

Dynamische Brückenüberwachung mit dem Profilmodus des RIEGL VZ-600i – erste Erfahrungen aus einem Feldversuch in Chile

Daniel Czerwonka-Schröder¹ (ORCID 0009-0008-0314-5674), Florian Pöppl² (ORCID 0000-0001-9397-4370)
& Sebastian Fingerhuth³ (ORCID 0000-0001-5852-2547)

¹ Fachbereich Geodäsie, Hochschule Bochum,
daniel.czerwonka-schroeder@hs-bochum.de (Korrespondierender Autor)

² RIEGL Laser Measurement Systems GmbH

³ School of Electrical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-024](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-024), 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.

1 Einleitung

Die Überwachung von Ingenieurbauwerken ist zu einem wesentlichen Bestandteil moderner Instandhaltungs- und Risikomanagementstrategien geworden. Alternde Bauwerke, steigende Verkehrsbelastungen und begrenzte Ressourcen erfordern Ansätze, die über periodische Sichtprüfungen hinausgehen und das tatsächliche Tragwerksverhalten unter Betriebsbedingungen bewerten. In diesem Kontext wird Structural Health Monitoring (SHM) als Entscheidungsunterstützung verstanden (NOVÁK ET AL., 2024; WEDEL ET AL., 2025).

Beim Monitoring sind unterschiedliche zeitliche Skalen zu berücksichtigen. Quasistatische Beobachtungen konzentrieren sich auf langsam verlaufende Effekte (z. B. temperaturinduzierte Deformationen). Demgegenüber adressiert das dynamische Monitoring strukturelle Reaktionen, die beispielsweise durch den Verkehr hervorgerufen werden. Dynamische Veränderungen liefern wertvolle Informationen über Steifigkeiten, Lastabtragungsmechanismen und das Gesamtverhalten des Systems; ihre Erfassung unter realen Betriebsbedingungen stellt jedoch erhöhte Anforderungen an die Sensorik (LIENHART ET AL., 2023; NOVÁK ET AL., 2024; WEDEL ET AL., 2025).

Traditionell wird das dynamische Brückenmonitoring durch kontaktbasierte Sensorsysteme dominiert. Infolgedessen sind flächendeckende Beobachtungen des dynamischen Verhaltens häufig nur eingeschränkt möglich (LIENHART ET AL., 2023; SCHILL & EICHORN, 2019; SCHILL ET AL., 2022). Getrieben durch Fortschritte in der Sensorik können geodätische Sensoren wie bspw. bildgestützte Totalstationen (ZSCHIESCHE ET AL., 2022), terrestrische Laserscanner (WUJANZ ET AL., 2018) oder radarbasierte Instrumente (BAUMANN-OUYANG ET AL., 2022) Bauwerke überwachen ohne direkten physischen Kontakt.

Die verschiedenen geodätischen Sensortechniken weisen komplementäre Eigenschaften hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der Sensitivitätsrichtung auf. Punktbasierte Sensoren wie GNSS oder Totalstationen ermöglichen dreidimensionale Verschiebungsmessungen an ausgewählten Punkten, während bildbasierte Systeme räumlich verteilte Beobachtungen erlauben. Das terrestrische Laserscanning (TLS) ermöglicht berührungslose Messungen ohne die Notwendigkeit einer physischen Installation am Bauwerk.

Zusätzlich kann durch die Beschränkung der Datenerfassung auf eine einzelne Scanlinie TLS mit erhöhter Messrate betrieben werden und ermöglicht die Beobachtung dynamischer Veränderungen an verschiedensten Objekten (SCHILL & EICHHORN, 2019). Studien zum dynamischen Brückenmonitoring zeigen das Potenzial laserbasierter Ansätze und belegen, dass kontaktlose Verfahren etablierte sensorbasierte Monitoringkonzepte ergänzen können (SCHILL ET AL., 2022; MEYER ET AL., 2022; KOSTJAK & NEUNER, 2023).

TLS-Systeme von RIEGL sind im Kontext des permanenten Laserscannings (PLS) in Monitoringanwendungen etabliert. Dabei werden Scanner kontinuierlich über längere Zeiträume betrieben, um quasistatische Veränderungsprozesse zu überwachen (LINDENBERGH ET AL., 2025). Aufbauend auf diesem Monitoringkonzept ermöglichen die aktuellen Weiterentwicklungen den Betrieb derselben Scannerplattform im Linienscanmodus, wodurch der Anwendungsbereich bspw. auf das dynamische Brückenmonitoring erweitert wird. Der vorliegende Beitrag präsentiert erste Felderfahrungen mit dem VZ-600i und fokussiert sich auf Aspekte der praktischen Umsetzung, der Datenerfassungsstrategien sowie des Betriebsverhaltens unter regulärem Eisenbahnbetrieb in Chile.

2 Untersuchungsgebiet und experimenteller Kontext

Das Experiment wurde am 11. September 2025 an der Eisenbahnbrücke "Puente Las Cucharas" in Chile durchgeführt. Die Brücke ist Teil des interurbanen Eisenbahnnetzes der staatlichen Eisenbahngesellschaft Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) und stellt eine zentrale Verbindung im Metrosystem zwischen Valparaíso und Limache dar. Eine Übersicht über die geografische Lage, den Streckenverlauf und die Position der Brücke ist in Abbildung 1 dargestellt.

Puente Las Cucharas ist eine Eisenbahnbrücke mit einer Länge von etwa 175 m. Die Bauarbeiten erfolgten zwischen 1908 und 1913 und umfassten die Montage einer vorgefertigten Stahlkonstruktion, die in Frankreich hergestellt und nach Chile transportiert wurde. Die heutige Brücke ersetzte frühere Bauwerke an derselben Stelle. Mit einer Betriebsdauer von über 110 Jahren ist sie weiterhin Bestandteil des Metrosystems und trägt sowohl den täglichen Metroverkehr als auch den gelegentlichen Güterverkehr, womit sie ein typisches Betriebslastszenario für Eisenbahnbrücken der Region darstellt (SEPÚLVEDA ORBENES, 2005).

Aus Sicht der EFE stellt Puente Las Cucharas ein kritisches Infrastrukturobjekt im regionalen Verkehrsnetz dar. Das fortbestehende Interesse an der Überwachung ergibt sich aus ihrer strategischen Bedeutung, ihrem fortgeschrittenen Alter und der Notwendigkeit, steigende betriebliche Anforderungen ohne Betriebsunterbrechungen zu bewältigen (EFE TRENES DE CHILE, 2024). Aufgrund der kontinuierlichen Nutzung, der guten Zugänglichkeit und der Eignung für kontaktlose Messverfahren unter realen Verkehrsbedingungen wurde die Brücke als Teststandort ausgewählt und bot geeignete Rahmenbedingungen zur Untersuchung laserbasierter Linienscanverfahren für das dynamische Brückenmonitoring im Regelbetrieb.

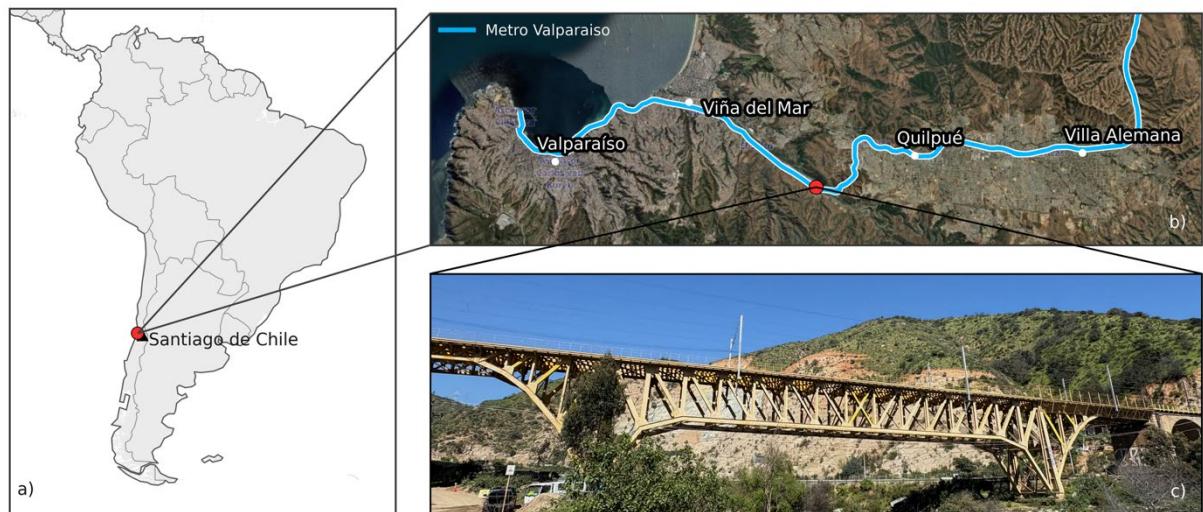


Abb. 1: Lage und Kontext der Eisenbahnbrücke “Puente Las Cucharas”. (a) Geografische Lage von Valparaíso in Chile, ca. 150 km westlich von Santiago de Chile (Basiskarte: Natural Earth). (b) Verlauf der Metro zwischen Valparaíso und Limache mit markierter Lage der Puente Las Cucharas (Bildmaterial: Esri World Imagery; Eisenbahn-Overlay: OpenRailwayMap-Kacheln und Eisenbahnvektoren aus OpenStreetMap über die Overpass API; © OpenStreetMap-Mitwirkende, Open Data Commons Open Database License (ODbL); OpenRailwayMap, CC-BY-SA 2.0). (c) Fotografie der Puente Las Cucharas, aufgenommen im September 2025 aus nordöstlicher Richtung.

3 Messsystem und Linienscanverfahren

3.1 RIEGL VZ-600i – Systemübersicht

Ein terrestrischer 3D-Laserscanner, der statisch auf einem Stativ betrieben wird, erfasst die Geometrie der Umgebung durch das Aussenden von Laserpulsen und die Messung der Laufzeit des rückgestreuten Signals. Auf Basis des Impulslaufzeitverfahrens werden in Kombination mit der bekannten Strahlrichtung präzise dreidimensionale Koordinaten berechnet.

Der Scanner variiert während der Messung den Horizontal- und den Vertikalwinkel und erzeugt so eine dreidimensionale Punktwolke, die die umgebende Szene geometrisch beschreibt. Diese Punktwolke bildet die Grundlage für weiterführende Auswertungen wie die Modellierung der Geometrie oder den Vergleich von Punktwolken aus unterschiedlichen Epochen. Soll jedoch statt einer flächenhaften 3D-Erfassung eine wiederholte Abtastung eines linearen Objekts erfolgen, kann ein 3D-Laserscanner als zweidimensionaler Linienscanner betrieben werden, indem der Scannerkopf hinsichtlich der Horizontalbewegung fixiert wird.

In dieser Arbeit kommt der Laserscanner RIEGL VZ-600i zum Einsatz (siehe Tabelle 1). Der VZ-600i ist ein leistungsfähiger Hochgeschwindigkeitslaserscanner. Er arbeitet mit einer Pulswiederholrate von 2,2 MHz und nutzt einen rotierenden Multifacettenspiegel mit vier Facetten, der bis zu 105 Umdrehungen pro Sekunde erreicht und so bis zu 420 Scanlinien pro Sekunde bei einem vertikalen Sichtfeld von 105° erzeugt.

Tabelle 1: Spezifikationen des Laserscanners RIEGL VZ-600i (RIEGL, 2025A)

Messrate	2.2 MHz Pulswiederholrate (PRR)
Scangeschwindigkeit	Min.: 4 Scanlinien pro Sekunde; Max.: 420 Scanlinien pro Sekunde
Scanmechanismus	Rotierender Vierfacetenspiegel
Präzision	3 mm
3D Genauigkeit	3 mm @ 50 m 5 mm @ 100 m
Scanbereich (Horizontal / Vertikal)	360° / 105° (-40° to +65°)
Reichweite (2,2 MHz PRR)	0.5 - 220 m (90% Reflexionsgrad) 0.5 - 100 m (20% Reflexionsgrad)
Gewicht	< 6 kg
GNSS-Empfänger	internal (L1), optional: RIEGL RTK-GNSS Empfänger
Laserklasse	1 (augensicher)
Geräteschutzklasse	IP64, staub- und spritzwassergeschützt

3.2 Funktionsprinzip des Linienscanmodus

Der Linienscanmodus entspricht einem Standardscan, bei dem die Rotation des Scanners um die Horizontale deaktiviert ist. In diesem Modus führt der Scanner einen zweidimensionalen Scan mit vorgegebener Pulswiederholrate und Liniengeschwindigkeit durch. Die Pulswiederholrate steht in direktem Zusammenhang mit der Punktmessrate; geringere Pulswiederholraten ermöglichen größere maximale Messreichweiten (RIEGL, 2025A).

Die Anzahl der Scanlinien pro Sekunde ist proportional zur Rotationsgeschwindigkeit des rotierenden Vierfacetenspiegels, wobei pro Facette und Umdrehung jeweils eine Scanlinie erzeugt wird. Aufgrund fertigungsbedingter Abweichungen sind die Facetten des Polygonspiegels nicht exakt orthogonal zueinander. Ihre tatsächliche Geometrie wird im Rahmen der Kalibrierung präzise bestimmt.

Die Anzahl der Scanlinien pro Sekunde (LPS) und die Pulswiederholrate (PRR) bestimmen gemeinsam den Winkelabstand zwischen benachbarten Punkten innerhalb einer Scanlinie, den sogenannten Theta-Inkrementwinkel ($\Delta\theta$). Für einen Scanmechanismus mit einem Vierfacetenspiegel ergibt sich dieser zu

$$\Delta\theta = \frac{\text{LPS} \cdot 360^\circ}{4} \cdot \frac{2}{\text{PRR}} \quad (1)$$

Bei einer maximalen PRR von 2200 kHz und 420 LPS ergibt sich ein Inkrement von 34 mdeg.

3.3 Datenstruktur von 3D-Punktwolken und Linienscandaten

Eine erste Nachverarbeitung der Messdaten erfolgt in der Software RiSCAN PRO. Dabei werden die Rohdaten des Scanners in Punktwolken überführt, einschließlich der Georeferenzierung und des Multistationsausgleichs (d. h. die Koregistrierung mehrerer Scanpositionen zueinander bzw. die Registrierung gegenüber externen Festpunkten). Die erzeugten Punktwolken können in gängigen Formaten (z. B. LAS/LAZ, e57) exportiert oder im nativen RIEGL-Datenbankformat (RDB) über die RDBLib-Bibliothek weiterverarbeitet werden (RIEGL, 2025B).

Die RDBLib ist eine frei verfügbare Programmbibliothek zum Lesen und Schreiben verschiedener Datentypen (u. a. Punktwolken, Trajektorien, Voxel). Sie ermöglicht einen direkten Zugriff auf die gespeicherten Daten aus unterschiedlichen Programmiersprachen (z. B. Python) heraus und erleichtert damit die Integration in weiterführende Auswerte- und Analyseworkflows.

Eine RDB-Datei kann neben Primärattributen, in der Regel den XYZ-Koordinaten, beliebige Sekundärattribute speichern. Für Punktwolken stellt das RDB-Format einen effizienten räumlichen Index für schnelle räumliche Abfragen sowie für die Visualisierung großer Datensätze bereit. Während bei klassischen RDB-Punktwolken Zeitstempel typischerweise als Sekundärattribute abgelegt werden, sind sie bei Linienscandaten das Primärattribut. Entsprechend werden Linienscandaten standardmäßig mit einem zeitlichen statt mit einem räumlichen Index gespeichert, wobei eine Umwandlung zwischen räumlicher und zeitlicher Indexierung möglich ist.

4 Experimenteller Aufbau und Messkonzept

4.1 Feldinstallation und lokaler Referenzrahmen

Der TLS wurde auf der östlichen Seite der Puente Las Cucharas aufgebaut und betrieben, da auf der westlichen Seite die Lage der Autobahn eine freie Sicht auf das Bauwerk verhindert. Die östliche Seite bot eine ungehinderte Sicht auf die relevanten Tragwerkskomponenten sowie ausreichend Platz für einen stabilen Aufbau.

Die Beobachtungsgeometrie wurde vor Ort überprüft, um sicherzustellen, dass die Scanlinie einen definierten Bauwerksquerschnitt erfasst und während der Messungen stabil bleibt. Zur Gewährleistung eines konsistenten Referenzrahmens wurde ein Projektkoordinatensystem (Project Coordinate System, PRCS) auf Basis von sechs Scanpositionen eingerichtet. Die ersten fünf Positionen wurden in nahezu horizontaler Positionierung auf einem Stativ durchgeführt und dienten der Definition des lokalen Referenzrahmens. In diese Definition werden scannerinterne GNSS-Messungen einbezogen. Die Abstände zwischen den Positionen betragen jeweils weniger als 10 m. Die Messdaten liegen zunächst jeweils im Scanner's Own Coordinate System (SOCS) vor; die Transformation in das PRCS erfolgt über die Scanner Orientation and Position (SOP)-Matrix, die die Lage und Orientierung des Scanners im Projektkoordinatensystem beschreibt. Das PRCS ist als lokale Tangentialebene zum Erdellipsoid definiert, mit den Achsen in Ost- (X), Nord- (Y) und Vertikalrichtung (Z, antiparallel zur Schwerkraftbeschleunigung), sodass eine nivellierte XY-Ebene entsteht.

Die sechste Scanposition wurde für den Linienscanbetrieb genutzt und mit einem um 45° geneigten Adapter betrieben. Zur Bestimmung der SOP-Matrix der geneigten Aufstellung

wurde zunächst ein vollständiger 360°-Scan durchgeführt und automatisch im PRCS registriert. Der Standpunkt der letzten Scannerposition wurde iterativ verfeinert, bis er zentral unter einem ausgewählten Brückenträger platziert war. Die Ausrichtung der Scanlinie wurde über die grafische Benutzeroberfläche des Scanners festgelegt. Der finale Aufbau und der Linienscan sind in Abbildung 2 dargestellt.

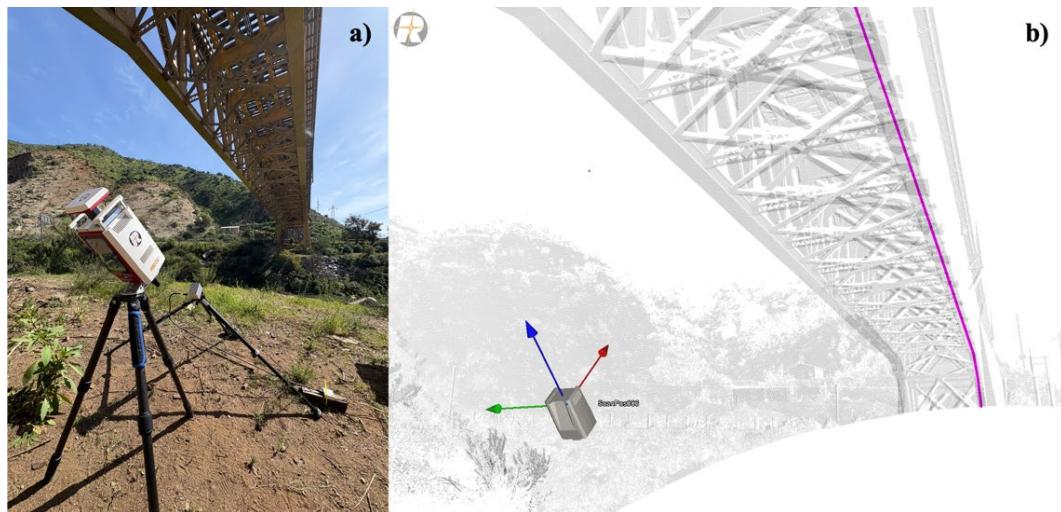


Abb. 1: Feldinstallation an der Puente Las Cucharas. (a) Finale Scanposition mit dem terrestrischen Laserscanner in der 45°-Konfiguration. (b) Screenshot aus RiSCAN PRO mit dem registrierten 360°-Übersichtsscan (dunkel dargestellt) und dem zugehörigen Linienscan (magenta), ausgerichtet entlang eines Brückenträgers auf der Nordseite der Brücke.

4.2 Datenerfassung

Die Datenerfassung konzentrierte sich auf Linienscanmessungen während des regulären Zugbetriebs. Der Linienscanmodus wurde direkt am Scanner gestartet. Die Messungen erfolgten zwischen 15:15:19 und 15:43:16 Ortszeit (UTC – 3 h). In diesem Zeitraum wurden fünf RDBX-Datensätze mit Aufzeichnungsdauern zwischen etwa 40 s und 15 min erfasst. Die resultierenden Dateigrößen variierten je nach Aufzeichnungsdauer zwischen ca. 350 MB und 7,6 GB. Der Scanner wurde mit einer Pulswiederholrate von 2200 kHz und einem festen Winkelinkrement $\Delta\theta = 10$ mdeg betrieben. Gemäß Gleichung (1) ergab sich auf Grundlage dieser Parameter eine effektive Linienrate von etwa 124 LPS. Die Zeitstempelung der Daten basierte auf dem internen GPS-Empfänger des Scanners, sodass alle Messungen über eine gemeinsame absolute Zeitreferenz verfügten. Die Linienscandaten enthalten Zugpassagen in beiden Fahrtrichtungen.

Die Datenerfassung erfolgte manuell ohne externe Trigger. Zur Unterstützung der Identifikation und der zeitlichen Zuordnung von Zugdurchfahrten wurde parallel ein kostengünstiges Kamerasystem eingesetzt. Die Kamera zeichnete Bildsequenzen aus leicht versetzter Position mit GPS-basierten Zeitstempeln auf und wurde für diese Messkampagne entsprechend dem Ansatz von BLANCH ET AL. (2024) angepasst. Die Kameradaten dienen ausschließlich der zeitlichen Referenzierung der Durchfahrten.

Ziel der Datenerfassung war es, Datensätze mit klar identifizierbaren Zugpassagen zu gewinnen, um die praktische Funktionsfähigkeit und Stabilität des Linienscanansatzes unter realen Betriebsbedingungen zu bewerten.

4.3 Datenverarbeitung und Auswertungskonzept

Der hier eingesetzte Workflow ist eine angepasste Auswerteroutine, die speziell für die Analyse hochfrequenter Linienscandaten entwickelt wurde. Es handelt sich nicht um eine standardisierte Verarbeitungskette innerhalb der RIEGL-Softwareumgebung, sondern um einen anwendungsspezifischen Ansatz, der auf dem direkten Zugriff auf Rohdaten und Metadaten basiert.

Die Linienscandaten wurden direkt aus dem RDBX-Format ausgelesen. Jeder Messpunkt wurde zunächst unter Verwendung der zugehörigen SOP-Matrix vom SOCS in das PRCS transformiert, wodurch ein konsistenter räumlicher Bezug und eine eindeutig definierte Vertikalrichtung sichergestellt wurden.

Zur strikten Anpassung der Analyse an die Geometrie des überwachten Bauteils wurde für den betrachteten Träger ein lokales Koordinatensystem (Locally Levelled Coordinate System, LLCS) eingeführt. Der Ursprung des LLCS wurde am östlichen Ende des Trägers an dessen Anschluss an das Betonfundament definiert. Die z-Achse des LLCS entspricht der z-Achse des PRCS und beschreibt die Vertikalrichtung. Die x-Achse verläuft entlang der Längsachse des Trägers in Richtung seines westlichen Endes, während die y-Achse das rechtshändige Koordinatensystem transversal zur Brückenachse vervollständigt.

Die Transformation vom PRCS in das LLCS wurde durch eine Local Orientation and Positioning (LOP)-Matrix beschrieben. Die auf die Messpunkte angewendete Gesamttransformation ergibt sich somit zu

$$X_{LLCS} = \underbrace{T_{PRCS \rightarrow LLCS}}_{=LOP^{-1}} \cdot \underbrace{T_{SOCS \rightarrow PRCS}}_{=SOP} \cdot X_{SOCS} \quad (2)$$

Die Scanlinie ist die kleinste zeitliche Einheit der Messung, da sie jeweils einer Facette des rotierenden Vierfacettenspiegels entspricht. Vier aufeinanderfolgende Scanlinien wurden zu einem Frame zusammengefasst, entsprechend einer vollständigen Spiegelumdrehung. Der Zeitstempel eines Frames wurde durch die erste Scanlinie des jeweiligen Zyklus definiert, wodurch sich eine effektive Abtastrate von etwa 31 Hz (mittlere Framedauer: 0,032204 s) ergibt.

Für jedes Frame wurden die zum überwachten Träger gehörenden Punkte anhand ihrer Lage im LLCS selektiert. Entlang der Längsrichtung (LLCS-x-Achse) wurde eine feste räumliche Binbreite von 0,10 m verwendet. Diese vereinfachte Diskretisierung wurde für das betrachtete Bauteil als ausreichend erachtet und vermeidet für diesen ersten Versuch zusätzliche Komplexität durch geometrieabhängige Segmentierungen.

Für jedes räumliche Bin und jedes Frame wurde der mittlere Vertikalwert (LLCS-z-Achse) berechnet, wodurch zeitaufgelöste vertikale Profile des Trägers resultieren. Das Referenzprofil wurde als zeitliches Mittel aller framebasierten Profile definiert, und relative Deformationen wurden als Abweichungen davon ausgedrückt.

Zur Analyse des zeitlichen Verhaltens wurden an ausgewählten Referenzpositionen entlang des Trägers Verschiebungszeitreihen extrahiert. Diese weisen in der Regel nichtlineare Trends auf, die mittels B-Spline-Regression nach HARMENING UND NEUNER (2016) approximiert wurden. Die Anzahl der Stützstellen wurde durch Minimierung des Bayesian Information Criteria (BIC) bestimmt.

Als Abschätzung der erreichbaren Messpräzision wurde für jede Referenzposition die Median Absolute Deviation (MAD) der trendbereinigten ΔZ -Zeitreihen berechnet. Nach Subtraktion des splinebasierten Trends $\hat{s}(t)$ ergeben sich die Residuen zu

$$r(t_i) = \Delta Z(t_i) - \hat{s}(t_i) \quad (3)$$

Die MAD wurde zeitlich gemäß

$$\text{MAD} = \text{median}(|r_i - \text{median}(r)|) \quad (4)$$

bestimmt und unter Annahme einer Normalverteilung in eine äquivalente Standardabweichung überführt:

$$\sigma_{\text{MAD}} = \frac{\text{MAD}}{0.6745} \quad (5)$$

Dies liefert eine robuste Abschätzung der erreichbaren Messpräzision.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden exemplarisch für eine Zugdurchfahrt dargestellt. Das ausgewählte Ereignis entspricht einem west–ostwärts fahrenden Zug in Richtung Limache. Der Zug befür die Brücke zwischen 18:38:09 UTC (15:38:09 Ortszeit, LT) und 18:38:23 UTC (15:38:23 LT).

Abbildung 3(a) zeigt das Linienscanprofil entlang des ausgewählten Trägers. Für die Auswertung wurde ausschließlich der zum Gleisverlauf parallel verlaufende Abschnitt des Trägers berücksichtigt, entsprechend den LLCS-x-Koordinaten zwischen 11 m und 64 m. Die Scannerposition ist im selben Koordinatensystem mit $x = 2,409$ m, $y = 0,036$ m und $z = -1,574$ m dargestellt. Das erfasste Messprofil entspricht dem vertikalen Sichtfeld des Scanners von 105° , das durch die verwendete 45° -Konfiguration vollständig ausgenutzt wird. Dadurch wird eine kontinuierliche Erfassung des Trägers entlang des gesamten überwachten Abschnitts bei gleichbleibender Beobachtungsgeometrie ermöglicht.

Abbildung 3(b) zeigt die gemessenen Punkte entlang einer Scanlinie zu einem Zeitpunkt (18:38:02 UTC). Bereits hier sind Unterschiede in der Messpräzision erkennbar. Mit zunehmender Entfernung vom Scanner sowie bei größer werdenden Einfallswinkeln nimmt die Streuung sichtbar zu. Die für die nachfolgende Zeitreihenanalyse verwendete Referenzposition bei $x = 23$ m ist im selben Diagramm markiert.

Der zeitliche Verlauf der vertikalen Verschiebung an der Referenzposition ist in Abbildung 3(c) dargestellt. Die Zeitreihe umfasst den Zeitraum von 18:38:01 bis 18:38:53 UTC und schließt den Zustand vor der Zugankunft, die Belastungsphase während der Durchfahrt sowie die anschließende Entlastung ein. Die Originalbeobachtungen (blau) sind gemeinsam mit einer B-Spline-Approximation dargestellt, die den zugrunde liegenden Trend beschreibt. Das Spline-Modell wurde datengetrieben bestimmt und weist 12 Knoten auf. Während der Zugdurchfahrt zeigt sich eine deutliche Abwärtsbewegung des Bauwerks mit einer maximalen vertikalen

Verschiebung von etwa 2,4 mm. Nach dem Verlassen der Brücke kehrt sich die Deformation um und nähert sich schrittweise dem Ausgangsniveau an. Eine kurze Phase gegenläufiger Bewegung ist über etwa 25 s erkennbar, bevor sich die Verschiebung erneut stabilisiert. Der Zeitpunkt der maximalen Deformation stimmt mit der vom Kamerasystem erfassten Zugposition überein (Abbildung 4).

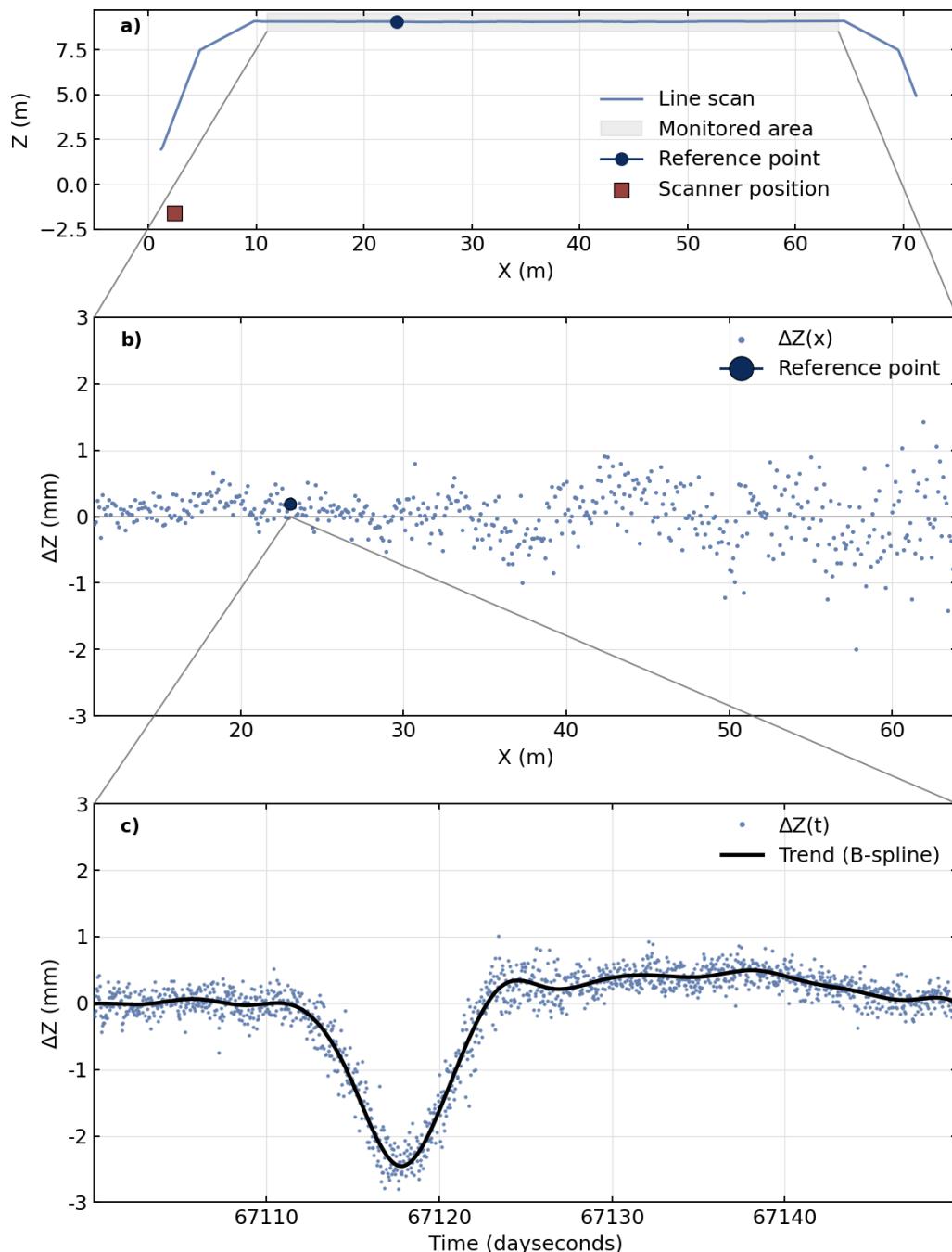


Abb. 2: Linienscan-Ergebnisse für eine repräsentative Zugdurchfahrt. (a) Längsprofil des überwachten Trägers im LLCS ($x = 11$ – 64 m) mit eingezeichneter Scannerposition. (b) Räumliches ΔZ -Profil zum Zeitpunkt 18:38:02 UTC einschließlich der Referenzposition. (c) ΔZ -Zeitreihe an der Referenzposition ($x = 23$ m) mit B-Spline-Trend.



Abb. 3: Kamerabild zur zeitlichen Verifikation der Zugdurchfahrt an der Brücke Puente Las Cucharas um 18:38:16 UTC.

Zur Abschätzung der erreichbaren Messpräzision wurde die Streuung der trendbereinigten Zeitreihen mithilfe der MAD (Gleichung 4) ausgewertet. Abbildung 5 zeigt die daraus abgeleiteten σ_{MAD} in Abhängigkeit von der Referenzposition entlang des Profils. Für Referenzpositionen bis etwa 26 m liegen die σ_{MAD} unter 0,2 mm. Mit zunehmender Entfernung vom Scanner nimmt die Streuung deutlich zu und erreicht bei 40 m etwa 0,4 mm sowie bei 50 m rund 0,6 mm.

Der beobachtete Anstieg folgt einem exponentiellen Verlauf in Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Dieses Verhalten stimmt mit den bekannten Eigenschaften terrestrischer Laserscandaten überein und spiegelt den Einfluss der Aufnahmegeometrie auf die Messpräzision wider (z. B. SOUDARISSANANE ET AL., 2009).

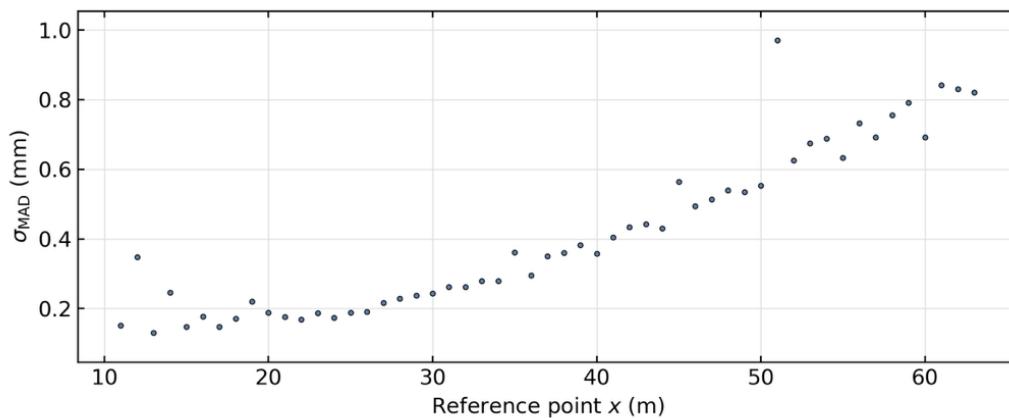


Abb. 4: σ_{MAD} -Werte der trendbereinigten ΔZ -Zeitreihen in Abhängigkeit von der Referenzposition entlang des Brückenträgers.

5 Zusammenfassung und Fazit

Diese Studie stellt erste Felderfahrungen mit dem RIEGL VZ-600i im Linienscanbetrieb für das dynamische Brückenmonitoring dar. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Konfiguration die kontaktlose Beobachtung vertikaler Deformationen ermöglicht. Der Beitrag fokussiert sich zunächst auf die praktische Umsetzung.

In Übereinstimmung mit früheren Arbeiten von SCHILL ET AL. (2022) bestätigt die Analyse, dass die Messunsicherheit einzelner Laserpunkte für eine zuverlässige Bewertung dynamischer Deformationen nicht ausreicht. Aussagekräftige Ergebnisse erfordern eine räumliche Aggregation benachbarter Punkte entlang des überwachten Profils. Die angewandte framebasierte Verarbeitung und die räumliche Binning-Strategie haben sich als geeignet erwiesen, um reproduzierbare Deformationssignale aus den Daten zu extrahieren.

Eine während des Feldeinsatzes identifizierte Einschränkung betrifft die Messgeometrie. Trotz des Einsatzes einer 45°-Konfiguration begrenzt das effektive vertikale Sichtfeld des Scanners die Optimierung der Einfallswinkel. Dies kann die geometrische Flexibilität einschränken.

Aus Anwendungssicht bietet das Linienscanning zahlreiche vielversprechende Einsatzmöglichkeiten. Eine potenzielle Anwendung liegt in der Voruntersuchung von Brücken vor der Installation dauerhaft montierter Sensoren, um mit mobilem Messequipment einen schnellen Einblick in das dynamische Verhalten zu erhalten. Darüber hinaus kann das Linienscanning in längerfristige Monitoringkonzepte integriert werden, bei denen permanentes Laserscanning zur quasistatischen Beobachtung von Brücken und angrenzendem Gelände eingesetzt wird und durch temporäre Hochfrequenzmessungen ergänzt wird.

Insgesamt zeigt das Feldexperiment, dass hochfrequentes Linienscanning mit vergleichsweise geringem Aufwand vor Ort umsetzbar ist. Im Kontext des Structural Health Monitoring, stellt das linienbasierte TLS einen wertvollen ergänzenden Ansatz zur Unterstützung fundierter Instandhaltungs- und Risikomanagemententscheidungen dar.

Literatur

- BAUMANN-OUYANG, A., BUTT, J., & WIESER, A. (2022). Bridge deformations during train passage: monitoring multiple profiles using concurrently operating MIMO-SAR sensors. In 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022) (pp. 11-19). Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/jisdm2022.2022.13620>
- BLANCH, X., GUINAU, M., ELTNER, A., & ABELLÁN, A. (2024). A cost-effective image-based system for 3D geomorphic monitoring: An application to rockfalls. *Geomorphology*, 449, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109065>
- EFE TRENES DE CHILE. (2024). Sensores e inteligencia artificial al servicio del monitoreo y mantenimiento del Puente Las Cucharas. <https://www.efe.cl/sensores-e-inteligencia-artificial-al-servicio-del-monitoreo-y-mantenimiento-del-puente-las-cucharas/>
- HARMENING, C. & NEUNER, H. (2016). Choosing the Optimal Number of B-spline Control Points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves). *Journal of Applied Geodesy*, 10(3), 139-157. <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0003>
- KOSTJAK, V., & NEUNER, H. B. (2023). Investigation of Systematic Influences on the Distance Measurement and Sensitivity of a Profile Laser Scanner. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 4, 99-108.

- LIENHART, W., SCHILL, F., & MOSER, T. (2023). Dynamic Bridge Monitoring with Remote Sensing Techniques. In *Structural Health Monitoring 2023: Designing SHM for Sustainability, Maintainability and Reliability* (pp. 184-191). DEStech Publications, Inc. <https://doi.org/10.12783/shm2023/36736>
- LINDENBERGH, R., ANDERS, K., CAMPOS, M., Czerwonka-Schröder, D., Höfle, B., Kuschnerus, M., Puttonen, E., Prinz, R., Rutzinger, M., Voordendag, A., & Vos, S. (2025). Permanent terrestrial laser scanning for near-continuous environmental observations: Systems, methods, challenges and applications. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 17, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2025.100094>
- MEYER, N.; SCHMID, L.; WIESER, A.; MEDIC, T. (2022). Vibration monitoring of a bridge using 2D profile laser scanning: Lessons learned from the comparison of two spatio-temporal processing strategies. En 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022). Editorial Universitat Politècnica de València. 177-184. <https://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13813>
- NOVÁK, B., STEIN, F., FAROUK, A., THOMAS, L., REINHARD, J., ZELLER, T., & KOSTER, G. (2024). Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021. Bundesanstalt für Straßenwesen. <https://doi.org/10.60850/bericht-b197>
- RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH (2025A). Datasheet RIEGL VZ-600i. https://www.riegl.com/fileadmin/media/Products/01_Terrestrial_Scanning/RIEGL_VZ-600i/RIEGL_VZ-600i_Datasheet_2025-10-03.pdf
- RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH (2025B). rdlib (RIEGL database library) [Software library]. <https://www.riegl.com/en-austria/products/detail/rdplib>
- SCHILL, F., & EICHHORN, A. (2019). Deformation monitoring of railway bridges with a profile laser scanner. *ZFV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 144, 109–118. <https://doi.org/10.12902/zfv-0248-2018>
- SCHILL, F., MICHEL, C., & FIRUS, A. (2022). Contactless Deformation Monitoring of Bridges with Spatio-Temporal Resolution: Profile Scanning and Microwave Interferometry. *Sensors*, 22(23), 9562. <https://doi.org/10.3390/s22239562>
- SEPÚLVEDA ORBENES, R. (2005). Análisis estructural Puente Las Cucharas (Master's thesis). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- SOUDARISSANANE, SS., LINDENBERGH, RC., MENENTI, M., & TEUNISSEN, PJG. (2009). Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. In F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, & MG. Vosselman (Eds.), *Proceedings ISPRS workshop laserscanning 2009* (pp. 183-188). ISPRS.
- WEDEL, F., PITTERS, S., HILLE, F., HERRMANN, R., & SCHNEIDER, R. (2025). Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke. Bundesanstalt für Straßenwesen. <https://doi.org/10.60850/bericht-b210>
- WUJANZ, D., BURGER, M., NEITZEL, F., LICHTENBERGER, R., SCHILL, F., EICHHORN, A., STENZ, U., NEUMANN, I. AND PAFFENHOLZ, J. (2018). Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung. In *Mauerwerk Kalender 2018*, W. Jäger (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9783433608050.ch10>
- ZSCHIESCHE, K., FITZKE, M. & SCHLÜTER, M. (2022). Self-Calibration and Crosshair Tracking with Modular Digital Imaging Total Station. *PFG 90*, 543–557. <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00220-0>