



Technische  
Universität  
Dresden

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau [www.massivbau.tu-dresden.de](http://www.massivbau.tu-dresden.de)



# 35. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPIOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG  
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

18. UND 19. MÄRZ 2026

© 2026 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von Dritten frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Tagungsorganisation:

Ausstellungsorganisation:

IT:

Social Media:

Jana Müller-Strauch

Harald Michler, David Sandmann

Matthias Zagermann

Stefan Gröschel, Jana Müller-Strauch

Titelbild: Gerüst für die Gueuroz-Brücke, errichtet von dem Gerüstbauer Richard Coray. Foto: Büro A. Sarrasin (Archiv Philippe Mivelaz)

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

# **Tagungsband 35. Dresdner Brückenbausymposium**

**Institut für Massivbau  
Freunde des Bauingenieurwesens e.V.  
TUDIAS GmbH**

**18. und 19. März 2026**

# Inhaltsverzeichnis

Grußwort.....	9
<i>Regina Kraushaar   Sächsische Staatsministerin für Infrastruktur und Landesentwicklung</i>	
Nationale Ergänzung des Brückenregelwerks – Hintergründe und Umsetzung .....	11
<i>Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Mehr Tempo für die Brückenmodernisierung durch funktionale Ausschreibungen, Schnellbauverfahren und serielles Bauen .....	21
<i>Dr.-Ing. Karlheinz Haveresch, Dipl.-Ing. Manuela Poschau</i>	
Brückenverstärkungen mit CFK-Lamellen – Bemessung und Überbau mit Asphalt .....	29
<i>Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Finckh, Dipl.-Ing. (FH) Florian Eberth</i>	
Weiternutzung historischer Eisenbahngewölbebrücken – eine nachhaltige Alternative zum Neubau .....	39
<i>Conrad Pelka M.Sc., Dipl.-Ing. Jenny Keßler, Prof.-Dr.-Ing. Steffen Marx</i>	
Spannungsrissskorrosion und sicherer Weiterbetrieb – ein ganzheitlicher Ansatz für die Elbebrücke Bad Schandau ...	51
<i>Dr.-Ing. Steffen Müller, Dr.-Ing. Oliver Mosig, Dipl.-Ing. Andreas Gruner, Christina Fritsch, M.Sc., Dr.-Ing. Gregor Schacht, Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx</i>	
Entwicklung, Umsetzung und Betrieb des geodätischen und faseroptischen Monitoringsystems der S-Bahn-Überbrückung am Bahnhof Stuttgart S21 .....	61
<i>Prof. Dr.techn. Werner Lienhart, Dr.techn. Christoph M. Monsberger, Dipl.-Ing. Fabian Buchmayer, Dr.techn. Peter Bauer, Prof. Dr.-Ing. Christian Sodeikat, M.Sc. Sonja Gepperth, Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser</i>	
AR- und KI-gestützte Analyse von Schadensentwicklungen in der Bauwerksprüfung.....	73
<i>B. Eng. Jessica Steinjan, Dipl.-Ing. Jan-Derrick Braun, M. Sc. Lisa Freifrau von Rössing, M. Sc. Patrick Herbers, M. Eng. Bernhard Braun, M. Eng. Regina Panzer, Prof. Dr.-Ing. Markus König</i>	
Alexandre Sarrasin (1895–1976) – Stahlbetonbrücken in den Schweizer Alpen .....	81
<i>Dr. Philippe Mivelaz</i>	
Stabbogenbrücke Wustermark – altes Eisen mutig, radikal und nachhaltig neu verbaut .....	93
<i>Dipl.-Ing. Jörg Titel</i>	
A 45 Talbrücke Rinsdorf – innovativer Querverschub mit Pfeilern .....	103
<i>Dipl.-Ing. Ralf Schubart, Dipl.-Ing. Holger Klein, Dipl.-Ing. Wolfgang Schlensorg</i>	
Holz im Brückenbau – auf zu neuen Dimensionen im Straßenbrückenbau .....	113
<i>Dipl.-Ing. (FH) Frank Miebach</i>	
Zwischen Industriekultur und Natur – der „Sprung über die Emscher“ .....	121
<i>Dipl.-Ing. Peter Sprinke, Jan Berwing, M.Sc., Asc. Prof. Dipl.-Ing. Arch Dirk Krolkowski, Dipl.-Ing. Arch Falko Schmitt, Dipl.-Ing., M.Sc. (Wirtsch.) Simone Kern</i>	
Friesenbrücke Weener – Europas größte Hub-Drehbrücke .....	131
<i>Dipl.-Ing. Stefan Schwede, Dipl.-Ing. Lorenz Haspel, Dr. ès sc. Jan Brütting, M.Eng. Lukas Hornberger, MSc. ETH Povilas Ambrasas, Dipl.-Ing. Andreas Menzel, Dipl.-Ing. Alexander Krölls, Dipl.-Ing. Jens Kögel, Dr.-Ing. Lutz Vogt, Dr.-Ing. Gregor Schacht</i>	
Krämerbrücke in Erfurt – 700 Jahre steinerne Brücke .....	143
<i>Dr.-Ing. Hans-Jörg Vockrodt</i>	
Vier Länder, viele Brücken, alles unter einem DACH – Brückenbauexkursion 2025.....	153
<i>Dipl.-Ing. Cedric Eisermann, Max Götze, M.Sc., Dipl.-Ing. Jakob Vogt</i>	
Neue Berliner Brücke in Duisburg auf der BAB 59 .....	165
<i>Dipl.-Ing. Moritz Menge</i>	

Analyse und Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Brückenbau .....	169
<i>Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz, Thi Kim Dung Pham, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens, Dr.-Ing. Bianca Kern</i>	
Sydney Harbour Bridge Cycleway – eine außergewöhnliche Fahrradbrücke .....	173
<i>Dipl.-Ing. Peter Boesch, M.Sc. Long Bai, M.Sc. Angus Murray</i>	
Nachhaltige Fuß- und Radwegbrücken aus vorgespanntem Carbonbeton (CPC).....	179
<i>Dipl.-Ing. Simon Liebl</i>	
Wirtschaftliche und ökologische Bewertung chloridbelasteter Brückenbauteile .....	183
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch, Paul Steinmetz, M. Sc., Dr.-Ing. Marc Zintel</i>	
Ermüdung alter Bahnbrücken am Beispiel der Sihlbrücken im HB Zürich .....	187
<i>Daniel Grüter, Felix Gisler, Christian Uhlig</i>	
Verschub der gevouteten Cölvebrücke über aktiven Schienenverkehr .....	193
<i>Josef Teupe</i>	
Potenziale von Suffizienzstrategien im Umgang mit denkmalgeschützten, stählernen Bahnbrücken .....	197
<i>Dr.-Ing. Clara Jiva Schulte</i>	
EcoBuild Evaluator – ganzheitliche Nachhaltigkeit im Ingenieurbau am Beispiel Rheinbrücke Schierstein .....	203
<i>Dipl.-Ing. Sebastian Schultheis, Dipl.-Ing. Martin Ludwig</i>	
CFK-Spannlitzen für Betonbauteile im Brückenbau.....	207
<i>Dipl.-Ing. Johannes Schleiss, Dr.-Ing. André Seidel, Dr.-Ing. Danny Friese, Dr.-Ing. Paul Penzel, Prof. Dr.-Ing. Chokri Cherif</i>	
The new city bridge of Drammen (Norway) .....	213
<i>Birger Opgård, MSc Sivilingeniør, Mario Rando Campos, MSc ETSIIM, Architect Bartłomiej Halaczek, Architect Thor Olav Solbjør</i>	
Inserentenverzeichnis .....	220

# Entwicklung, Umsetzung und Betrieb des geodätischen und faseroptischen Monitoringsystems der S-Bahn-Überbrückung am Bahnhof Stuttgart S21

Prof. Dr.techn. Werner Lienhart | Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz

Dr.techn. Christoph M. Monsberger, Dipl.-Ing. Fabian Buchmayer | ACI Monitoring GmbH, Graz

Dr.techn. Peter Bauer | VRVis GmbH, Wien

Prof. Dr.-Ing. Christian Sodeikat | Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH, München

M.Sc. Sonja Gepperth | Werner Sobek AG, Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser | BUNG Ingenieure AG, München

## Kurzfassung

Zur langfristigen Überwachung der S-Bahn-Überbrückung in Stuttgart im künftigen Durchgangsbahnhof, dem Herzstück von S21, wurde ein umfangreiches Monitoringkonzept entwickelt. Kernelemente sind die verteilte faseroptische Dehnungsmessung der Brückenkonstruktion und die Erfassung von 3D Deformationen mittels Robotik-Totalstationen. Aufgrund der komplexen Geometrie der Bahnhofshalle wurde das geodätische Messprogramm vollständig in 3D mittels Virtual-Reality-Methoden geplant. Somit war es vorab möglich, Sichtachsen zu kontrollieren und die Lage der Totalstationen sowie jene der Prismenpunkte anzupassen. Eine visuelle Inspektion der Brückenunterseite ist aus geometrischen Gründen unmöglich. Aus diesem Grund wurden in den Bahnsteigen und den Gleisbereichen insgesamt mehr als 2.000 m faseroptische Sensorkabel mit einbetoniert und die erwarteten Dehnungen bereits bauzeitbegleitend mittels hochauflösender Messverfahren erfasst. Die Epochenmessungen und Dauermessungen über mehr als viereinhalb Jahre geben ein vollständiges Dehnungsbild während der unterschiedlichen Bauphasen. So können Auswirkungen von Vorspannvorgängen, Belastungen infolge Baufortschritt, Belastungstests und Temperaturänderungen lückenlos erfasst werden.

## 1 Einleitung

Beim Projekt Stuttgart 21 wurde im Bauabschnitt (BA) 11 des künftigen Durchgangsbahnhofs eine vorgespannte Brückenkonstruktion zur Querung des tiefer gelegenen S-Bahntunnels geplant. Dabei handelt es sich um ein komplexes Einfeld-Rahmentragwerk, welches biegesteif mit den beidseitig angeordneten Bohrpfahlwänden verbunden ist (Bild 1). Im Endzustand ist das Brückentragwerk monolithisch an die angrenzenden Bodenplatten von BA10 und BA12 angeschlossen und damit integraler Bestandteil der Bahnhofshalle. Im Bauzustand hingegen stellt das Brückentragwerk einen Einfeldträger dar. Die Verbindung zu den benachbarten Bodenplatten erfolgt erst nach Abschluss der Vorspannarbeiten. Der Überbau mit ca. 30 m Spannweite ist durch sein Eigengewicht, durch die beiden Kelchstützen K23 und K24 des Hallendaches und aufgrund des Eisenbahnverkehrs belastet, wobei die ständigen Lasten einen Anteil von ca. 90 % an den Gesamtlasten haben. Außerdem

befinden sich in der Tragplatte des BA11 auch die Treppenabgänge zum S-Bahntunnel. Diese stellen vier große Durchbrüche in der Brücke dar. Die Treppenabgänge sind durch eine Raumfuge getrennt und nicht monolithisch mit der Bahnhofshalle verbunden.

Die Brückenkonstruktion wird mit internen Spanngliedern ohne Verbund vorgespannt. Diese Ausführung ent-

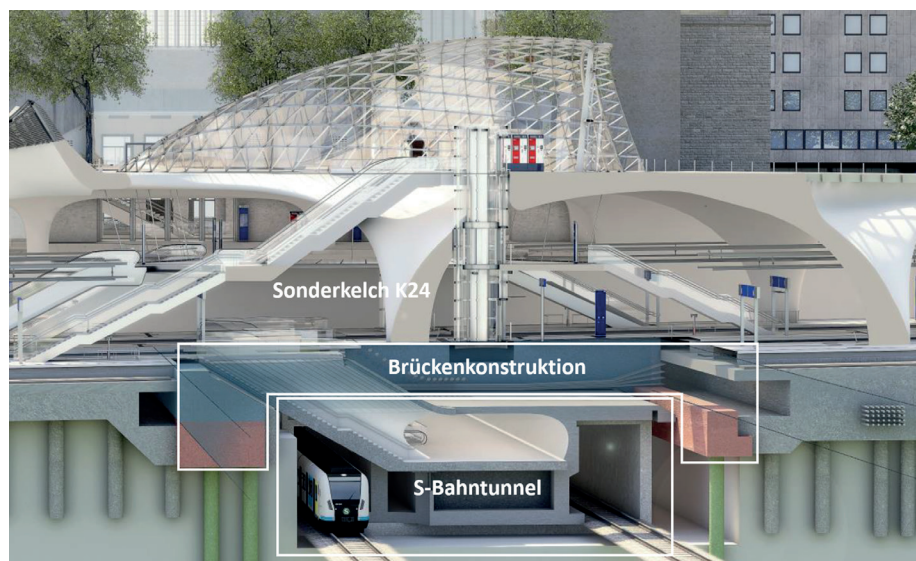


Bild 1: Überbrückung des S-Bahntunnels im Durchgangsbahnhof von S21

Grafik: DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, editiert von Werner Lienhart, TU Graz

spricht gemäß den in der ELTB (Eisenbahnspezifische Liste der technischen Baubestimmungen [1]) eingeführten geltenden Vorschriften im Eisenbahnbau keiner Regelbauweise. Daher wurden für die Bemessung eines robusten Tragwerks einige gegenüber den geltenden Regelwerken verschärfte Bemessungsansätze gewählt.

Zusätzlich ist die Brückenunterseite des Bauwerks nicht inspizierbar, da zum einen der Abstand zur Oberseite der darunterliegenden S-Bahntunneldecke nur 10 cm beträgt und zum anderen dieser Zwischenspalt zusätzlich mit Grundwasser gefüllt sein wird. Die Feststellung einer Rissbildung infolge möglicher Überlastung des Bauteils oder infolge möglicher Spannstaalausfälle ist somit auf herkömmlichem Wege unmöglich.

Die Inspizierbarkeit gemäß Richtlinie RIL 804 [2], Module 804.8001 und 804.8002, ist demnach nicht gegeben und wird durch eine Dauerüberwachung in Form eines Monitorings ersetzt, welches aus verschiedenen, sich ergänzenden Messsystemen besteht [3]. Entsprechende Warn- und Alarmwerte werden anhand eines kalibrierten Rechenmodells festgelegt.

## 2 Monitoringkonzept

Zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZIE) durch das Eisenbahnbundesamt wurde ein umfangreiches Monitoringkonzept entwickelt, welches in der Lage ist, Spanndrahtbrüche, Risse, Verformungen und Spannkraftverluste zu erkennen. Im Detail basiert das Konzept auf:

- **Verformungsmessungen:** Während der Bauphase werden die Verformungen zu definierten Zeitpunkten geodätisch aufgenommen. Im Endzustand erfolgen die Verformungsmessungen automatisch mit Hilfe von Robotik-Totalstationen (RTS) und Prismen. Hierfür werden drei Totalstationen eingesetzt, welche Messungen zu Prismen an elf Verknüpfungspunkten sowie 35 Monitoringpunkten ausführen.
- **Messungen der Betondehnungen:** Die Messungen der Betondehnungen an der Brückenunterseite werden mit einem verteilten faseroptischen Messsystem

(distributed fiber optic sensing – DFOS) durchgeführt. Hierfür sind im Brückenbauwerk Glasfaserleitungen (Lichtwellenleiter) einbetoniert. Mit den bei der Messung eingeleiteten Lichtsignalen können die Dehnungen lückenlos entlang der Glasfaserleitung aufgezeichnet und Risse detektiert werden.

- **Messungen der Spannungen der Längsspannglieder:** Die Spannkkräfte der Längsvorspannbewehrung werden an 28 Spanngliedern nach dem Messprinzip der magnetischen Permeabilität mit DYNA-Force-Sensoren gemessen.
- **Überwachung der Querspannglieder:** Im Endzustand werden die Querspannglieder mit dem Verfahren der Schallemissionsmessung (*acoustic emission* – AE) überwacht. Durch die AE-Sensoren kann erkannt werden, wenn es zu einem Spannstahtbruch kommt. Zur örtlichen Zuordnung wird jeweils ein Sensor mittig zwischen vier Querspanngliedern angeordnet.

Zusätzlich werden folgende Einwirkungen gemessen, um diese bei der Beurteilung der Ergebnisse der übrigen Messungen korrekt zu berücksichtigen:

- **Temperaturen:** Die Temperaturen im Bauwerk werden an 27 verschiedenen Stellen gemessen. Dabei sind jeweils mehrere Sensoren je Temperaturmessstelle über die Höhe des Brückenbauwerks angeordnet, woraus auch die Temperaturgradienten bestimmt werden kann.
- **Grundwasserstand:** Die Messung des Grundwasserstandes erfolgt an insgesamt vier Messstellen, welche in der Nähe der Trogwände unter den benachbarten Bodenplatten BA10 und BA12 liegen.

Alle Messdaten und Auswertungen werden in einem Dashboard dargestellt und können von einem berechtigten Personenkreis eingesehen werden. Für die einzelnen Messsysteme und fusionierten Daten der Messsysteme werden Warn- und Alarmwerte mit Hilfe eines kalibrierten FE-Modells generiert und im Verlauf einer fünfjährigen wissenschaftlichen Begleitung des Monitorings festgelegt.

Im Folgenden werden die Planung und Umsetzung des geodätischen und faseroptischen Monitorings im De-

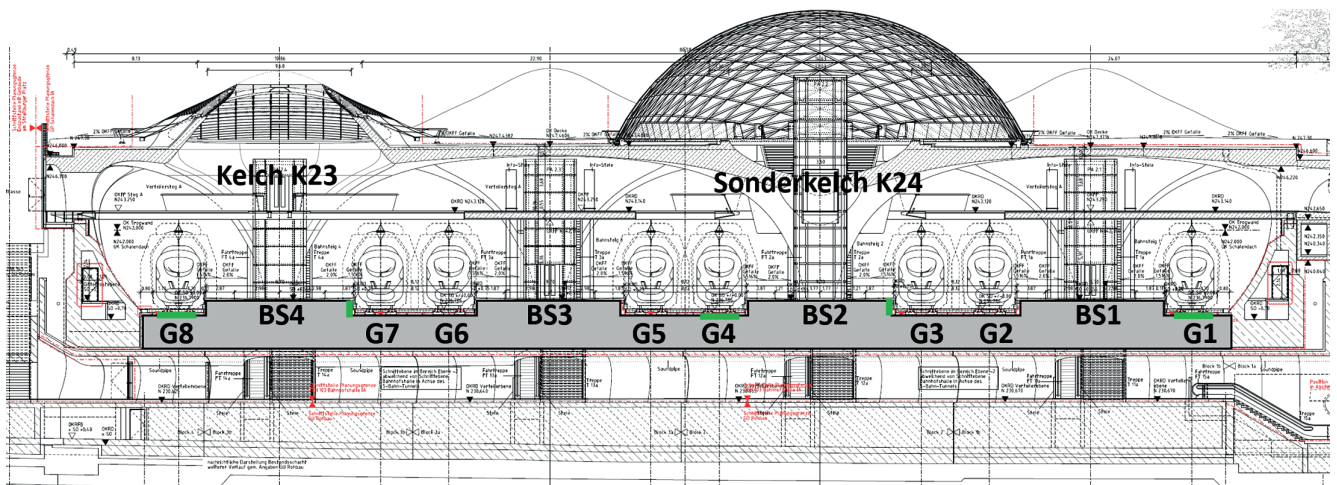


Bild 2: Querschnitt des BA11: Brückenkonstruktion (grau) mit vier Bahnsteigen (BS), acht Gleisbetten (G) und fünf geodätischen Monitoringbereichen (grün)  
Konstruktionszeichnung: ingenhoven associates, Düsseldorf, adaptiert von Werner Lienhart, TU Graz

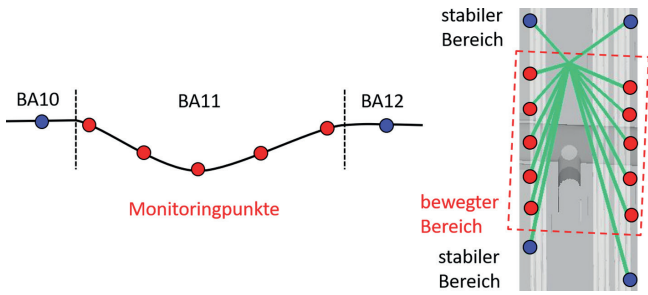


Bild 3: Beispielhafte Anordnung der Messpunkte  
 Grafik: Werner Lienhart, TU Graz

tail beschrieben und Messergebnisse diskutiert, welche während der Bauphase der Brückenkonstruktion erlangt und für das Kalibrieren des statischen Modells verwendet wurden.

### 3 Geodätisches Monitoring

#### 3.1 Randbedingungen

Die Verformungen der Gleisbetten der Gleise (G) 1, 4, 8 und der Bahnsteige (BS) 2 und 4 sollen überwacht werden. Die fünf zu überwachende Bereiche sind in Bild 2 ersichtlich. Um eine Sichtblockade aufgrund des Personenverkehrs zu den Monitoringpunkten bzw. auch Stolperfallen zu vermeiden, befinden sich Bahnsteigpunkte auf der Bahnsteigkante, wodurch auch die Beschädigungsgefahr durch Personen, Reinigungsgeräte etc. minimiert werden kann. Zur Ableitung entsprechender Biegelinien besteht jeder Monitoringbereich aus fünf Punkten auf der Brücke sowie jeweils einem als stabil angenommenen Punkt in den benachbarten Bauabschnitten (Bild 3). Die 3D Positionen dieser 35 Monitoringpunkte sollen automatisiert und kontinuierlich mit Totalstationen eingemessen werden.

#### 3.2 Planung

Die 3D Einmessung von Monitoringpunkten mittels Robotik-Totalstationen kann als Stand der Technik betrach-

tet werden und wird üblicherweise im innerstädtischen U-Bahnbau zur Überwachung von Gebäudebewegungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind z. B. Bauprojekte in Amsterdam [4], London (Crossrail, [5]) oder Zürich (Durchmesserlinie, [6]). Die Planung des geodätischen Monitorings der Brückenkonstruktion im Durchgangsbahnhof von S21 hatte jedoch zusätzliche Anforderungen, welche üblicherweise nicht auftreten. Vorgabe war einerseits, dass keine Kabel auf der Oberfläche montiert werden dürfen. Andererseits mussten Bohrpositionen und -tiefen bereits vorab bekannt gegeben werden, um sicherzustellen, dass in diesen Bereichen keine kritischen Bewehrungen vorliegen. Die endgültigen Positionen von Prismenpunkten und Totalstationen waren somit bereits vor Errichtung der Kelchstützen und des Schalendachs final festzulegen.

Geodätisches Monitoring erfordert immer eine direkte Sichtverbindung zwischen Instrument und Ziel, weshalb bereits in der Planungsphase sämtliche Visuren auf mögliche Kollisionen mit anderen Objekten überprüft werden mussten. Aufgrund der Freiformflächen der Kelchstützen war eine Visurkontrolle in 2D Schnittplänen nicht möglich. Um die Kontrollen vollständig in 3D durchzuführen, wurde als Hilfsmittel Virtual Reality (VR) verwendet und die Applikation VRSurv in der Game Engine Unity entwickelt [7], welche den üblichen Auswahlprozess des Vermessers vor Ort in VR ermöglicht (Bild 4).

Im 3D Planungsmodell des Bahnhofs kann man sich frei bewegen und mögliche Positionen für Instrumente und Ziele identifizieren. Aus einem virtuellen Objektkatalog wählt man die gewünschten Elemente aus und platziert sie im 3D Modell. Die 3D Objekte können mit dem 3D Modell interagieren. Dies bedeutet, dass z. B. die Winkel der Konsole automatisch an die Orientierung der Oberfläche angepasst werden, sodass die Totalstation horizontal aufgestellt wird. Durch eine Fangoption wird die Totalstation automatisch auf der Konsole zentriert. Im nächsten Schritt werden die gewünschten Ziele ausgewählt und die Visurlinien automatisch auf mögliche Kollisionen überprüft. Bild 5 zeigt, dass von dieser Total-

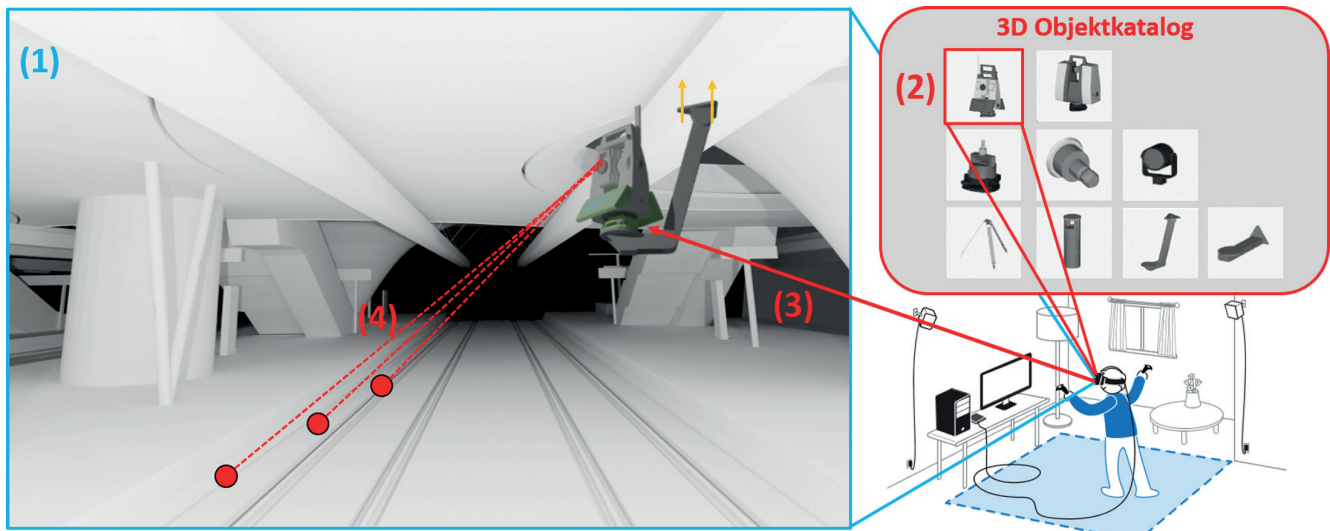


Bild 4: Einsatz von VRSurv: (1) freie Navigation im 3D Modell des Bahnhofs, (2) Auswahl des gewünschten Instrumentes im 3D Produktkatalog, (3) Platzierung des Instrumentes im 3D Modell, (4) Definition der Visuren und Kontrolle auf Kollisionsfreiheit

Grafik: Peter Bauer, VRVis und Werner Lienhart, TU Graz

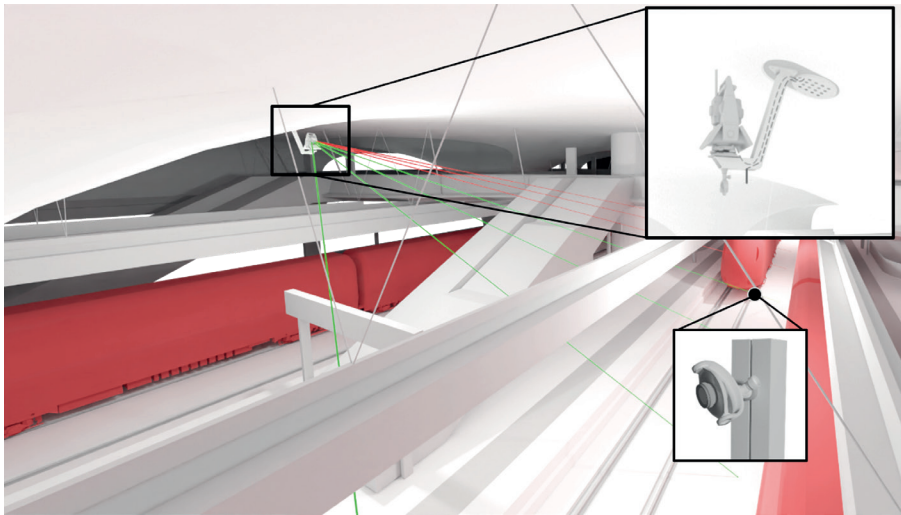


Bild 5: Kollisionskontrolle in VRSurv mit möglichen (grün) und nicht umsetzbaren Visuren (rot)  
Grafik: Peter Bauer, VRVis und Werner Lienhart, TU Graz

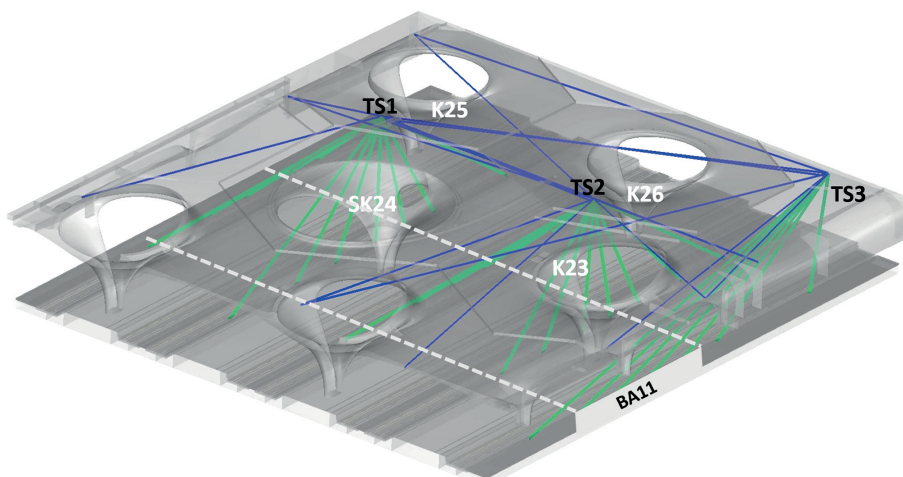


Bild 6: Geodätisches Messkonzept zur Verformungsmessung von Punkten im Gleisbett und an der Bahnsteigkante (grüne Visurlinien) und Messungen zu Verknüpfungspunkten (blaue Visurlinien)  
Grafik: Peter Bauer, VRVis und Werner Lienhart, TU Graz

station aus nicht alle Ziele sichtbar sind. Grüne Visurlinien sind möglich, rote jedoch nicht.

In der Detailplanung hat sich herausgestellt, dass drei Totalstationen erforderlich sind, um alle 35 Prismen in den fünf Monitoringbereichen einmessen zu können. Diese Totalstationen sind mittels Konsolen an den

Außenseiten der Kelche K25, K26 bzw. K27 positioniert. Die Lage der Totalstationen am Schalendach schließt jedoch nicht aus, dass auch diese von Lageänderungen betroffen sind. Aus diesem Grund wurden zusätzlich elf Verknüpfungspunkte unter den Totalstationen sowie im stabilen Bereich installiert, aus welchen sich ein geodätisches Netz ergibt (Bild 6). im Rahmen eines Netzausgleiches können die Koordinaten der Totalstationen somit auf Unveränderlichkeit überprüft und danach Veränderungen der Monitoringpunkte bestimmt werden.

### 3.3 Umsetzung

Zur Umsetzung wurden in den Kelchstützen, an denen die Totalstationen montiert sind, Leerrohre für die Kabelführung verlegt. Zusätzlich wurde für die Montage der Konsole und der Versorgung der Kommunikationskomponenten einer Totalstation ein Einbauteil (EBT) mit einbetoniert. Auf der Kelchoberseite sind somit nur die Konsole mit Totalstation, das Verknüpfungsprisma, der Wettermessfühler und die Oberfläche des EBTs sichtbar (Bild 7). Die Kabel für Totalstation und Temperaturfühler werden innerhalb der Konsole geführt.

Als Totalstationen werden spezielle Monitoringinstrumente (Leica TM60) mit einer Winkelmesspräzision von 0,5" und einer Distanzmesspräzision von 0,6 mm + 1 ppm [8] eingesetzt. Alle Totalstationen und Verknüpfungsprismen sowie die Monitoringprismen am Schalendach waren mit Stand Dezember 2025 bereits montiert und

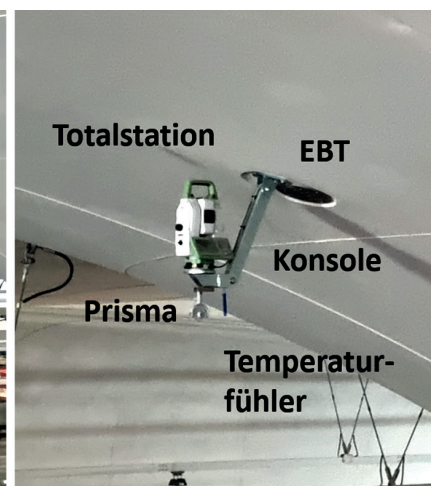


Bild 7: Totalstationen TS1 und TS2 des geodätischen Monitoringkonzeptes (September 2025)

Fotos: Werner Lienhart, TU Graz

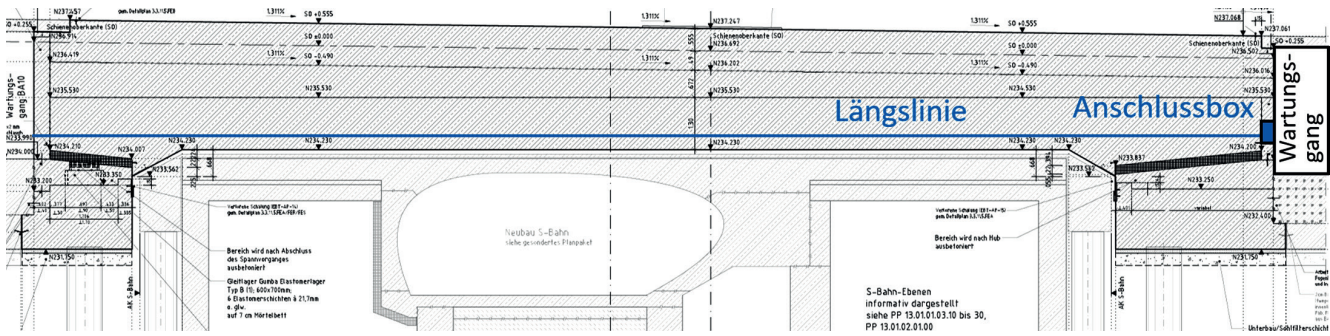


Bild 8: Längsgeführtes faseroptisches Sensorkabel Konstruktionszeichnung: Werner Sobek AG, adaptiert von Werner Lienhart, TU Graz

werden im Rahmen einer Testphase bereits automatisiert betrieben. Die Installation der Monitoringprismen im Gleis- und Bahnsteigbereich soll gemäß Bauzeitenplan im Frühjahr 2026 ausgeführt werden.

## 4 Faseroptisches Monitoring

### 4.1 Allgemeines

Wie einleitend erläutert, ist eine visuelle Rissüberprüfung auf der Unterseite der Brückenkonstruktion aufgrund des geringen Abstandes der Brücke zum S-Bahntunnel und des Umstandes, dass dieser Freiraum mit Grundwasser gefüllt sein wird, nicht möglich. Als Alternative wurde eine hochauflösende, verteilte faseroptische Dehnungsmessung (*distributed strain sensing* – DSS) mittels optischer Frequenzbereichsreflektometrie (*optical frequency domain reflectometry* – OFDR) vorgeschlagen. Mit diesem Messverfahren können neben der großräumigen Dehnungsänderung auch Risse entlang von eingebetteten faseroptischen Sensorkabeln erfasst werden [9].

### 4.2 Planung

Das faseroptische Monitoringkonzept für die S-Bahn-Überbrückung basiert auf der Einbettung von speziellen Sensorkabeln, welche entlang der untersten Bewehrungslage geführt werden. Bei den Kabeln handelt es sich um sogenannte FiMT-Kabel (FiMT – *fiber in metal tube*). Beim Dehnungssensorkabel vom Typ SOLIFOS

BRUsens V9 [10] ist eine Single-Mode-Glasfaser in einem Metallrohr eingeklebt. Zusätzlich besitzt dieses Kabel eine strukturierte Polyamidoberfläche, welche einen durchgehenden Verbund mit Beton sicherstellt [11]. Am Übergang zum BA12 wird angrenzend zum Wartungsgang eine Anschlussbox eingebaut, in welcher ein Zugriff zum Anschlussstecker des Kabels möglich ist.

OFDR-Messverfahren nutzen den Rayleigh-Rückstreuungseffekt und erfassen Frequenzänderungen, welche durch Dehnungs- oder Temperaturänderungen entlang des Kabels entstehen. Um die Temperaturabhängigkeit numerisch kompensieren zu können, wird die Messlinie als Schleife ausgeführt. Der Hinweg besteht aus dem zuvor genannten BRUsens-V9-Kabel, bei welchem sowohl Dehnungen als auch Temperaturen auf die starr gekoppelte Faser wirken können. Der Rückweg wird mit einem parallel geführten BRUsens-DTS-Kabel [12], ebenfalls von SOLIFOS, ausgeführt, in welchem die Glasfaser lose in einem Gel im Metallrohr eingebettet und die Oberfläche glatt ausgeführt ist. Auftretende Deformationen werden daher nicht oder erst ab großen Dehnungen auf die Glasfaser übertragen. Somit erfassen die Messungen entlang dieses Kabels nahezu ausschließlich den Temperatureinfluss.

OFDR-Messungen sind grundsätzlich einseitige Messverfahren, sodass bei der vorliegenden Schleifenkonstellation bei einem Kabelbruch von beiden Seiten bis zur Bruchstelle gemessen werden kann und dadurch auch weiterhin eine komplette Abdeckung der Messstrecke vorliegt. Um die volle Funktionsfähigkeit auch

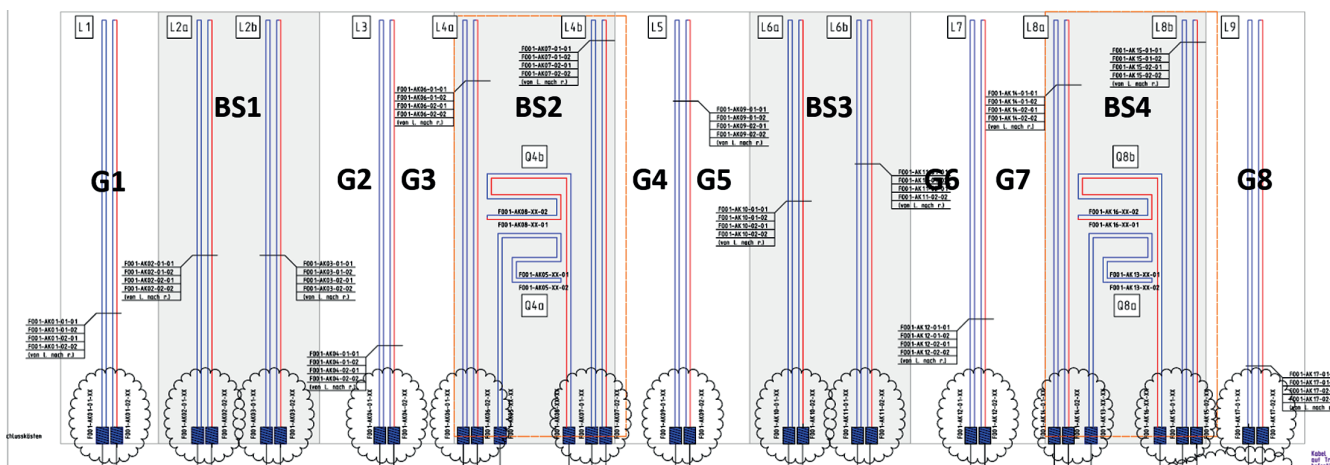


Bild 9: Schematische Darstellung der Faserführung in der Brückenkonstruktion mit Dehnungs- (blau) und Temperatursensorkabel (rot) Konstruktionszeichnung: Werner Sobek AG, adaptiert von Werner Lienhart, TU Graz



Bild 10: Installation der faseroptischen Sensorkabel (links) und Fixierung mit Kabelbindern (Dehnungsschleife, rechts)  
Fotos: Fabian Buchmayer, ACI Monitoring GmbH

bei mehreren Kabelbrüchen zu erhalten, wurde in jedem Messabschnitt zusätzlich eine weitere Dehnungsschleife eingebaut. Dadurch ist jeder Messbereich durch drei Dehnungslinien und eine Temperaturlinie abgedeckt. Bei den Bahnsteigen BS2 und BS4, welche die Kelche K23 und SK24 tragen, wurden weitere Messschleifen im Bereich der Querbewehrungen vorgesehen. Das gesamte Layout der Faserlinien mit 30 Messschleifen ist in Bild 9 gezeigt.

Während der Bauphase können Messungen durch einen Anschluss des faseroptischen OFDR-Interrogators an die Messlinien im Wartungsgang erfolgen. Vor Inbetriebnahme des Bahnhofs erfolgt eine faseroptische Verkabelung bis zum Technikgebäude, von welchem aus die langfristige Dauermessung erfolgt.

### 4.3 Umsetzung

Nachdem die unterste Bewehrungsebene gelegt worden war, konnten die faseroptischen Sensorkabel instal-

liert werden (Bild 10). Damit die Kabel in der vorgegebenen Lage während des Betonierens verbleiben, wurden sie mit Kabelbindern an den Armierungseisen fixiert. Aufgrund der strukturierten Oberfläche des Kabels ist der endgültige Verbund entlang der gesamten Kabelstrecke nach Betonage jedenfalls gegeben.

Vor der Betonage wurden die Kabel auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft und deren Lage im Baustellenkoordinatensystem mittels Totalstationen eingemessen. Somit können die verlegten faseroptischen Sensorschleifen im 3D Bauwerksmodell lagerichtig dargestellt werden (Bild 11). Insbesondere bei der komplexen Geometrie der Querlinien ist dies zur zuverlässigen Interpretation der Messdaten entscheidend. Die Betonage erfolgte in zeitlich versetzten Betonierabschnitten zwischen Herbst 2020 und Sommer 2021. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, wurden zuerst die Bahnsteige betoniert und anschließend die dazwischen liegenden Gleisbette, wobei nach jeder Betonage eine Kontrolle der Funktionsfähigkeit

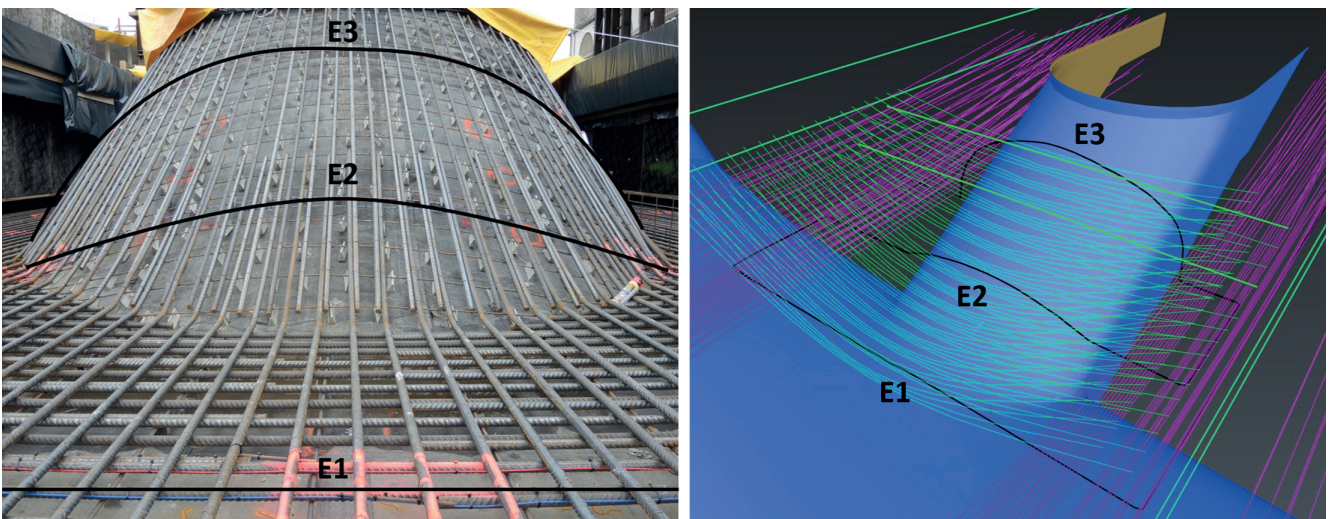


Bild 11: Querlinien von Bahnsteig 4; physische Lage (links) und Darstellung des eingemessenen Sensorkabelverlaufs (schwarz) im 3D Modell mit Abgang zum S-Bahntunnel (blau), Längs- (violett) und Querspannkabel (grün)  
Foto und Grafik: Werner Lienhart, TU Graz

Tabelle 1: Betonierzeitpunkte (B) der einzelnen Gleisbereiche (G) und Bahnsteige (BS)

Datum	G1	BS1	G2+G3	BS2	G3+G4	BS3	G5+G6	BS4	G8
17.09.2020						B			
03.12.2020				B					
14.12.2020		B							
17.02.2021								B	
26.02.2021					B				
30.04.2021			B						
03.05.2021	B								
21.07.2021							B		
23.07.2021									B

der Messkabel erfolgte. Alle 30 Schleifen mit einer Gesamtlänge von ca. 2 km haben den Einbau ohne Beschädigung überstanden und sind auch mehr als vier Jahre nach der Installation weiterhin voll funktionsfähig.

#### 4.4 Betrieb

Im ursprünglichen Monitoringkonzept wurde ein Start der OFDR-Messungen erst nach der Fertigstellung des Technikgebäudes und der Zuleitungskabel, d. h. kurz vor Inbetriebnahme des Bahnhofs, geplant. Infolge der variablen Konzeptionierung des Systems war ein temporärer Zugriff zu den Anschlussboxen im Wartungsgang jedoch jederzeit gegeben. Daher wurde zur Dokumentation entschieden, Messungen bei relevanten Bauvorgängen

wie z. B. dem Vorspannen bereits während der Bau-phase des Brückentragwerks durchzuführen. Die ersten Epochenmessungen erfolgten bereits wenige Tage nach der Betonage und wurden durch Dauermessungen einzelner Linien ergänzt. Für sämtliche Messungen wurde ein Optical Backscatter Reflectometer OBR 4600 von Luna Innovations Inc. eingesetzt [13]. Im Gegensatz zu anderen OFDR-Realisierungen ist das OBR 4600 im Fall von Kabelbrüchen wesentlich robuster [14].

#### 4.4.1 Epochenmessungen

Aus den Messdaten kann die Reaktion des Bauwerks auf unterschiedliche Bauzustände abgeleitet werden. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Bahnsteige ein anderes

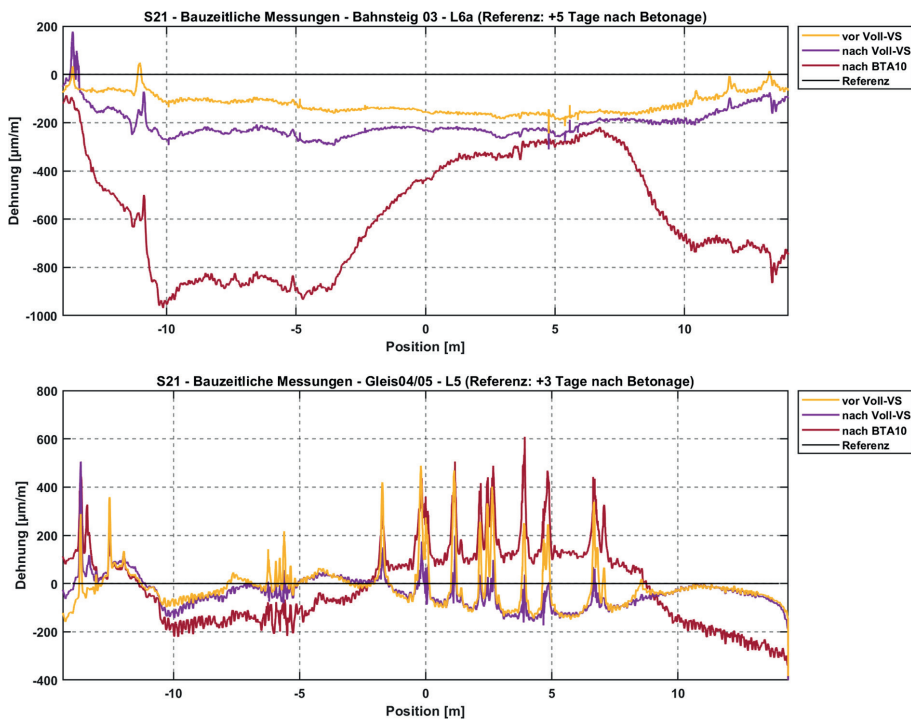


Bild 12: Dehnungsvorläufe von Bahnsteig 3 und Gleisbett G4/G5 in drei Folgeepochen mit der ersten Messung nach der Betonage als Referenz

Grafik: Christoph Monsberger, ACI Monitoring GmbH und Werner Lienhart, TU Graz

dehnungsverhalten als die Gleisbereiche aufweisen. Beispielfhaft ist dies in Bild 12 für den Bahnsteig 3 und das Gleisbett von G4 und G5 gezeigt. Vor der Vollvorspannung ist die Dehnungslinie beim Bahnsteig glatt (gelbe Linie im oberen Diagramm), während die Dehnungslinie beim Gleisbett Spitzen aufweist, welche Risse anzeigen (gelbe Linie im unteren Diagramm in Bild 12). Durch die Vollvorspannung werden die Risse größtenteils geschlossen (violette Linie), sie öffnen sich nach dem Betonierabschnitt (BTA) 10 jedoch wieder (rote Linie). Hierzu ist anzumerken, dass Bild 12 zur besseren Übersichtlichkeit nur wenige Messzeitpunkte zeigt und die erkennbaren Risse über die Bauzeit durch weitere Spannvorgänge geschlossen wurden. Entlang des Bahnsteiges ist ebenso eine signifikante Reaktion auf das Betonieren zu erkennen.

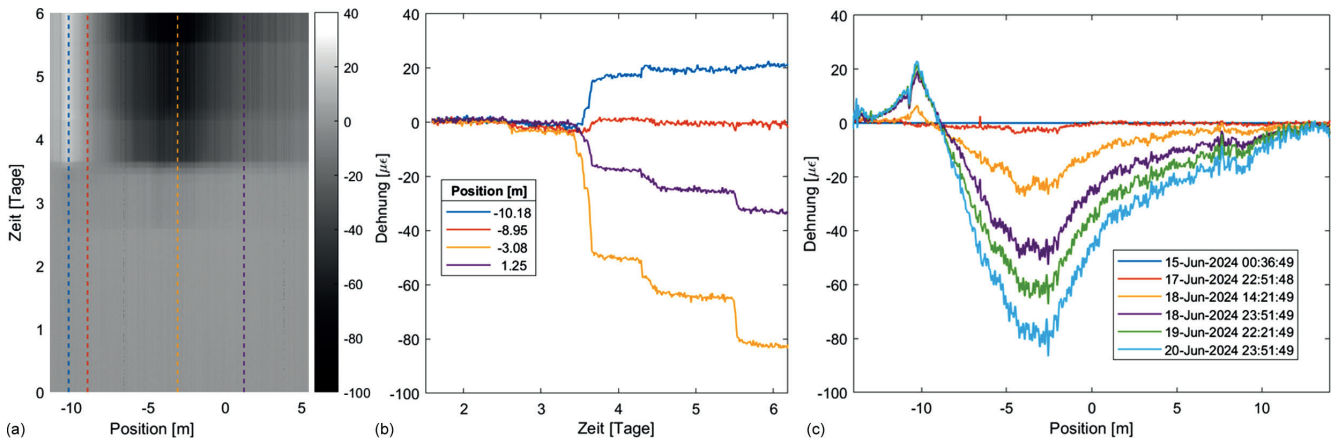


Bild 13: (a) Wasserfallplot der Dehnungen von L4a während des finalen Spannvorgangs im Juni 2024, (b) zeitlicher Verlauf der Dehnungen für ausgewählte Positionen (strichlierte Linien in Wasserfallplot) und (c) Dehnungsverteilung während unterschiedlicher Spannstufen  
Grafik: Werner Lienhart, TU Graz

#### 4.4.2 Dauermonitoring

Für begrenzte Zeiträume wurden immer wieder Dauermessungen durchgeführt. Die längste Dauermessperiode war bisher die Messung der Längslinie L4a von Bahnsteig 2, welche von Januar 2022 bis August 2024 im Dauerbetrieb in einem 15-Minutenintervall gemessen wurde. Aus der Vielzahl an Messdaten werden in diesem Beitrag die kontinuierlich aufgezeichneten Daten während des finalen Spannvorgangs im Juni 2024 gezeigt. Bild 13 (a) zeigt ein Wasserfalldiagramm, aus welchem sowohl zeitliche als auch örtliche Veränderungen der Dehnungen entnommen werden können. Um die Dehnungsentwicklung während des Vorspannes besser sichtbar zu machen, sind die Daten in diesem Plot auf die Messung vom 15. Juni 2024 referenziert (entspricht Tag 0 im Diagramm). Wenn man den zeitlichen Verlauf einzelner Positionen in Bild 13 (b) betrachtet, so kann man anhand des stufenförmigen Verlaufs jeden einzelnen Spannvorgang erkennen. Ebenso ist ersichtlich, dass bei Position -10,18 m (blaue Linie) positive Dehnungen durch das Vorspannen auftreten, Position -8,95 m

(rote Linie) kaum Dehnungen erfährt, während die Positionen -3,08 m (gelbe Linie) und 1,25 m (violette Linie) gestaucht werden. Alternativ dazu kann man auch den räumlichen Verlauf der Dehnungen für ausgewählte Zeitpunkte aus dem Wasserfalldiagramm extrahieren. Bild 13 (c) zeigt den Dehnungsverlauf bei unterschiedlichen Spannstufen. Erkennbar ist, dass in der Richtung von Position -9 m bis -3 m die Stauchungen immer mehr zunehmen und von Position -3 m bis zum rechten Rand hin (Position 14 m, BA10) auf Null abklingen. Richtung BA12 (Position -14 m) treten positive Dehnungen auf, welche gegen den Rand auch auf null abfallen.

#### 4.4.3 Belastungstest

Im Rahmen eines kontrollierten Belastungstests wurden im März 2025 mit Schotter beladene Güterwaggons in unterschiedlichen Lastpositionen auf der Brücke positioniert (Bild 14), um das statische Berechnungsmodell entsprechend validieren und kalibrieren zu können. Ausgewählte Messlinien wurden vor, während und nach der Belastung gemessen und zeigen, wie erwartet, sehr ge-



Bild 14: Belastungstest der Brückenkonstruktion mit Güterwaggons

Foto: Madeleine Winkler, ACI Monitoring GmbH

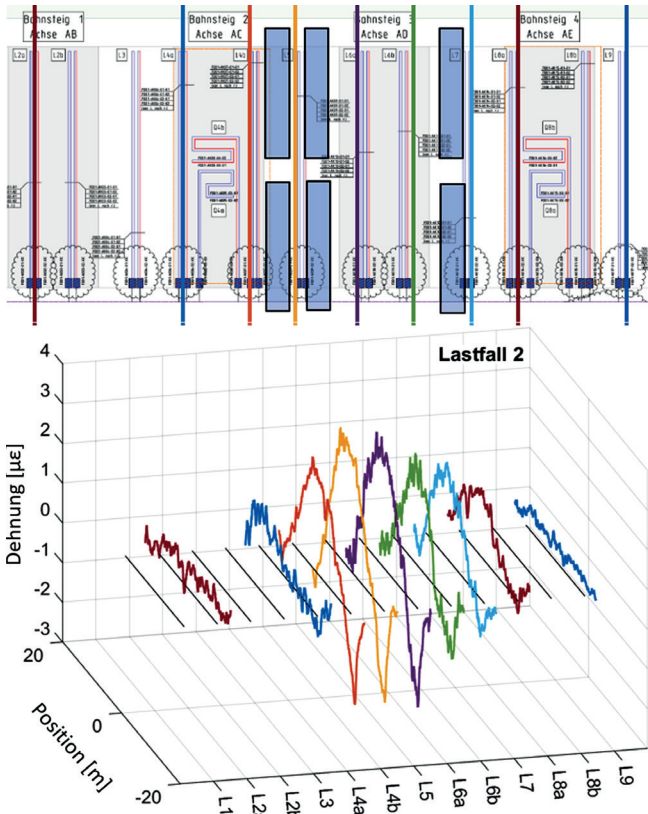


Bild 15: Position der sechs Güterwaggons (hellblaue Rechtecke) bei Lastfall 2 (oben) und gemessene Dehnungsverteilung während der Belastung (unten) Grafik: Werner Lienhart, TU Graz

ringe Dehnungen im Bereich weniger  $\mu\text{m}/\text{m}$  sowie keine Rissöffnungen.

Bild 15 zeigt beispielhaft die aufgetretenen Dehnungen bei der Belastung mit zwei Waggons, positioniert jeweils auf den Gleisen 4, 5 und 6 mit etwa 82 t wirksamem Gesamtgewicht je Wagenpaar. Erwartungsgemäß treten die größten Dehnungen in der Messlinie L5 auf, welche sich zwischen den beiden belasteten Gleisen 4 und 5 befindet. Die benachbarten Bahnsteige BS2 und BS3 zeigen ein ähnliches Dehnungsbild. Mit zunehmender Distanz von der Belastung nehmen die Dehnungen ab. Die maximal aufgezeichneten Dehnungen liegen unter 4  $\mu\epsilon$  und bestätigen die hohe Auflösung in Kombination mit dem geringen Rauschen des Messverfahrens.

## 5 Warn- und Alarmwerte

Für den Betrieb eines Dauermonitorings sind Warn- und Alarmwerte erforderlich, bei deren Überschreiten automatisch eine Benachrichtigung an den Bauwerksbetreiber ausgelöst wird. Dies ersetzt die Information des Betreibers durch den Gutachter nach einer klassischen Brückeninspektion. Für die Querung des S-Bahntunnels im neuen Stuttgarter Durchgangsbahnhof werden die Warnwerte so gewählt, dass bei deren Erreichen die der Planung zugrunde gelegten Regelwerke noch vollumfänglich eingehalten sind. Damit sind die durch die gegenüber der Norm verschärften Bemessungsansätze entstandenen Reserven im Tragwerk aufgebraucht. Die

Alarmwerte werden so festgelegt, dass die Standsicherheit noch gegeben ist.

Die Festlegung der konkreten Warn- und Alarmwerte erfolgt anhand eines Rechenmodells der Brückenkonstruktion, welches mit den Ergebnissen der Messungen im Bauzustand und während des Belastungstests kalibriert wurde. Dabei kann das mit Schalelementen modellierte Rechenmodell Effekte wie die Gewölbewirkung nicht abbilden. Die errechneten Dehnungen an der Brückenunterseite entsprechen den gemessenen Dehnungen daher nur qualitativ (Bild 16).

Um auch eine quantitative Verknüpfung zwischen Rechenmodell und Messergebnissen zu erreichen, wurde für jede Längslinie des faseroptischen Monitorings anhand der Ergebnisse der Belastungstests ein Umrechnungsfaktor ermittelt. Mit diesen Faktoren können aus den rechnerisch ermittelten Dehnungen und Verformungen die konkreten Warn- und Alarmwerte für das Monitoring des Brückentragwerks ermittelt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Einzigartige Bauwerke erfordern oft auch innovative messtechnische Lösungen. Um die Anforderungen einer Zustimmung im Einzelfall zu erfüllen, wurde dieses umfangreiche Messkonzept für das Dauermonitoring entwickelt. Aufgrund der komplexen Geometrie wurde für die geometrische Messplanung eine eigene VR-Applikation entwickelt. Mit dieser Anwendung können geeignete Positionen für Instrumente und Ziele intuitiv und rasch gefunden werden. Inzwischen wurde die Applikation weiterentwickelt. Sie berücksichtigt nun neben Visurkontrollen auch mögliche Störungen aufgrund von mehreren Zielen im Blickfeld des Instrumentes und überprüft die Auftreffwinkel auf die Prismen. Derzeit wurde die VR-Applikation für die Planung verwendet, sie könnte in Zukunft auch erweitert werden, um zeitlich variierende Störelemente wie z. B. einlaufende Züge zu integrieren, wodurch ein lebender digitaler Zwilling entstehen würde [15].

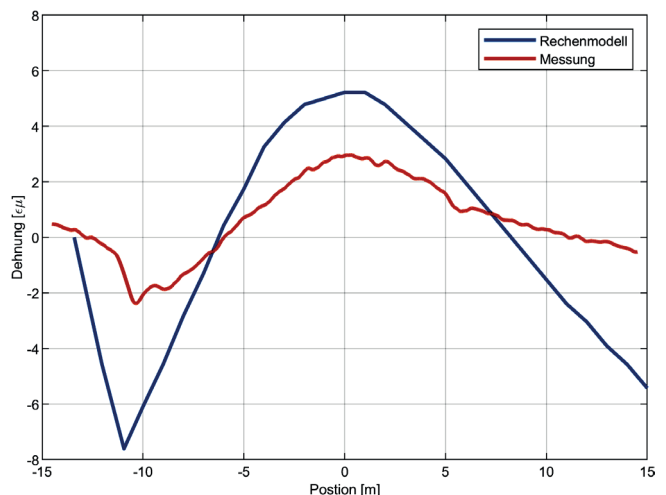


Bild 16: Vergleich der gemessenen mit den errechneten Dehnungen in Linie L2a für Lastfall 1 des Belastungstests Grafik: Werner Lienhart, TU Graz

Die faseroptischen Sensorkabel haben sich als sehr robust herausgestellt. Es konnten 2 km Sensorkabel beschädigungsfrei im Bauwerk integriert werden. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und Messpräzision des eingesetzten OFDR-Messverfahrens konnten Veränderungen von wenigen  $\mu\text{m}$  wie z. B. beim Belastungstest nachgewiesen werden. Für das Langzeitmonitoring ist ebenso wichtig, dass eine Veränderung zum Ausgangszustand hergestellt wird. Bei allen Messlinien ist auch viereinhalb Jahre nach der Installation eine Referenzierung ohne jegliche Messausfälle zum Ausgangszustand möglich. Der Dauerbetrieb zeigt, dass faseroptische Sensorsysteme zuverlässig im Baustellenbetrieb über Jahre hinweg funktionieren können. Jedoch ist dazu eine entsprechende Planung zum frühestmöglichen Zeitpunkt essentiell. Für die Betriebsphase ist außerdem zu beachten, dass aufgrund der großen Anzahl von Messlinien und der hohen räumlichen Auflösung mit großen Datenmengen zu rechnen ist. Eine effiziente Auswertung erfordert daher automatisierte Berechnungs- und Detektionsalgorithmen, welche eventuell unter Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens weiter optimiert werden können.

## Dank

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bahn, insbesondere bei Johanna Zink, Peter Werner Lange, Frank Rolle, Wolfgang Esser, Ralf Megerle und Tinashe Shoniwa, für die hervorragende Zusammenarbeit und bei der Ed. Züblin AG für die Unterstützung bei der Umsetzung des innovativen Monitoringkonzepts.

## Literatur

- [1] Eisenbahn-Bundesamt (Hrsg.): Eisenbahnspezifische Liste Technischer Baubestimmungen (ELTB). Fassung 01/2016.
- [2] DB Netz AG (Hrsg.): Richtlinie 804 - Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten. 2003.
- [3] Schmid, A.; Gepperth, S.; Reinke, H.-G.: Die S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – ein unterirdisches Verkehrsbauwerk mit ganz besonderen Anforderungen. *Bautechnik* 99 (2022), S. 524–532. <https://doi.org/10.1002/bate.202100112>
- [4] Michel, V.; Person, T.; Kasser, M.: 74 Motorized Tacheometers Aiming at 5350 Prisms in Amsterdam: The Largest Topometric Continuous Real Time Monitoring System in the World? in: *Proc. of FIG Working Week 2003*, 13.–17.04.2003 in Paris (Frankreich), 2003, 9 S. [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig\\_2003/TS\\_22/TS22\\_1\\_Michel\\_et\\_al.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_22/TS22_1_Michel_et_al.pdf)
- [5] Binder, N.: Moving London safely forward. *Leica Geosystems Reporter* 71 (2019), S. 18–21.
- [6] Meyer, C.; Eisenegger, S.: Durchmesserlinie Zürich: geotechnisches und geodätisches Monitoring für ein großes innerstädtisches Infrastrukturprojekt. *Geomatique Suisse* 4 (2011), S. 140–145.
- [7] Bauer, P.; Lienhart, W.: 3D concept creation of permanent geodetic monitoring installations and the a priori assessment of systematic effects using Virtual Reality. *Journal of Applied Geodesy* 17 (2023) 1, 13 S. <https://doi.org/10.1515/jag-2022-0020>
- [8] Leica Geosystems AG (Hrsg.): Leica Nova TM60 Monitoring Station. Datenblatt, 2020. [https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica%20nova%20tm60%20ds%20929643%201120%20en%20lr.ashx?sc\\_lang=de-de&hash=543B60E9561757D-8358F92962108373E](https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica%20nova%20tm60%20ds%20929643%201120%20en%20lr.ashx?sc_lang=de-de&hash=543B60E9561757D-8358F92962108373E)
- [9] Herbers, M.; Richter, B.; Gebauer, D.; Classen, M.; Marx, S.: Crack monitoring on concrete structures: Comparison of various distributed fiber optic sensors with digital image correlation method. *Structural Concrete* 24 (2023) 5, S. 6123–6140. <https://doi.org/10.1002/suco.202300062>
- [10] Solifos (Hrsg.): BRUsens – DSS V9 Strain Sensing Cable. Datenblatt, 2025. [https://solifos.com/wp-content/uploads/2023/10/Solifos\\_3-50-2-005\\_en.pdf](https://solifos.com/wp-content/uploads/2023/10/Solifos_3-50-2-005_en.pdf)
- [11] Monsberger, C. M.; Lienhart, W.: Distributed Fiber Optic Shape Sensing of Concrete Structures. *Sensors* 21 (2021) 18, 6098. <https://doi.org/10.3390/s21186098>
- [12] Solifos (Hrsg.): BRUsens DTS Steel-Armored. Datenblatt, 2023. [https://solifos.com/wp-content/uploads/2023/10/Solifos\\_3-50-1-001\\_en-1.pdf](https://solifos.com/wp-content/uploads/2023/10/Solifos_3-50-1-001_en-1.pdf)
- [13] LUNA (Hrsg.): OBR 4600. Datenblatt, 2023. [https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/datasheets/OBR4600\\_DS\\_REV6\\_111623.pdf](https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/datasheets/OBR4600_DS_REV6_111623.pdf)
- [14] Agreiter, A.; Lienhart, W.: Limitations of OFDR measurements in civil structural health monitoring. in: *Proc. SPIE 13639 – 29<sup>th</sup> Int. Conf. on Optical Fiber Sensors*, 25.–30.05.2025 in Porto (Portugal), 4 S. <https://doi.org/10.1117/12.3062274>
- [15] Bauer, P.; Lienhart, W.: Augmentation approaches for geodetic permanent monitoring systems in dynamic urban environments. *Survey Review* 56 (2024) 398, S. 500–508. <https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2293555>