatory foundation work has been completed, the daily progress of construction is particularly visible through the rising load-bearing structures. An important part of the work so far has been the construction of the S-Bahn crossing, which is particularly demanding in terms of structural planning. This article describes the special features of this supporting structure from the point of view of the engineers involved. In addition to the construction with its internal bondless prestressing, the design concept that goes beyond the normative requirements and the constant monitoring of the structure over its entire period of use are also considered.

Keywords bridge structure; monitoring; design; prestressing; railway station; S21

Aufgrund dieser großen Kräfte und zur Begrenzung der Verformungen wird die Brücke vorgespannt. Im Endzustand ist die Brückenkonstruktion monolithisch mit den benachbarten Bodenplatten und über die beiden Kelchstützen mit dem Schalendach verbunden. Während der Bauzeit und somit auch während der Spannvorgänge ist



Bild 1 Innenansicht des neuen Stuttgarter Tiefbahnhofs
Interior view of the new Stuttgart underground station

Quelle: Ingenhoven Architects, Düsseldorf

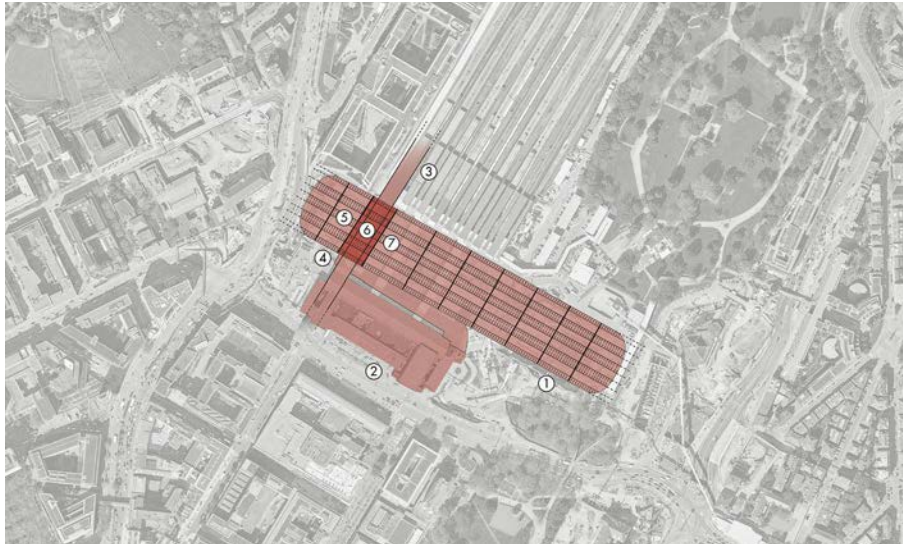


Bild 2 Grundriss des neuen Stuttgarter Bahnhofs: 1 der neue Tiefbahnhof, 2 bestehendes Bahnhofsgebäude, 3 S-Bahn-Strecke im Tunnel unter dem neuen Tiefbahnhof, 4 S-Bahn-Querung des neuen Tiefbahnhofs, 5 Bauabschnitt 10, 6 Bauabschnitt 11 (S-Bahn-Querung), 7 Bauabschnitt 12

Floor plan of the new Stuttgart railway station: 1 the new underground station, 2 existing station building, 3 S-Bahn line in the tunnel under the new underground station, 4 S-Bahn crossing of the new underground station, 5 construction phase 10, 6 construction phase 11 (S-Bahn crossing), 7 construction phase 12

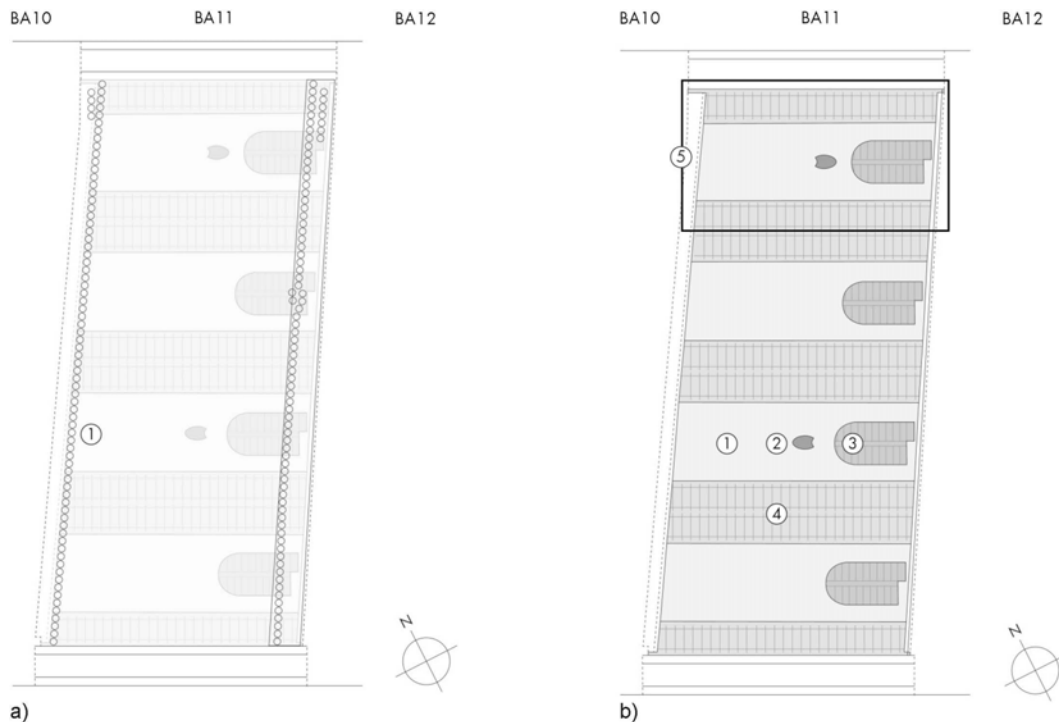


Bild 3 Grundriss der S-Bahn-Querung: a) Pfahlgründung – 1 Bohrpfahlgründung, b) Brückenbauwerk – 1 Bahnsteig, 2 Kelchstütze (60 MN im GZT), 3 Treppena-
bgang zur S-Bahn, 4 Gleisbereich, 5 Ausschnitt Bild 5

Ground plan of the S-Bahn crossing: a) bored pile foundation, b) bridge structure – 1 platform, 2 calyx support (60 MN in GZT), 3 stairway exit to S-Bahn, 4 track area, 5 section Fig. 5

die monolithische Verbindung zu den benachbarten Bodenplatten allerdings noch nicht hergestellt.

Als Spanntechnologie kommt die „Interne Vorspannung ohne Verbund“ zum Einsatz; im Gegensatz zur Vorspannung mit nachträglichem Verbund ist hier ein mehrfaches Anspannen einzelner Spannglieder auch über lange Zeiträume hinweg problemlos möglich. So ist es möglich, die Spannglieder während der Bauzeit entsprechend der Laststeigerung im Baufortschritt anzuspinnen. Weiterhin kön-

nen auch die bis zum Ende der Rohbauarbeiten eingetretenen Spannkraftverluste aus Schwinden und Kriechen des Betons durch erneutes Vorspannen vor Herstellung der monolithischen Verbindung der Brückenkonstruktion mit den benachbarten Bodenplatten kompensiert werden. Der Korrosionsschutz wird bereits werkseitig auf die Spannglieder aufgebracht, d.h., die Litzen sind von Beginn an zuverlässig vor Korrosion geschützt. Bei einer Vorspannung mit nachträglichem Verbund wäre der Korrosionsschutz erst durch das Verpressen der Hüllrohre

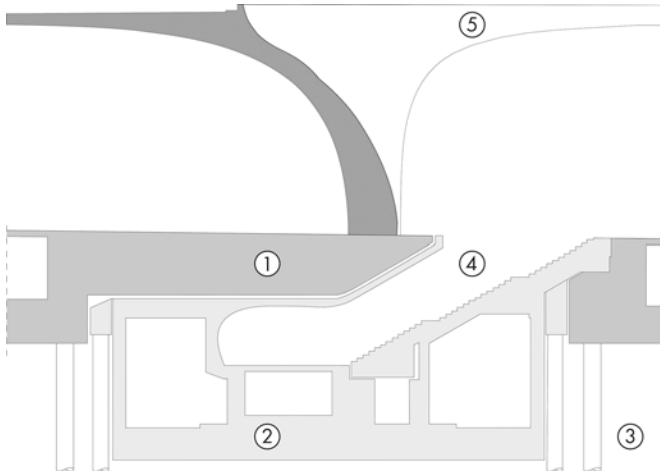


Bild 4 Längsschnitt durch den Bahnsteig mit daraufstehendem Kelch:
 1 Bahnsteig, 2 S-Bahn-Tunnel, 3 Gründung des Brückenbauwerks,
 4 Treppenabgang zur S-Bahn, 5 Kelch
 Longitudinal section through the platform with cup standing on it:
 1 platform, 2 S-Bahn tunnel, 3 foundation of the bridge structure,
 4 staircase to the suburban railway, 5 chalice-shaped column

nach dem Anspannen sichergestellt – ein temporärer Korrosionsschutz hätte aber aus verschiedenen Gründen nicht über den für den Bau erforderlichen Zeitraum von zwei Jahren sichergestellt werden können.

Ein weiterer Vorteil der Vorspannung ohne Verbund ist die Austauschbarkeit. Sollten sich während der Nutzungsphase Veränderungen in der Tragwirkung des Brückentragwerks einstellen, können prinzipiell Spannstahl und Korrosionsschutzfett erneuert werden. Die Vorspannung mit nachträglichem Verbund bietet diese Möglichkeit nicht.

Die interne Vorspannung ohne Verbund stellt derzeit keine Regelbauart für Bauwerke der Deutschen Bahn dar. Gemäß der Eisenbahnspezifischen Liste der Technischen Baubestimmungen des Eisenbahnbundesamts ist für die Anwendung dieser Vorspanntechnologie eine Unternehmensinterne Genehmigung (UiG) erforderlich.

Aufgrund der o.g. großen Vorteile gab auch die DB diesem Spannsystem den Vorzug gegenüber der sonst verwendeten Regelbauweise einer Vorspannung mit nachträglichem Verbund.

Aufgrund der geometrischen Randbedingungen, wie der eingeschränkten Zugänglichkeit insbesondere der Bauwerksunterseite, ist eine Inspektion des Brückenbauwerks gem. RIL 804 nur teilweise möglich. Für diese besondere Situation musste ein weiterer UiG- und ZiE-Antrag gestellt werden.

Im Bereich der Kelchstützen verlaufen Spannglieder in Bahnhofsquerrichtung. Diese tragen die hohen konzentrierten Lasten im Bereich der Kelchstützen von der Bahnsteigmitte zu den Rändern ab. Dort wird die Last dann in die längs der Bahnsteighalle verlaufenden Spannglieder überführt. Dieser Umweg im Lastpfad ist aufgrund der Öffnungen im Bereich der Treppenabgänge erforderlich.

Für die Querspannglieder wird das Verfahren BBV Litzenverfahren mit neun Litzen verwendet. Jede Litze besteht aus sieben Einzeldrähten, die von einem Hüllrohr umschlossen sind. Das Spanverfahren wurde aufgrund seines sehr kleinen zulässigen Krümmungsradius gewählt, da so bei einer Bahnsteigbreite von nur knapp 10 m ein möglichst großer Stich der Spannglieder erreicht werden kann.

Für die Längsspannglieder wurde das Verfahren „SUSPA-Draht intern ohne Verbund“ gewählt. Bei diesem Verfahren fasst jedes Spannglied mehrere – im vorliegenden Fall 84 – Spanndrähte in einem Hüllrohr zusammen. Durch die starke Bündelung der Spanndrähte ist das Verfahren besonders in Feldmitte platzsparend, was das Betonieren erleichtert.

Die Längsspannglieder werden über die gesamte Breite des Brückentragwerks verteilt sowohl in den Bahnsteigen wie auch in den Gleisbereichen angeordnet (Bild 5). In

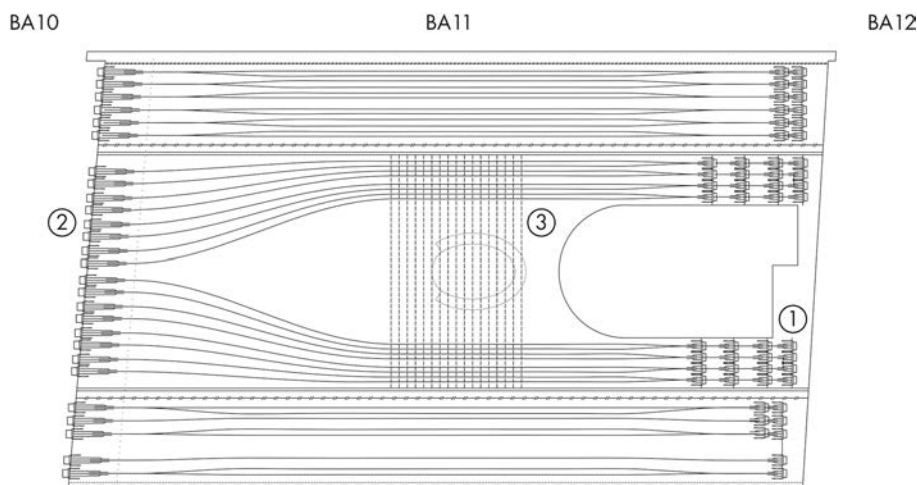
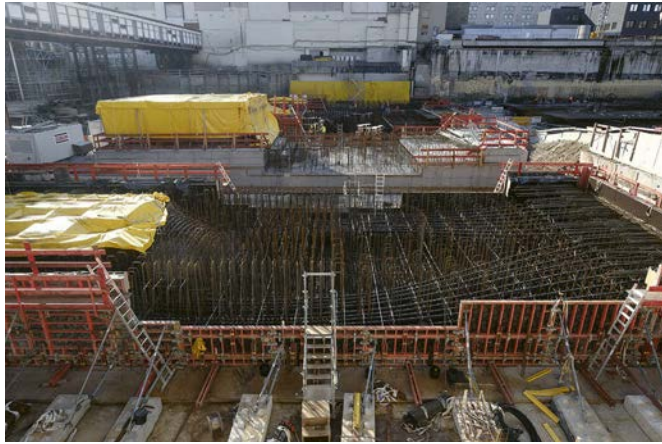


Bild 5 Grundriss mit Darstellung des Spanngliedverlaufs (Ausschnitt Bild 3): 1 Festanker der Längsspannglieder, 2 Spannanker der Längsspannglieder, 3 Querspannglieder
 Plan view showing the course of the tendons (detail in Fig. 3): 1 fixed anchor of the longitudinal tendons, 2 tensioning anchor of the longitudinal tendons, 3 transverse tendons



Quelle: Achim Birnbaum, Stuttgart

Bild 6 Im Vordergrund: Verlauf der Längsspannglieder im Bahnsteig mit Betonstahlbewehrung, dahinter: unterster Betonierabschnitt (Bahnsteig)

In the foreground: course of the longitudinal tendons in the platform with reinforcing steel reinforcement, behind: lowest concreting section (platform)

den Bahnsteigbereichen werden die Spannglieder an den Durchbrüchen für die Treppenabgänge vorbeigeführt und auf der gegenüberliegenden Seite aufgefächert (Bild 6). Dort befinden sich die Spannanker, die auf der Seite des BA 10 alle vom Wartungsgang aus zugänglich sind. Auf der Seite der Treppenabgänge werden die Festanker in den etwa 2 m breiten Streifen seitlich der Durchbrüche in mehreren Reihen hintereinander angeordnet.

Im Gleisbereich werden die Längsspannglieder nahe der Ankerköpfe im Grundriss verzogen, um den max. möglichen Stich auszunutzen sowie ausreichend Platz für Betonieröffnungen und Rüttelgassen zu schaffen. Die Spannanker befinden sich alle auf der Seite des BA 10 und sind vom Wartungsgang aus zugänglich. Auf der Seite des BA 12 werden die Festanker (Bild 7) aufgrund der geringeren Konstruktionshöhe in zwei Ankerreihen angeordnet.

2 Bauablauf

Vor Erstellung der Bodenplatte werden die Gründungsarbeiten im Bereich des BA 11 ausgeführt. Dazu gehören die beiden Bohrpfehlwände und die Pfahlkopfbalken.



Quelle: Achim Birnbaum, Stuttgart

Bild 7 Verlegung der Längsspannglieder, im Vordergrund der Festanker
Laying the longitudinal tendons, in the foreground the fixed anchor

Die Brücke BA 11 wird anschließend in mehreren Teilen auf dem vorhandenen S-Bahn-Tunnel betoniert. Zwischen der Decke des S-Bahn-Tunnels und dem Beton der S-Bahn-Querung wird eine 10 cm dicke Schicht aus einem Sand-Kiesgemisch als Schalung ausgebildet.

Die Decke des S-Bahn-Tunnels kann in Teilbereichen nur eine Last abtragen, die einer Betonierhöhe von 1,3 m entspricht. Die einzelnen Abschnitte werden daher zunächst nur bis zur jeweils zulässigen Höhe betoniert (1,3 m in Feldmitte und 3 m bzw. 3,3 m in den Auflagerbereichen). In den Auflagerbereichen entspricht dies bereits der endgültigen Stärke des Tragwerks.

Diese unteren Betonierabschnitte (Bild 8) werden in der Fläche in insgesamt neun Betonierabschnitte unterteilt: zunächst werden die Bahnsteigbereiche betoniert, anschließend die Gleisbettbereiche. In jedem dieser Abschnitte werden im Rahmen einer Schwindvorspannung die ersten Längsspannglieder angespannt, sobald die dafür erforderliche Betonfestigkeit und Bauwerkstemperatur erreicht sind. Nach dem vollständigen Erhärten eines Betonierabschnitts werden dann so viele Spannglieder voll angespannt, dass die Konstruktion ihr Eigengewicht sowie den Frischbeton der oberen Betonierabschnitte abtragen kann. Im Anschluss daran wird das Sand-Kiesgemisch abgesaugt; hierdurch entsteht die für

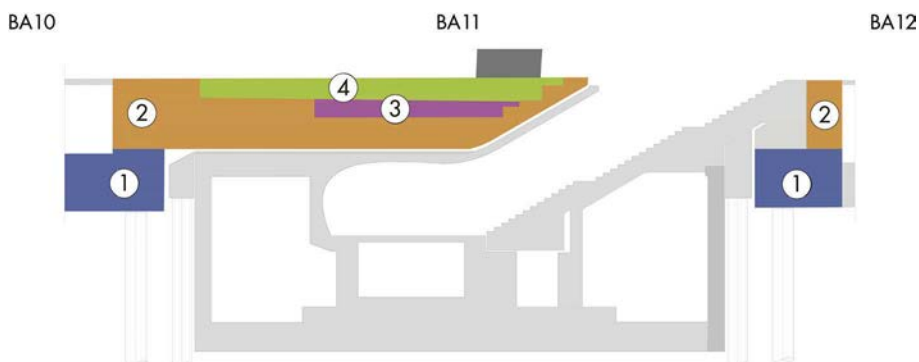


Bild 8 Betonierabschnitte des Brückenbauwerks: 1 Pfahlkopfbalken, 2 untere Betonierabschnitte, 3 bis OK Gleis, 4 bis OK Bahnsteig
Concreting sections of the bridge structure: 1 pile head beam, 2 lower concreting sections, 3 to upper edge of track, 4 to upper edge of platform

den Endzustand erforderliche Fuge zwischen den beiden Bauwerken. Ab diesem Zeitpunkt wird die Decke des S-Bahn-Tunnels nicht mehr durch den Beton des Brückentragwerks belastet. Das Brückentragwerk lagert dann seitlich auf den Pfahlkopfbalken bzw. den Bohrpfahlwänden.

Nach Fertigstellung der unteren Betonierabschnitte werden die mittleren Bereiche in mehreren Schritten bis zur endgültigen Höhe betoniert.

Während der Spannarbeiten soll das Brückentragwerk möglichst einseitig verschieblich gelagert sein. Hierfür sind für die Bauzeit auf beiden Seiten der Brücke Fugen zu den benachbarten Bodenplatten ausgebildet worden. Außerdem ist auf Seite des BA 10 ein Großenflächengleitlager vorgesehen worden. Durch diese Maßnahmen liegt zum Zeitpunkt aller Spannvorgänge ein idealer Einfeldträger vor, sodass keine Spannkräfte in die Gründung oder in benachbarte Bereiche des Bahnhofs abfließen.

Das Betonieren des Schalendachs erfolgt in mehreren Schritten: zunächst werden die Kelchfüße betoniert, dann die Kelche. Anschließend erfolgt das Schließen der Schwindgassen zu den benachbarten Kelchachsen. Vor bzw. nach den einzelnen Betonierabschnitten werden weitere Spannglieder angespannt, sodass die Vorspannung des Brückentragwerks sukzessive mit der Laststeigerung aus dem Schalendach zunimmt. Hierdurch werden alle im Bauzustand zu führenden Nachweise erfüllt und die aufgetretenen Verformungen kompensiert.

Zwischen dem Baubeginn der Brücke und dem Schließen der letzten Schwindgasse zu den benachbarten Bereichen des Schalendachs liegen rd. drei Jahre Bauzeit. Die bis dahin eingetretenen Verluste aus Schwinden und Kriechen werden durch nochmaliges Anspannen der Längspannglieder ausgeglichen. Erst danach wird die Fuge zwischen den Pfahlkopfbalken und den benachbarten Bodenplatten geschlossen, wodurch aus dem Einfeldträger ein monolithisch mit den benachbarten Trogbereichen verbundener Mehrfeldträger wird.

3 Einwirkungen und statische Systeme

Die hohen Lasten aus den zwei Kelchstützen waren die bestimmende Einwirkung für die Bemessung der S-Bahn-Querung. Weitere, jedoch deutlich untergeordnete Einwirkungen sind die Verkehrslasten auf den Bahnsteigen, der Zugverkehr in den Gleisbereichen sowie der nach oben wirkende Wasserdruck. Weiterhin sind Temperaturlasten, Kriechen und Schwinden sowie Erdbebenlasten und Zusanprall angesetzt worden. Unter den verschiedenen Einwirkungen waren unterschiedliche statische Systeme zu untersuchen.

Im Bauzustand spannt die Brücke zwischen den beiden Pfahlkopfbalken und stellt somit einen Einfeldträger mit

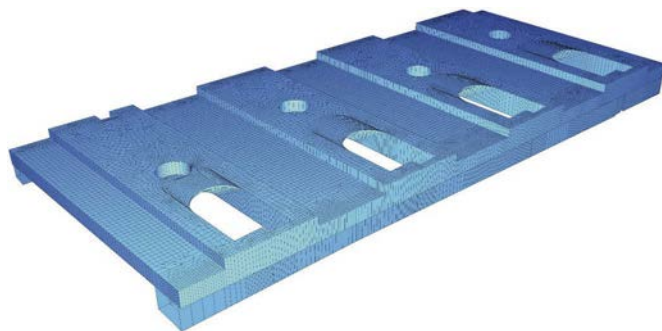


Bild 9 Finite-Elemente-Modell der S-Bahn-Querung
Finite element model of the urban railway crossing

einseitig verschieblichem Lager (Gleitlager im Bauzustand) dar. Die Brücke selbst wurde hierbei aber nicht als simpler Träger, sondern aufgrund ihrer Geometrie als Rahmen mit finiten Elementen modelliert (Bild 9). Auf dieses statische System werden die Lasten aus dem Eigengewicht sowie Ausbaulasten aufgebracht. Nach Fertigstellung von Brücke und Schalendach wird die Brücke an ihren beiden Längsenden monolithisch mit den angrenzenden Bodenplatten der Bahnhofshalle verbunden. Hier entsteht somit eine Durchlaufwirkung für das Brückentragwerk. Auf dieses System werden die veränderlichen Lasten aufgebracht.

Beim Nachweis der Querkräfte des Brückentragwerks sind die internen Spannglieder ohne Verbund in Längs- und Querrichtung zu berücksichtigen. Im Bereich der Kelchstütze kreuzen sich die Spannglieder mit einer konzentrierten Anordnung. Die Hüllrohre der nicht im Verbund liegenden Spannglieder sind gem. DIN EN 1992-2 beim Querkraftnachweis als Aussparungen zu berücksichtigen. Dies führt zur Reduzierung des Tragwiderstands, insbesondere für den Querkraftnachweis.

Die Haupteinwirkung für den Kreuzungsbereich der Spannglieder ergibt sich aus der Kelchstützenlast, wodurch die Tragmodelle zur Abtragung dieser Belastung wesentlich zur Beurteilung des Kreuzungsbereichs der Spannglieder sind.

Die Lastabtragung der Kelchstützenlast erfolgt in Querrichtung über Druckstreben in Richtung der längs vorgespannten Haupttragstreifen (Bild 10) sowie über die direkte Aufnahme der Kelchstützenlast durch die Umlenkkräfte der Quervorspannung (Bild 11).

Das Stabwerkmodell in Querrichtung mit Druckstreben zu den Längstragstreifen erfordert ein unteres Zugband in Querrichtung sowie eine Aufhängebewehrung für den über Druckstreben abzutragenden Lastanteil der Kelchstütze. Die Druckstreben in Querrichtung führen zu einer Lastverteilung der Kelchstützenlast in Längsrichtung, zumindest über die Länge des mit Querspanngliedern vorgespannten Bereichs.

Ein Teil der Kelchstützenlast wird über die Umlenkkräfte der Quervorspannung direkt aufgenommen und über

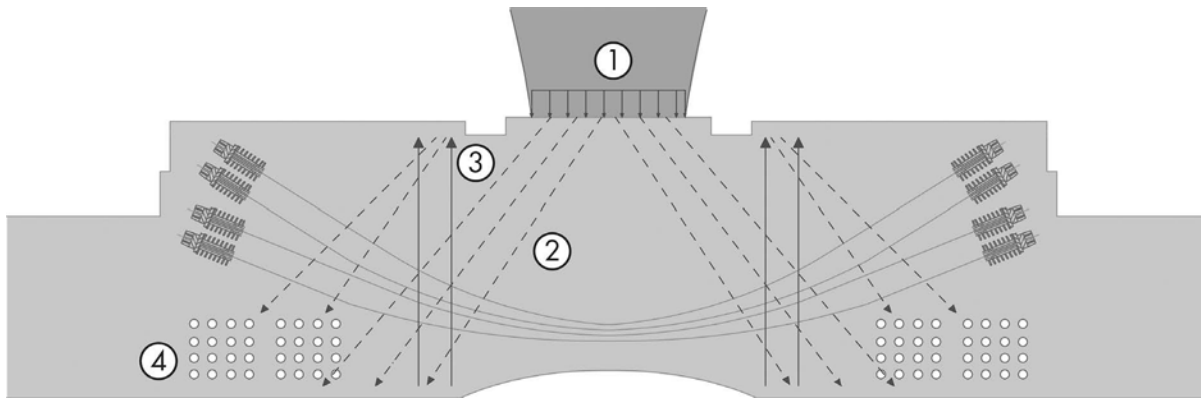


Bild 10 Lastabtrag Fachwerk: 1 Kelchlast, 2 Druckstrebe, 3 Zugstrebe (Auffhängebewehrung), 4 Längsspannglieder
Load transfer truss: 1 column load, 2 compression strut, 3 tension strut (suspension reinforcement), 4 longitudinal tendons

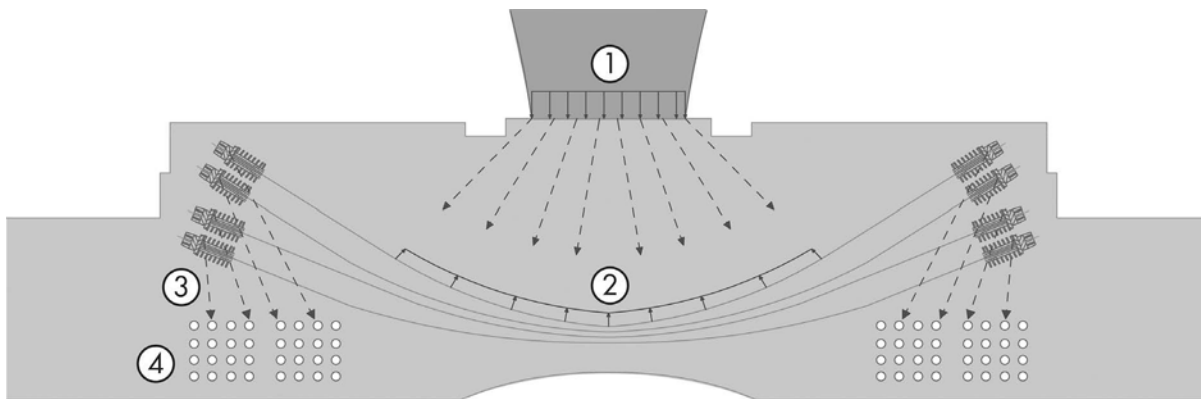


Bild 11 Lastabtrag Querspannglieder: 1 Kelchlast, 2 Aufnahme der Last durch die Querspannglieder, 3 Druckstrebe (Weiterleitung vom Spannanker zu den Längsspanngliedern), 4 Längsspannglieder
Load transfer transverse tendons: 1 column load, 2 absorption of the load by the transverse tendons, 3 compression strut (transfer from the tendon to the longitudinal tendons), 4 longitudinal tendons

Druckstreben von den Verankerungspunkten der Spannlieder zu den Längstragstreifen abgeleitet.

Der Nachweis der Querkräfte für die dreidimensionale Beanspruchung ist mithilfe von Stabwerkmodellen geführt worden. Weitere Berechnungen wurden zur Verifizierung der Ergebnisse durchgeführt. Die Umsetzung in der Bewehrungsführung führt zu mehrschnittigen Bügelbewehrungen.

Die Nachweiskonzepte für den Querkraftnachweis wurden in enger Abstimmung mit dem von der DB eingeschalteten Gutachter Prof. Dr. Keuser geführt.

4 Bemessungsansätze

Die Bemessung der Brückenkonstruktion erfolgte auf Grundlage der aktuellen Normung (DIN EN 1992-2 mit Nationalem Anhang). Ziel war es hierbei, ein besonders robustes Tragwerk auszubilden. Daher wurden die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit gegenüber den normativ festgelegten Bemessungsansätzen verschärft. Dadurch werden zusätzliche Sicherheiten im Tragwerk geschaffen, die den Einsatz der für das Bauwerk der S-Bahn-Querung günsti-

geren Vorspannung ohne Verbund, welche keine Regelbauweise der Deutschen Bahn darstellt, ermöglichte.

Bei Spannbetonkonstruktionen bewirkt die Vorspannung bei Gebrauchslasten einen überdrückten Querschnitt und verhindert so eine Rissbildung. Anstelle des Dekompressionsnachweises wird eine Druckspannungsreserve von mind. $0,5 \text{ N/mm}^2$ unter der häufigen anstatt der normativ geforderten quasiständigen Einwirkungskombination in Längsrichtung in allen Längsträgern vorgesehen.

Durch die Berücksichtigung einer Druckspannungsreserve unter der häufigen Einwirkungskombination, mit der ein deutlich größerer Anteil veränderlicher Lasten abgedeckt ist als in der quasiständigen Einwirkungskombination, ist die vorgesehene Druckspannung größer als normativ gefordert. Auch bei einem äußerst unwahrscheinlichen Ausfall einzelner Spannlieder bleibt der Querschnitt überdrückt und das Bauwerk voll funktionsfähig. Voraussetzung für eine Rissbildung ist die Überschreitung der Betonzugfestigkeit, welche aufgrund des überdrückten Querschnitts nicht vorliegt.

Der Nachweis der Rissbreite wurde mit der seltenen Einwirkungskombination anstatt der normativ geforderten häufigen Einwirkungskombination geführt. Die Rissbreite

wurde dabei normativ wie im übrigen Trog der Bahnhofshalle auf 0,15 mm begrenzt. Der Nachweis der Betonrandzugspannung konnte hierdurch entfallen, da er für die Sicherstellung robuster Kragarmquerschnitte von in Querrichtung nicht vorgespannten Hohlkastenquerschnitten vorgesehen ist und somit hier geometrisch nicht anwendbar war.

Der Nachweis der Betonstahlbewehrung im Grenz- zustand der Tragfähigkeit wurde unter Ansatz eines teilweisen Ausfalls von Spanngliedern geführt. Der Nachweis der Tragfähigkeit wurde mit einer auf 75% bzw. 85% reduzierten Wirkung der Vorspannung geführt, um zusätzliche Tragreserven bei einer unplanmäßigen Reduzierung der Spannkkräfte zu schaffen.

Neben der Absicherung der zum Einsatz kommenden Vorspannung ohne Verbund entsteht durch die verschärften Bemessungskonzepte ein wesentlich robusteres Tragwerk. Dies wird für die unterirdische Brücke sicherheitstechnisch als besonders sinnvoll erachtet.

5 Betontechnologische und konstruktive Maßnahmen

Die spätere Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eines Tragwerks wird neben den statischen Berechnungen auch von anderen Faktoren, wie z. B. den Eigenschaften des verwendeten Betons, beeinflusst. Im Folgenden werden die Maßnahmen genannt, die von den Planern für die Bauausführung der S-Bahn-Querung besonders berücksichtigt wurden.

Da die Unterseite der Brückenkonstruktion nicht einsehbar ist, können hier nach dem Einbringen des Betons keine Mängel mehr erkannt werden. Es wurde daher ein möglichst fließfähiger Beton verwendet, um die Bildung von Betonnestern so gut wie möglich zu vermeiden.

Zur Reduzierung von Zwangsbeanspruchungen im frühen Betonalter wurde ein Beton mit niedriger Hydrationswärmeentwicklung ausgewählt. Zur Vermeidung von Rissen an der Oberfläche des Betons wird bis zum Erreichen der halben geforderten Betondruckfestigkeit (25 N/mm², Zylinderfestigkeit) eine Nachbehandlung durchgeführt. Weiterhin wird eine Schwindvorspannung aufgebracht, sobald die dafür in der Zulassung geforderte Betonfestigkeit erreicht ist und der Beton so weit abgekühlt ist, dass die max. zulässige Temperatur unter Berücksichtigung der Biegeradien der Spannglieder für das Anspannen der Spannglieder eingehalten ist.

Die ausführende Firma muss nachweisen, dass der verwendete Beton die der statischen Bemessung zugrunde gelegten Rechenwerte der Betonfestigkeit und des E-Moduls erreicht.

Wie bereits erläutert, werden die ersten Betonierabschnitte der S-Bahn-Querung auf einer 10 cm dicken Schicht aus einem Sand-Kiesgemisch betoniert, das auf dem be-

stehenden S-Bahn-Tunnel aufliegt. Nach dem Erhärten und ersten Vorspannen des Betons wird das Sand-Kiesgemisch abgesaugt, sodass ein Spalt von 10 cm entsteht. Um bei diesem Vorgang eine Beschädigung der Unterseite der Brückenkonstruktion bzw. der Oberseite des S-Bahn-Tunnels auszuschließen, wird zwischen den Betonbauteilen und der Unter- bzw. Oberseite des Sand-Kiesgemischs jeweils eine im Bauwerk verbleibende Trennschicht in Form von Blechen und einer Frischbetonverbundfolie ausgebildet.

6 Verifikation der Planungsansätze und Bauüberwachung

Bei der Bemessung des vorgespannten Brückentragwerks wurden Vorgaben bez. der Vorspannung (Spannweg bzw. Spannkraft jedes Spannglieds) für die Bauausführung festgelegt, um im Endzustand sowie in jeder Bauphase die jeweils benötigte Vorspannung im Tragwerk zu erhalten. In den Berechnungen wurden dabei normgemäße Annahmen, z. B. für die Einflüsse aus Schwinden und Kriechen des Betons, getroffen.

Diese Planungsansätze müssen während der Bauausführung überprüft werden, um am Ende der Spannarbeiten den gewünschten Zustand des Bauwerks sicherzustellen. Hierfür sind Verformungsmessungen und Messungen der Betondehnung an der Unterkante der Brückenkonstruktion während der gesamten Bauzeit, also von der Erstellung der Brückenkonstruktion bis zur Fertigstellung des Rohbaus, vorgesehen.

Zusätzlich wird ein Teil der Längsspannglieder konstant mit den für das Monitoring im Endzustand vorgesehenen DynaForce-Sensoren überwacht. Dies geschieht ab dem Zeitpunkt des Anspannens der betreffenden Spannglieder. Für die Überwachung der Querspannglieder werden während der Bauzeit Kraftmessdosen eingesetzt.

Die Messergebnisse werden vom Auftragnehmer mit im Vorfeld ermittelten Sollwerten verglichen. Bei Über- oder Unterschreiten der in der Ausführungsplanung ermittelten Grenzwerte wird in Absprache mit dem Planer und dem Prüfenieur eine Analyse durchgeführt, sodass dann z. B. das Spannprogramm angepasst werden kann.

7 Inspektion und Austauschbarkeit

Die DIN EN 1992-2/NA fordert (in Anhang NA. UU.3.2(1)) einen möglichen Spanngliedaustausch von verbundlosen Spanngliedern, um Bauwerke bei einer im Zuge der regelmäßigen Inspektion festgestellten Veränderung der Gebrauchstauglichkeit (z. B. Risse an der Bauteilunterseite) ggf. durch eine Erneuerung der Spannkraft sanieren zu können.

Im vorliegenden Fall ist eine übliche Inspektion nach RIL 804 nicht möglich, weshalb eine ZiE für mögliche Kom-

pensationsmaßnahmen beim Eisenbahnbundesamt beantragt werden musste. Hierfür wurde vom Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat in enger Abstimmung mit den Tragwerksplanern bereits während der Planungszeit ein umfangreiches Monitoringkonzept entwickelt. Dieses enthält die folgenden, automatisiert durchführbaren Messungen:

- Dehnungsmessungen an der Bauteilunterseite mittels Glasfaserkabel in Längs- und Querrichtung
- Überwachung von 10% der Längsspannglieder mittels DynaForce-Sensoren
- Detektion eines möglichen Risses der Querspannglieder mittels Acoustic-Emission
- Verformungsmessungen an der Bauwerksoberseite

Außerdem werden die Bauwerkstemperatur und der Grundwasserstand gemessen, um Einflüsse aus diesen beiden Einwirkungen beurteilen zu können. Bei Bedarf können außerdem die Spannkraft aller Längsspannglieder mittels Abhebeversuch überprüft werden.

Für die verschiedenen Messungen wurden div. Einbauten wie Leerrohre und Zugkästen notwendig, welche in den Ausführungsplänen berücksichtigt wurden. Hierbei wurde – wo erforderlich – auf eine spätere Zugänglichkeit geachtet, damit einzelne Messsensoren im Laufe der normativ bei der Bemessung anzusetzenden Betriebszeit von 100 Jahren getauscht werden können (gem. den Normen kann keine längere Mindestbetriebszeit angesetzt werden, auch wenn die Autoren davon ausgehen, dass das Bauwerk wesentlich länger nutzbar sein wird).

Durch die geschaffenen Überwachungsmöglichkeiten kann die in der RIL 804 beschriebene übliche Inspektion sinnvoll ersetzt werden. Der Betreiber der neuen Bahnhofshalle erhält täglich, und nicht wie sonst üblich alle drei Jahre, elektronische Meldungen zum Zustand der Brückenkonstruktion. In den ersten fünf Betriebsjahren wird dies wissenschaftlich begleitet, später zeigt ein Ampelsystem dem Betreiber an, wann Experten hinzugezogen werden sollten, um die aufgezeichneten Veränderungen im Brückenbauwerk näher zu analysieren. Sollten hierbei z. B. durch Verminderung der Spannkraft eingetretene Beeinträchtigungen in der Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks sichtbar werden, könnten die Spannglieder nachgespannt oder im Falle eines Bruchs der Spannstahl eines Spannglieds ausgetauscht werden. Aufgrund der verschärften Bemessungsansätze ist das Tragwerk jedoch so robust ausgebildet, dass selbst ein einzelner Spanngliedbruch nicht zum sofortigen Handeln zwingt.

Für den unwahrscheinlichen Fall eines notwendig werdenden Spanngliedaustauschs wurde gemeinsam mit Ingenhoven Architects ein umfangreiches Konzept zur Gewährleistung einer späteren Zugänglichkeit und zur Schaffung der erforderlichen Arbeitsräume erarbeitet. Zum Austausch der Längsspannglieder müssen die einbetonierten Festanker freigelegt werden.

Die Fest- und Spannanker der Querspannglieder sind alle einbetoniert. Um diese Spannglieder auszutauschen, muss somit ähnlich wie bei den Längsspanngliedern der Beton zurückgebaut werden. Die Querspannglieder sind nicht hintereinander angeordnet, sodass alle Ankerköpfe erreicht werden können.

Aufgrund der im Endzustand vorhandenen monolithischen Verbindung zwischen der Brückenkonstruktion und den benachbarten Bodenplatten wird bei einem späteren Austausch und erneutem Anspannen des Spannstahls ein nicht unbeträchtlicher Teil der Spannkraft in die benachbarten Bodenplatten abfließen. Dadurch werden deutlich kleinere Umlenkkraft auf die Brückenkonstruktion aufgebracht als beim Anspannen vor Herstellen der monolithischen Verbindung zwischen der Brückenplatte und den benachbarten Bodenplatten. Andererseits ergibt sich durch die Dehnungsbehinderung des Überbaus infolge der monolithischen Verbindung zu den Bodenplatten der Nachbarbereiche beim Entspannen eines auszutauschenden Spannglieds ein Verbleib eines Teils der Spannkraft als Druckkraft im Überbau, wodurch die beschriebenen Effekte beim Nachspannen teilweise kompensiert werden.

Um die eingeschränkte Austauschbarkeit bzw. die Ineffektivität beim Nachspannen zu kompensieren, wurden die Bemessungsansätze wie beschrieben deutlich verschärft. So ist ein rissfreies Tragwerk selbst bei Ausfall einzelner Spannglieder sichergestellt. Weiterhin ist für eine Eisenbahnbrücke nicht mit Lasterhöhungen durch erhöhtes Verkehrsaufkommen zu rechnen. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Spannstahl ausgetauscht werden muss.

8 Zusammenfassung

Die größten Herausforderungen für die Tragwerksplanung des ca. 30 m spannenden unterirdischen Brückenbauwerks stellten sicherlich die beiden Kelchstützen mit einer Last von jeweils etwa 60 MN sowie die für den Lastabtrag unvorteilhaft angeordneten Durchbrüche der Treppenabgänge zum S-Bahn-Tunnel dar. Durch die beiden erforderlichen UiG- bzw. ZiE-Anträge zur Spanntechnologie Vorspannung ohne Verbund und zur Inspektion der Brücke wurden im Laufe der Planungszeit neben der rein normativen Bemessung verschiedene andere aufgabenspezifische Aspekte bearbeitet. Hierzu zählten in besonderem Maße die verschärften Bemessungsansätze in den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit, die ein deutlich robusteres als das von der Norm geforderte Tragwerk entstehen ließen. Hierdurch wird es auch weniger wahrscheinlich, dass während der Betriebszeit der Bahnhofshalle eine Sanierung erforderlich wird. Neben dem für die ZiE erforderlichen Inspektionskonzept wurde auch ein Konzept zum Austausch der Spannglieder entwickelt, sodass die Spannkraft im unwahrscheinlichen Fall eines Spanngliedbruchs erneuert werden kann. Damit ist dieses besondere unter-

irdische Brückentragwerk aus Sicht der Tragwerksplanung bestens für die kommenden 100 Jahre und darüber hinaus gerüstet.

Autorinnen und Autor

Dipl.-Ing. Angelika Schmid (Korrespondenzautorin)
angelika.schmid@wernersobek.com
Werner Sobek Group GmbH
Albstr. 14
70597 Stuttgart

Sonja Gepperth, M.Sc.
sonja.gepperth@wernersobek.com
Werner Sobek Group GmbH
Albstr. 14
70597 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Reinke
hans.georg.reinke@wernersobek.com
Werner Sobek Frankfurt GmbH & Co. KG
Darmstädter Landstraße 125
60598 Frankfurt am Main

Dank

Der Dank der Autor:innen für die exzellente Zusammenarbeit gilt an dieser Stelle insbesondere dem Bauherrn DB PSU sowie dem Gutachter Prof. Dr. Keuser.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schmid, A.; Gepperth, S.; Reinke, H.-G. (2022) *Die S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – ein unterirdisches Verkehrsbauwerk mit ganz besonderen Anforderungen*. Bautechnik 99, H. 7, S. 524–532. <https://doi.org/10.1002/bate.202100112>