

# Planung & Realisierung eines geodätischen Monitoringsystems zur Überwachung der S-Bahn Überbrückung am Hauptbahnhof Stuttgart S21

Christoph M. MONSBERGER<sup>1</sup> (ORCID No 0000-0003-0937-014X) & Peter BAUER<sup>2</sup> (ORCID No 0000-0002-7245-7259)

<sup>1</sup> ACI Monitoring GmbH, christoph.monsberger@aci-monitoring.at

<sup>2</sup> VRVis GmbH

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-004](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-004), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

## Kurzfassung

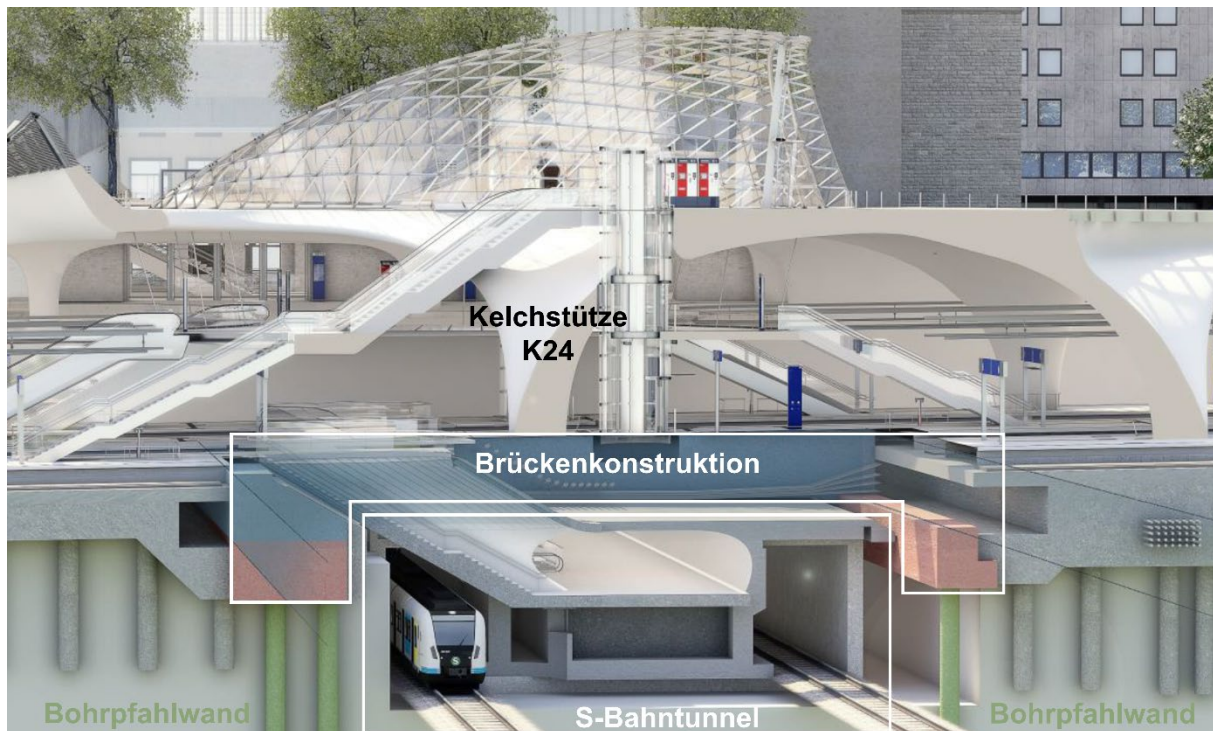
Automatisierte Überwachungsmessungen im urbanen Gebiet bringen komplexe Herausforderungen mit sich und erreichen bei Großprojekten oftmals die Grenzen des Stands der Technik. Dieser Beitrag behandelt die Planung und Realisierung eines automatischen Monitoringsystems für ein Brückenbauwerk innerhalb der im Rahmen von Stuttgart 21 neu errichteten Bahnsteighalle des Hauptbahnhofs Stuttgart. Die Brückenkonstruktion wurde nur wenige Zentimeter über dem bestehenden S-Bahn-Tunnel errichtet, weshalb eine konventionelle visuelle Inspektion nicht möglich und stattdessen ein permanentes Monitoring erforderlich ist. Eine Kombination aus automatischen Totalstationen, verteilten faseroptischen Sensoren und Sensoren zur Messung der Schallemission soll daher in Zukunft eine gesamtheitliche Betrachtung des Strukturverhaltens im Betrieb gewährleisten.

Eine besondere Herausforderung bei der Planung des Überwachungssystems stellte die komplexe Geometrie der Bahnsteighalle dar, wobei zusätzlich zahlreiche Einbauten berücksichtigt sowie die endgültige Position der Totalstationen (Bohrungen der Aufhängung) und die Prismenpositionen mit sehr geringen Toleranzen bereits vor Baubeginn vor Ort definiert werden mussten. Infolge dessen wurde die Planung und Simulation der Totalstationen auf Basis der 3D Planungsdaten gänzlich in einer virtuellen 3D Umgebung unter Zuhilfenahme von Virtual Reality (VR) mit Fokus auf Validierung der Sichtachsen, Kontrolle der Öffnungswinkel bei einfallenden Visierlinien bei Prismen und Vermeidung von Mehrdeutigkeiten im Suchfeld der automatischen Anzielung durchgeführt. Neben diesen Aspekten thematisiert dieser Beitrag die Erkenntnisse aus der Installation und einer mehrwöchigen Testphase des Systems. Diese zeigen die Herausforderungen in der baubetrieblichen Umsetzung, demonstrieren jedoch auch die hohe wiederholbare Genauigkeit des realisierten Systems.

## 1 Einleitung & Motivation

Zur Querung des bestehenden S-Bahn-Tunnels wurde für die S21-Bahnsteighalle im Bauabschnitt BA11 eine vorgespannte Brückenkonstruktion in Bahnhofslängsrichtung geplant. Das Brückentragwerk gründet seitlich beidseitig mit neu errichteten Bohrfahlwänden und ist im Endzustand mit den benachbarten Bodenplatten sowie über die Kelchstützen mit dem Schalendach verbunden (Abb. 1). Der Überbau mit einer Spannweite von etwa 30 m wird durch

sein Eigengewicht, die beiden Kelchstützen K23 und K24 des Schalendaches sowie den Eisenbahnverkehr belastet. Im Zuge der Bauphase, also auch während der Spannvorgänge, ist die monolithische Verbindung zur angrenzenden Bodenplatte jedoch noch nicht hergestellt.



**Abb. 1:** Überbrückung des S-Bahn-Tunnels in der S21-Bahnsteighalle (basierend auf Werner Sobek AG, 2025)

Als Spanntechnologie kommt hierzu die „Interne Vorspannung ohne Verbund“ zum Einsatz, welche ein mehrfaches Vorspannen einzelner Spannglieder ermöglicht und somit die mehrmalige Kompensation eingetretener Spannverluste aus Kriechen und Schwinden vor Herstellung einer monolithischen Verbindung (Schmid et al., 2022). Diese Ausführung entspricht jedoch keiner Regelbauweise gemäß geltender Vorschriften der ELTB (Eisenbahnspezifische Liste der technischen Baubestimmungen), weshalb verschärfte Bemessungsansätze für das Brückenbauwerk gegenüber standardmäßigen Regelwerken gewählt wurden. Zusätzlich ist die Brückenuntersicht infolge des geringen Abstandes zum darunterliegenden S-Bahn-Tunnel von nur 10 cm nicht inspizierbar und die Feststellung einer möglichen Rissbildung infolge von Überlastung oder etwaiger Spannstahlausfälle auf herkömmlichem Wege nicht möglich. Die Inspizierbarkeit gemäß geltender DB-Richtlinie (Ril 804 - Eisenbahnbrücken u. sonstige Ingenieurbauwerke) ist folglich nicht gegeben und wird durch ein kontinuierliches Monitoring ersetzt. Das konzeptionierte Überwachungssystem, bestehend aus geodätischen Messungen mit automatischen Totalstationen (punktuelle absolute 3D Deformation), verteilten faseroptischen Sensoren (hochauflösende relative Deformation) sowie Sensoren zur Messung der Schallemission (Spannstahlbruchortung), ermöglicht eine gesamtheitliche Beurteilung des Strukturverhaltens im Betrieb. Der vorliegende Beitrag thematisiert die Konzeptionierung und Realisierung des geodätischen Monitoringsystems mit Fokus auf die Planung, praktische Herausforderungen in der Umsetzung sowie erste Erkenntnisse einer mehrwöchigen Testphase.

## 2 Planung & Konzepterstellung

### 2.1 Planungsprozesse im digitalen Bauen

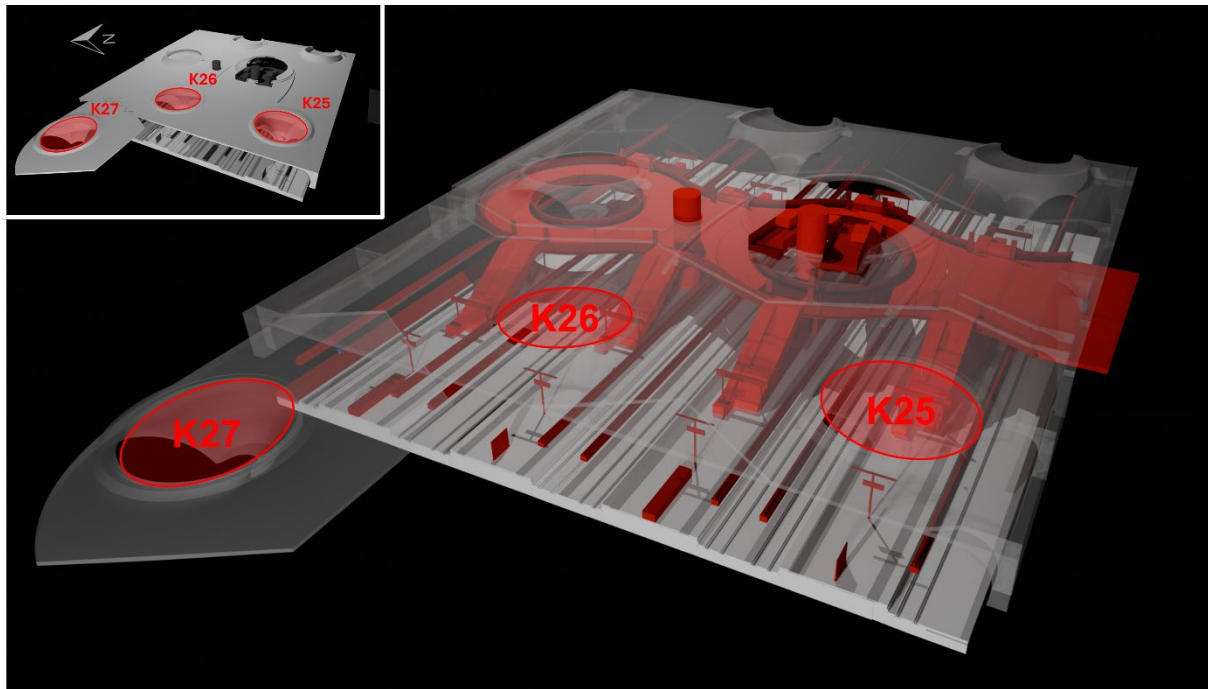
Die Überwachung von Strukturen während dem regulären Betrieb zur Schadensdetektion und Instandhaltung gewinnt in Bauprojekten zunehmend an Bedeutung. Es ist daher als großer Fortschritt zu sehen, dass bereits bei vielen Neubauprojekten ein geodätisches Überwachungssystem als permanente Installation vorgesehen ist. Somit kann vom natürlichen Verhalten des Bauwerks im Betrieb gelernt, auftretende Deformationen im Schadensfall besser detektiert und deren Signifikanz zuverlässig analysiert werden. Des Weiteren werden geodätischen Instrumente bereits in der Planungsphase berücksichtigt, sodass diese keinen Fremdkörper im Gesamtsystem darstellen und ein störungsfreier Betrieb eher gewährleistet werden kann.

Im Gegenzug steigen aber auch die Anforderungen an die Planung des Systems, da sämtliche Komponenten (Konsolen, Prismen, Kabelleitungen, etc.) mit den gleichen Maßstäben wie alle anderen Einbauteile gehandhabt werden müssen und im digitalen Bauprozess zu berücksichtigen sind. Hierzu ist festzuhalten, dass die Repräsentation und Einpflegung von geodätischen Objekten im Prozess des Building Information Modelings (BIM) zwar Teil aktueller Forschung ist (Sacks et. al., 2011), praktisch jedoch methodisches Neuland darstellt. Außerdem ist die konventionelle Planung von Totalstationsmessungen, insbesondere die Abschätzung von Fehlereinflüssen, in der Regel stark auf die Erfahrung des ausführenden Personals und damit auf eine Baustellenbegehung vor Ort angewiesen ist. Jedoch besteht weder das eigentliche Bauwerk noch zukünftige Probleme zum Zeitpunkt der Planung in der Realität und können somit praktisch vor Ort nicht abgeschätzt werden.

Die Ausgangslage der geodätischen Überwachungsmessungen beim Bauprojekt S21 beruhte ausschließlich auf den Planungsdaten. Aufgrund der äußerst komplexen Geometrie des Schalendaches und der Vielzahl an Einbauten wurde die Planung durchgängig in einer 3D-Umgebung ausgeführt und methodisch damit direkt an den digitalen 3D-Planungsprozess der Baustelle angeknüpft. Dafür wurde für die geodätische Planung der relevante Ausschnitt als 3D Geometrie zur Verfügung gestellt, welcher in Abb. 2 ersichtlich ist. In rot sind hierbei sämtliche Einbauten dargestellt, die den verfügbaren Raum stark begrenzen. Insbesondere die Oberleitungen und Informationstafeln, aber auch eine zentral über dem Projektgebiet verlaufender Fußgängersteg sind für die Planung der Visuren relevant.

Die Bereiche in der Bahnsteighalle gliederten sich in einen potenziell bewegten Untergrund (Bahnsteige und Gleisbett) und den Dachbereich (Schalendach), welcher a priori als stabil definiert wurde. Folglich findet auch die Ausführung des Messsystems in zwei unterschiedliche Ebenen statt, mit Referenzmessungen am Schalendach sowie Überwachungsmessungen im Bodenbereich (S-Bahn-Überbrückung).

Zusätzlich zur Geometrie für die Kollisionskontrolle der Visuren sollten auch einzelne Objekte für die Standpunktsbestimmung sowie bestehende, bereits eingeplante Versorgungsschächte und Aussparungen berücksichtigt werden. Letztere waren insbesondere für die Versorgung der Totalstationen von Interesse, weshalb die Kelchstützen K25, K26 und K27 als mögliche Standorte in den Vordergrund rückten.



**Abb. 2:** Planungsmodell von S21 mit Innenansicht (Fußgängersteg und sonstige Einbauten in Rot)

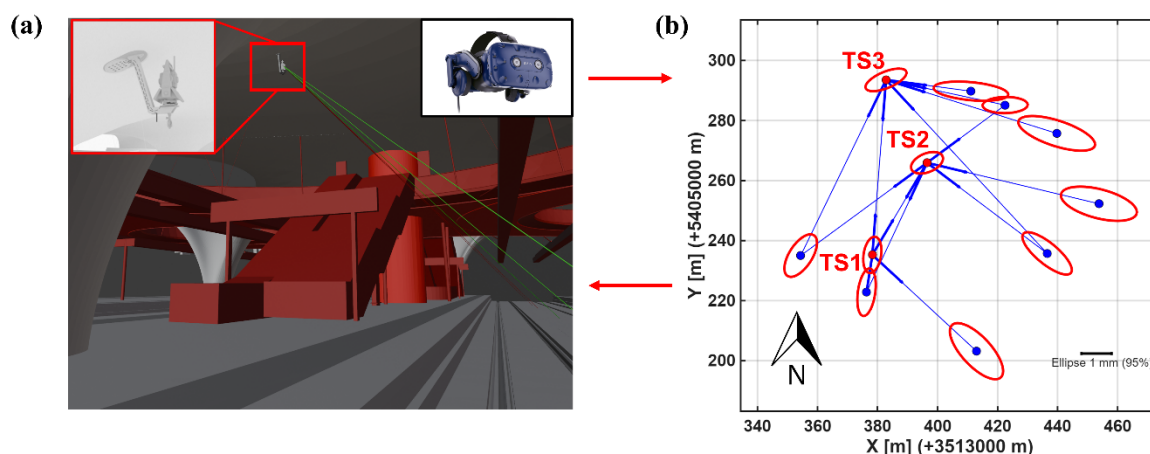
## 2.2 Virtuelle Realität als Bindeglied zwischen BIM und Geodäsie

Um die geplanten Visuren nach Fertigstellung gewährleisten zu können, müssen der Anfangspunkt (Zentrum der Totalstation) und der Endpunkt (Prismenzentrum) mit hoher Genauigkeit definiert und vor Ort realisiert werden. Im Bauprozess selbst sind jedoch sowohl das Zentrum der Totalstation als auch das Prismenzentrum abstrakte Begriffe. Daher wurden für alle Komponenten die Bohr- und Dübelpositionen (mit einer Genauigkeit von unter 1 cm) als Installationsanweisung berechnet und ausgewiesen. Insbesondere bei der Totalstationsaufhängung war diese Nachrechnung essentiell, da für die Montage und Unterbringung der notwendigen Kommunikationseinheit (COM-Box) ein speziell gefertigtes Einbauteil im Schalendach einbetoniert werden musste. Dieser Detailgrad der Planung ist nur durch eine vollständige 3D-Modellierung aller Komponenten (Konsolen, Einbauteile, Instrumente, Prismen) mitsamt ihrer mechanischen Funktionalität möglich.

Aktuell ist diese Funktion weder in kommerzieller BIM-Software noch in geodätischer Software abgebildet. Aufgrund der Komplexität des Schalendachs und der Einbauten haben sich auch konventionelle 3D-Viewer als unpraktikabel herausgestellt. Zu diesem Zweck wurde eine eigene VR-Applikation (Bauer und Lienhart, 2022) in der Game Engine Unity entwickelt, mit welcher sich ein geplantes Bauwerk virtuell begehen und Vermessungskomponenten interaktiv und dynamisch setzen lassen. Die Funktion der virtuellen Vermessungsobjekte basiert auf vorhandenen Datenblättern der Hersteller bzw. auf aktuellen Laboruntersuchungen, während die Geometrieinformationen aus frei verfügbaren Modellen oder einem Reverse-Engineering-Prozess stammen. Aus diesem Grund verhalten sich die virtuellen Komponenten realistisch und ermöglichen den hohen Detailgrad der Planung.



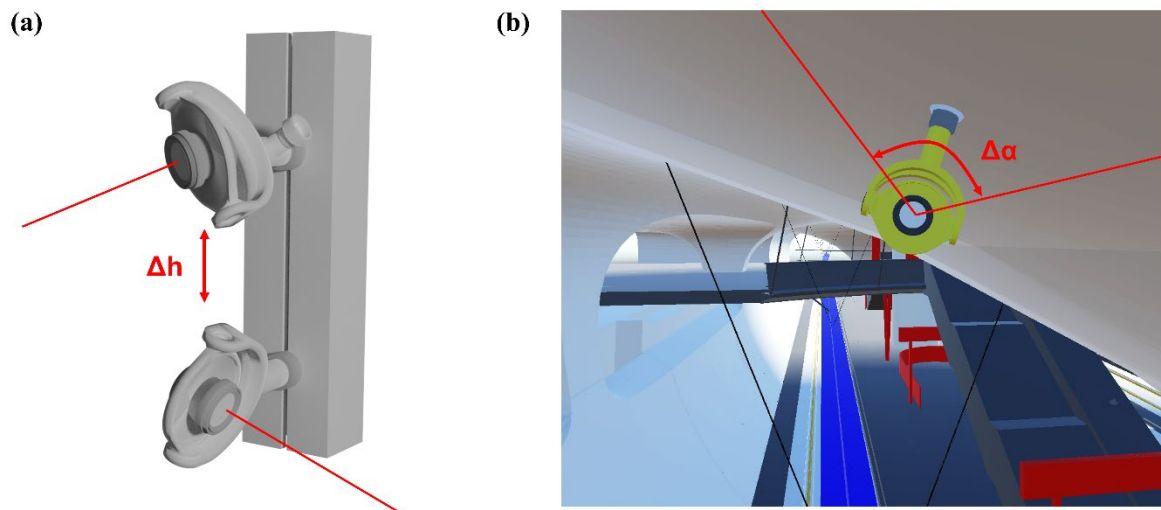
Ein besonderes Augenmerk lag darauf, dass sich die VR-Planung in den geodätischen Workflow einbetten lässt. Sie stellt das Bindeglied zwischen der BIM-Modellierung und der konventionellen geodätischen Berechnungssoftware dar. Das Modell wurde in Unity im sog. OBJ-Format (offenes Dateiformat zum Speichern von 3D-Formen) geladen, die Simulation durchgeführt und anschließend die geplanten Koordinaten der Komponenten in ein Netzprogramm übertragen. Auf Basis der Ergebnisse der konventionellen Netzsimulation wurde die VR-Planung angepasst, neue Koordinaten an das Netzprogramm weitergegeben und somit ein iterativer Lösungsprozess geschaffen.



**Abb. 3:** Innovatives Netzdesign: (a) VR-Planung und (b) konventionelle 2D-Netzsimulation

Eine Hauptaufgabe der VR-Simulation ist die Kollisionsberechnung der Sichtlinien (siehe Abb. 3a). Zusätzlich werden dem Benutzer weitere Berechnungsergebnisse und Qualitätsinformationen (Prädiktionen) angezeigt. Für die Netzplanung sind hier das Sichtfeld der automatischen Zielanvisierung, also die Verhinderung von Doppelpunkten im Suchfeld, sowie die Planung der Einfallswinkel auf Prismen relevant. Zahlreiche Untersuchungen (Lösler et al., 2013; Lackner und Lienhart, 2016) haben gezeigt, dass je nach Einfallswinkel auf ein Prisma mit Abweichungen im Millimeterbereich gerechnet werden muss. Insbesondere für die Platzierung der Verknüpfungspunkte am Schalendach ist dies relevant, da diese von unterschiedlichen Totalstationen gemessen werden.

Aufgrund der hier erforderlichen Genauigkeit scheiden  $360^\circ$ -Prismen für derartige Anwendungen aus (Lackner und Lienhart, 2016). Es verbleibt die Möglichkeit, sog. Prismen-Arrays in unterschiedliche Richtungen einzusetzen (Abb. 4a), welche im Allgemeinen eine praktikable, baustellentaugliche Lösung darstellen. Jedoch wurde diese Methode für die Planung von S21 verworfen, da ein vertikaler Offset zwischen den Prismen aufgrund der Dachgeometrie (zumindest teilweise) nicht realisiert werden konnte und der größere Gesamtaufbau durch min. zwei Prismen das ästhetische Gesamtkonzept des Bauwerks stärker beeinflusst hätte. Aus diesem Grund wurde in Vorversuchen der zulässige Einfallswinkel (Abb. 4b) auf Miniprismen untersucht und ein Operationsbereich von  $\pm 25^\circ$  bestimmt, bei welchem die Abweichungen aufgrund von variierendem Einfallswinkel  $> 1$  mm betragen. Auf Basis dieses Operationsbereiches und des limitierten Platzes für Visuren ergab sich ein entsprechendes Netzdesign für das Grundlagnetz am Schalendach (Abb. 3b).

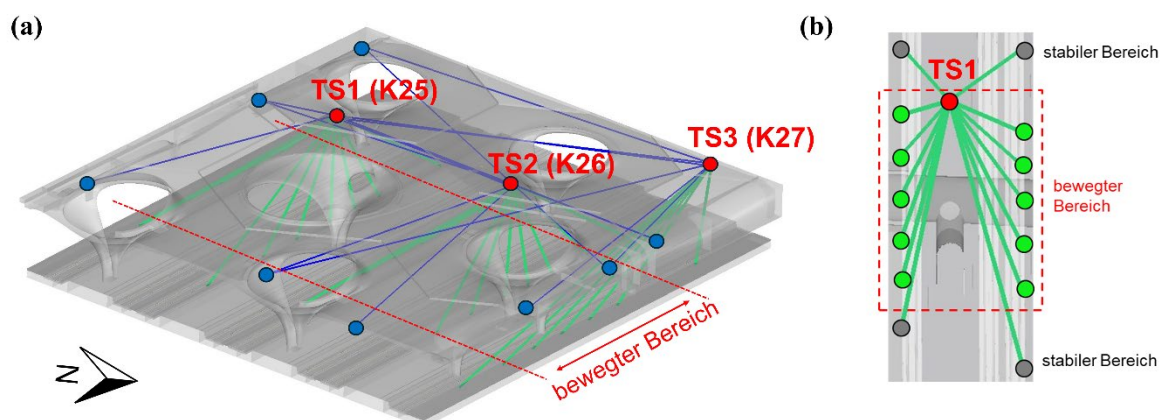


**Abb. 4:** Varianten zur Realisierung von Verknüpfungspunkten: (a) Prismen-Array in unterschiedliche Richtungen und (b) Einzelkonfiguration mit zulässigem Einfallswinkel

## 2.3 Finales Messkonzept

Im Rahmen der Konzeptphase wurden unterschiedliche Varianten mit zwei und drei Totalstationen simuliert. Letztere bietet dabei den Vorteil einer wesentlich besseren Abdeckung mit Objektpunkten im Gleisbereich.

Auf Basis der Voruntersuchungen und der Simulation wurde schlussendlich ein finales Messkonzept mit jeweils einer Totalstation auf den Kelchstützen K25, K26 und K27 sowie acht Verknüpfungspunkten am Schalendach erstellt, siehe Abb. 5a. Unter jeder Konsole wurde ein zusätzlicher Verknüpfungspunkt geplant, um Messungen zwischen den Konsolen zu erlauben und somit „gegenseitige Visuren“ in einem permanenten Setup im Netzausgleich zu realisieren. Des Weiteren wurden Visuren zu den Verknüpfungspunkten so gewählt, dass diese nicht durch Besucher auf der Brücke gestört werden und Prismen vor Vandalismus geschützt sind.



**Abb. 5:** Finales Messkonzept: (a) Gesamtnetz und (b) Anordnung der Objektpunkte von TS1 im Gleisbereich

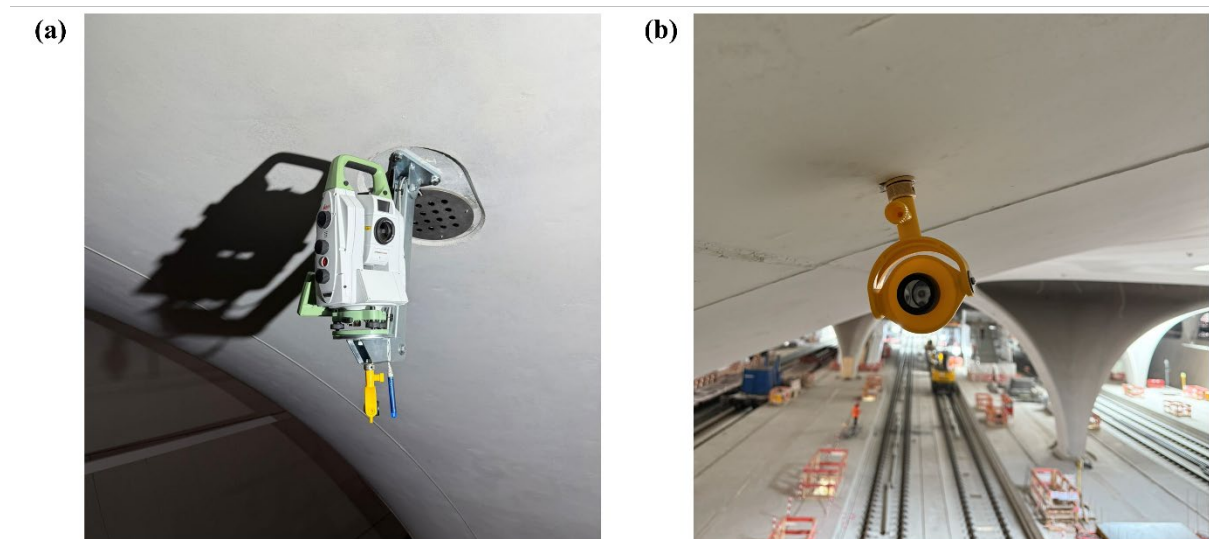
Die Standpunkte der Totalstationen können a priori nicht als stabil angenommen werden, da die Stahlkonsolen thermalen Ausdehnungseffekten durch die Änderung der Umgebungstemperatur unterliegen. Aus diesem Grund wird der Netzausgleich zu jeder Epoche frei ausgeglichen, wobei auf den 8 Verknüpfungspunkten gelagert wird.

Im Bodenbereich misst jede Totalstation zu 14 Objektpunkten, wobei sich jeweils die Messlinie einer Seite im Gleisbett und jene der anderen Seite an der Bahnsteigkante befindet (Abb. 5b). Am Ende beider Messlinien wird ebenso ein Punkt im stabil angenommenen Bereich angeordnet, um relative Deformationen entlang der Messlinie kontrollieren zu können. Diese Maßnahme dient vor allem zur Absicherung, sollte es zu einem späteren Zeitpunkt auch zu einer Setzung im Dachbereich und somit im Referenznetz kommen.

### 3 Praktische Realisierung

#### 3.1 Installation der Systemkomponenten

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Veröffentlichung wurden alle drei Totalstationen inklusive entsprechender Kommunikationseinheiten und Datenverbindungen sowie sämtliche Verknüpfungspunkte am Schalendach praktisch realisiert. Im Zuge einer Begehung vor der Installation erfolgte eine Lagekontrolle sämtlicher Einbauteile im Schalendach sowie die Bohrungen zur Montage der jeweiligen Konsole im Baustellenkoordinatensystem. Die Abweichungen von  $< 1\text{cm}$  zum geplanten Netz bestätigen die hohe Genauigkeit der Bauleistung und des digital unterstützten Bauprozesses und ermöglichten eine Installation gemäß Netzsimulation.



**Abb. 6:** Installation der Systemkomponenten: (a) Totalstation Leica TS60 mit Einbauteil an der Kelchstütze und (b) Prisma mit Dübel am Schalendach

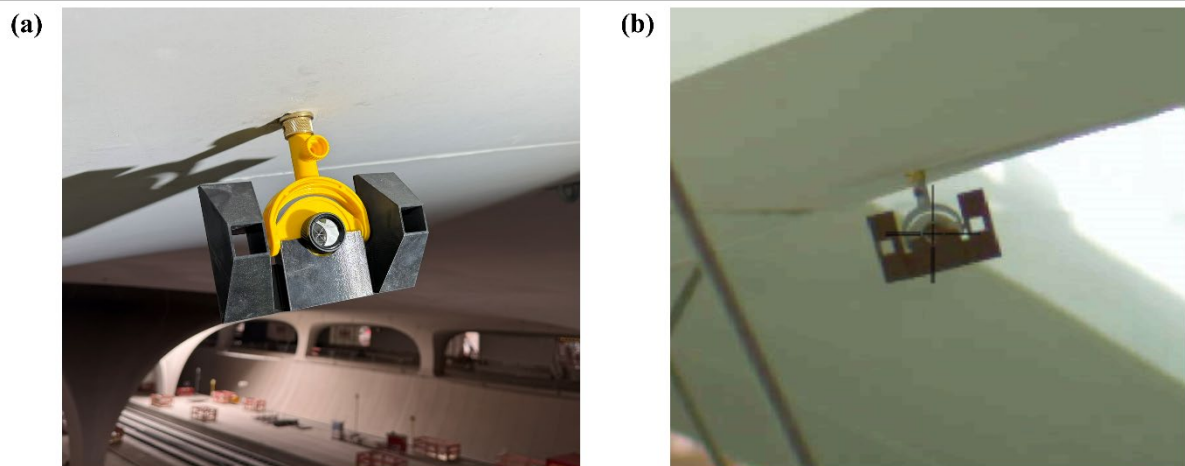
Abb. 6 zeigt eine der installierten Totalstation auf einer Konsole sowie einen realisierten Verknüpfungspunkt am Schalendach. Infolge der Ableitung der Bohrpositionen aus der VR-Simulation stimmen die tatsächlichen Positionen der Prismenzentren auf wenige Millimeter mit

der Netzsimulation überein. Im Bereich der Konsole musste die Höhe und Lage infolge eines Instrumentenwechsels im Vergleich zur ursprünglichen Planung (Leica Typ TS60 anstelle TS50) geringfügig verändert werden, um eine Kollision zwischen dem Display der Totalstation und dem Konsolenarm zu verhindern. Die Auswirkung auf die Visuren zu sämtlichen Verknüpfungspunkten wurde vor Ort kontrolliert und keine signifikanten Auswirkungen festgestellt.

### 3.2 Prismen Orientierung

Zur Umsetzung der zulässigen Orientierung wurde in der ursprünglichen Planung (Bauer und Lienhart, 2024) eine komplexe Zieltafel mit Markern vorgeschlagen. Diese sollte mittels der On-Axis Kamera detektiert und aus der Aufnahme die relative Orientierung des Prismas berechnet werden. Aufgrund des Fehlens kommerzieller Apps auf der Totalstation hat sich diese Methode jedoch nicht als zielführend erwiesen. Aus diesem Grund wurde zur praktischen Realisierung auf eine mechanische Hilfskonstruktion (siehe Abb. 7a) zurückgegriffen, welche zwar demselben Grundprinzip folgt, jedoch wesentlich einfacher auf der Baustelle eingesetzt werden kann. Hierzu wurde der Öffnungswinkel von  $\pm 25^\circ$  durch die beiden Aussparungen links und rechts des Prismenzentrums physisch realisiert. Ist der Hintergrund aus Blickrichtung der Totalstation durch die beiden Öffnungen sichtbar, befindet sich das Prisma relativ zur Totalstation im zugelassenen Betriebsbereich. Aufgrund der exzentrischen Positionierung der Aussparungen und einer dadurch resultierenden Parallaxe muss das optische Mittel aus beiden Aussparungen genommen werden. Diese Problematik ist aber indirekt proportional zur Distanz und besitzt nur im Nahbereich einen signifikanten Effekt.

Der Vorteil dieser „analogen“ Variante ist, dass dieses Vorgehen vom Installationsteam mit dem Videostream der Totalstation ohne weitere Anpassungen der Software durchgeführt werden konnte. Dazu wurde für jeden Verknüpfungspunkt das On-Axis Kamerabild (Abb. 7b) von den jeweiligen Totalstationen betrachtet, die Ausrichtung des Prismas vorgenommen und abschließend das Prisma mittels Schraube fixiert. Das Bild dient außerdem zur Dokumentation, wodurch eine mögliche Veränderung am Prisma selbst oder im Nahbereich zu einem späteren Zeitpunkt jederzeit überprüft werden kann.

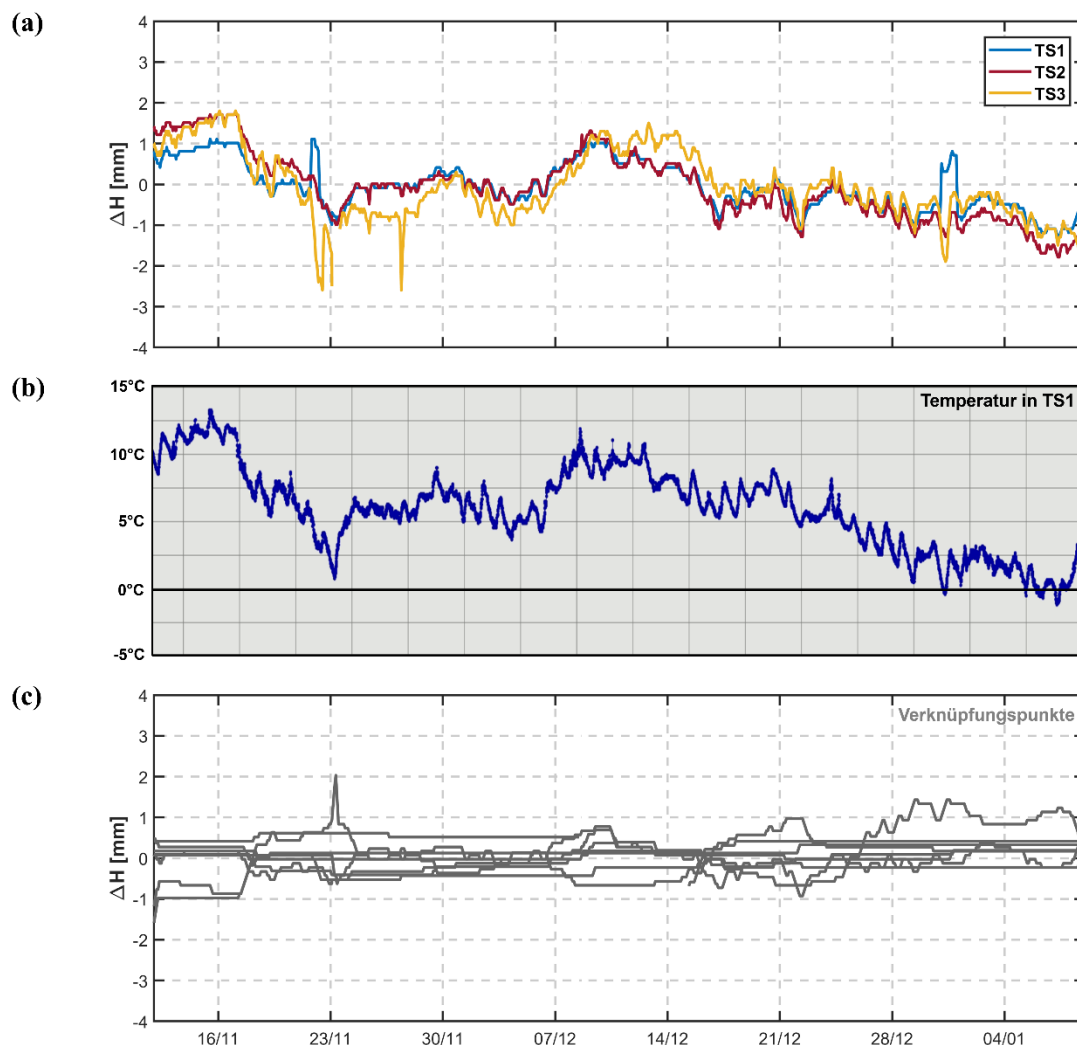


**Abb. 7:** Planungsgetreue Orientierung der Prismen in der Praxis: (a) 3D-Druck gefertigter Prismenadapter und (b) resultierendes On-Axis Kamerabild der Leica TS60



## 4 Erste Auswertungen

Seit 11.11.2025 sind alle Konsolen sowie Konsolen in der endgültigen Konfiguration besetzt – das System befindet sich in einem mehrmonatigen Testbetrieb. Zur Veranschaulichung der ersten Messresultate sind in Abb. 8 die Auswertungen der Höhenkomponente bis inkl. 09.01.2026 dargestellt. Die Höhenveränderungen aller drei Konsolenpunkte zentriert um den Mittelwert (Abb. 8a) zeigen, wie zu erwarten, eine Variation im Millimeterbereich. Die Außentemperatur am Standpunkt TS1 in Abb. 8b zeigt im Beobachtungszeitraum eine Variation zwischen  $-1^{\circ}\text{C}$  und  $10^{\circ}\text{C}$ , wobei der Temperaturverlauf eindeutig mit der Höhenvariation korreliert. Die Messwerte selbst werden durch die externen Sensoren meteorologisch korrigiert, außerdem ist im Messbereich nur wenig Refraktion zu erwarten. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass eine tatsächliche Bewegung aufgrund der thermischen Ausdehnung der Konsole stattfindet. Diese Aussage wird auch dadurch gestützt, dass diese Systematik in keinem der Verknüpfungspunkte (Abb. 8c) zu erkennen ist.



**Abb. 7:** Auswertung des ersten Testzeitraums von 2 Monaten: (a) Relative Höhenveränderung in den Konsolenpunkten, (b) Temperaturverlauf in TS1 und (c) relative Höhenänderung in den Verknüpfungspunkten

## 5 Zusammenfassung & Ausblick

Konventionelle Methoden zur Planung automatisierter, geodätischer Überwachungssysteme stoßen im urbanen Gebiet infolge komplexer Geometrien und einer Vielzahl von Einbauten oftmals an ihre Grenzen. Zur Planung des geodätischen Monitorings in der neuen Stuttgart-21-Bahnsteighalle wurde daher eine eigene VR-Applikation realisiert, in welcher das Bauwerk virtuell begangen und Vermessungskomponenten intuitiv gesetzt werden können. Neben einer Kontrolle der geplanten Visurlinien können z.B. Störungen durch mehrere Prismen im Sichtfeld der Totalstation oder Kollisionen mit Einbauten interaktiv identifiziert und behoben werden. Ebenso kann der Auftreffwinkel der Visur am Prisma berechnet und somit die Orientierung des Prismas basierend auf Voruntersuchungen und/oder Erfahrungswerten in der Planung optimiert werden. In weiterer Folge kann durch die Integration zeitlich variierender Beeinflussungen wie z.B. Klimaanlage ein lebendiger digitaler Zwilling für den Betrieb geschaffen werden.

Die Einbindung von geodätischen Objekten in den BIM-Prozess und damit eine Schaffung einer interoperablen Schnittstelle zwischen BIM und Monitoring kann aktuell nicht als Stand der Technik angesehen werden. Der interaktive Planungsprozess im Projekt S21 zeigt den erheblichen Mehrwert insbesondere im Hinblick auf die spätere praktische Umsetzung und kann eine zuverlässige Grundlage für die Planung zukünftiger Großprojekte mit geodätischen Monitoringsystemen bieten.

Die praktische Installation der geodätischen Komponenten am Schalendach konnte im Jahr 2025 erfolgreich abgeschlossen werden. Die ersten Erkenntnisse einer mehrwöchigen Testphase beweisen die Plausibilität des Monitoringsystems anhand einer direkten Korrelation der Höhenkoordinate der Konsolenpunkte mit der Umgebungstemperatur infolge einer thermischen Ausdehnung des Konsolenarmes. Die Variation der Verknüpfungspunkte in einem Wertebereich von etwa  $\pm 1$  mm über den gesamten Beobachtungszeitraum demonstriert außerdem die hohe wiederholbare Genauigkeit des Systems.

Auf Basis des Bauzeitplans soll die Installation der Bodenpunkte im Gleisbett und am Bahnsteig nach Fertigstellung der Schallabsorber im Gleisbereich im ersten Halbjahr 2026 realisiert werden. Das Gesamtsystem kann somit vor Inbetriebnahme des Bahnhofs ausreichend getestet werden. Im späteren Betrieb ist aktuell ein Messintervall aller Totalstationen von 15 Minuten sowie eine vollständige Netzausgleichung alle 2 Stunden geplant. Die ausgeglichenen Koordinaten werden automatisiert an das übergeordnete Datenmanagementsystem übertragen, in welchem die Messwerte sämtlicher Sensoren des Monitoringsystems gespeichert sowie mit festgelegten Warn- und Grenzwerten abgeglichen werden.

## Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Bahn, insbesondere Johanna Zink, Peter Werner Lange, Frank Rolle, Wolfgang Esser und Tinashe Shoniwa für die partnerschaftliche Zusammenarbeit in der Planungs- und Realisierungsphase. Weiters möchten sich die Autoren bei sämtlichen Projektpartnern, namentlich Werner Lienhart (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz), Christian Sodeikat und Robin Groschup (Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH), Sonja Gepperth und Angelika Schmid

(Werner Sobek AG) sowie Manfred Keuser (BUNG-PEB Tunnelbau-Ingenieure GmbH) für deren Input und die gute Kooperation bedanken.

## Literatur

- BAUER, P. & LIENHART, W. (2022): 3D concept creation of permanent geodetic monitoring installations and the a priori assessment of systematic effects using Virtual Reality. In: Journal of Applied Geodesy, 17 (1), S. 1-13. <https://doi.org/10.1515/jag-2022-0020>
- BAUER, P. & LIENHART, W. (2022): Augmentation approaches for geodetic permanent monitoring systems in dynamic urban environments. In: Survey Review, 56 (398), S. 500-508. <https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2293555>
- LACKNER, S. & LIENHART, W. (2016): Impact of prism type and prism orientation on the accuracy of automated total station measurements. 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring – JISDM, Wien, Österreich.
- LÖSLER, M., HAAS, R. & ESCHELBACH, C. (2013): Automated and continual determination of radio telescope reference points with sub-mm accuracy: results from a campaign at the Onsala space observatory. In: Journal of Geodesy, 87, <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0647-y>
- SACKS, R., EASTMAN, C., TEICHOLZ, P. & LISTON, K. (2011): BIM Handbook, A guide to building information modelling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. , S. 15-17. 2. Auflage. Wiley, Hoboken, New Jersey. ISBN-9781119287537
- SCHMID, A., GEPPERTEH, S. & REINKE, H.-G. (2022): Die S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – ein unterirdisches Verkehrsbauwerk mit ganz besonderen Anforderungen. In: Bautechnik, 99, S. 524-532. <https://doi.org/10.1002/bate.202100112>
- WERNER SOBEK AG (2025): S21 – S-Bahnbrücke. <https://www.wernersobek.com/de/projekte/s21-s-bahnbruecke/> (abgerufen am 14.01.2026)