



Überwachung von Infrastrukturbauwerken mit mobilem Laserscanning

Monitoring transport infrastructure with mobile laser scanning

Slaven Kalenjuk, Graz

Kurzfassung

Geodätisches Monitoring spielt in der Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken eine entscheidende Rolle. Wird ein Bauwerk infolge einer handnahen Prüfung als kritisch bewertet, wird in der Regel das Verformungsverhalten des Bauwerks überwacht. Stationäre Messungen mit Totalstationen sind der Stand der Technik, erweisen sich aber als zu zeit- und kostenintensiv für eine großflächige Anwendung. In diesem Artikel wird aufgezeigt, welchen Beitrag mobiles Laserscanning für die objektive Zustandsbewertung von Stützbauwerken liefern kann. Heute sind fahrzeuggebundene, mobile Laserscanning Systeme von verschiedenen Herstellern kommerziell erhältlich. Diese High-End Messsysteme ermöglichen es, Punktwolken im Vorbeifahren mit bis zu 100 km/h zu erfassen. Die produzierten Datenmengen sind enorm und erfordern daher weitest gehende Automatisierung in der Auswertung, um die Effizienz des gesamten Workflows zu gewährleisten. In mehrjähriger Forschungsarbeit wurden insgesamt acht Kampagnen mit vier verschiedenen Messsystemen zur Vermessung von 24 Stützbauwerken durchgeführt. Die Genauigkeit der Methode erwies sich als sehr stark abhängig von der Qualität der direkten Georeferenzierung. Im alpinen Raum wurden Schwankungen von 10 cm innerhalb von 200 m festgestellt. Durch Anwendung einer neuen Registrierungsmethode konnten Punktwolken auf besser als 1 cm in Deckung gebracht werden. Restfehler im Millimeterbereich sind auf die Aufnahmebedingungen und die Objektbeschaffenheit zurückzuführen. Die Methode aus rascher Datenaufnahme und intelligenter Auswertung zeigt vielversprechendes Potenzial für großflächiges Deformationsmonitoring. Sie eignet sich nicht als Ersatz für Totalstationsmessungen, sondern viel mehr zum Aufspüren von potenziell, geschädigten Bauwerken. Diese effiziente „Vorprüfung“ bietet das Potenzial neue Geschäftsfelder für die geodätische Community zu erschließen.

Schlüsselwörter: Mobiles Laserscanning, Deformationsmonitoring, Infrastrukturbauwerke, Big Data, Qualitätskontrolle

Abstract

Geodetic monitoring is a special measure in infrastructure maintenance. In general, inspection engineers assess the structural condition visually and decide whether total stations measurements are necessary to observe the structural behavior. The established method proved accurate and reliable but too cost- and time expensive for a large-scale application. This article analyses the potential of mobile laser scanning for providing an objective data basis for safety and condition assessment of retaining walls. Mobile laser scanning is an emerging technology that enables rapid data collection with up to 100 km/h. Today, there are a number of commercial systems available from different manufacturers. Such systems gather data efficiently and produce large amounts of data. Hence, highly automated processing steps are essential to achieve overall efficiency of the method. In multiple years of research, 24 retaining walls were captured using four different systems in eight measurement campaigns. The quality of the point clouds depends heavily on the geo-referencing quality. In alpine settings, variations reach up to 10 cm within 200 m, producing ‚deformed‘ point clouds. A new registration method accounts for these time-variable errors and aligns two point clouds better than 1 cm under good conditions. The remaining error pattern depends on the acquisition geometry and on surface properties. While the method shows great potential for large-scale monitoring, it does not aim to replace geodetic monitoring with total stations. Its strength lies in identifying potentially damaged structures from the large pool of objects. This efficient pre-assessment method shows potential for opening a new business field for geodesists.

Keywords: mobile laser scanning, deformation monitoring, transport infrastructure, big data, quality control

1. Einleitung

Das österreichische Verkehrsnetz umfasst eine Vielzahl an Infrastrukturbauwerken wie Brücken, Tunnel und Stützbauwerke. Die Erhaltung dieser Bauwerke ist in rechtlich bindenden Regelwerken (wie z.B. RVS – Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) im Detail definiert. Im Wesentlichen sehen diese regelmäßige Inspektionen und Prüfungen durch Bauingenieure vor [1,2]. Wird die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Tragfähigkeit der Bauwerke angezweifelt, folgen in der Regel geodätische Überwachungsmessungen als Sonderprüfmaßnahme. Der Verbruch einer Stützmauer im Jahr 2012 hat allerdings die bewährten Methoden in Frage gestellt. Der tragische Vorfall bei der Mautstation Schönberg kostete ein Menschenleben und sorgte für Verunsicherung bei den öffentlichen Bauwerkserhaltern über den genauen Zustand der zigtausenden Stützbauwerke. Es folgten intensive Bauwerksprüfungen sowie -sanierungen und es wurde nach innovati-

ven Lösungen zur effizienten Zustandserfassung und -bewertung gesucht. Im Jahr 2016 entstand am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der TU Graz die Idee, Stützbauwerke mittels mobilem Laserscanning im Vorbeifahren aufzunehmen, um daraus Geometrieänderungen abzuleiten. Dieser Beitrag fasst die wesentlichsten Erkenntnisse aus mehrjähriger Forschungsarbeit zusammen.

2. Mobiles Laserscanning

Im Gegensatz zum statistischen Laserscanning wird beim mobilen Laserscanning die Geometrie umliegender Objekte durch Fortbewegung abgetastet [3]. Zu den Anfängen meiner Forschungsarbeiten war die Anzahl an kommerziell erhältlichen, mobilen Laserscanning Systemen (kurz MLS) und auch der Dienstleister in Europa stark begrenzt. Das Interesse an der Technologie hat allerdings dazu geführt, dass inzwischen unzählige Komplettsysteme wie auch Einzelkomponenten von



Abb. 1: Fotos der verwendeten MLS: Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead (links oben), Siteco Road Scanner 4 (rechts oben), Trimble MX9 (links unten) und Riegler VMX-2HA (rechts unten)

verschiedenen Herstellern angeboten werden. Die Bandbreite reicht von Systemen, die in der Hand oder in einem Rucksack mitgeführt werden bis hin zu MLS, die auf Autos, Drohnen oder auch Roboterhunden installiert werden. Für die Bauwerksüberwachung kommen allerdings nur straßen- bzw. schienenfahrzeuggebundene MLS in Frage.

Mobile Laserscanning Systeme bestehen aus einer Vielzahl an Sensoren. Durch Datenfusion wird einerseits die Fahrzeugposition und -lage bestimmt und gleichzeitig die Umgebung abgetastet [3]. Die Qualität der Einzelkomponenten, d.h. von GNSS und inertialer Messeinheit, des Radsensors und des/der Laserscanner bestimmt letztendlich den Preis des Systems. Für hochwertige Systeme mit zwei Laserscannern inklusive Wartung und Software belaufen sich die Preise derzeit noch auf mittlere bis höhere sechsstelligen Eurobeträge. Die Strategie war es daher mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie zusammenzuarbeiten, um mehrere hochqualitative Systeme einsetzen und miteinander vergleichen zu können.

Im Zuge der Forschungsprojekte kamen die High-End Produkte von Leica Geosystems, Trimble, Riegler und Siteco Informatica zur Anwendung (siehe Abbildung 1). Es ist bemerkenswert, dass diese konkurrierenden Hersteller in ihren Gesamtsystemen zum Teil dieselben Einzelkomponenten verbauen. So sind zwei Z+F 9012 Profils Scanner sowohl im Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead als auch im Siteco Roadscanner 4 zu finden [4,5]. Trimble MX9 und Riegler VMX-2HA sind jeweils mit zwei Riegler VUX-1HA Profils Scanner bestückt [6,7].

Am Papier sind sich die Systeme ähnlich, in der Praxis ergaben sich aber deutliche Unterschiede in den generierten Punktwolken. Dies ist auf

unterschiedliche Firmenphilosophien und auf die Handhabung durch die Dienstleister zurückzuführen. Besonders hervorzuheben sind folgende Aspekte:

■ Kalibrierung:

Die Lage und Orientierung von Laserscannern zur inertialen Messeinheit muss genau bekannt sein, um qualitative Ergebnisse erzielen zu können. Manche Hersteller setzen darauf, dass jährliche Werkskalibrierungen genügen, um die Genauigkeitsansprüche zu erfüllen. Feldkalibrierungen wie bei klassischen Vermessungsgeräten gibt es wiederum bei anderen Herstellern, wobei Informationen zur Qualität der Kalibrierung zum Teil gänzlich fehlen.

■ Systemkonfiguration:

Die Ausrichtung, die Profil- und Abtaststraten der Scanner sind zum Teil einstellbar, variieren aber jedenfalls zwischen den Systemen. Diese Parameter beeinflussen die Abtastung und letztlich auch die Qualität der Punktwolken (siehe Kapitel Datenqualität).

3. Datenverarbeitung

Fahrzeuggebundene MLS ermöglichen die effiziente Kartierung der Straßen- und Schieneninfrastruktur. Mit der Flut an Daten kommt der Auswertesoftware eine immens hohe Bedeutung zu. Neue Firmen und Softwarelösungen sind entstanden, die die effiziente Verarbeitung der mobilen Laserscandaten versprechen. Typische Aufgabenstellungen umfassen die Extraktion von z.B. Gehsteigkanten, Schienen, Oberleitungen, sowie der Analyse des Lichtraums oder der Fahrbahn [8,9]. Für Spezialanwendungen wie z.B. dem Bauwerksmonitoring existieren keine geeigneten

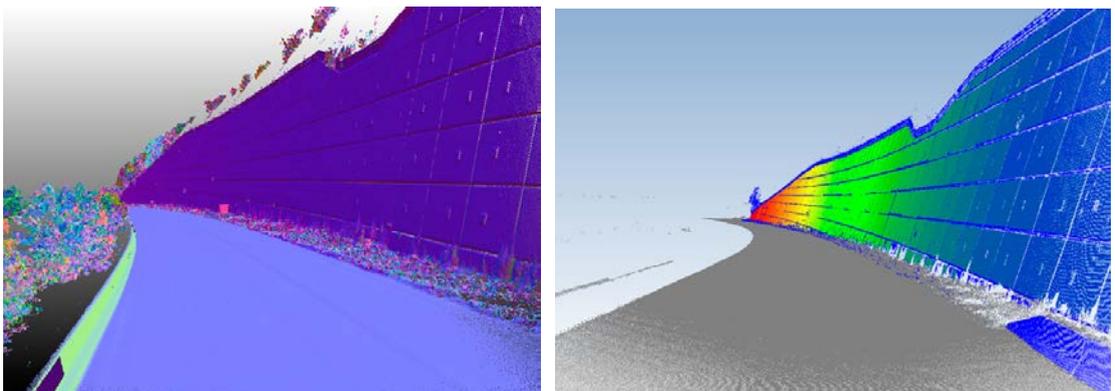


Abb. 2: Darstellung der Punktnormalen durch Transformation in den HSV-Farbraum (links) für die semantische Interpretation von Straße (grau), Stützmauer und geankerten Betonelementen (von blau bis rot; rechts)

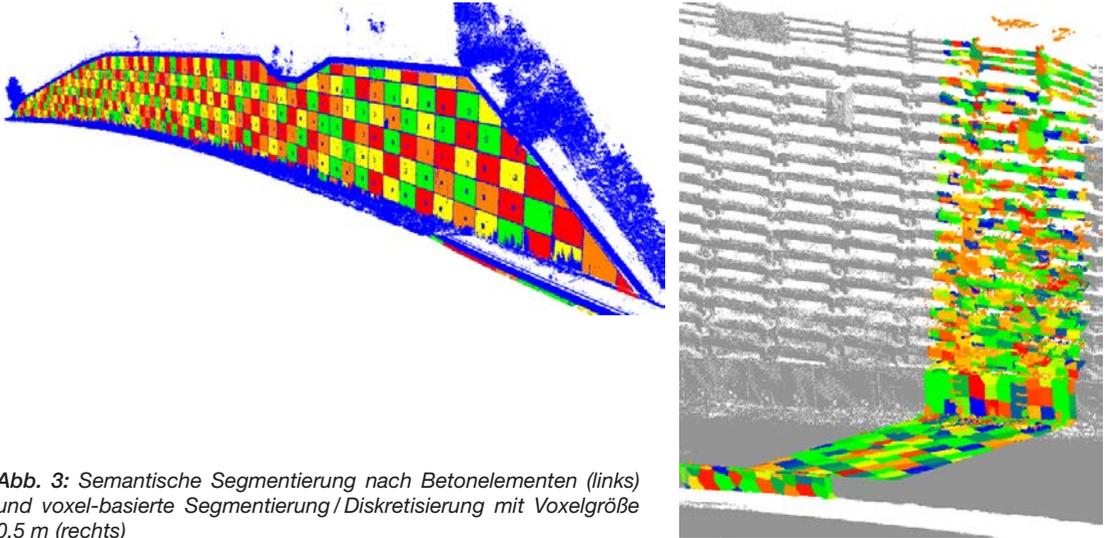


Abb. 3: Semantische Segmentierung nach Betonelementen (links) und voxel-basierte Segmentierung/Diskretisierung mit Voxelgröße 0,5 m (rechts)

Softwareprodukte am Markt. Daher war es auch Ziel der Forschungsarbeiten eine Programminfrastruktur aufzubauen, mithilfe derer die Auswertung vieler Stützbauwerke automatisiert und konsistent erfolgt. Folgende Aufgaben werden mit dieser bewerkstelligt:

- Semantische Interpretation
- Modellierung von Bauwerksdeformationen
- Qualitätsanalyse und -verbesserung

Für geschulte Geodäten stellt die Interpretation der Punktwolken keine Herausforderung dar. Anders sieht es für den Computer aus, denn Stützbauwerke in großen Datensätzen rein aus XYZ Koordinaten wiederzufinden, ist nicht trivial. Es existieren eine Fülle an Publikationen, die sich mit der semantischen Interpretation von Punktwolken beschäftigen [10,11]. Der in meinen Arbeiten verwendete Ansatz setzt darauf die lokale Nachbarschaft jedes einzelnen Scanpunktes mathematisch zu beschreiben. Objekte wie z.B. Straße, Vegetation, Autos und Stützbauwerke weisen unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Ausrichtung, Rauigkeit, Punktdichte, usw. auf. Derartige Eigenschaften können durch Merkmalsextraktion und statische Ansätze zur Segmentierung ausgenutzt werden (siehe Abbildung 2). Für weitere Informationen zu den eingesetzten Algorithmen sei an dieser Stelle auf [12] verwiesen.

Die nächste Herausforderung besteht nun darin Verformungen aus den mobilen Laserscanning Punktwolken abzuleiten. Nachdem die Abtastung nie exakt gleich sein wird, liegen a-priori keine

Punktkorrespondenzen vor. Es bedarf also Strategien um Verformungen des Bauwerks aus zwei Punktwolken zu modellieren [13].

Die Wahl der Strategie ist abhängig von der Form des Bauwerks. In Standardsoftware implementierte Punkt-zu-Punkt Vergleiche sind flexibel und praktisch auf alle Objekte anwendbar [14]. Im Fall von Ankerwänden liegen zum Teil klare geometrische Formen vor. In diesem Fall wird die Segmentierung und anschließende Schätzung von z.B. Ebenenparametern vorteilhaft sein, um eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit für das Deformationsmonitoring zu erreichen. Die Segmentierung geankerter Betonelemente erfolgt nach den gleichen mathematischen Ansätzen wie die Identifikation der Stützmauer selbst.

Für Steinschichtungen und Raumgitterwände sind punktwolkenbasierte Methoden [13] besser geeignet. Der entwickelte Ansatz teilt die Punktwolke zunächst mithilfe einer Voxel-Segmentierung in Punktgruppen (Abbildung 3 rechts) ein. Für jede Punktgruppe werden Punktcorrespondenzen über nahegelegene Punkte hergestellt um anschließend durch Verschieben und Verdrehen beide Epochen zur bestmöglichen Deckung zu bringen. Ein prominenter Vertreter dieser Gruppe ist der Iterative-Closest-Point (ICP) Algorithmus [15]. Dieser Ansatz wird dahingehend adaptiert, dass nicht die euklidische Distanz, sondern der Normalabstand minimiert wird. Der Vorteil liegt in der Robustheit der Methode gegenüber fehlerhaften Punktcorrespondenzen [16].

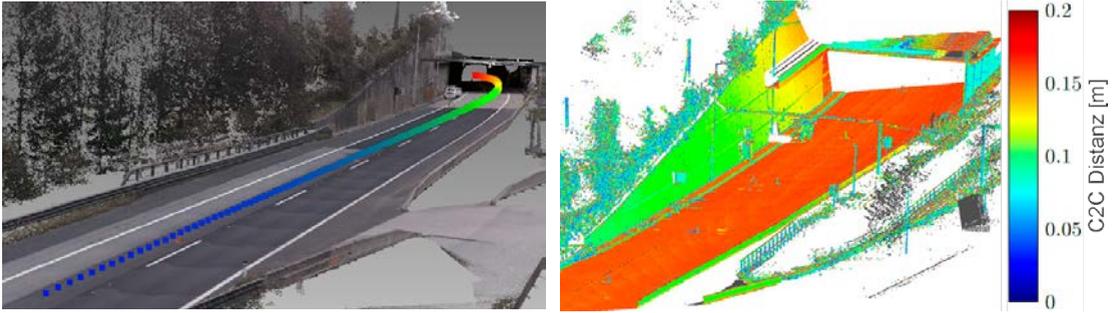


Abb. 4: Separierung der Trajektorienlösungen als Indiz für die Qualität der Georeferenzierung (links) und Cloud-to-Cloud (C2C) Abweichungen von zwei Punktwolken, aufgenommen in zwei Fahrten mit zeitlichem Versatz von ca. 15 Minuten (rechts)

4. Qualität

Die Effizienz von mobilem Laserscanning ist unter Verwendung geeigneter Algorithmen unumstritten. Nachdem sich dieser Beitrag der Anwendung von MLS für Deformationsüberwachungen widmet, darf eine Betrachtung der geometrischen Qualität nicht fehlen. Die Fehlerquellen sind zahlreich und die Unsicherheit der tatsächlich erfassten Punktwolken ist im Vorhinein nur grob abschätzbar [17]. Die derzeitige Empfehlung lautet daher die Messunsicherheiten empirisch zu ermitteln [17].

Die Qualität der Positionierung ist ein entscheidender Faktor für die Gesamtgüte von mobilen Laserscanning Punktwolken. Im Falle direkter Georeferenzierung, d.h. also ohne Verwendung von Passpunkten, sind Lage und Orientierung im alpinen Bereich durch Satellitenabschattungen stark beeinträchtigt. Am Beispiel eines Tunnelpor-

tals wurde festgestellt, dass die Trajektorienlösungen von Vorwärts- und Rückwärtsberechnung um bis zu 12 cm klaffen (Separierung in Abbildung 4 links dargestellt). Trotz einer gewichteten Kombination sind Restfehler enthalten, die empirisch durch Mehrfachmessungen festzustellen sind. Zwei aufeinanderfolgende Messfahrten weisen beim Portal 18 cm Abweichung in der Höhe und über 10 cm in der Lage auf (Abbildung 4 rechts).

Abbildung 5 links zeigt Punkt-zu-Punkt Abweichungen zweier mobiler Laserscanning Punktwolken, die innerhalb weniger Minuten aus zwei Fahrtrichtungen aus aufgenommen wurden. Es fällt bei der farbkodierten Darstellung auf, dass inhomogene Abweichungen auf Straße und Stützbauwerk auftreten. Versuche diese „deformierte“ Punktwolke über Passpunkte oder ICP zu registrieren sind also zum Scheitern verurteilt.

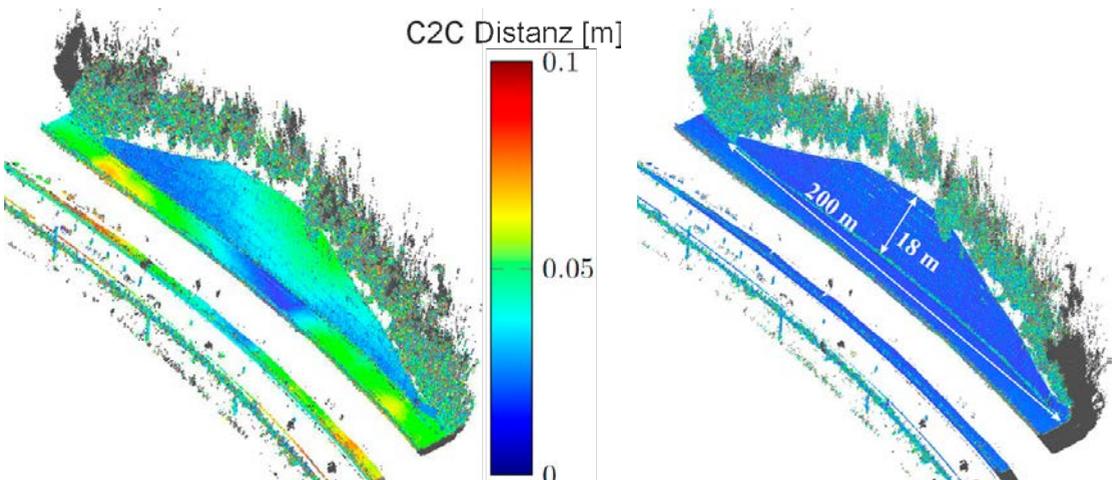


Abb. 5: Punkt-zu-Punkt Abweichungen zweier Punktwolken aus zwei kurz nacheinander durchgeführten Fahrten bei einem 20 m hohen Bauwerk: vor der Registrierung (links) und nach der Registrierung mit Berücksichtigung zeitlich variierender Fehler (rechts)

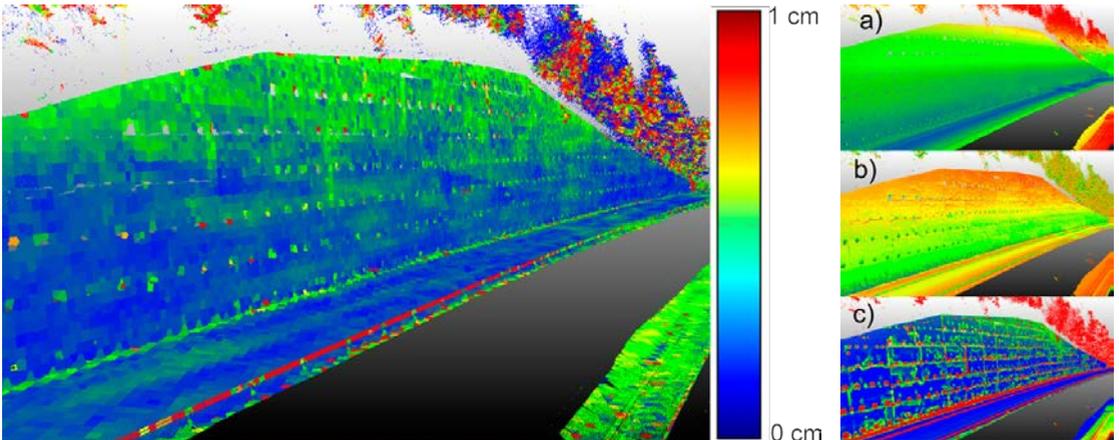


Abb. 6: Standardabweichung der Deformationsbestimmung normal zur Oberfläche (links), Objektdistanz (a), Auftreffwinkel (b) und Oberflächenrauigkeit (c) (rechts)

Aus diesem Grund wurde eine neue Methode entwickelt, die zeitabhängige Fehler in der Registrierung zweier mobiler Laserscans berücksichtigt [16]. Die Punktwolken werden zeitlich untergliedert und abschnittsweise mithilfe der im vorigen Kapitel vorgestellten Methode registriert. Die Qualitätssteigerung ist beachtlich, wie in Abbildung 5 rechts zu sehen ist. Während die Abweichungen ursprünglich bis zu 10 cm ausmachten, liegt die mittlere Abweichung nach der Registrierung unter 1 cm.

Im Zuge der vielen Versuchsreihen stellte sich heraus, dass selbst die Punktwolken von Scanner links und rechts zeitliche Variationen aufweisen. Unter ungünstigen Bedingungen und einer nicht symmetrischen Scannerkonfiguration weichen die beiden Punktwolken bis zu 2,5 cm voneinander ab. Aber auch hier konnte die adaptierte Registrierungsmethode angewendet werden, um diese Fehler zu minimieren [16].

5. Strenge Deformationsanalyse

Das Ergebnis dieser Prozessierungsschritte sind Punktwolken, die relativ zueinander besser als 1 cm übereinstimmen (Abbildung 5 rechts) und frei von groben und systematischen Fehlern sind. Diese Erkenntnis lud dazu ein, aus einer Stichprobe von vier Punktwolken (das sind vier Messfahrten) die Streuung zu berechnen. Dazu wurde die punktwolken-basierten Vergleichsmethode (siehe Kapitel Datenverarbeitung) in allen $\binom{4}{2} = 6$ Kombinationen gerechnet und aus den Abweichungen in Normalenrichtung die Standardabweichung bestimmt (Abbildung 6 links). Im oberen Bereich der Mauer liegt die Streuung bei ca.

3 mm – 5 mm. Wie in verschiedenen Publikationen aus Laborversuchen festgestellt wurde, besteht ein Zusammenhang zwischen der empirischen Standardabweichung, der Objektdistanz (a), des Auftreffwinkels (b) und der Oberflächenrauigkeit (c) (Abbildung 6 rechts). Zur Berechnung dieser Größen sind die Trajektoriendaten erforderlich [16].

Mithilfe der empirischen Standardabweichung ist es nun möglich, im Sinne der strengen Deformationsanalyse [18], zwischen signifikanten Deformationen und Messrauschen zu unterscheiden. Die berechneten Translationsparameter von 5,4 mm im oberen Bereich des Bauwerks können mit 95 % Konfidenz als nicht signifikant ausgewiesen werden (siehe Abbildung 7 oben). Die Gegenüberstellung in 19 Punkten (schwarze Punkte in Abbildung 7 links oben) mit geodätischen Messungen zeigen eine Übereinstimmung von besser als 5 mm (siehe Abbildung 7 unten).

6. Zusammenfassung

Geodätisches Monitoring gilt als Sonderprüfmaßnahme in der Erhaltung von Infrastrukturbauwerken. Vermessungen finden statt, wenn der Zustand des Bauwerks im Zuge einer handnahen Prüfung durch einen Bauingenieur als kritisch eingestuft wird. In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, inwieweit mobiles Laserscanning einen Beitrag zur kosteneffizienten Zustandsbewertung von Stützbauwerken leisten kann.

Die initialen Anschaffungskosten für kommerzielle, fahrzeuggebundene, Laserscanning Systeme sind derzeit noch sehr hoch. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurde deshalb mit Industriepartnern zusammengearbeitet und Systeme von

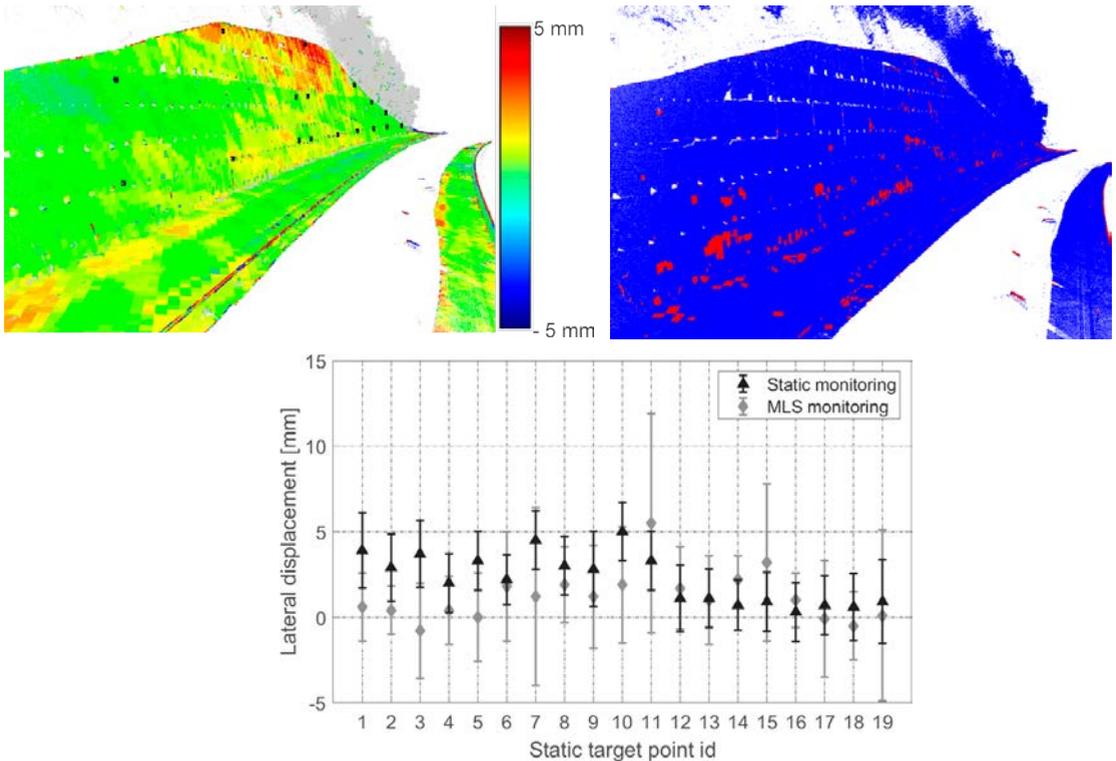


Abb. 7: Strenge Deformationsanalyse mit mobilem Laserscanning am Beispiel eines Stützbauwerks: Abweichungen in Normalenrichtung (links oben), binäre Maske mit signifikanten (rot) und nicht signifikanten (blau) Deformationen sowie eine Gegenüberstellung zwischen geodätischen Messungen und den Ergebnissen aus mobilem Laserscanning (unten)

vier verschiedenen Herstellern eingesetzt. Nach 8 Messkampagnen kann festgestellt werden, dass die Systeme noch nicht voll ausgereift sind und Knowhow bei der Nutzung lange aufgebaut werden muss.

In Bezug auf Deformationsmonitoring stellt die Georeferenzierung die größte Herausforderung dar. An zwei Beispielen wurde gezeigt, dass die Fehler auf über 20 cm anwachsen können und zudem auch noch zeitlich variabel sind. Bei dem Punktwolkenvergleich einer 200 m langen und 20 m hohen Stützmauer, die innerhalb weniger Minuten zweimal gescannt wurde, ergab sich ein inhomogenes „Verformungsbild“ mit Abweichungen von bis zu 10 cm. Das bedeutet, dass eine Transformation mittels Passpunkten oder Standard Punktwolken Registrierungsmethoden nicht funktioniert. In den Forschungsarbeiten wurden daher Algorithmen zur Verarbeitung von mobilen

Laserscanning-Daten entwickelt. Diese ermöglichen eine rasche Datenverarbeitung sowie die Registrierung von Punktwolken mit Berücksichtigung der zeitlich variablen Fehler.

Damit liegt ein Arbeitsfluss für die strenge Deformationsanalyse mit mobilem Laserscanning vor. Die Genauigkeit der Methode ist stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. In den Untersuchungen konnte für glatte, vegetationsbefreite Infrastrukturbauwerke Verformungen im Millimeterbereich mit 95 % Konfidenz detektiert werden.

Diese Methode strebt nicht danach tachymetrische Überwachungsmessungen zu ersetzen, sondern potenziell geschädigte Bauwerke aus der Vielzahl an Objekten aufzuspüren. Diese effiziente, automatische „Vorprüfung“ kann als Datengrundlage für die eigentliche Bauwerksprüfung verstanden werden.

Referenzen

- [1] FSV (2013): Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Geankerte Stützbauwerke, RVS, 13.03.21, Wien.
- [2] FSV (2014): Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten, Nicht geankerte Stützbauwerke, RVS, 13.03.61, Wien.
- [3] Kuhlmann H., Klingbeil L. (2017): Mobile Multisensorsysteme. In: Schwarz W. (Hrsg.): Ingenieurgeodäsie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_20. ISBN 978-3-662-47187-6. S. 93–129
- [4] Leica Geosystems (2022): Leica Pegasus:Two Ultimate, Mobile reality capture, Datenblatt verfügbar unter: https://leica-geosystems.com/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus_two-ultimate. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [5] Siteco Informatica (2022): Road-Scanner - The 4th generation high-performance Mobile Mapping System. Datenblatt verfügbar unter: <https://www.sitecoinf.it/en/solutions/road-scanner>. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [6] Trimble (2022): Trimble MX9 – Mobile Mapping Solution. Datenblatt verfügbar unter: <https://www.sitecoinf.it/en/solutions/road-scanner>. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [7] Riegl Laser Measurement Systems (2022): Riegl VMX-2HA. Datenblatt verfügbar unter: <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product-scanner/56/>. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [8] Certainty 3d (2022): TopoDOT – Point Cloud Processing Software. <https://new.certainty3d.com/>. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [9] Bentley Systems (2022): Orbit GT 3DM Content Manager - Complete software suite to manage, extract and share 3D data. <https://orbitgt.com/domains/mobile-mapping/>. Letzter Zugriff: 19.09.2022.
- [10] Weinmann M., Jutzi B., Mallet C. (2013): Feature relevance assessment for the semantic segmentation of 3D point cloud data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-5/W2, S. 313-318.
- [11] Hackel T., Savinov N., Ladicky L., Wegner J.D., Schindler K., Pollefeys M. (2017): SEMANTIC3D.NET: A new large-scale point cloud classification benchmark. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-1-W1, S. 91-98.
- [12] Kalenjuk S., Lienhart W., Rebhan M. (2021). Processing of mobile laser scanning data for largescale deformation monitoring of anchored retaining structures along highways. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 36(6), 678-694. <https://doi.org/10.1111/mice.12656>
- [13] Wunderlich T., Niemeier W., Wujanz D., Holst C., Neitzel F., Kuhlmann H. (2016): Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – The Challenge. Allgemeine Vermessungsnachrichten 123, 11-12, S. 340 – 351.
- [14] Holst C., Schmitz B., Schraven A., Kuhlmann H. (2017): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? zfv 142, 2/2017, S. 98-110.
- [15] Besl P. J., McKay N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures, International Society for Optics and Photonics, S. 586-607.
- [16] Kalenjuk S., Lienhart W. (2022). A Method for Efficient Quality Control and Enhancement of Mobile Laser Scanning Data. Remote Sensing, 14(4), [857]. <https://doi.org/10.3390/rs14040857>
- [17] Kuhlmann H. (2020): Uncertainty modelling for kinematic multi-sensor systems. Beitrag zur Fachtagung der Deutschen Geodätischen Kommission (Abteilung Ingenieurgeodäsie) & der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel vom 21.-23. September 2020 in Bad Lauterbach, Deutschland zum Thema Unsicherheitsmodellierung beim Einsatz komplexer Messsysteme.
- [18] Pelzer H. (1971): Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 164, München, 86 S.

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Slaven Kalenjuk, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, Steyrergasse 30, 8010 Graz.
E-Mail: slaven.kalenjuk@tugraz.at
E-Mail: slaven.kalenjuk@gmail.com