Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement

Band: 111 (2013)

Heft: 4

Artikel: Terrestrisches Laserscanning im Eis : Aufnahme einer Gletschergrotte auf dem Kleinen Matterhorn

Autor: Willi, D. / Theiler, P.W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-323389

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Terrestrisches Laserscanning im Eis: Aufnahme einer Gletschergrotte auf dem Kleinen Matterhorn

Die Gletschergrotte «Gletscher-Palast» auf dem Kleinen Matterhorn existiert erstmals virtuell in 3D. Die Grotte wurde im Rahmen eines Projekts der ETH Zürich innerhalb von sieben Monaten in drei Epochen mittels terrestrischem Laserscanning vermessen. Dabei geben die erstellten 3D-Modelle Aufschluss über die Dynamik der Grotte. Auch wenn die systematischen Effekte auf die Messunsicherheit noch unerforscht sind, wurde damit die Anwendbarkeit von Laserscanning im Eis eindeutig aufgezeigt.

La grotte glacière «Palais de Glace» du petit Cervin existe pour la première fois virtuellement en 3D. La grotte a été mensurée dans le cadre d'un projet de l'EPF Zurich sur une période de sept mois en trois époques au moyen d'un scannage laser terrestre. Ainsi les modèles 3D renseignent sur la dynamique de la grotte. Bien que les effets systématiques de l'insécurité des mesures soient encore scientifiquement inconnus il a été démontré clairement que l'application du scannage laser était possible dans la glace.

La grotta di ghiaccio del «Palazzo di ghiaccio» sul Piccolo Cervino è per la prima volta disponibile virtualmente in 3D. Nell'ambito di un progetto del Politecnico di Zurigo, la grotta è stata misurata a tre riprese in un lasso di tempo di sette mesi tramite uno scanner al laser terrestre. Al riguardo, i modelli 3D allestiti informano sulla dinamica della grotta. Anche se non si sono ancora ricercati gli effetti sistematici sulla sicurezza di misurazione si è riusciti a dimostrare l'applicabilità dello scanner al laser nel ghiaccio.

D. Willi, P. W. Theiler

Flächenhafte Aufnahmen von Schnee- und Eisfeldern sind im Kontext des globalen Klimawandels zunehmend von Bedeutung, denn insbesondere Gletscher reagieren sehr empfindlich auf veränderte Umweltbedingungen. Monitoring kann helfen, Trends frühzeitig zu erkennen, sei es zur Optimierung von Stromproduktion aus Wasserkraft, zur Reduktion der Gefährdung durch Gletscherseen oder für Forschungszwecke, wie zum Beispiel für die Kalibrierung und Validierung von Schmelzmodellen. Mit dem Aufkommen des terrestrischen Laserscannings (TLS) ist das mögliche Instrumentarium für diese Vermessungsaufgabe um eine Technologie reicher geworden.

Der für dieses Projekt vermessene «Gletscher-Palast» ist eine künstliche, direkt in den Gletscher geschlagene Grotte. Sie befindet sich auf dem Breithornplateau südlich des Kleinen Matterhorns (Zermatt, VS), ungefähr 15 m unter der Gletscheroberfläche (siehe Abb. 1). Der Palast wird von der Zermatt Bergbahnen AG als touristische Attraktion unterhalten und betrieben. Der Zugang erfolgt von der Bergstation der Seilbahn ausgehend über zwei Personenlifte. Anschliessend führt ein 140 m langer Stollen (3.7 m Durchmesser) zuerst 10 m durch den Felsen und anschliessend durch Eis bis zur eigentlichen Kaverne. Dort befinden sich in drei Räumen auf rund 990 m² Eisskulpturen und diverse Ausstellungsstücke. Weitere Informationen zum «Gletscher-Palast» sind der Webseite der Zermatt Bergbahnen AG zu entnehmen. Da sich die Kaverne vollständig im Eis befindet, kann davon ausgegangen werden, dass sie sich mit einer ähnlichen Geschwindigkeit bewegt wie der Gletscher. Zusätzlich zur reinen Bewegung kann die Kaverne Deformationen unterworfen sein. Die Vermessung zeigt die Summe beider Effekte.

1. Instrumentarium

Der Z+F Imager 5006i ist ein moderner short-range Phasenvergleichs-Laserscanner mit einer Trägerwellenlänge von 650 nm bis 690 nm und einem Eindeutigkeitsbereich von 79 m. Eine komplette Liste der Spezifikationen ist auf der Webseite des Herstellers aufgeführt. Der Imager zeichnet sich durch eine besonders hohe Messrate von bis zu 500 000 Punkten pro Sekunde aus. Bei einer Auflösung von 250 Punkten pro Quadratdezimeter auf 10 m Entfernung benötigt der Scanner knapp dreieinhalb Minuten für einen Scan, der horizontal 360° und vertikal 155° abdeckt. Das Entfernungsrauschen wird vom Hersteller mit 1 mm bis 10 mm angegeben, je nach Objekteigenschaften und Lichtverhältnissen. Messungen auf Eis weisen erfahrungsgemäss ein starkes Messrauschen auf. Zudem kann die Penetration des Laserstrahls in das Messob-

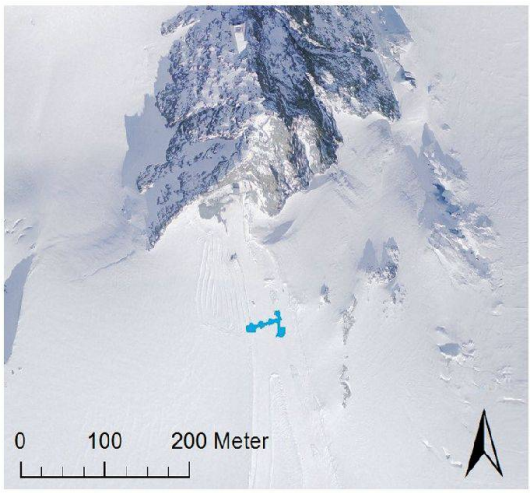

Abb. 1: Orthophoto des Kleinen Matterhorns und des Breithornplateaus überlagert mit der Eisgrotte «Gletscher-Palast». Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100120).

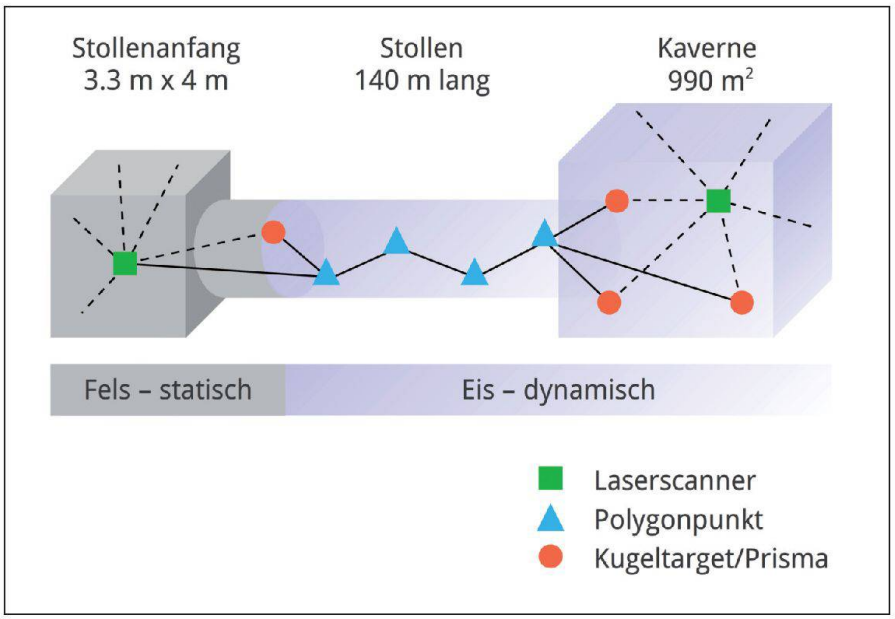

Abb. 2: Schematischer Messaufbau. Ein Scan des stabilen Stollenanfangs im Fels dient als Verknüpfung zwischen den einzelnen Epochen.

jekt (hier: Eis) die Punktmessgenauigkeit beeinflussen (Schulz und Ingensand, 2004).

2. Aufnahmemethodik

Die Eisgrotte wurde im Jahr 2012 in drei Epochen aufgenommen: Am 6. März, am 13. Mai sowie am 5. Oktober. Die Aufnahmemethodik war bei allen drei Epochen identisch: Als statische Referenz wurde der Teil des Zugangs gescannt, der sich im Felsen befindet. Dabei wurde auch ein Kugeltarget am Übergang zum Stollen im Eis erfasst. Die Kaverne wurde dann von bis zu zehn Scannerstandpunkten aus aufgenommen. Zur Verknüpfung der Scans wurden Kugeltargets verwendet. Drei dieser Kugeltargets in der Kaverne wurden mittels Polygonzug an die Scannerposition und das Target am Stollenanfang angehängt (siehe Abb. 2, aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur ein Scan in der Kaverne aufgeführt). Technische Spezifikation zur hierfür verwendeten Totalstation Leica TCRP1201 sind auf der Herstellerseite zu finden.

2.1. Georeferenzierung

Da weder eine Sichtverbindung nach aussen besteht, noch die Nutzung von GNSS möglich ist, und die Koordinaten- und Richtungsübertragung von obertage in den Stollen zu aufwändig gewesen wäre, wurden die Messungen lokal georeferenziert. Dafür wurde der Teil des Zugangsstollens, der sich im Fels befindet, als statisch erachtet, was für die Dauer des vorliegenden Projektes gerechtfertigt erscheint. Wegen der begrenzten Ausdehnung dieses stabilen Stollenteils (3 × 4.4 m²) wurde von einer freien Stationierung über im Fels vermarkte Punkte abgesehen. Stattdessen wurden die Orientierung und Position des Scanners – und in Folge des ersten Kugeltargets als weiteren Fixpunkt – durch einen Laserscan des gesamten Raumes festgelegt. Der Vorteil liegt in der immensen Anzahl an Messungen. Dabei muss aber beachtet werden, dass über die Epochen hinweg die Punktkorrespondenz nicht eindeutig ist, weil die Punktwolke des gesamten Raums und nicht diskrete Punkte verwendet werden. Der zusätzlich erfasste Fixpunkt wird im Anschluss als Startpunkt für den Polygonzug verwendet, während der Scannerstandpunkt selbst als Orientierungspunkt für den Polygonzug dient. Durch die Verwendung von Holzkugeln, deren Mittelpunkte bei einer Montage auf einem Stativ dieselbe Position wie ein Reflektor haben, ist ein zwangszentrierter Austausch zwischen Kugeln, Prismen und Instrumenten ohne Weiteres möglich. Die drei Passpunkte (Kugeltargets) im beweglichen Teil des Eispalastes, welche der Georeferenzierung des 3D-Modells dienen, werden während des Polygonzugs von möglichst vielen Stationen aus als Zwischenblicke eingemessen. Der Abschluss des Polygonzugs auf dem Startpunkt dient der Kontrolle und der Ausgleichung (Sonderfall eines Ringpolygonzugs).

Eine Abschätzung hat ergeben, dass die erreichbare Genauigkeit der Anfangskoordinaten und -richtung des Polygonzugs damit bei 1.5 mm beziehungsweise 3 mgon Standardabweichung liegt. Die weitaus grössere Unsicherheit ergibt sich demnach aus der Orientierungsbestimmung. Bei einer Stollenlänge von 140 m resultiert daraus bereits eine Standardabweichung der Passpunkte von ~6 mm in Querrichtung. Nicht berücksichtigt hierbei ist die zusätzliche Unsicherheit wegen des Polygonzugs. Die erwarteten Kavernenbewegungen liegen jedoch deutlich über diesem Wert, so dass die Methode verwendet werden kann.

2.2. Scan der Grotte

Aufgrund der relativ komplexen Geometrie der Kaverne waren bis zu zehn Scans pro Epoche nötig, um das Objekt wie gewünscht zu erfassen. Durch eine Verteilung der Passpunkte über die gesamte Kaverne konnte die aus dem Polygonzug gegebene Qualität der Georeferenzierung bestmöglich genutzt werden. Zusätzliche Kugeltargets dienten der Verknüpfung der Scans untereinander.

Mit dem Feldcomputer und der Herstellersoftware Z+F LaserControl konnte der Scanner angesteuert werden, wodurch eine erste Kontrolle der Resultate vor Ort durchführbar war. Dies ermöglichte es zudem, einzelne Bereiche gezielt mit einer höheren Auflösung zu scannen. Diese Möglichkeit wurde für die jeweils weiter entfernten Kugeltargets genutzt (Entfernungen über 20 m).

3. Auswertung

Die Auswertung erfolgte einerseits in der Software Z+F LaserControl, andererseits mit Geomagic. Jeder Scan produziert eine Punktwolke. Die Koordinaten liegen dabei im scannereigenen Koordinatensystem vor, welches seinen Ursprung am Scannerstandpunkt hat und eine zufällige Orientierung aufweist. Es gilt, die Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren um anschliessend ein 3D-Modell zu erstellen.

3.1. Koordinatentransformation zwischen Epochen

Zuerst wurde die Koordinatentransformation zwischen den einzelnen Epochen berechnet, wobei Epoche I als Referenz fungierte (Referenzscan). Vor diesem Arbeitsschritt besteht kein Bezug zwischen den verschiedenen Epochen, denn sowohl der Startpunkt als auch der Orientierungspunkt des Polygonzugs wurden in jeder Epoche neu gewählt. Mithilfe des Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus wird der Scan des Stollens aus Epoche II bzw. III inkrementell so lange verschoben, bis dieser im Sinne der kleinsten Quadrate am besten auf den Referenzscan passt. Ausführliche Informationen zu dem Algorithmus sind in Besl und McKay (1992) zu finden. Das Resultat ist eine Schätzung der sechs Parameter der Transformation bestehend aus einer 3D-Translation und einer 3D-Rotation. Durch die Anwendung der Transformation auf den Start- und Orientierungspunkt des Polygonzugs und die Neuberechnung des Zugs, liegen die Passpunkte der Epochen II und III im Referenzsystem aus Epoche I vor. Eine direkte Transformation der Passpunkte anstelle der Neuberechnung des Zugs wurde wegen der Auswirkung der Stehachsabweichung des Laserscanners nicht durchgeführt.

3.2. Georeferenzierung der Scans

In der Software Z+F LaserControl wurden auf allen Scans der jeweiligen Epoche alle Kugeltargets markiert und benannt. Das umfasst sowohl die Verknüpfungskugeln wie auch die tachymetrisch eingemessenen Kugeltargets (Passpunkte). Dabei bestimmt die Software den Mittelpunkt der Holzkugeln. Durch das Einführen der übergeordneten Koordinaten der Passpunkte werden die Punktwolken georeferenziert. Die Standardabweichung beim Passpunktmatching betrug nach der Ausgleichung jeweils weniger als 2 mm. Das bedeutet, dass die relative Genauigkeit innerhalb der Kaverne hoch ist und damit, dass die Unsicherheit des georeferenzierten Modells letztlich von der Unsicherheit des Polygonzugs dominiert wird.

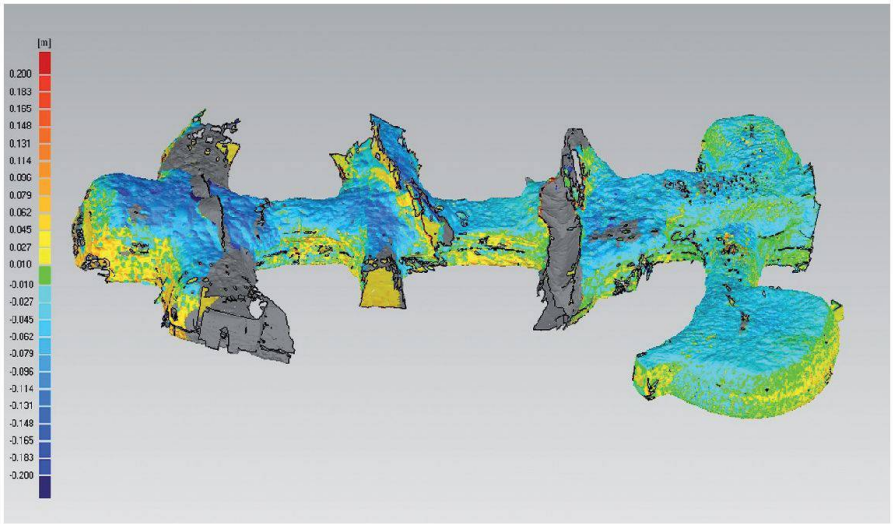

Abb. 3: Differenzmodell (vertikale Veränderungen) zwischen Epoche I und Epoche II. Die blaue Farbe zeigt eine Absenkung an.

3.3. Modellierung

Beim Transfer der Punktwolken von Z+F LaserControl in die Software Geomagic wurde der Reflektivitätsschwellwert auf 0.01% herabgesetzt. Standardmässig werden alle Messpunkte mit einer Reflektivität von unter 0.6% entfernt. Bei der stellenweise geringen Reflektivität von Eis führt das jedoch zu unvollständigen Punktwolken. Die Nachteile eines tiefen Schwellwerts sind der vermehrte Einschluss von Fehlmessungen sowie ein erhöhtes Messrauschen, besonders an Oberflächen, an denen der Laserstrahl annähernd parallel zur Flächennormalen eintritt. Im Fall der Eisgrotte überwiegen aber die Vorteile eines tiefen Schwellwerts.

Um die Anzahl der Punkte zu reduzieren, besteht der erste Arbeitsschritt in Geomagic in der Ausdünnung der Punktwolken auf eine einheitliche Auflösung. Ein Algorithmus entfernt Punkte aus wenig gekrümmten Regionen, um die Detailtreue trotz Reduktion der Punktanzahl beizubehalten. Nachdem offensichtliche Fehlmessungen manuell entfernt worden sind, kann die eigentliche Modellbildung ausgeführt werden. Die 3D-Vermaschung generiert aus der bearbeiteten Punktwolke ein flächenhaftes Modell (Triangulated Irregular Network, TIN). Dieses Modell dient sowohl der Visualisierung der Kaverne, als auch als Grundlage für die Detektion von Bewegungen zwischen den Epochen.

3.4. Vergleich der verschiedenen Epochen

Für den Vergleich zwischen den Epochen wurde der Abstand der Punkte aus Epoche II beziehungsweise Epoche III (Testmodelle) vom jeweils nächstgelegenen Punkt im Referenzmodell aus Epoche I berechnet. Ob es sich um einen gültigen Nachbarn handelt, wurde in einer Plausibilitätskontrolle anhand von zwei Parametern entschieden. Die beiden Punkte dürfen nicht weiter als 0.5 m voneinander entfernt sein. Zudem darf der Winkel zwischen dem Verbindungsvektor der beiden Punkte und der Flächennormalen

Epoche	Mittel I → III	Mittel extrapoliert I → III	Mittel I → II	Mittel extrapoliert I → II
Setzung Decke	25.0 ± 2 cm	42 ± 3.4 cm/Jahr	4.9 ± 2 cm	26 ± 10.6 cm/Jahr
Setzung Boden	11.6 ± 2 cm	20 ± 3.4 cm/Jahr	1.9 ± 2 cm	10 ± 10.6 cm/Jahr
Translation südwärts	19.0 ± 2 cm	32 ± 3.4 cm/Jahr	3.3 ± 2 cm	17 ± 10.6 cm/Jahr
Translation westwärts	17.6 ± 2 cm	30 ± 3.4 cm/Jahr	4.6 ± 2 cm	24 ± 10.6 cm/Jahr
Zeitspanne zwischen Epochen			**Messunsicherheit**	
Epoche I → II	68 Tage		angegeben durch ± 1 σ	
Epoche I → III	213 Tage			

Tab. 1: Zusammenfassung der Bewegungen. «Mittel» bezeichnet einen Mittelwert über eine Region mit homogener Bewegung.

am Referenzpunkt nicht grösser als 30° sein.

Der erhaltene Punktabstand wurde dann farbkodiert und im 3D-Modell visualisiert (siehe Abb. 3). An dieser Stelle muss betont werden, dass es sich dabei nicht um ein Punktmatching handelt. Eine einzelne berechnete Distanz entspricht nicht der Bewegung eines Eispartikels, sondern dem Abstand zwischen zwei nächstgelegen Punkten aus zwei Epochen.

Um ein besseres Bild der Veränderungen zu erhalten, wurden einzelne Bereiche, insbesondere einzelne Wände, gesondert analysiert. Unter der Annahme, dass sich ein ausgewählter Bereich homogen bewegt, kann einem Mittelwert einer Verschiebung eine physikalische Bedeutung zugeordnet werden.

4. Resultate und Diskussion

Die Erstellung eines 3D-Modells der Kaverne ist gelungen: Es eignet sich für Visualisierungs- und Planungszwecke (Vergleich Abb. 1). Zum anderen wurden die geometrischen Veränderungen des beweglichen Teils des Palastes erfasst. Die Kaverne hat sich hauptsächlich differentiell gesetzt und nach Südwesten bewegt. Über den Beobachtungszeitraum von sieben Monaten hat sich die Decke durchschnittlich um 25 cm, der Boden um 11.6 cm gesetzt. Die Grotte hat eine Translation um durchschnittlich 19 cm nach Süden und um 17.6 cm nach Westen erfahren. Diese Angaben aus dem Vergleich der Epochen I und III konnten durch den Vergleich der Epochen I und II bestätigt werden, auch wenn die Veränderungen über den wärmeren Sommer tendenziell etwas grösser ausfallen (siehe Tab. 1). Die Standardabweichung für eine einzelne berechnete Verschiebung zwischen zwei Epochen liegt bei 2 cm, wie eine Abschätzung ergeben hat. Damit sind die ermittelten Bewegungen signifikant. Gewisse Anteile an der Messunsicherheit konnten eindeutig berechnet werden, wie zum Beispiel die Messunsicherheit des Polygonzugs, andere Anteile beruhen auf Erfahrungswerten aus der Literatur, während wieder andere grob abgeschätzt werden mussten. Gerade die reflektorlose Distanzmessung auf Eis ist noch nicht ausreichend erforscht und sehr stark von der jeweiligen Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Offen ist auch die Frage nach systematischen Effekten, wie zum Beispiel der Penetration des Eises durch den Laserstrahl. Aus diesem Grund wurde ein konservativer Wert für die Schätzung der Messunsicherheit der einzelnen Distanzmessung angesetzt.

5. Fazit

In diesem Projekt ist es gelungen, TLS im blanken Eis anzuwenden. Dieses Resultat ist erfreulich. Nichtsdestotrotz sind noch viele Fragen offen, speziell was die reflektorlose Distanzmessung im Eis betrifft. Zukünftige Forschung wird sich auf diesen Aspekt konzentrieren müssen, damit TLS auch bei kritischen Vermessungsaufgaben und höheren Genauigkeitsanforderungen in einem derartigen Umfeld einsetzbar wird.

Aufgrund der relativ hohen Messunsicherheit und der fehlenden Punkt-zu-Punkt-Zuordnung konnten noch keine definitiven Aussagen über die kleinräumigen Veränderungen der Kaverne getroffen werden. Ein erster Eindruck von der Dynamik der Eisgrotte «Gletscher-Palast» auf dem Kleinen Matterhorn liegt nun jedoch vor. Im Gegensatz zu klassischen tachymetrischen Aufnahmen mögen die TLS-Messungen deutlich ungenauer sein, dafür liefern sie jedoch ein 3D-Modell für Visualisierungszwecke und bieten den Vorteil einer flächenhaften Erfassung von Veränderungen, die intuitiv interpretierbar sind.

Literatur:

Besl und McKay (1992): A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(2).

Schulz und Ingensand (2004): Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. In: Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage.

Willi (2012): Flächenhafte Aufnahme einer Gletschergrotte zur Bestimmung von Eisbewegungen mittels Laserscanning. Bericht zur Bachelorarbeit, ETH Zürich.

www.geomagic.com

www.zf-laser.com

www.leica-geosystems.ch

www.zermatt.ch/de/page.cfm/erlebnis/ausfluege/gletscher_palast

Daniel Willi
Pascal Willy Theiler
ETH Zürich
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Wolfgang-Pauli-Strasse 15
CH-8093 Zürich
dawilli@student.ethz.ch
pascal.theiler@geod.baug.ethz.ch