

Geomechanics and Geomechanik und Tunnelbau **Tunnelling**



**The permanent three-dimensional data acquisition
 of geotechnical structures by means of a web-based application
 of terrestrial LiDAR sensors /**

**Die permanente dreidimensionale Datenerfassung
 geotechnischer Strukturen mittels webbasierter Anwendung
 terrestrischer LiDAR-Sensorik**

Daniel Czerwonka-Schröder, Thomas Gaisecker

The permanent three-dimensional data acquisition of geotechnical structures by means of a web-based application of terrestrial LiDAR sensors

Die permanente dreidimensionale Datenerfassung geotechnischer Strukturen mittels webbasierter Anwendung terrestrischer LiDAR-Sensorik

As part of the i2MON research project, an integrated monitoring service was developed for the identification and evaluation of soil and slope movements in the context of coal mining. The focus was on the correct integration (to give reliability, accuracy and integrity) of a long-range laser scanner into a web-based monitoring system from an engineering geodetic point of view. A web-based application of terrestrial laser scanners has been developed by cooperation between DMT GmbH & Co. KG and RIEGL Laser Measurement Systems GmbH.

The system allows a high temporal and spatial resolution for measured value acquisition by means of permanent installation in the vicinity of a monitored object. This article shows how the laser scanner can be remotely controlled within a web-based monitoring platform. In addition, the integration of various sensors (including total station, GNSS, geotechnical sensors) within a project into a uniform monitoring platform based on a web interface and the corresponding data analysis (including the automatic detection of geomorphological processes) will be described.

Keywords LIDAR; multitemporal 3D point cloud analysis; permanent laser scanning; monitoring

1 Introduction

Landslides, slope failures and rock falls are among the most serious natural hazards for mankind. They occur in all parts of the world and cause billions of dollars of damage to property, infrastructure and the environment [1]. The analysis of mass movements is therefore a key subject in the prevention of natural hazards, the protection of infrastructures and the population [2]. Such events are triggered by natural processes such as precipitation or temperature fluctuations. Climate change creates new framework conditions that pose an increasing risk of such events in terms of scale and frequency [3].

Against this background, as well as the expansion of areas of urban settlement, e.g., in the Alpine region, the need for high-quality three- or four-dimensional data sets on the Earth's surface is increasing, and this must be integrated into a holistic risk management system. Different stakeholders – be it at the municipal level or, for example, the operating company of a motorway or a railway line – are interested in qualified data in order to maintain every-

Im Rahmen des Forschungsprojekts i2MON wurde ein integrierter Monitoring-Dienst zur Identifikation und Bewertung von Boden- und Hangbewegungen im Zusammenhang mit dem Steinkohlenabbau entwickelt. Der Fokus lag dabei auf der aus ingenieurgeodätischer Sicht korrekten Integration (Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Integrität) eines Long Range Laser-scanners in ein webbasiertes Monitoringsystem. In Zusammenarbeit zwischen der DMT GmbH & Co. KG und RIEGL Laser Measurement Systems GmbH ist eine webbasierte Anwendung terrestrischer Laser-Scanner entstanden. Das System erlaubt mittels permanenter Installation im nahen Umfeld eines Überwachungsobjekts eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung bei der Messwerterfassung. In diesem Beitrag wird dargestellt, wie der Laserscanner innerhalb einer webbasierten Monitoring-Plattform ferngesteuert werden kann. Darüber hinaus wird die Integration verschiedenster Sensorik (u. a. Totalstation, GNSS, geotechnische Sensorik) innerhalb eines Projekts in eine einheitliche, auf einem Web-Interface basierende Überwachungsplattform und die entsprechende Datenanalyse (u. a. die automatische Erkennung geomorphologischer Prozesse) gezeigt.

Stichworte LIDAR; multitemporale 3D-Punktwolkenanalyse; permanentes Laserscanning; Monitoring

1 Einleitung

Erdrutsche, Böschungsversagen und Felsstürze gehören zu den größten Naturgefahren für den Menschen. Sie treten in allen Teilen der Welt auf und verursachen Schäden in Milliardenhöhe, indem sie Eigentum, Infrastruktur und Umwelt beschädigen [1]. Die Analyse von Massenbewegungen ist daher ein zentrales Thema bei der Prävention von Naturgefahren, dem Schutz von Infrastrukturen und der Bevölkerung [2]. Derartige Ereignisse werden durch natürliche Prozesse wie Niederschlag oder Temperaturschwankungen ausgelöst. Durch den Klimawandel werden neue Rahmenbedingungen geschaffen, die ein zunehmendes Risiko solcher Ereignisse in Bezug auf Ausmaß und Häufigkeit darstellen [3]. Vor diesem Hintergrund sowie der Ausdehnung von urbanen Lebensräumen, z. B. im Alpenraum, steigt der Bedarf an qualitativ hochwertigen drei- bzw. vierdimensionalen Datensätzen der Erdoberfläche, die es in ein ganzheitliches Risikomanagement zu integrieren gilt.

day operations or to be able to take effective measures in the prevention of hazards at their properties.

Qualified data as a basis for risk management can only be collected in the course of a problem-specific monitoring concept [1]. The primary goal is the derivation of three-dimensional motion vectors, which can be used in the monitoring process as a basis for linking with further (mostly interdisciplinary) observation data. It must be remembered that the object is discretised both spatially and temporally in accordance with the expected displacements. Up to now, the quality of a monitoring concept depends directly on the prior information regarding an object's behaviour, i.e., there is (apparently) exact knowledge of which areas are to be monitored.

However, this can be detrimental if changes in time and space remain unobserved. On this point, a paradigm shift has taken place in the last few years according to [4]. This is characterised by a transition from point, epochal measurements to area-based, continuous procedures as well as the development of time-intensive offline evaluations to complex online systems [1]. This has greatly improved the opportunities for geodesists in the collection of data. Terrestrial laser scanning (TLS) has established itself as a measurement technique over the last two decades. Due to the continuous further development of TLS and the associated increase in the performance of such systems, it is possible to measure objects continuously and autonomously, in high-resolution time and space. Permanent laser scanning systems (PLS) are very suitable for integration into near-real-time assistance or early warning systems in the sense of adaptive monitoring as a further sensor.

2 Concept of web-based LiDAR monitoring

2.1 Theoretical basics

The number of applications of permanent laser scanners for the observation of natural surface processes has steadily increased in recent years [5]. For a targeted design, it is essential to understand the entire monitoring system itself and the decision-making processes. This is the only way to prepare a system for the corresponding monitoring task. If PLS were to be used as part of an early warning system, false alarms and misinterpretations due to low levels of detection (LOD) or systematic deviations must be avoided.

Monitoring by means of PLS can be divided into four process steps that are subject to different influencing factors.

- The data acquisition must take into account atmospheric influences on the individual point clouds at the respective measurement time [6]. In addition, multi-temporal point clouds must be present in a common reference frame [5].

Unterschiedliche Stakeholder – sei es auf kommunaler Ebene oder beispielsweise die Betreibergesellschaft einer Autobahn oder einer Bahnstrecke – haben ein hohes Interesse an qualifizierten Daten, um alltägliche Abläufe im Betrieb aufrecht zu erhalten oder bei der Prävention von Gefahren an ihren Objekten effizient Maßnahmen ergreifen zu können.

Qualifizierte Daten als Grundlage für ein Risikomanagement lassen sich nur im Zuge eines problemspezifischen Monitoringkonzepts erfassen [1]. Primäres Ziel ist die Ableitung von dreidimensionalen Bewegungsvektoren, die im Monitoringprozess als Grundlage für die Verknüpfung mit weiteren (zumeist interdisziplinären) Beobachtungsdaten genutzt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Objekt entsprechend den zu erwartenden Verschiebungen räumlich als auch zeitlich diskretisiert wird. Bisher ist die Qualität eines Monitoringkonzepts direkt abhängig von den Vorinformationen hinsichtlich eines Objektverhalts, d.h. es gibt eine (scheinbar) genaue Kenntnis darüber, welche Bereiche zu überwachen sind. Dies kann jedoch zum Nachteil werden, wenn zeitlich und räumlich Veränderungen unbeobachtet bleiben. An dieser Stelle hat in den letzten Jahren nach [4] ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Dieser zeichnet sich durch einen Übergang von punktuellen, epochalen Messungen hin zu flächenhaften, kontinuierlichen Verfahren sowie der Entwicklung von zeitintensiven offline-Auswertungen hin zu komplexen online-Systemen aus [1]. Dadurch haben sich die Möglichkeiten für Geodäten in der Erfassung der Daten erheblich verbessert. Exemplarisch dafür hat sich das terrestrische Laser-scanning (TLS) in den letzten zwei Jahrzehnten als Messtechnik etabliert. Durch die stetige Weiterentwicklung von TLS und die damit einhergehende Steigerung der Leistungsfähigkeit solcher Systeme besteht die Möglichkeit, Objekte permanent, autonom, zeitlich und räumlich hochauflösend messtechnisch zu erfassen. Permanente Laserscanningsysteme (PLS) sind im Sinne eines adaptiven Monitorings als weiterer Sensor für die Integration in echtzeitnahe Assistenz- oder Frühwarnsysteme prädestiniert.

2 Konzept des webbasierten LiDAR-Monitorings

2.1 Theoretische Grundlagen

Die Anzahl der Anwendungen von permanenten Laserscannern zur Beobachtung von natürlichen Oberflächenprozessen hat in den letzten Jahren stetig zugenommen [5]. Zur zielgerichteten Konzeption ist es unerlässlich, das gesamte Monitoringsystem an sich als auch die Entscheidungsprozesse zu verstehen. Nur so ist es möglich, ein System für die entsprechende Monitoringaufgabe vorzubereiten. Hinsichtlich der Anwendung von PLS im Rahmen eines Frühwarnsystems müssen Fehlalarme und Missinterpretationen aufgrund von zu niedrigem Level of Detection (LOD) oder systematische Abweichungen vermieden werden.

- A developed communication box provides reliable data management from the monitoring site to central servers [7].
- A targeted analysis of the available data is necessary. Various methods are presented and discussed in [8]. These methods are purely bi-temporal. [9] describes a method of using multitemporal data so that the value of time-continuous data can be leveraged.
- A user-friendly data display focused on key parameters such as displacement vectors or volume changes results from the targeted analysis and is described in this article.

2.2 Hardware

The data is recorded using a RIEGL laser scanner (model: VZ-2000i). With this scanner, objects can be measured without contact up to a range of 2,500 m. Laser distance measurement is performed by means of high-precision pulse time measurement. An eye-safe Class 1 laser measuring system enables automatic, continuous measurement without danger to people in the monitoring area. In addition, the scanner is classified according to IP64, which allows it to be used even in harsh environments.

A communication box (model: CB22) was added to the system for permanent autonomous use. It enables the management of the system and guarantees 24/7 operation. The box contains a router and a “Hardware watchdog”. This checks all connected hardware components for their functionality. A manual reboot of the entire system is also possible via a web interface.

2.3 Scanner related software

The scanner’s completely redesigned hardware includes an integrated computing unit, which enables data processing tasks to be carried out in near real time at the scanner. In an open Linux operating system, the scanner is adapted to special purposes using its own apps that run directly on the scanner. An essential component of the integration of a PLS is the monitoring app which is already available.

Raw data from each scan can reach a memory requirement of up to several hundred MB, which is detrimental for real-time data transfer. The app processes the point cloud and converts the data into a compressed 2D representation. All measurement points are displayed in a raster image (PNG format). The respective RGB values and the alpha value of a pixel contain the distance and surface orientation information of an object in encoded form. Due to this data format, the memory requirement per epoch is only about 10% of the raw data.

Using equation 1, a distance in metres from the scanner origin is calculated for each pixel from the RGB values. In order to calculate differences between the respective

Das Monitoring mittels PLS lässt sich in vier Prozessschritte separieren, die unterschiedlichen Einflussfaktoren unterliegen.

- Bei der Datenerfassung gilt es, atmosphärische Einflüsse auf die einzelnen Punktwolken zum jeweiligen Messzeitpunkt zu berücksichtigen [6]. Zusätzlich müssen multitemporale Punktwolken in einem gemeinsamen Referenzrahmen vorliegen [5].
- Mittels entwickelter Kommunikationsbox wird ein zuverlässiges Datenmanagement von der Monitoring Site hin zu zentralen Servern bereitgestellt [7].
- Eine zielgerichtete Analyse der vorliegenden Daten ist notwendig. Verschiedene Methoden sind in [8] diskutiert und dargestellt. Diese Methoden sind rein bitemporal. In [9] wird eine Methode zur Nutzung multitemporaler Daten beschrieben, sodass der Mehrwert zeitkontinuierlicher Daten nutzbar ist.
- Eine nutzerfreundliche und auf die wesentlichen Parameter wie Verschiebungsvektoren oder Volumenänderungen fokussierte Datenvisualisierung resultiert aus der zielgerichteten Analyse und wird in diesem Artikel präsentiert.

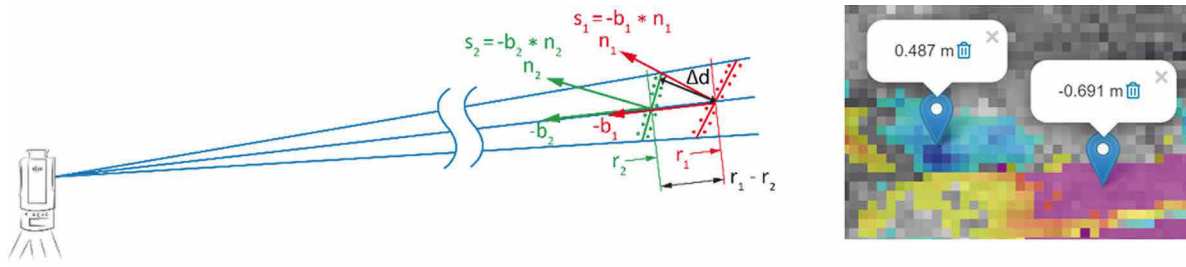
2.2 Hardware

Die Datenerfassung erfolgt mittels eines Laserscanners von RIEGL (Modell: VZ-2000i). Mit diesem Scanner können Objekte berührungslos bis zu einer Reichweite von 2500 m vermessen werden. Die Laserdistanzmessung erfolgt mittels hochpräziser Pulszeitmessung. Ein augensicheres nach Klasse 1 spezifiziertes Lasermesssystem ermöglicht eine automatische, kontinuierliche Messung ohne Gefahr für Menschen im Überwachungsbereich. Darüber hinaus ist der Scanner nach IP64 klassifiziert, was ein Einsatz auch in rauen Umgebungen ermöglicht.

Für den permanenten autonomen Einsatz wurde das System um eine Kommunikationsbox (Modell: CB22) erweitert. Sie ermöglicht das Management des Systems und garantiert einen 24/7-Betrieb. Die Box enthält einen Router und einen „Hardware-Watchdog“. Dieser überprüft alle angeschlossenen Hardwarekomponenten auf ihre Funktionstüchtigkeit. Ein manueller Neustart des gesamten Systems ist über ein Web-Interface ebenfalls möglich.

2.3 Scannerseitige Software

Die komplett neu konzipierte Hardware des Scanners inklusive einer integrierten Recheneinheit ermöglicht die Ausführung von Datenverarbeitungsaufgaben in nahezu Echtzeit bereits am Scanner. In einem offenen Linux-Betriebssystem wird der Scanner mittels eigener Apps, die direkt auf dem Scanner ausgeführt werden, an spezielle Zwecke angepasst. Wesentliche Komponente der Integration eines PLS ist die bereits verfügbare Monitoring-App.



graphical explanation of the formula

result of formula visualized in web viewer

Fig. 1 a) Comparison of the differences along the local normal vector on the surface corresponding to equations 1 and 2; b) Graphical representation of the changes per pixel, colour-coded according to magnitude. Selection of two pixels by mouse click with display of the related value.

Bild 1 a) Berechnung der Differenzen entlang des lokalen Normalenvektors auf der Oberfläche entsprechend der Gln. 1 und 2; b) grafische Darstellung der Veränderungen je Pixel, farblich kodiert nach der Magnitude. Auswahl zweier Pixel per Mausklick mit Darstellung des entsprechenden Werts

pixels of an epoch, the spatial position must be taken into account in addition to the distance difference (equation 2). The spatial position is taken into account by means of a scalar product, which is also stored per pixel as an alpha value. The scalar product describes the angle between the normal vector on the surface and the direct connection of the scanner to the pixel. The comparison of two scenes can be done “on-the-fly”, so that any scene can be compared in seconds. The connection is shown graphically in Figure 1.

$$Range_{pix(i,j),t0} = (Red + 256 * Green + 256^2 * Blue) * 0.001 \quad (1)$$

$$\Delta d = (range_{pix(i,j),t0} - range_{pix(i,j),t1}) * 0.5 * (scalar\ product_{pix(i,j),t0} + scalar\ product_{pix(i,j),t1}) \quad (2)$$

2.4 Web-based monitoring

In addition to the requirements for the sensor itself, prerequisites must be set for data integration, data storage and finally the display. This publication uses the web-based software product DMT SAFEGUARD. It offers the possibility of storing large amounts of data centrally and making it available to the user in a web-based manner.

This enables the user to operate the project platform worldwide. The software processes all types of sensor data, and enables the potential hazard area to be monitored permanently. The special feature of this solution is the hardware connection of a wide variety of sensors from different applications regardless of manufacturer.

With the help of LiDAR integration, the measurement data is automatically made available to the user via a password-protected web platform. The monitoring app is integrated directly into the platform and the customer does not need any additional software.

Rohdaten eines jeden Scans können einen Speicherbedarf von mehreren hundert MB erreichen, was für eine echtzeitnahe Datenübertragung nachteilig ist. Die App verarbeitet die Punktwolke und konvertiert die Daten in eine komprimierte 2D-Darstellung. Alle Messpunkte werden in einem Rasterbild (PNG-Format) dargestellt. Die jeweiligen RGB-Werte sowie der Alphawert eines Pixels enthalten kodiert die Entfernungs- und Oberflächenorientierungsinformationen eines Objekts. Aufgrund dieses Datenformats liegt der Speicherbedarf pro Epoche nur noch bei etwa 10% der Rohdaten.

Mittels Gl. 1 wird für jedes Pixel aus den RGB-Werten eine Strecke in Metern vom Ursprung des Scannerkoordinatensystems aus berechnet. Um Differenzen zwischen den jeweiligen Pixeln einer Epoche berechnen zu können, muss neben der Streckendifferenz die Raumlage berücksichtigt werden (Gl. 2). Die Raumlage wird mittels Skalarprodukt berücksichtigt, das als Alphawert ebenfalls pro Pixel gespeichert ist. Das Skalarprodukt beschreibt den Winkel zwischen dem Normalenvektor an der Oberfläche und der direkten Verbindung vom Scanner zum Pixel. Der Vergleich zweier Szenen kann „on-the-fly“ erfolgen, sodass beliebige Szenen in Sekundenschnelle vergleichbar sind. Der Zusammenhang ist grafisch in Bild 1 dargestellt.

$$Strecke_{pix(i,j),t0} = (Rot + 256 * Grün + 256^2 * Blau) * 0,001 \quad (1)$$

$$\Delta d = (Strecke_{pix(i,j),t0} - Strecke_{pix(i,j),t1}) * 0,5 * (Skalarprodukt_{pix(i,j),t0} + Skalarprodukt_{pix(i,j),t1}) \quad (2)$$

2.4 Webbasiertes Monitoring

Neben den Anforderungen an den Sensor selbst müssen Voraussetzungen an die Datenintegration, die Datenspeicherung und schließlich die Visualisierung erfüllt sein. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird das webbasierte Softwareprodukt DMT SAFEGUARD eingesetzt. Es bietet die Möglichkeit, große Datenmengen zentral zu speichern und dem Nutzer webbasiert zur Verfügung zu stellen. Dies ermöglicht dem Anwender, seine Projektplatt-

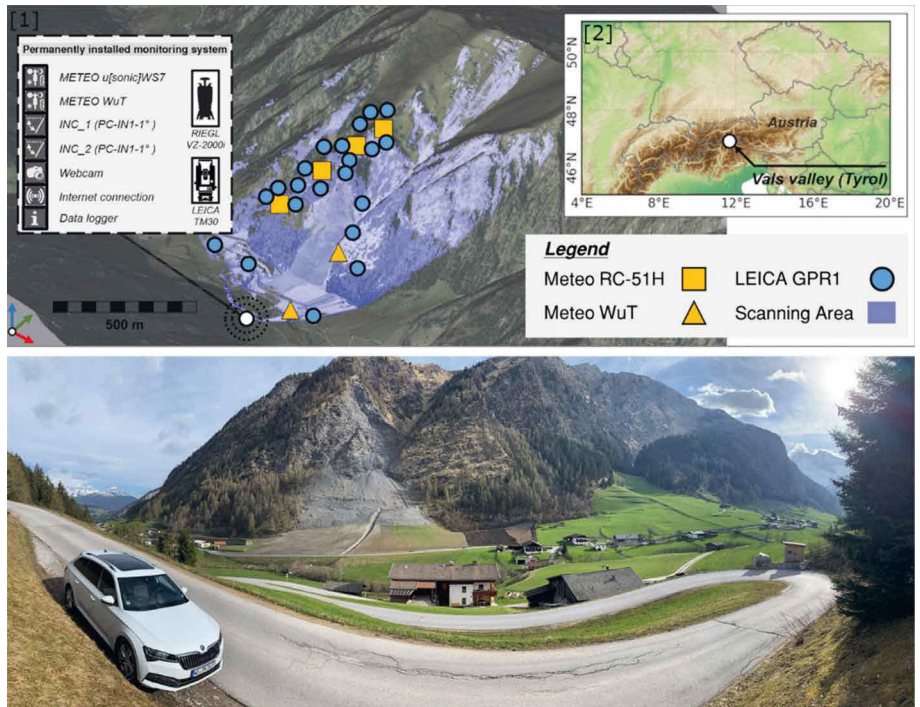


Fig. 2 a) Location map showing the sensor technology used in the open-air laboratory in the Vals Valley [5]; b) The situation at the rockfall in Vals in May 2021: the new road layout has been completed and the rehabilitation of the outfall area below the rockfall has been completed including safety measures.

Bild 2 a) Lageplan zur Darstellung der eingesetzten Sensorik im Open Air Labor im Valsertal [5]; b) Situation am Felssturz in Vals im Mai 2021: Der neue Straßenverlauf ist fertiggestellt, und die Sanierung des Auslaufbereichs unterhalb des Felsens ist inkl. Sicherungsmaßnahmen abgeschlossen

3 System implementation

The area of study dealt with here is the Valsertal (Vals Valley) in Tyrol (Austria). In this area, a rockfall occurred on 24 December 2017. After the rock fall, the terrain changed and a re-assessment of the avalanche and rockfall hazard was required. In addition to comprehensive three-dimensional mapping of the new situation, a surveying monitoring system was installed for long-term monitoring by the local authorities. The measuring area was made available as an open air laboratory.

The objective of the implementation was to evaluate the system and not primarily to document the motion behaviour of the slope. Additional sensors (Figure 2) were not primarily used to monitor the slope [5]. Data from the study was collected during three campaigns over several weeks in 2020 and 2021. The scanner was permanently installed in a shelter on the opposite slope about 800 m from the area affected by the rock fall (Figure 3).

In Vals, the communication box is connected to the scanner via LAN. The box provides power and Internet connection. The data connection to the DMT servers is done via a secure VPN connection, so that the scanner itself is only available to selected users. The monitoring app is integrated into the software interface and is thus available to users from anywhere in the world via a password-protected login (Figure 4).

Figure 5 shows the application. Users can interactively select two scans to be compared and display the changes in the distance “on-the-fly” per pixel. In addition, the

form von jedem Standort weltweit zu betreiben. Die Software verarbeitet alle Arten von Sensordaten und ermöglicht so eine permanente Überwachung des potenziellen Gefahrenbereichs. Die Besonderheit dieser Lösung ist die herstellerunabhängige Hardwareanbindung unterschiedlichster Sensorik aus verschiedenen Anwendungen.

Mithilfe der LiDAR-Integration werden die Messdaten automatisch über eine passwortgeschützte Web-Plattform dem Anwender zur Verfügung gestellt. Die Monitoring-App ist direkt in die Plattform integriert und der Kunde benötigt keine zusätzliche Software.

3 Systemimplementierung

Das hier behandelte Untersuchungsgebiet ist das Valsertal in Tirol (Österreich). In diesem Gebiet ereignete sich am 24. Dezember 2017 ein Felssturz. Nach dem Felssturz hat sich das Gelände verändert, und eine Neubeurteilung der Lawinen- und Steinschlaggefahr war erforderlich. Neben umfassenden dreidimensionalen Kartierungen der neuen Situation wurde ein vermessungstechnisches Überwachungssystem für eine Langzeitbeobachtung durch die lokalen Behörden installiert. Das Messgebiet wurde als Open-Air-Labor zur Verfügung gestellt. Ziel der Implementierung ist die Evaluierung des Systems und nicht primär die Dokumentation des Bewegungsverhaltens. Zusätzliche Sensorik (Bild 2) diente primär nicht zur Überwachung des Hangs [5]. Die Daten der Untersuchung wurden während drei Feldversuchen über mehrere Wochen 2020 und 2021 aufgenommen. Der Scanner wurde permanent in einer Schutzhütte am gegenüberlie-



Fig. 3 Setting up the scanner on a measuring point in a shelter in the Vals Valley.

Bild 3 Aufbau des Scanners auf einem Messpfeiler in einer Schutzhütte im Valsertal

image can be coloured according to the differences, and any thresholds can be selected. The display can be customised with a shaded view and various transparency values.

Sensors that measure just one point (e.g., inclinometers, prisms or weather stations of the extended experiment) can be displayed using dashboard functionality (Figure 6). Time series can be displayed for the respective measurement components (inclination, temperature or air pressure), which allow an analysis.

The latest version of the laser scanner offers the extraction of prisms from the scan data. A detailed description can be found in [7]. Time series can also be generated using these unique points in the scan. Figure 7 shows the time series of five prisms that were moved in the experiment by means of a cross slide. The changes in the line

genden Hang ca. 800 m vom betroffenen Felssturzgebiet installiert (Bild 3).

In Vals ist die Kommunikationsbox über LAN mit dem Scanner verbunden. Die Box sorgt für die Stromversorgung und Internetanbindung. Die Datenverbindung zu den DMT-Servern wird über eine sichere VPN-Verbindung realisiert, sodass der Scanner selbst nur ausgewählten Nutzern zur Verfügung steht. Die Monitoring-App ist in die Softwareoberfläche integriert und steht damit den Anwendern von überall auf der Welt über einen passwortgeschützten Login zur Verfügung (Bild 4).

In Bild 5 wird die Anwendung gezeigt. User können interaktiv zwei zu vergleichende Scans auswählen und sich on-the-fly je Pixel die Veränderungen in der Distanz anzeigen lassen. Zusätzlich lässt sich das Bild entsprechend der Differenzen einfärben und beliebige Schwellen sind wählbar. Die Visualisierung lässt sich durch eine schattierte Ansicht und verschiedene Transparenzwerte individualisieren.

Punktweise messende Sensoren (z. B. Inclinometer, Prismen oder Wetterstationen des erweiterten Experiments) lassen sich mittels Dashboard-Funktionalität visualisieren (Bild 6). Dabei können für die jeweiligen Messkomponenten (Neigung, Temperatur oder Luftdruck) Zeitreihen dargestellt werden, die eine Analyse zulassen.

Der Laserscanner bietet in seiner neuesten Version die Extrahierung von Prismen aus den Scandaten. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [7]. Mittels dieser eindeutigen Punkte im Scan lassen sich ebenfalls Zeitreihen erzeugen. In Bild 7 werden die Zeitreihen von fünf Prismen gezeigt, die im Experiment mittels Kreuzschlitten bewegt wurden. Die Veränderungen in Streckenrichtung sind im Bereich weniger Millimeter deutlich zu erkennen.

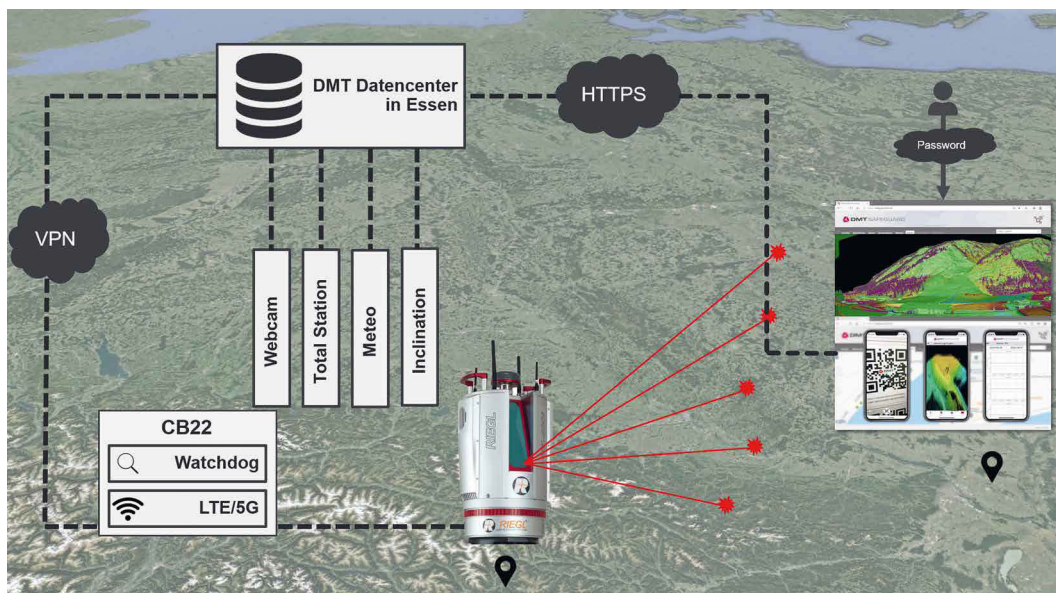


Fig. 4 The installation of DMT SAFEGUARD LiDAR in a schematic illustration.

Bild 4 Die Installation von DMT SAFEGUARD LiDAR in schematischer Darstellung

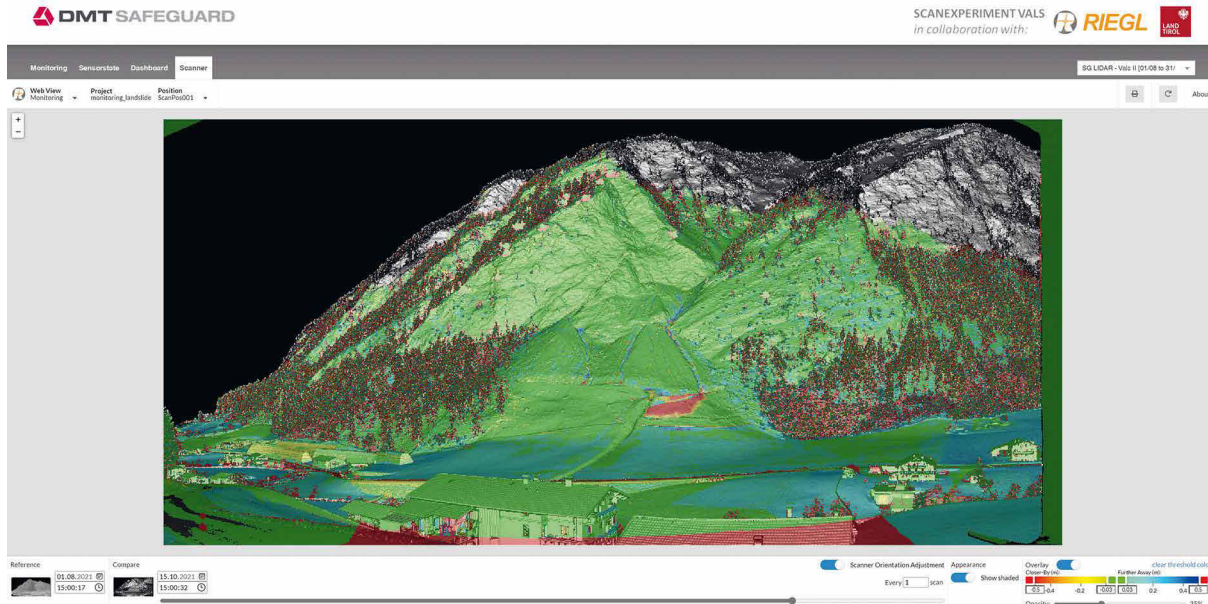


Fig. 5 RIEGL Monitoring App integrated in DMT SAFEGUARD: red colours for changes $> \pm 50$ cm, green colours for changes $< \pm 3$ cm. The colour scheme can be adapted interactively by the user and does not represent an analysis taking significance thresholds into account. In the middle area, the volume changes due to excavation work are clearly visible in red.

Bild 5 RIEGL Monitoring App integriert in DMT SAFEGUARD: rote Farben bei Veränderungen $> \pm 50$ cm, grüne Farben bei Veränderungen $< \pm 3$ cm. Das Farbschema lässt sich interaktiv durch den Nutzer anpassen und stellt keine Analyse unter Berücksichtigung von Signifikanzschwellen dar. Im mittleren Bereich sind in roter Farbe deutlich die Volumenveränderungen durch Baggerarbeiten erkennbar

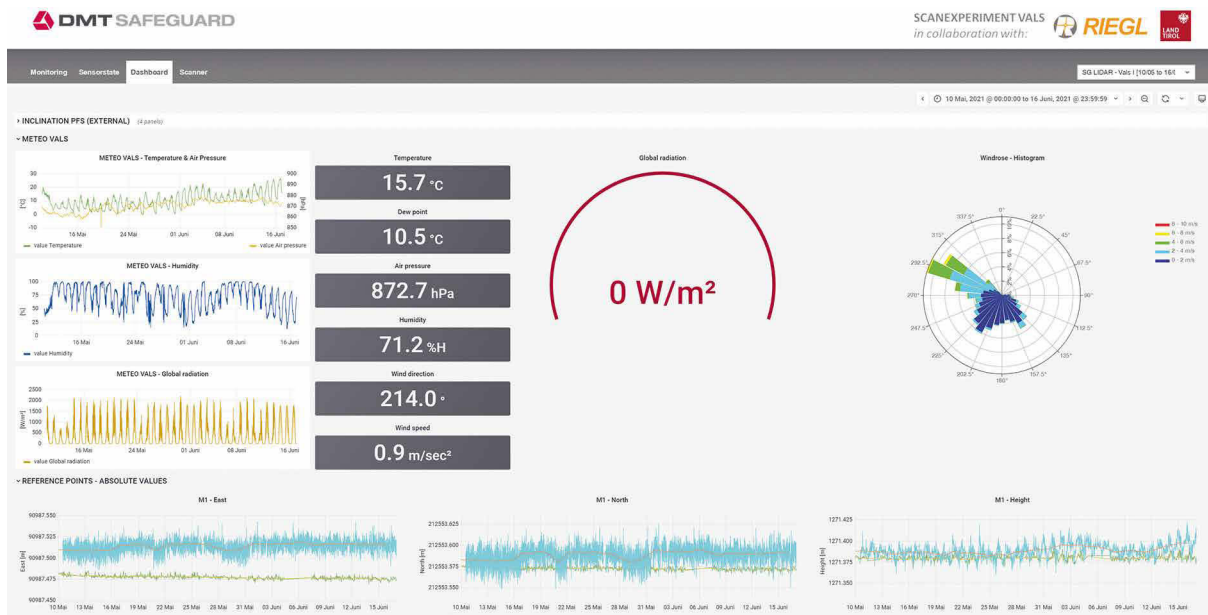


Fig. 6 Screenshot showing the display options in the form of dashboards within DMT SAFEGUARD

Bild 6 Screenshot zur Darstellung der Visualisierungsmöglichkeiten in Form von Dashboards innerhalb von DMT SAFEGUARD

direction can be clearly seen in the range of a few millimetres.

4 Summary and discussion

This article describes the successful implementation of a surface-mounted sensor into a web-based monitoring platform. The paradigm shift has taken place and quasi-surface measuring sensors can be used economically and efficiently. Within such a platform, the TLS supplements

4 Zusammenfassung und Diskussion

Dieser Beitrag zeigt die erfolgreiche Implementierung von einem flächenhaften Sensor in eine webbasierte Monitoringplattform auf. Der Paradigmenwechsel ist vollzogen und quasi-flächenhaft messende Sensorik ist wirtschaftlich und effizient einsetzbar. Innerhalb einer solchen Plattform ergänzt der TLS etablierte punktbezogene Messsysteme und kann einen zusätzlichen Informationsgehalt generieren. Im Sinne eines adaptiven Monitorings lassen sich Scanner für Objekte einsetzen, an denen zu-

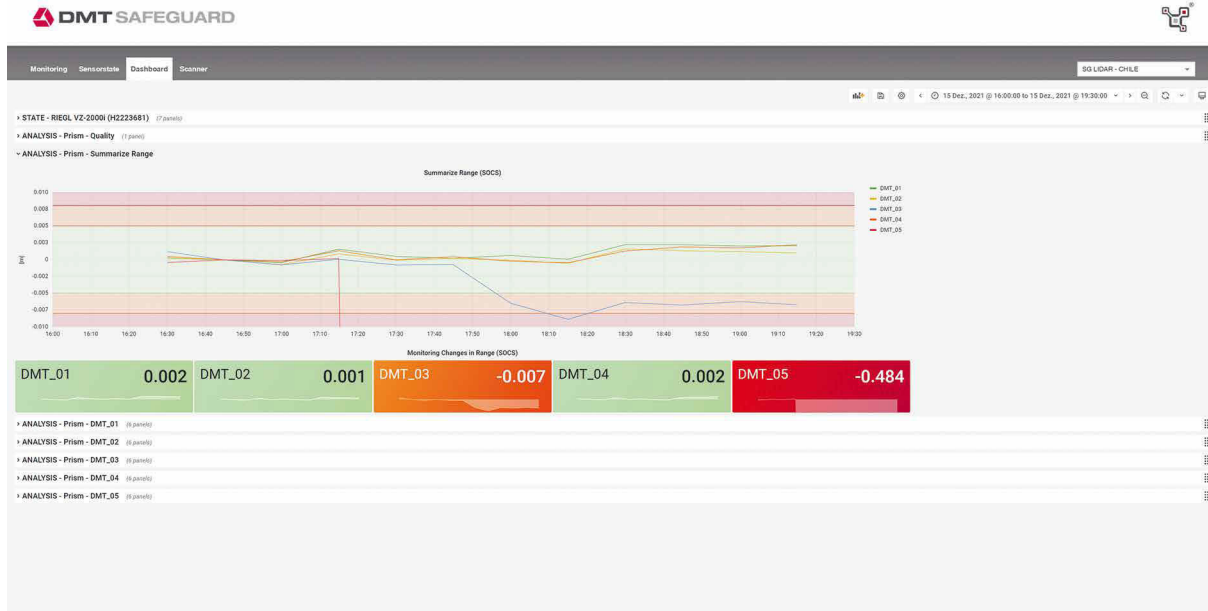


Fig. 7 Screenshot showing the time series for prism detection in DMT SAFEGUARD. Alarm when threshold values set by the user are exceeded.

Bild 7 Screenshot zur Darstellung der Zeitreihen für die Prismenerkennung in DMT SAFEGUARD. Alarmierung bei Überschreitung durch den Anwender festgelegter Schwellwerte

established point-related measuring systems and provides additional information. In the sense of adaptive monitoring, scanners can be used for objects on which the knowledge of the existing motion processes is not known at first.

In the summer of 2022, an early warning and alarm system based on the raster images will be integrated into the application. Winiwarter et al. [9] show that changes from approx. 0.04 to 0.05 m (bi-temporal) and approx. 0.02 m (multitemporal by filtering) can be detected during the reflectorless measurement of an object. The integration of the measuring prisms shown makes possible accuracies of less than 0.01 m in the transverse and vertical directions. New application possibilities arise because the longitudinal component (distance) can be determined to an accuracy of about 0.001 m [7].

References

- [1] Niemeier, W.; Riedel, B. (2017) *Monitoring of landslides in Freeden*, Reiner (eds.) *Manual of Geodetic*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_34.
- [2] Bremer, M.; Zieger, T.; Pfeiffer, J.; Petrini-Monteferrri, F.; Wichmann, V. (2019) *Monitoring of the large slope movement Reissenschuh (Schmirntal, Tyrol) with TLS and UAV-based laser scanning* in Hanke, Weinold (eds.) *20. International Geodetic Week Obergurgl 2019*, pp. 321–333. Berlin: VDE Verlag.
- [3] Hermle, D.; Gaeta, M.; Krautblatter, M.; Mazzanti, P.; Chushnig, M. (2022) *Performance Testing of Optical Flow Time Series Analyses Based on a Fast, High-Alpine Landslide* in *Remote Sensing* 14(1), no. 3. pp. 455.
- [4] Niemeier, W.; Heunecke, O. (2004) *Paradigm change in the evaluation of geodetic measurements: Challenges, Concepts, Trends* in *Engineering Surveying 2004*, 14th International Course on Engineering Surveying, pp. 131–142.
- [5] Schröder, D.; Anders, K.; Winiwarter, L.; Wujanz, D. (2022) *Permanent terrestrial Lidar monitoring in mining, natural hazard prevention and infrastructure protection – opportunities, risks, and challenges: A case study of a rockfall in Tyrol, Austria* in *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Valencia.
- [6] Schröder, D.; Nowacki, A. (2021) *The atmosphere as a restrictive influence on measurement results of a long-range laser scanner* in *21. International Geodetic Week 2021*, Obergurgl, Austria.
- [7] Gaisecker, T.; Schröder, D. (2022) *RIEGL V-Line scanners for permanent monitoring applications and integration capabilities into customers risk management* [online]. Horn,

Essen (eds.) *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH & DMT GmbH & Co. KG* [Access on 15.07.2022]. https://www.dmt-group.com/fileadmin/redaktion/news/Whitepaper_RIEGL_DMT.pdf

[8] Neuner, H.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2016) *Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation*

analysis. Avn 123, no. 11–12, pp. 328–339. <https://hdl.handle.net/20.500.11811/8766>

[9] Winiwarter, L.; Anders, K.; Schröder, D.; Höfle, B. (2022) *Full 4D Change Analysis of Topographic Point Cloud Time Series using Kalman Filtering* in *Earth Surf. Dynamic*. Discussion, 1–25. <https://doi.org/10.5194/esurf-2021-103>.

Authors



Daniel Czerwonka-Schröder, M.Sc.
(corresponding author)
daniel.schroeder@dm-t-group.com
DMT GmbH & Co. KG
Civil & Mining Engineering
Am TÜV 1
45327 Essen
Germany



Mag. Thomas Gaisecker
tgaisecker@riegl.com
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
Business Division Mining
Riedenburgstraße 48
3580 Horn
Austria

How to Cite this Paper

Czerwonka-Schröder, D.; Gaisecker, T. (2022) *The permanent three-dimensional data acquisition of geotechnical structures by means of a web-based application of terrestrial LiDAR sensors*. *Geomechanics and Tunneling* 15, No. 5, pp. 596–604. <https://doi.org/10.1002/geot.202200012>

This paper has been peer reviewed. Submitted: 5. May 2022; accepted: 26. July 2022.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Czerwonka-Schröder, D.; Gaisecker, T. (2022) *Die permanente dreidimensionale Datenerfassung geotechnischer Strukturen mittels webbasierter Anwendung terrestrischer LiDAR-Sensorik*. *Geomechanik und Tunnelbau* 15, H. 5, S. 596–604. <https://doi.org/10.1002/geot.202200012>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 5. Mai 2022; angenommen: 26. Juli 2022.

Wissen, was los ist: Monitoring everything.

Die individuell skalierbare **IoT Monitoring-Plattform DMT SAFEGUARD** erlaubt die kontinuierliche, präzise und verlässliche Überwachung des Zustandes und der Integrität von Tunneln, Brücken, Baugruben, Tief- oder Hochbauprojekten, komplexen Industrieanlagen oder Ölplattformen u.v.m. Kurzum: Was man messen kann, kann auch überwacht werden.

Monitoring everything im Paket oder als Baustein – wir beraten projektspezifisch und unabhängig, entwickeln Monitoring-Konzepte, setzen diese um, nutzen Sensoren jeder Art und von jedem Hersteller, bieten die Online-Monitoring-Plattform, übernehmen die Datenbewertung, geben Handlungsempfehlungen, leiten sie ein und setzen sie um.

Wenn Sie für Monitoring-Projekte verantwortlich sind, sollten wir miteinander reden.

bit.ly/3hOsNat

