

Monitoring von Schneehöhen mittels terrestrischem Laserscanner zur Risikoanalyse von Lawinen

Arnold Bauer, JOANNEUM RESEARCH
Gerhard Paar, JOANNEUM RESEARCH

Zusammenfassung: Neben der Erfassung meteorologischer Daten (wie Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windgeschwindigkeit, etc.) und der Geländeform ist vor allem die Schneehöhe ein wesentlicher Parameter für die Lawinenprognose. Hierbei liefert die derzeit übliche punktuelle Vermessung nur unzureichende Informationen, insbesondere bei Hängen mit starken Schneeverfrachtungen. Eine kontinuierliche flächenhafte Erfassung der Schneedecke kann die Zuverlässigkeit einer Prognose wesentlich erhöhen. Rasterpunktmessungen mit Hilfe der Lasermesstechnik ermöglichen heute die genaue Bestimmung der Schneemächtigkeiten in lawinengefährdeten Hängen. Ein Überwachungssystem auf Basis eines terrestrischen Laserscanners vermisst vollautomatisch vordefinierte Regionen und erstellt ein Digitales Höhenmodell, woraus aus Vergleichsmessungen die aktuelle Schneehöhe sowie deren Veränderung ermittelt werden. Operationelle Installationen am Präbichl / Steiermark, sowie am Arlberg / Tirol liefern erstmals detaillierte Informationen über die örtliche und zeitliche Veränderung der Schneehöhen an die örtliche Lawinenkommission.

1 Einleitung

Lawinen stellen für viele Gebiete im alpinen Raum ein gravierendes Problem dar. Trotz vorhandener Schutzmaßnahmen wie Schneestützwürke, Dämme und Galerien kommt es immer wieder zu Lawinenabgängen, die mitunter großen Personen- und Sachschaden verursachen können. Aus diesem Grund hat die Prognose der akuten Lawinengefahr sowie die Risikoabschätzung eines Lawinenabganges einen besonderen Stellenwert. Die Wirksamkeit und Effizienz getroffener Maßnahmen ist dabei fast ausschließlich von der Qualität der Prognose abhängig. Ein unterschätztes Lawinenrisiko lässt die Schutzwirkung verschwinden, wenn z.B. ein Verkehrsweg im Falle eines Lawinenabganges nicht gesperrt war. Ein überschätztes Lawinenrisiko hingegen ist mit hohen Kosten verbunden und lässt das Risiko der Ignoranz der Warnung steigen, wenn z.B. der Verkehrsweg zu lange gesperrt wurde.

In letzter Zeit wurden zahlreiche computergestützte Modelle für die Lawin prognose entwickelt (Geigl, 1999; Brun, 1992; Lehning, 1998; Jordan, 1991). Diese Expertensysteme berücksichtigen dabei zahlreiche meteorologische Parameter wie z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit und -Richtung, um Rückschlüsse auf die Beschaffenheit und Stabilität der Schneedecke zu gewinnen.

Abgesehen davon sind Informationen über die Entwicklung der Schneedecke von großer Bedeutung. Dies konnte bis vor kurzer Zeit nur über punktuelle Pegelmessungen abgeschätzt werden. Oftmals sind solche Messungen direkt am Lawinengang (im speziellen in den Anrissregionen von Lawinen) aufgrund der Unzugänglichkeit von vornherein unmöglich.

Neben den oben erwähnten Faktoren ist die Beobachtung der flächenhaften Veränderung der Schneehöhe ein entscheidender Parameter für ein gutes und zuverlässiges Prognosesystem. Grosse Fortschritte im Bereich der Lasermess technik und Sensorik ermöglichen den Einsatz von Lasermesssystemen auch in diesem Anwendungsbereich. Damit kann über Entfernungsmessungen die Schneehöhe in potentiell lawinengefährdeten Hängen laufend erfasst werden.

Für die Risikoanalyse eines lawinengefährdeten Hanges ist zudem die Exposition und Neigung des Hanges entscheidend. Das von einem Laserscanner gelieferte Geländemodell ist weitaus genauer und erlaubt eine wesentlich detailliertere Betrachtungsweise der Geländeform, beispielsweise für den Einfluss der Sonneneinstrahlung.

2 Laserscanner

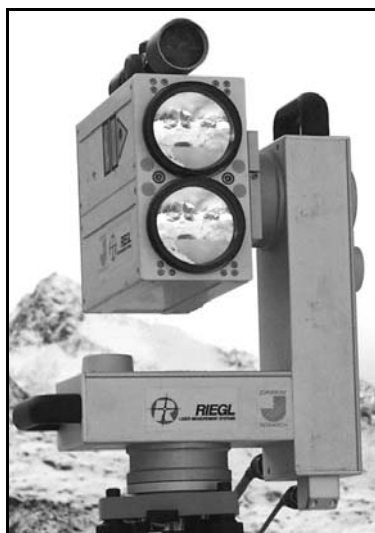
Laser Range Finder liefern im allgemeinen einzelne Distanzmessungen als Funktion zweier Winkel im Kugelkoordinatensystem. Range Scanner kombinieren viele solcher Messungen zu einem regelmäßigen Gitter. In Kombination mit einer mechanischen Ablenkeinheit erfolgt eine punktuelle Vermessung von unterschiedlichen Raumrichtungen. Aus der Anordnung aller vermessenen Raumrichtungen resultieren Entfernungsbilder, welche die Geometrie der Umgebung wiedergeben (Abbildung 3). Aufgrund der eigenständigen aktiven Beleuchtung ist man dabei nicht auf Umgebungslicht angewiesen.

Eines der wenigen am Markt verfügbaren Geräte, die eine große Reichweite von weit über einem Kilometer abdecken, ist der Long Range Laserscanner LPM98-2k (Abbildung 1, links) der Firma Riegl Laser Measurement Systems (<http://www.riegl.co.at>).

Durch präzise Schrittmotorsteuerung und Aufhängung kann eine Positioniergenauigkeit von wenigen Bodensekunden erreicht werden (wenige mm in 1 km Entfernung). Die Entfernung wird durch Laufzeitmessung eines gepulsten Laserstrahls mit einer Wellenlänge von 900 nm (nahes Infrarot) bestimmt, wobei abhängig von der Messzeit pro Punkt hunderte Einzelmessungen gemittelt wer-

den. Die Entfernungsgenauigkeit liegt im Mittel bei etwa 5 cm. Der Durchmesser eines Messpunktes beträgt in den meisten Fällen etwa 1 mrad, das entspricht einem Meter auf 1000 m Entfernung. Die Reichweite ist im wesentlichen abhängig von der Intensität des ausgesandten Laserstrahls, der Messzeit und der Reflektivität der Oberfläche. Aufgrund der guten Reflektivität von Schnee ist bei guten äußeren Bedingungen eine Reichweite von über 2000 m möglich. Abbildung 1 gibt einen Überblick über wesentliche technische Parameter des Laserscanners.

Dieses Messsystem ist seit etwa 4 Jahren für die Geländeüberwachung im Einsatz. Erste Erfahrungen wurden beim Felssturz des Eiblschrofen in Schwaz / Tirol gewonnen (Scheikl, 2000; Paar, 2000). Im EU Forschungsprojekt SAMPLE (Snow Avalanche Monitoring & Prognosis by Laser Equipment) wurden die Grundlagen des Messsystems erarbeitet (Steffan, 2001). Zur Zeit wird das System zur Überwachung von felssturzgefährdeten Hängen, zur Beobachtung von Gletschern (Bauer, 2003), sowie zur Überwachung von lawinengefährdeten Hängen am Arlberg eingesetzt (Paar, 2001).



Scannerparameter	Wert / Bereich
Reichweite für	
gut diffus reflektierende Targets	Bis zu 2500 m
schlecht diffus reflekt. Targets	> 800 m
Minimale Distanz	10 m
Genauigkeit Distanzmessung	+/- 25 mm
Genauigkeit Positionierung	+/- 0.01 gon
Messzeit / Punkt	0.25 s to 1 s
Divergenz des Messstrahls	1.2 mrad
Wellenlänge	0.9 μm
Scanbereich horizontal/vertikal	400 / 180 gon
Laser Sicherheitsklasse	3B, EN 60825-1
Stromversorgung	11-18 V, 10 VA
Betriebstemperaturbereich	-10 to +50 $^{\circ}\text{C}$

Abbildung 1: Technische Parameter des Laserscanners LPM-2k von Riegl.

3 Lasermessung

Der Laserscanner wird von einem PC über eine RS-232 Schnittstelle gesteuert, auf der sowohl die Kontrollbefehle, als auch die Messdaten übertragen werden. Die Serversoftware dient einerseits der autonomen und stabilen Steuerung des Messgerätes, andererseits werden die Messdaten sofort online ausgewertet und in einer geeigneten Datenbank verwaltet. Der Anwender kann jederzeit die gewünschten Ergebnisse von außen abrufen.

3.1 Standort

Bei der Auswahl eines geeigneten Standortes für die Messstation ist eine möglichst direkte (normale) Sicht auf den zu beobachtenden Lawinengang (z.B. Gegenhang) erforderlich. Der Laserscanner wird in einem wetterfestem Gehäuse auf einer erschütterungsfreien und fixen Konsole montiert (Abbildung 2).

Die Anbringung von Referenztargets in Sichtbereich des Scanners ermöglicht den wiederholten Vergleich von Messungen über einen langen Zeitraum (siehe 4.1).



Abbildung 2: Laserscanner LPM-2k im wetterfesten Gehäuse montiert auf einer Konsole nahe der Valluga Seilbahnstation am Arlberg / Tirol.

3.2 Messung

Messungen können in Form von Punktmessungen oder rechteckigen Bereichen durchgeführt werden, sogenannten Regions-of-Interest. Zudem werden Aufgaben definiert, in denen der zeitliche Ablauf der Messungen, sowie die Auswertungsschritte für diese Region mit den entsprechenden Parametern festgelegt werden. Die große Anzahl von Aufnahmedaten sowie Auswertungsergebnissen wird in einer datenbankähnlichen Struktur gespeichert und verwaltet.

Die Ansteuerung des Laserscanners ermöglicht eine automatische wiederholte Aufnahme der definierten Regionen, wobei die Rasterdichte und bestimmte Scannerparameter frei konfigurierbar sind.



Abbildung 3: Laser-Entfernungsmessung vom Präbichl / Steiermark (grauwertkodiert: schwarz = 10 m, weiss = 1200 m)



Abbildung 4: Reflektivität des Laserstrahls an der Oberfläche zu Abbildung 3 (grauwertkodiert: hell = gute Reflektivität, dunkel = schlecht). Teilregionen und Referenztargets sind markiert.

Ob eine Entfernungsmessung erfolgreich durchgeführt werden kann, ist im wesentlichen von der Reflektivität der Oberfläche abhängig. Schnee und Fels reflektieren sehr gut, wohingegen Vegetation die meiste Energie des Laserstrahls absorbiert. Wetterbedingte Unterbrechungen ergeben sich durch dichten Nebel oder Niederschlag.

Aus diesem Grund kommen verschiedene Strategien zum Einsatz, damit abhängig von den äußeren Bedingungen möglichst viele Informationen gesammelt werden können. So kann, wenn durchziehender Nebel die aktuelle Messung behindert, automatisch eine andere Messregion versucht werden. Außerdem

können Regionen mit Prioritäten versehen werden, damit bei schlechten Wetterverhältnissen, sofern ein Zeitfenster Messungen ermöglicht, die wichtigen Regionen zuerst bereitgestellt werden können. Auch kann eine Messung zuerst in einem groben Raster gescannt und dann stufenweise verfeinert werden.

Für jeden Messpunkt erhält man zusätzlich zu den Entfernungsdaten die exakte Winkelposition, aber auch noch andere Informationen, wie die Reflektivität der Oberfläche und die Standardabweichung (über die Teilmessungen), die Rückschlüsse über die Güte der Messung zulassen.

Die Referenzmessung (Nullmessung), auf die sich alle Folgemessungen zur Ermittlung der Schneehöhe beziehen, wird vor dem ersten Schnee durchgeführt.

4 Datenauswertung

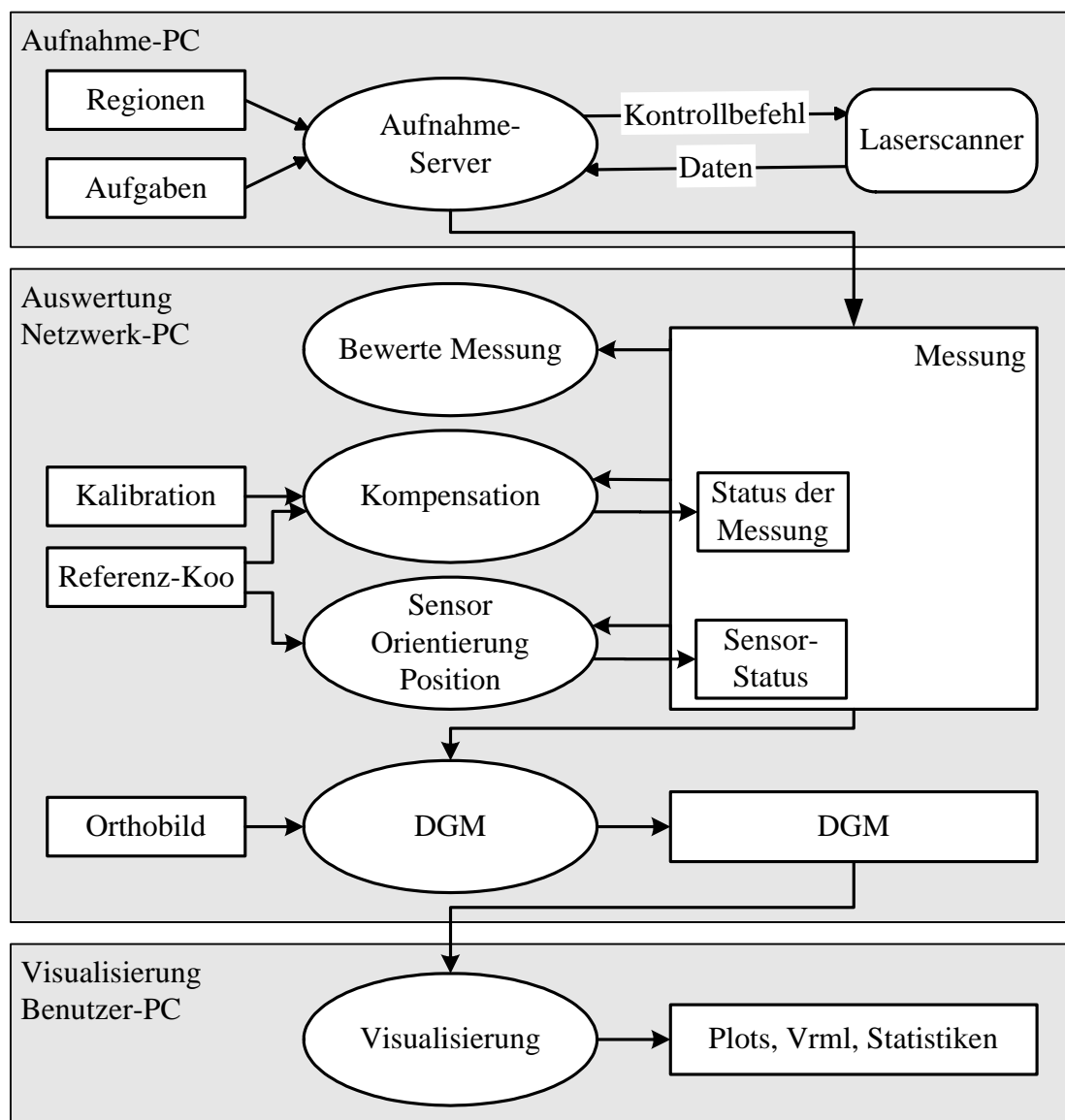


Abbildung 5: Überblick über das Lasermesssystems für Schneehöhenmonitoring.

4.1 Sensor-Orientierung

Um die Vergleichbarkeit einzelner Messungen zu gewährleisten, müssen der Standpunkt und die Ausrichtung des Sensors in einem gemeinsamen Koordinatensystem bekannt sein.

Dazu werden reflektierende Targets rund um den Scannerstandpunkt beobachtet (Abbildung 6, links). Als Targets eignen sich dafür entweder mit reflektierender Folie beschichtete kreisrunde Tafeln oder aber herkömmliche in der Geodäsie verwendete Reflektorprismen. Von Bedeutung dabei ist einerseits eine gute Reflektivität des Laserstrahls gegenüber der Umgebung, andererseits die kreisrunde Form, die eine hochgenaue Lokalisation erlaubt.

Die Targets werden dabei mehrmals täglich mit einer kleinen Gitterweite gescannt, wobei eine kleine Umgebung rund um das Target miteinbezogen wird. Abbildung 6 zeigt ein solches Target und die zugehörige Scannermessung.

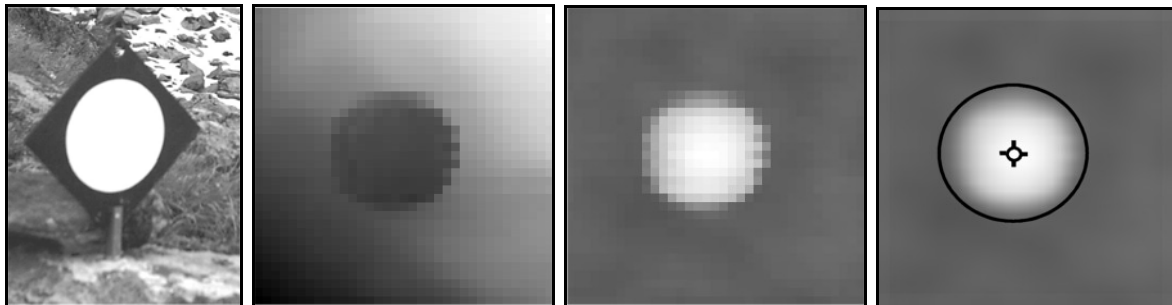


Abbildung 6: Reflektierendes Target zur Orientierung des Scanners. Links: Targettafel mit kreisrunder Reflexionsfolie; Mitte links: Entfernungsmessung; Mitte rechts: Reflektivität; Rechts: Target-Lokalisation.

Die Position des Targets wird aus den Reflektivitäts- Messwerten ermittelt, wobei ein Verfahren zur Zentroid- Lokalisation die Winkelkomponenten im sphärischen Scannerkoordinatensystem liefert. Die Distanz wird als gewichtetes Mittel aller Einzelmessungen am Target bestimmt. Dazu wird ein Subsampling durchgeführt, da die Originalmessung nicht notwendigerweise ein reguläres Gitter beschreibt.

Da die aktuelle Version dieses Messgeräts keinen elektronischen Nivelliersensor (wie der eines Standard- Theodoliten) besitzt, ist es notwendig, alle Parameter für Position und Orientierung zu bestimmen. Eine Standard-Transformationsmethode bestimmt dafür einen Verschiebungsvektor und eine Rotationsmatrix, wobei die Sensorposition optional festgehalten werden kann.

Die Referenztargets werden außerdem dazu verwendet, um Parameter für die Kompensation der Entfernungsmessung aufgrund von Sensoreigenheiten und atmosphärischen Einflüssen zu bestimmen. Dies passiert einerseits durch eine einmalige Kalibration des Messgeräts im Labor, andererseits durch Berücksichtigung der lokalen Situation vor und nach jeder Messung einer Region.

All diese Parameter (Transformation, Rotation, Kompensation) definieren den Sensorstatus der Messung, der zusammen mit den Messdaten in der Datenbank abgelegt wird.

4.2 Digitales Höhenmodell

Um einzelne Messungen vergleichen zu können, werden sie in ein geeignetes gemeinsames Referenzsystem transformiert. Die Berechnung der Schneedicke wird aus der Entfernung des Auftreffpunkts des Laserstrahls auf der Oberfläche und der Hangneigung am Messpunkt abgeleitet. Das Ergebnis ist ein Digitales Geländemodell (DGM), das an jedem Punkt der vorgegebenen Referenzfläche (i.A. eine Horizontalebene) den Normalabstand zu dieser Fläche speichert. Diese Datenstruktur eignet sich am besten für die Anforderungen dieser Anwendung, um Differenzen und Volumina zu berechnen, Visualisierungen zu erstellen und um schnellen direkten Datenzugriff in einer definierten Geometrie bereitzustellen.

Als erstes werden die Güte der Messung bewertet und unzuverlässige Einzelmessungen verworfen. Anschließend wird jede Messung gemäß dem zugehörigen Sensorstatus in ein georeferenziertes Koordinatensystem transformiert.

Die direkte Abbildung vom sphärischen Sensor-Koordinatensystem in das kartesische System des Höhenmodells resultiert in einem spärlich und ungleichmäßig besetztem DGM, vor allem bei großen Entfernungen und flachem Winkel zur Oberfläche. Die notwendige Interpolation im Zielkoordinatensystem führt zu fehleranfälligen und unsicheren Ergebnissen.

Besser geeignet ist die Laser- Locus- Methode (Kweon, 1992), welche die Oberflächenhöhe direkt im Sensorsystem berechnet. Für jeden Gitterpunkt auf der Referenzfläche wird eine hypothetische vertikale Gerade betrachtet. Der Schnitt dieser Geraden mit der beobachteten Oberfläche wird unter Verwendung der gleichmäßig verteilten Messungen direkt im Sensorsystem durchgeführt. Das Ergebnis ist ein dicht besetztes DGM mit vorgegebener Auflösung und Genauigkeit.

Die Differenz zweier DGM mit derselben Referenzoberfläche kann direkt zur Beschreibung der Schneehöhenveränderung zwischen den beiden Messungen verwendet werden. Daraus lassen sich Ergebnisse wie die absolute Schneehöhe, der Schneezuwachs zwischen zwei Zeitpunkten, Schneeprofile, Volumensänderungen und ähnliches in statistischer und grafischer Form ableiten.

4.3 Visualisierung

Da das Ergebnis in einem georeferenzierten Koordinatensystem vorliegt, kann eine geeignete Repräsentation der Daten nach individuellen Anforderungen durch kommerzielle Systeme bereitgestellt werden. Zur Zeit verfügbare Darstellungsmethoden sind:

- Falschfarbenkodierung der Schneehöhenveränderung, die dem Orthobild überlagert wird (Abbildung 7)
- Animierte 3D-Darstellung
- Definierbare Profilschnitte
- Statistische Auswertungen auf Teilregionen, statistische Trends
- Volumsberechnungen für den Schneehöhenzuwachs,

Diese Ergebnisse liefern der örtlichen Lawinenkommission zusätzliche Informationen für eine objektive Risikoeinschätzung der momentanen Lawinengefahr. Die Daten können jederzeit über eine Internet- oder Mobilfunkverbindung auf einen zentralen Server übertragen werden.

5 Messkampagne Arlberg

Im Skigebiet Arlberg / Tirol wird seit dem Winter 2000/2001 ein automatisches Lasermesssystem zum Monitoring der Schneehöhen in einer Kooperation zwischen JOANNEUM RESEARCH und DIBIT Measurement Systems (<http://www.dibit-scanner.at/>) eingesetzt.

Der Laserscanner wurde auf einer stabilen 2 m hohen Konsole nahe der Mittelstation der Valluga- Seilbahn auf etwa 2000 m Seehöhe aufgestellt. Der Scanner befindet sich in einem wetterfesten beheizbaren Gehäuse aus Glas mit Rundumsicht (Abbildung 2). Die Stromversorgung des Messgeräts erfolgt über ein Erdkabel zur Bergstation, wo sich auch der Steuerungsrechner befindet. Die Kommunikation vom PC zum Rechner erfolgt über ein Funkmodem.

Bereits im Herbst wurde die Referenzmessung ohne Schneedecke vorgenommen. Dabei wurden alle relevanten Regionen mit einer hohen Auflösung mehrmals gescannt, wobei meist bei stabilen Temperatur- und Witterungsverhältnissen vorwiegend in den Nachtstunden gemessen wurde.

Für die Orientierung des Sensors wurden 7 Referenztargets in guter räumlicher Verteilung im Sichtbereich des Scanners montiert. Diese Targets wurden geodätisch im Landeskoordinatensystem eingemessen, wodurch die Geokodierung der Scannerdaten ermöglicht wird. Diese Referenztargets wurden während der gesamten Messperiode 4 mal täglich mit hoher Auflösung gescannt.

Alle relevanten Regionen wurden 2-3 mal täglich automatisch gemessen und ausgewertet. Das Ergebnis wurde als Grafik und 3D-Modell bereitgestellt, wobei die Schneehöhe (Differenz der aktuellen Messung mit der Referenzmessung ohne Schnee) und die Schneehöhenveränderung (Differenz der aktuellen Messung zur Letztmessung) farblich kodiert auf das Orthobild projiziert wurden.

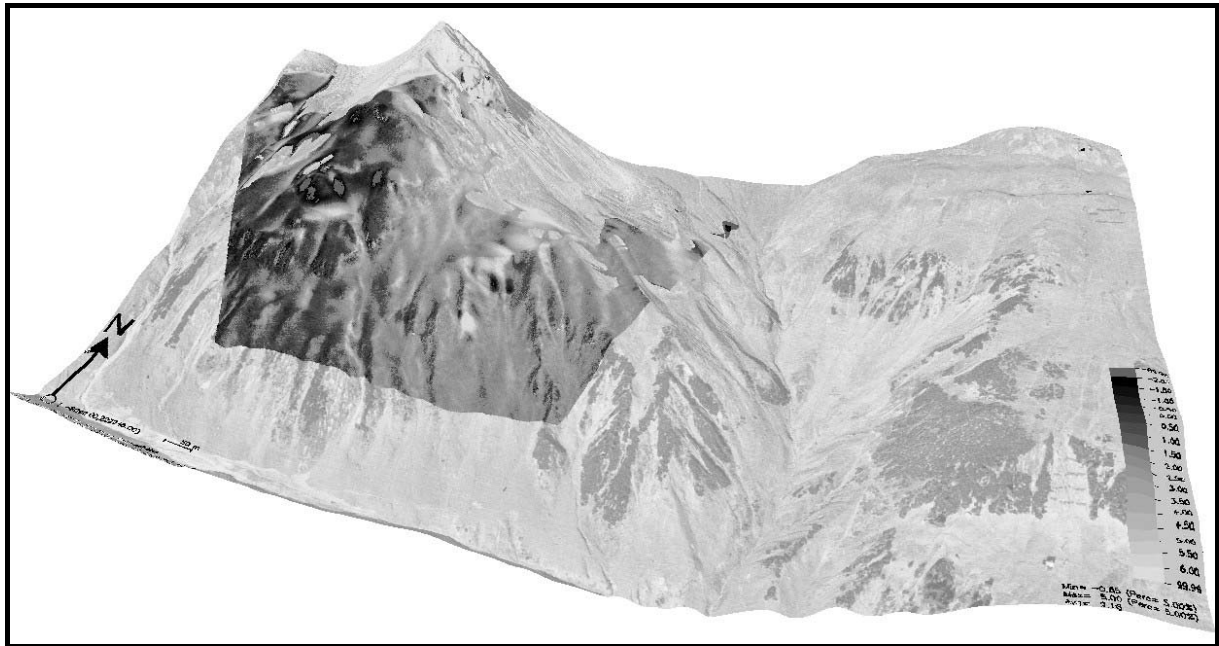


Abbildung 7: 3D Darstellung der Schneehöhenveränderung über einen Zeitraum von 2 Wochen (graukodiert: schwarz=-2m, weiss=6m) überlagert auf dem Orthobild.

6 Zusammenfassung

Mit einer maximalen Reichweite von über 2 km auf natürlich reflektierende Oberflächen, einem weiten Sichtfeld, und einer Genauigkeit für die Entfernungsmessung von weniger als 5 cm ist ein terrestrischer Laserscanner ein geeignetes Messgerät für die Erfassung der Schneehöhe. Die Software- und Hardwarekomponenten eines vollautomatischen Überwachungssystems wurden beschrieben. Die Ergebnisse des Prototyp- Systems, das seit 3 Winter am Arlberg im Einsatz ist, zeigen die praktische Tauglichkeit und die Brauchbarkeit der damit gewonnenen Daten. Kontinuierlich werden Datensätze mit Schneehöhen vom gesamten Lawinengang generiert, die es erlauben, die Verteilung und Volumsänderungen durch Schneefall, Windverfrachtungen, Schmelzprozesse oder Lawinenabgängen zu quantifizieren. Die unmittelbare Verfügbarkeit der Ergebnisse erlaubt eine Integration in ein Expertensystem zur Risikoabschätzung und Voraussage von Lawinen.

7 Ausblick

Neben der kontinuierlichen Beobachtung von lawinengefährdeten Hängen wird in diesem Winter versucht, die Ausbildung von Lawinenabrisskanten (sogenannten Lawinenmäulern) zu beobachten. Die Detektion derselben ist naturgemäß ein weiteres Indiz für ein erhöhtes Lawinenrisiko.

Weitere relevante Parameter zur Lawinenprognose könnten die Schneeoberflächenbeschaffenheit und andere Materialeigenschaften sein, die sich möglicherweise aus der Verteilung der einzelnen Laserreflexionen ableiten lassen.

Zukünftige Untersuchungen konzentrieren sich auch auf eine fundierte Überprüfung der Sensorgenauigkeit (systematische Fehler) in bezug auf verschiedene Einflüsse und Artefakte durch die Reflektivität der Oberfläche und der atmosphärischen Bedingungen.

Neben der Lawinenprognose kann dieses Messsystem auch eine wichtige Datenbasis zur Verifikation, aber auch für die Bestimmung von Anfangs- und Randbedingungen von dreidimensionalen Lawinensimulationsmodellen liefern.

Literatur:

- BAUER, A., PAAR, G., KAUFMANN, V. [2003]: Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring, In Proc. of the 8th Conference on Permafrost. Zurich.
- BRUN, E. [1992]: A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology 38, 128.
- GEIGL, B.C., MOSER, A. [1999]: NAFTA – New Avalanche Forecasting Technologies – A Fuzzy Logic based Expert System. Xcalar Tagung Innsbruck
- JORDAN, R. [1991]: A one-dimensional temperature model for a snow-cover: Technical description for SNTHERM.89, Special Report 91-16, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.
- KWEON, I. S., KANADE, T. [1992]: High-resolution terrain map from multiple sensor data. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, S. 278-292, 14(2)
- LEHNING, M. [1998]: The mass and energy balance of the SNOWPACK model. EOS, Transaction, American Geophysical Union, Fall Meeting Supplement, 79, 45.
- PAAR, G., BAUER, A. [2001]: Terrestrial long-range laser scanning for high-density snow cover measurement. In Proc. of the 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques. Vienna.
- PAAR, G., NAUSCHNEGG, B., ULLRICH, A. [2000]: Laser scanner monitoring – technical concepts, possibilities and limits, Workshop on advances techniques for the assessment of natural hazards in mountain areas, June 4-6, Igls, Austria.
- SCHEIKL, M., POSCHER, G., GRAFINGER, H. [2000]: Application of the new automatic laser remote monitoring system (ALARM) for the continuous observation of the mass movement at the Eiblschrofen rock fall area – Tyrol. Workshop on Advances Techniques for the Assessment of Natural Hazards in Mountain Areas, June 4-6 2000, Igls, Austria.
- STEFFAN, H., BAUER, A., SCHAFFHAUSER, H., RANDEU, W. [2001]: SAMPLE - Snow Avalanche Monitoring and Prognosis by Laser Equipment. Final Report. EU Target Area II regional support funded, Styrian Government Ref. AAW 11 L 6 97 /5

Anschriften:

JOANNEUM RESEARCH:

Arnold Bauer
Institut für Digitale Bildverarbeitung
Wastiangasse 6
A-8010 Graz
arnold.bauer@joanneum.at

Gerhard Paar
Institut für Digitale Bildverarbeitung
Wastiangasse 6
A-8010 Graz
gerhard.paar@joanneum.at