

Terrestrisches Laser Scanning in den Alpen mit dem RIEGL VZ-4000 – für Geländeerfassung, Hangrutschungsüberwachung und Gletschermonitoring



Thomas Gaisecker, Martin Pfennigbauer, Christian Sevcik, Nikolaus Studnicka, Horn

Kurzfassung

Seit Jahren sind Laserscanner in der Landvermessung etabliert. Um sie auch für die Geländeerfassung und -überwachung im alpinen Raum effizient einsetzen zu können, sind vor allem hohe Reichweiten und Messraten erforderlich. Mit dem neu entwickelten terrestrischen Laserscanner RIEGL VZ-4000 steht nun erstmalig ein Messgerät zur Verfügung, das diese Kriterien erfüllt und dabei auch noch einen augensicheren Laser nutzt. Der Scanner weist eine Reichweite von vier Kilometer und eine Messrate von bis zu 147.000 Messungen pro Sekunde auf. Die Integration von GPS-Empfänger, Kompass und Neigungssensoren ermöglicht die Registrierung der Scandaten ohne den Einsatz künstlicher Zielmarken, was Planung und Durchführung von Feldeinsätzen signifikant erleichtert. Das Einfärben der erzeugten Punktwolke erfolgt mittels der eingebauten kalibrierten Kamera.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der zugrundeliegenden Messtechnik, wie der Digitalisierung der Echosignale und dem dadurch ermöglichten „Online Waveform Processing“. Dieses Verfahren bietet dem Anwender neben einer höheren Genauigkeit auch die Möglichkeit der Mehrzielfähigkeit, was die Durchdringung von Vegetation erlaubt. Weiters wird neben der kalibrierten Amplitude mit dem Reflexionsgrad eine entfernungsabhängige Eigenschaft der Zielobjekte bestimmt.

Wir diskutieren das Potential von digitalisierenden Laserscannern für verschiedene Vermessungsaufgaben und geben einen Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen dieser Geräteserie.

Schlüsselwörter: Terrestrisches Laserscanning, Mehrzielfähigkeit, Multiple Time Around, Monitoring, Terrainfilter

Abstract

Laser scanners have been well established in surveying applications since several years. For the realization of efficient surveying and monitoring missions in alpine regions long range instruments with high scanning rates are obligatory.

With the new RIEGL VZ-4000 there is a laser scanner available fully satisfying these requirements using an eye safe laser. The scanner is capable of up to 4,000 m range and 147,000 measurements per second. On-board inclination sensors, integrated compass and GPS receiver with antenna allow for scan data registration without the use of artificial reflective targets, thus reducing the expense for field missions significantly. A built-in calibrated digital camera provides additional information required for true colour representation of the scandata.

This article gives an insight into the applied state-of-the-art measuring technique, like echo digitization and online waveform processing, which result in an increased accuracy as well as an excellent multi target capability for high penetration of obstructions (e.g. vegetation). Furthermore additional attributes of the targets like calibrated amplitude and reflectance can be derived.

We will discuss the potential of digitizing laser scanners for various surveying applications and provide an outlook to further developments such as measuring on snow and ice.

Keywords: Long range terrestrial laser scanning, multiple target, multiple time around, monitoring, bare earth filter

1. Das Messsystem RIEGL VZ-4000

Konventionelle terrestrische Laserscanner liefern mit hoher Taktrate Messdaten, die aus vielen einzelnen Entfernungs- und Winkelmessungen bestehen. Jede Einzelmessung liefert mindestens einen diskreten Messpunkt im dreidimensionalen Raum. Mit einer modernen digitalen Signalverarbeitung, wie sie RIEGL mit der V-Serie

verwirklicht hat, können nun neben der echten Mehrzielfähigkeit noch zusätzliche Informationen gewonnen werden, wie kalibrierte Messung des relativen Reflexionsgrades der Zieloberfläche und ein Maß für die Güte des empfangenen Laserimpulses. Vollkommen neu für terrestrische Laserscanner ist die Möglichkeit, über den durch die Lichtgeschwindigkeit und die Laserpulswiederholrate gegebenen Eindeutigkeitsbereich



Abb. 1: RIEGL VZ-4000

Messbereich	5 – 4000 m / Zielreflektivität 90% 5 – 2300 m / Zielreflektivität 20%
Messgenauigkeit	15 mm
Wiederholbarkeit	10 mm
Mehrzielfähigkeit	ja
Messrate	bis zu 147.000 Messungen/Sekunde
Scanbereich	–30° bis +30° vertikal 0° bis +360° horizontal
Laserklasse	Klasse 1, nahes Infrarot
Abmessungen / Gewicht	ca. 236 × 226,5 × 450 mm / 14,5kg

Tabelle 1: Spezifikation RIEGL VZ-4000

hinaus messen zu können. Diese Eigenschaft in Kombination mit größeren Optiken und stärkeren Lasern ermöglicht Reichweiten, die mit kommerziell verfügbaren und augensicheren Geräten bisher noch nicht möglich waren.

Im Folgenden soll das Messsystem und die dabei realisierten Techniken näher beschrieben werden. Die wichtigsten Kenndaten des RIEGL VZ-4000 (Abbildung 1) sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Um die angegebenen Spezifikationen realisieren zu können, verfügt das System über eine spezielle Anordnung der Sende- und Empfangsoptik. Es handelt sich dabei um einen biaxialen Aufbau, der sich vor allem durch eine ausgezeichnete optische Isolation von Sende- und Empfangskanal auszeichnet. Dadurch wird ein Übersprechen des Signals weitgehend verhindert, was entscheidend für die Qualität der Messungen ist.

Trotz Einsatz eines gegenüber anderen Geräten stärkeren Lasers erfüllt das System die Bedingungen der Augensicherheit und kann als Gerät der Laserklasse 1 eingestuft werden. Achsparallel zur Empfangsoptik wurde bei diesem System eine Kamera verbaut, die eine Auflösung von 5 Megapixel bei einem Field of View von 7,2°x5,5° liefert. Das Einzelbild wird mit einer automatischen Belichtungssteuerung über den Ablenkspiegel aufgenommen. Für größere Bereiche werden die Einzelbilder zusammengesetzt.

Der Zugriff auf alle Gerätefunktionen erfolgt über einen Touchscreen. Zusätzlich stehen noch die von den V-Line Geräten bekannten Steuerungsmöglichkeiten über Laptop oder mobiles Endgerät zur Verfügung.

Der RIEGL VZ-4000 ist bereits in der Basis-Konfiguration mit zusätzlichen Sensoren, die eine reflektorlose Registrierung ermöglichen, ausgestattet. Der eingebaute L1 GPS Receiver liefert WGS84-Koordinaten mit einer Genauigkeit von wenigen Metern. Die hochpräzisen Neigungssensoren mit Genauigkeiten von +/- 0.008° garantieren die automatische Nivellierung des Scanners. Letztendlich liefert ein eingebauter magnetischer Kompass die Nordrichtung mit einer maximalen Abweichung von lediglich 0,5°. Die Deklination, also die Abweichung von magnetisch Nord zu geographisch Nord wird ebenfalls berücksichtigt. Diese weltweit unterschiedlichen Abweichungen sind im Scanner als Isogonentabellen abgespeichert und unter Heranziehung der GPS-Koordinaten wird der lokale Korrekturwert angewendet. Somit liegt bereits vollautomatisch eine grobe Registrierung der Scandaten im WGS84 Koordinatensystem vor. Auch ein externer GPS-Receiver kann in das System integriert werden. Hierfür wird die GPS-Antenne des internen Receivers abgenommen und durch den externen GPS-Empfänger ersetzt. Die RTK-Daten des externen GPS-Receiver werden über die integrierte NMEA-Schnittstelle, die hinsichtlich der verschiedenen GPS-Hersteller konfigurierbar ist, eingelesen. Somit ist die Lage des Scanners in einem beliebigen Benutzer-Koordinatensystem bestimmbar.

2. Messtechnik

Konventionelle terrestrische Laserscanner liefern Punktwolken, die aus vielen einzelnen Entfernungs- und Winkelmessungen bestehen. Neben Zusatzinformationen wie der Echostärke liefert jede Einzelmessung im Allgemeinen genau einen diskreten Messpunkt im dreidimen-

sionalen Raum. Diese Laserscanner arbeiten mit analoger Signalverarbeitung. RIEGL hat mit der Einführung der V-Line Geräteserie auf die moderne digitale Signalverarbeitung umgestellt. Auf diese neue Technik und den damit verbundenen Vorteilen für den Anwender wird in den folgenden Kapiteln detailliert eingegangen.

2.1. Prinzip der Echodigitalisierung

Die erste Zeile des in Abbildung 2 dargestellten Diagramms stellt den Verlauf des analogen Echosignals dar. Der erste Impuls auf der linken Seite beschreibt den Sendepuls, also den Start der Entfernungsmessung. Alle weiteren Impulse beschreiben die verschiedenen Reflexionen eines einzelnen ausgesendeten Laserimpulses an einem oder mehreren Zielobjekten. Der zeitliche Abstand eines Empfangsimpulses in Bezug auf den Sendepuls korrespondiert über die Lichtgeschwindigkeit mit der Entfernung des Scanners zum jeweiligen Objekt. Der letzte Impuls auf der rechten Seite beschreibt die Reflexion des am weitesten entfernten Objekts, welches ein hinreichend großes Signal im Empfänger liefert. Das analoge Signal wird in konstanten Zeitintervallen abgetastet (mittlere Zeile) und danach Analog/Digital konvertiert. Der resultierende digitale Datenstrom ist in der untersten Zeile dargestellt. Aus diesem digitalen Datenstrom werden in Echtzeit mittels „Online Waveform Processing“ die Zielentfernungen ermittelt.

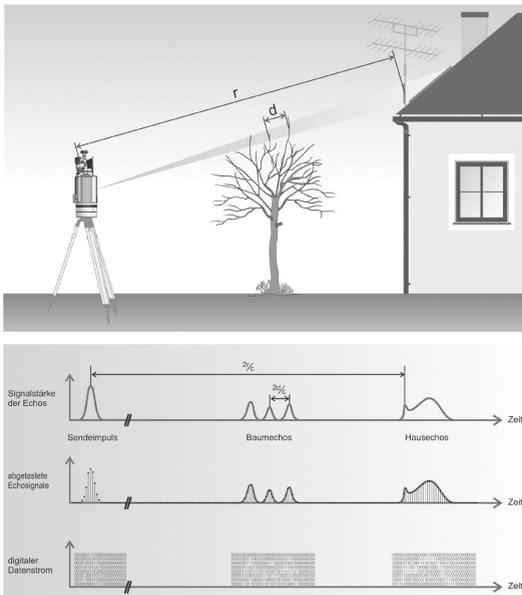


Abb. 2: Prinzip der Echodigitalisierung

2.2. Mehrzielfähigkeit und Messqualität

Aus den digitalen Abtastwerten werden bereits im Scanner selbst durch Anwendung von speziell für diese Aufgabe entwickelten und optimierten Algorithmen die Zielinformationen extrahiert. Zu jedem Ziel kann die Zielentfernung, die optische Echoamplitude, der relative Reflexionsgrad des Ziels, die Zielklassifizierung („single target“, „first target“, „last target“ und „other target“) und die Messqualität des Zieles als Messattribut der weiteren Nachverarbeitung zur Verfügung gestellt werden.

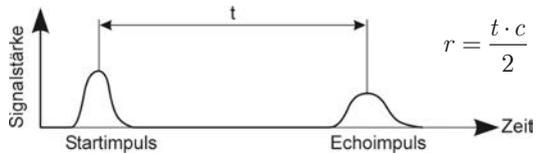


Abb. 3: Prinzip der Laufzeitmessung

Die zeitliche Position des Echoimpulses im Bezug zum Sendepuls t ergibt über die Lichtgeschwindigkeit im Medium c die absolute Objektentfernung r zum Ursprung des Laserscanners. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Echoimpulsen repräsentiert die Distanz d zwischen zwei Zielobjekten. Die minimal messbare Distanz zwischen zwei tiefengestaffelten Zielen wird Mehrzielauflösung genannt. Je höher die Mehrzielauflösung ist, desto näher zusammenliegende Ziele können unterschieden werden.

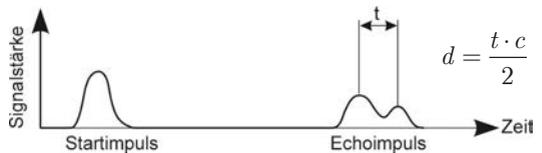


Abb. 4: Mehrzielauflösung

Die Mehrzielauflösung stößt an ihre Grenzen, wenn der zeitliche Abstand der Echos von unterschiedlichen getroffenen Zielen nicht deutlich größer als die Dauer der vom Laser abgegebenen Pulse ist. Dies tritt auf, wenn nahe beieinander liegende diskrete Ziele oder „tiefe“ Ziele, wie beispielsweise Objekte mit einer hohen Rauigkeit, Dunst, Nebel oder Staub getroffen werden. In diesem Fall ist die Messung mit einer hohen Unsicherheit behaftet, was vom Gerät erkannt wird und mit einem erhöhten Wert des Attributs „Deviation“ dem Messergebnis beigefügt wird.

2.3. Multiple Time Around (MTA)

Die hier besprochene Messtechnik ist in dieser Form in allen RIEGL V-Line Geräten realisiert.

Der RIEGL VZ-4000 ermöglicht sehr hohe Messraten bei gleichzeitig hoher Reichweite. Genau diese Eigenschaft kann zu Mehrdeutigkeiten bei der Distanzbestimmung führen. Wird ein Laserpuls ausgesandt, dessen Laufzeit zum Ziel und zurück zum Empfänger länger ist als das Pulsrepetitionsintervall (= 1/Pulsrepetitionsrate) sprechen wir von „Multiple Time Around“-Echos. Es sind dabei mehrere Laserpulse gleichzeitig auf dem Weg, und empfangene Echos können nicht mehr eindeutig ihrem ursächlichen Laserpuls zugeordnet werden.

Solange ein emittierter Laserpuls stets zu einem unmittelbar folgenden zugehörigen Echo führt, ist die Messdistanz kleiner als der Eindeutigkeitsbereich. Die Größe des Eindeutigkeitsbereiches ist durch die Lichtgeschwindigkeit und das Pulsrepetitionsintervall gegeben.

Bei einer Zielentfernung von 4000m entspricht dies einer max. Pulsrepetitionsrate von 37.500 Messungen pro Sekunde. Der RIEGL VZ-4000 misst allerdings selbst auf dieser hohen Entfernung noch mit 50kHz. Dadurch sind mehrere Laserpulse gleichzeitig unterwegs und der Echopuls kann nicht mehr eindeutig einem Sendepuls zugeordnet werden.

Abhängig von der gewählten Messrate lässt sich der Entfernungsmessbereich in Zonen, innerhalb derer sich der Echopuls eindeutig dem Sendepuls zuordnen lässt, einteilen (MTA-Zonen). Der RIEGL VZ-4000 hat bei einer Messrate

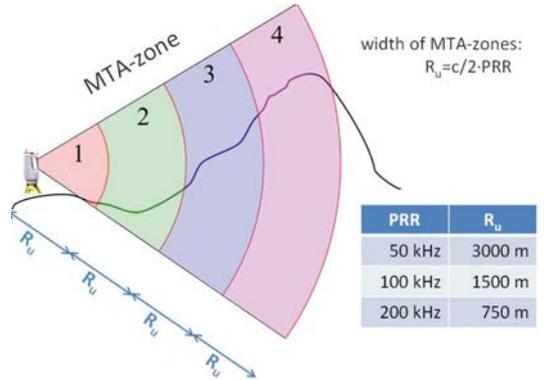


Abb. 5: MTA-Zonen

von 200kHz eine max. Reichweite von 2400m. Dadurch ist bei diesem Messprogramm eine Einteilung in 4 MTA-Zonen à 750m erforderlich (Abbildung 5). Um die korrekte Zone zu bestimmen, werden Blöcke zeitlich aufeinanderfolgender Messungen bezüglich ihrer Entfernungsvariationen in den verschiedenen MTA-Zonen mit eigens dafür entwickelten Algorithmen untersucht und letztendlich automatisch der korrekten MTA-Zone zugewiesen (Abbildung 6).

2.4. Aufnahmestrategie – Registrierung ohne Zielmarken

Gerade bei den hohen Reichweiten, die der RIEGL VZ-4000 ermöglicht, stellt sich die Frage der korrekten Registrierung der Scandaten. Aus

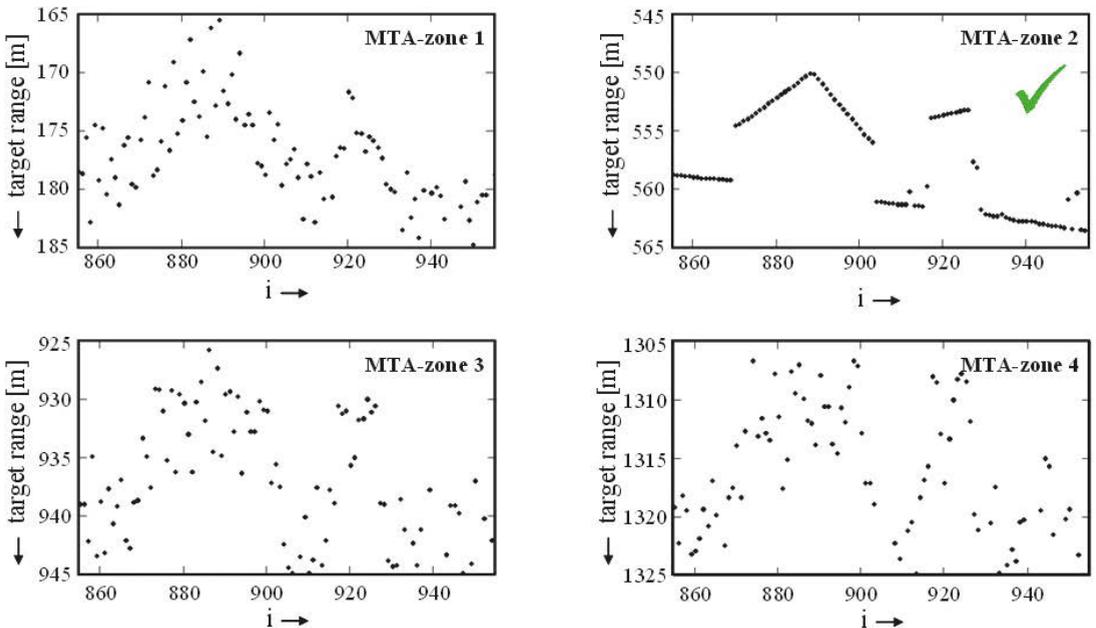


Abb. 6: Entfernungsvariationen in verschiedenen MTA-Zonen

vermessungstechnischer Sicht ist ein „stabiles“ Reflektornetz gefordert. D.h. die Messmarken müssen über das gesamte Untersuchungsgebiet gleichmäßig verteilt sein (siehe Abbildung 7). Eine Extrapolation aus diesem Messfeld führt unweigerlich zu beträchtlichen Klaffungen in den Scandaten. Daher scheint der Weg über Reflektormarken bei diesen Entfernungen nicht zielführend.

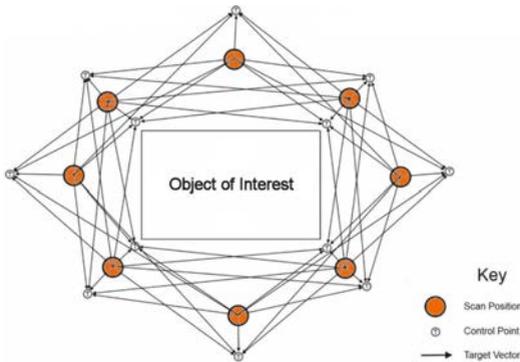


Abb. 7: Registrierung der Scandaten via Messmarken

Anstelle von Reflektoren/Messmarken bietet sich hier die Einbeziehung der gescannten Oberfläche selbst in die Registrierung an. Das RIEGL Software-Modul Multi Station Adjustment (MSA) verwendet hierfür einen modifizierten ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point Algorithm). Diese Berechnung beruht auf der Auswertung der Lage korrespondierender ebener Flächen (Abbildung 8).

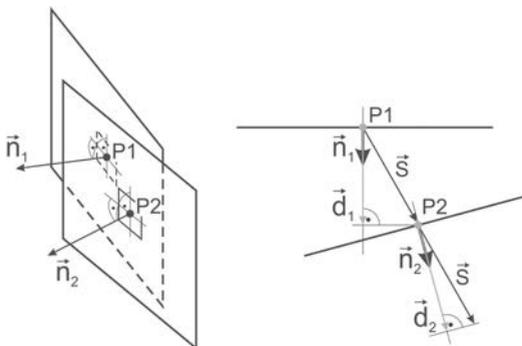


Abb. 8: Ebenen werden durch ihre Position und ihren Normalenvektor charakterisiert

In den Überlappungsbereichen unabhängig aufgenommener Scan-Positionen werden in den jeweiligen Punktwolken Teilbereiche gesucht, die durch eine Fläche gut angenähert werden können. Aus diesen Bereichen werden Ebenen-

Stücke bestimmt und durch Mittelpunkt P_i , Normalvektor n_i und Ausdehnung charakterisiert. Im nächsten Schritt werden zu den N Flächen, die in einer Punktwolke aufgefunden wurden, die korrespondierenden Flächen in den übrigen Punktwolken gesucht. Die Information über die Lage einzelner, in verschiedenen Punktwolken aufgefunderer, korrespondierender Ebenen bildet die Ausgangsbasis für die folgende Ausgleichsrechnung. Diese basiert auf der iterativen Änderung der Position und der Rotation um alle 3 Achsen jeder einzelnen Scan-Position, bis der mittlere quadratische Normalabstand (siehe Formeln) sämtlicher korrespondierender Flächen ein Minimum erreicht hat.

$$d_1 = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \cdot \vec{n}_1$$

$$d_2 = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \cdot \vec{n}_2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2}{N}}$$

Die Eingangsgenauigkeit der Position (= GPS-Genauigkeit) wird ebenfalls berücksichtigt. Jede Scan-Position darf nicht weiter als die angegebene GPS-Genauigkeit bewegt werden. Diese Methode der Registrierung gewährleistet ein stabiles Netz (Scan-Positionen, überlappende Scanbereiche), das eine exakte Registrierung der Scandaten im gesamten Untersuchungsgebiet gewährleistet.

Neben dem wichtigsten Indikator für eine korrekte Registrierung, nämlich der Standardabweichung, liefert MSA auch ein Histogramm der Restklaffungen der Flächen, sowie einen Polarplot, der Auskunft über die Orientierungen der für die Ausgleichsrechnung benutzen Flächen gibt. Eine kleine Standardabweichung unter Berücksichtigung möglichst vieler Flächen, sowie eine annähernd symmetrische Verteilung der Restklaffungen der Ebenen bei gleichzeitiger hoher Variabilität der Flächen-Orientierungen, sind Indikatoren für eine exakte und robuste Registrierung (siehe Abbildung 9). Rahmenbedingung für diese Art der Registrierung sind mindestens drei unabhängige Scan-Positionen, sowie genug Überlappungsbereiche in den Scandaten.

3. Praktische Anwendungsbeispiele

Die hohen Messdistanzen prädestinieren das System für den Einsatz in Gebieten mit beschränkter Zugänglichkeit wie beispielsweise Tagebau oder Hangrutschungen im alpinen Gelände. Im Tagebau finden diese Geräte hauptsächlich Anwendung zur Bestimmung der Abbauvolumina. Dazu wird in bestimmten Zeitintervallen der Minenbe-

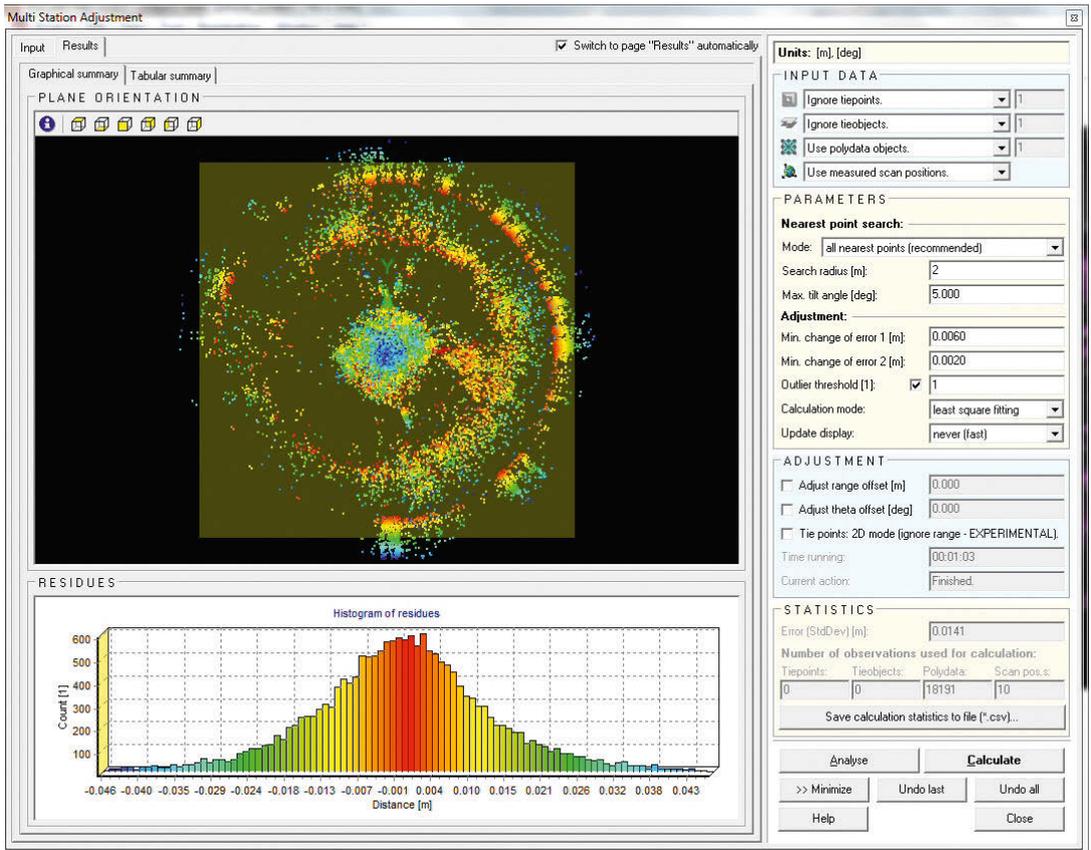


Abb. 9: MultiStation Adjustment – Residuenplot

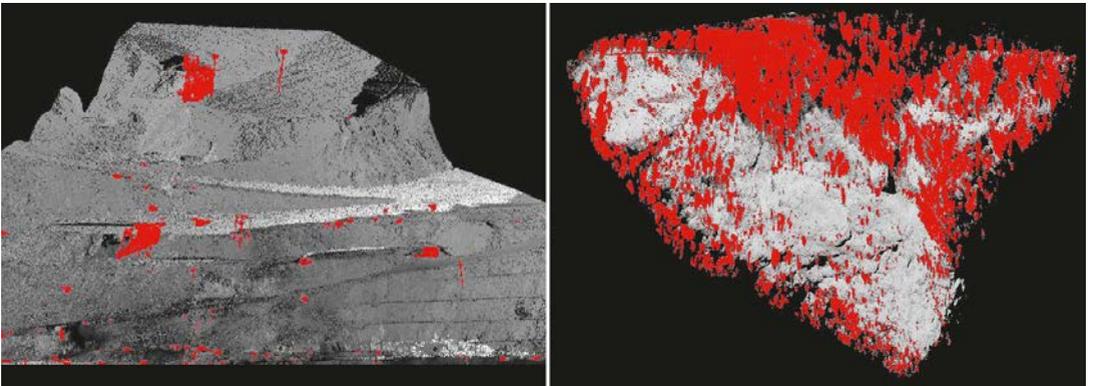


Abb. 10: automatische Filterergebnisse: links Abbaumaschinen im Tagebau, rechts Vegetation im alpinen Gelände

reich gescannt. Aus der Punktwolke werden mittels automatischer Filtermethoden künstliche Objekte (Abbaumaschinen, Freileitungen, ...) entfernt, sodass aus den übrigen Bodenpunkten ein Geländemodell gerechnet werden kann. Mit derselben Methode lässt sich durch Variation der Filterparameter die Vegetation in bewaldeten Gebieten sehr effektiv selektieren. Der

hierarchisch arbeitende Filter nähert dabei das Geländemodell vom Groben ins Feine an und untersucht dabei die Abweichungen der einzelnen Laserpunkte von einer dynamisch generierten Ausgleichsfläche. Der Filter liefert eine Selektion aller Nicht-Bodenpunkte, sodass die Geländepunkte von der gesamten Punktwolke sehr leicht separiert werden können.

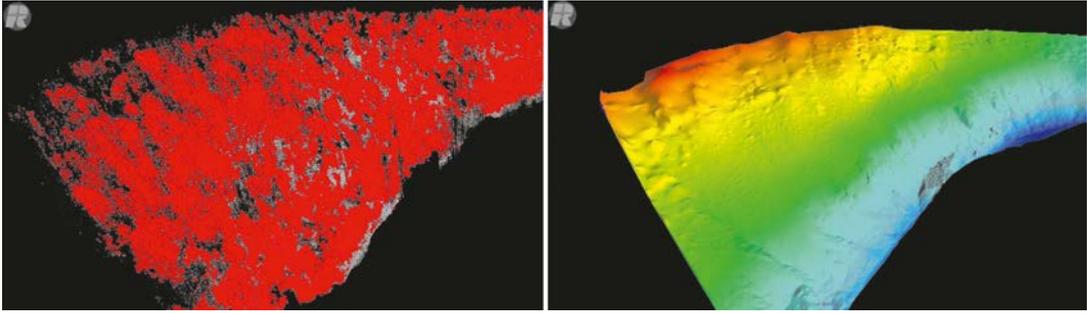


Abb. 11: Filterung der Vegetation und trianguliertes Geländemodell

Aus den Bodenpunkten wird anschließend mittels Triangulation ein Geländemodell gerechnet. Dieses kann - je nach eingesetzter Minenplanungssoftware - direkt als Dreiecksnetz oder in Form von extrahierten Bruchkanten an die Software übergeben werden.

Aus den Geländemodellen unterschiedlicher Aufnahmen kann dann ein Differenzmodell gebildet werden, anhand dessen die Abbauveränderungen feststellbar sind.

Ein spezieller Anwendungsbereich ist die Überwachung von Rutschhängen oder instabilen Geländeformen. Dabei ist es notwendig, dass das Scansystem kontinuierlich oder in definierten Intervallen Messdaten liefert. Mittels der speziell für diesen Einsatzzweck entwickelten Software RiMONITOR können diese Daten in Echtzeit ausgewertet und mit einer Referenzmessung oder einem Referenzmodell verglichen werden. Dabei wird der Scanner außerhalb des Gefahrenbereichs positioniert und mit einer Rechenstation gekoppelt. Stellt das System Abweichungen zu

den Referenzdaten fest, löst dies ein Alarmsignal aus, welches beispielsweise in Form von SMS oder e-mail weitergegeben wird. Aufgrund der wiederholten Messungen und der dadurch mehrfach redundanten Information, können mittels statistischer Methoden bereits kleinste Änderungen in der Geometrie des überwachten Objekts zuverlässig detektiert werden.

4. Ausblick

Die Weiterentwicklung dieser Geräteserie sieht eine Modellvariante für Messungen auf schneebedeckten Oberflächen vor. Die Wellenlänge des Gerätes wird auf das Reflexionsverhalten von Schnee und Eis angepasst, sodass sich dieses Gerät speziell für Anwendungen wie beispielsweise Gletschermonitoring oder Untersuchungen an Lawinhängen empfiehlt.

Literaturverzeichnis

- [1] Gaisecker, T. (2010): Die Laserscanner der neuen RIEGL V-Line@: Höhere Datenqualität durch Einsatz neuer Technologien, Flexibilität im Feld durch Integra-

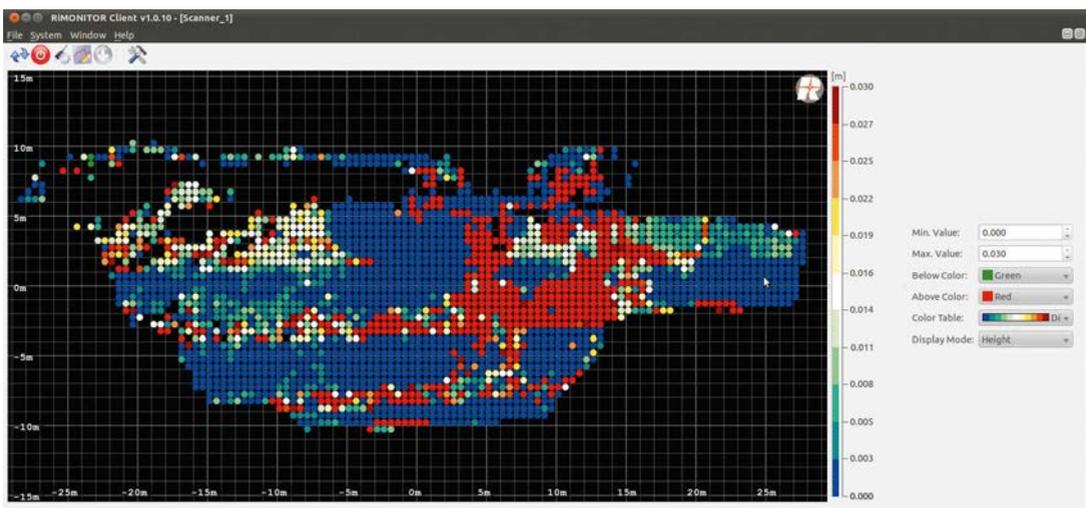


Abb. 12: RiMONITOR Client

tion zusätzlicher Sensoren, 11. Geokinematischer Tag Freiberg, 2010.

- [2] *Gaisecker, T., Pfennigbauer, M., Studnicka, N. (2009): Die Laserscanner der neuen V-Serie von RIEGL: Höhere Datenqualität durch Einsatz neuer Messmethoden, 15. Internationale Geodätische Woche Oberurgl, 2009.*
- [3] *Studnicka, N., Ullrich, A. (2008): Echosignaldigitalisierung und Full-Waveform Processing für terrestrisches Laser Scanning, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Wichmann.*
- [4] *Rieger P., Ullrich, A., (2011): Resolving range ambiguities in high repetition rate airborne LIDAR applications, Proc. SPIE 8186A, 8186A-9.*
- [5] *Pfennigbauer, M., Ullrich, A. (2010): Improving quality of laser scanning data acquisition through calibrated amplitude and pulse deviation measurement, Proc. SPIE 7684, 7684-53.*
- [6] *RiMONITOR Datenblatt, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. Technische Daten auf ww.riegl.com, 2012.*

Anschrift der Autoren

Mag. Thomas Gaisecker, Senior Manager International Sales, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstraße 48, A-3580 Horn.
E-mail: tgaisecker@riegl.com

Dr. Martin Pfennigbauer, Director Research & Intellectual Property, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstraße 48, A-3580 Horn.
E-mail: mpfennigbauer@riegl.com

Dipl.-Ing. Christian Sevcik, Software Application Engineer International Sales, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstraße 48, A-3580 Horn.
E-mail: csevcik@riegl.com

Dipl.-Ing. Nikolaus Studnicka, Manager Business Development, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstraße 48, A-3580 Horn.
E-mail: nstudnicka@riegl.com

Vortragender

Dipl.-Ing. Christian Sevcik

- 1999–2000 Freier Mitarbeiter am Institut für digitale Bildverarbeitung der Forschungsgesellschaft Joanneum Research, Graz
- 2000 Abschluß des Diplomstudiums Vermessung und Geoinformation an der Technischen Universität Graz
- 2001–2008 Projektmanager Photogrammetrie und Laser-scanning, GeoDATA Informationstechnologie GmbH
- 2008–2010 Client Support Manager, MET GeoInfo GmbH
- seit 2011 Software Application Engineer, International Sales, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH