

Airborne Laserscanning: Effizientes Werkzeug für die Geowissenschaften

In den vergangenen zehn Jahren hat sich Airborne Laserscanning (ALS) als wichtige Methode für die Aufnahme von digitalen Geländemodellen etabliert. Die Technologie ermöglicht im Vergleich zur Photogrammetrie eine deutlich bessere horizontale Auflösung bei ähnlicher oder gar besserer Genauigkeit. Die Vorteile dieser Methode lagen in der Vergangenheit primär bei der grossflächigen Erfassung von digitalen Terrainmodellen (DTM) oder bei der Aufnahme von digitalen Oberflächenmodellen (DOM), beispielsweise als Basis für 3D Gebäudemodelle oder zur Dokumentation von Hochspannungsfreileitungen. Die stetige Weiterentwicklung sowie die höhere Verfügbarkeit von Sensoren und die verbesserte Auswertesoftware erlauben einen effizienten Einsatz auch in kleinräumigen Gebieten. Damit eröffnet sich für das ALS ein weites Feld neuer Anwendungen.

JÜRIG LÜTHY & ALAIN GEIGER

Basis-Technologien

Ein Airborne Laserscanning (ALS) besteht aus drei wesentlichen Subsystemen: Erstens braucht es das eigentliche Distanzmessgerät mit dem Laserscanner, zweitens muss die Position der Messplattform bestimmt werden und drittens ist die Kenntnis der Fluglage und damit der «Blickrichtung» des Lasersystems notwendig. Verschiedene Laserscanning Methoden, Techniken und Instrumentierungen werden zur Geländeaufnahme entwickelt und eingesetzt. Das hier beschriebene System setzt Swissphoto in verschiedenen Projekten operationell ein. In Abbildung 1 ist das Gesamtsystem schematisch dargestellt.

Die Distanzmessung basiert auf der Laufzeitmessung eines Laserpulses. Ein Laserpuls wird über ein Spiegelsystem von der Sensorplattform zum Boden gesandt, dort reflektiert und wieder beim Sensor empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen Ausstrahlung und

Detektion kann die Distanz bestimmt werden. Durch Drehung des Spiegels wird der Laserstrahl quer zur Flugrichtung bewegt und somit wird das Gelände streifenweise gescannt. Aus der Geschwindigkeit der Sensorplattform, z.B. Geschwindigkeit des Flugzeuges, und der Scanfrequenz, das heisst der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels, ergibt sich der Abstand zwischen zwei Scanlinien. Der Abstand zwischen den einzelnen Scanpunkten ist abhängig von der Pulswiederholrate (aktuell werden 30 – 100 Kilohertz unterstützt), dem Öffnungswinkel (bis zu 50 Grad Field of View) und der Scanrate. Typischerweise wird eine gleichmässige Verteilung der Punkte quer und längs der Flugrichtung angestrebt. Die Systemparameter werden so eingestellt, dass sich, je nach Applikation, ein mittlerer Punktabstand von 25 cm bis 5 m ergibt. Moderne Systeme messen gleichzeitig die Intensität des reflektierten Pulses, was eine radiometrische

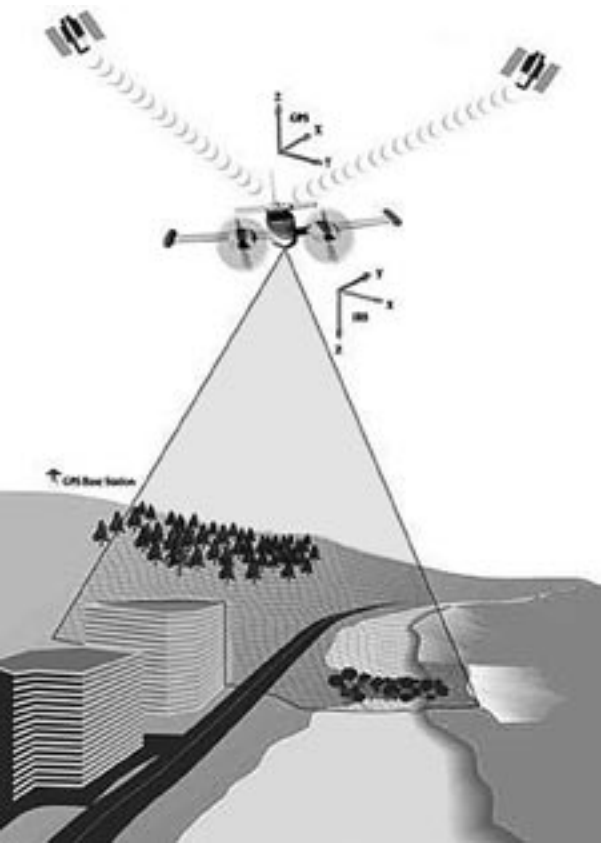


Abb. 1: Prinzip des Airborne Laserscannings. GPS und Inertiales Messsystem dienen der Positions- bzw. der Lagebestimmung und der Laserscanner der Distanzmessung (Bild www.optech.on.ca).

Interpretation ermöglicht. Eine Überlagerung der gemessenen 3D-Geometrie mit den Intensitäten ergibt ein 3D-Bild im entsprechenden Frequenzbereich (hier: Infrarot). Abbildung 2 dokumentiert eindrücklich, wie die Intensitätsinformation das rein geometrische Bild klar und verständlich macht: Auf Grund des unterschiedlichen Reflexionsverhaltens zeichnen sich Felspartien deutlich von Schnee und Eis ab.

Die Position der Plattform wird mittels differentiellem GPS mit einer Messrate von 2 bis 10 Hertz bestimmt. Zur Orientierung der Plattform und zur

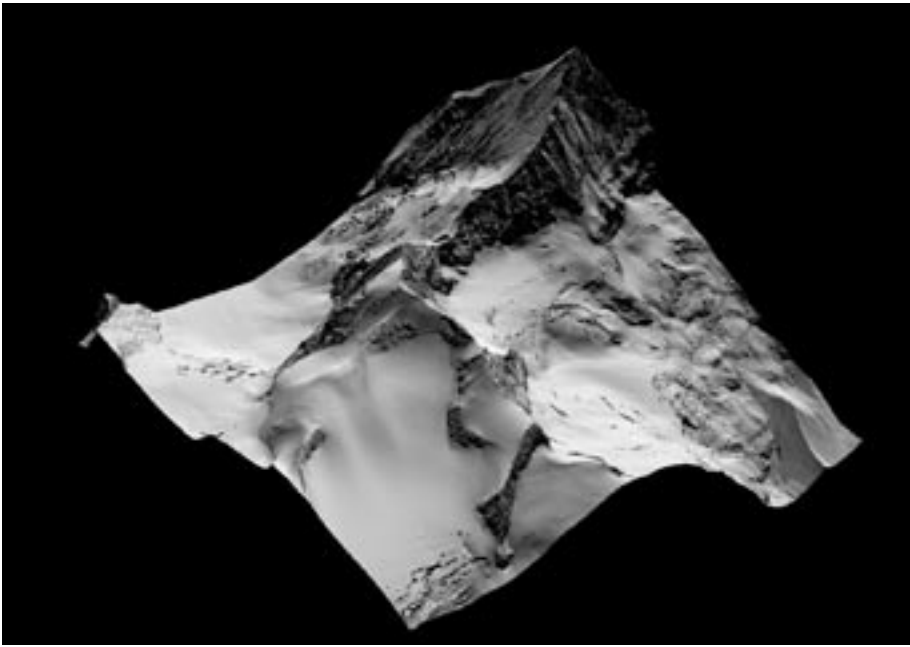
Verbesserung der GPS-Lösung (Bestimmen der Beschleunigungen in den drei Achsen) wird ein Inertiales Messsystem eingesetzt. Das Inertiale Messsystem zeichnet die Messungen mit einer Rate von bis zu 200 Hertz auf. Im Post-Processing wird zuerst die kinematische GPS-Lösung bestimmt und anschliessend zusammen mit den Messungen des Inertialen Systems in einem Kalman-Filter verdichtet. Kürzere Messlücken bei der GPS-Positionierung können dadurch ohne Genauigkeitsverlust durch die Messungen im inertialen System interpoliert werden. Im nachfolgenden Prozess werden die geografischen Koordinaten der gemessenen Punkte bestimmt. Dazu muss die Position und die Orientierung der Sensorplattform mit der Distanz und dem Ablenkwinkel der Einzelmessung kombiniert werden. Da die GPS-Lösung auf dem WGS84-Ellipsoid beruht, bedarf es noch einer Transformation ins Landeskoordinatensystem, bevor die weiteren Auswertungen starten.

Jeder einzelne Laserreflexionspunkt kann allein an Hand der Flugposition, der Fluglage und der Distanz exakt georeferenziert werden, unabhängig von terrestrischen Kontrollpunkten. Es ist daher möglich, auch abgeschiedene und unzugängliche Gebiete mit einer Genauigkeit von 10 bis 30 cm zu erfassen.

Das Digitale Terrainmodell (DTM) und das Digitale Oberflächenmodell (DOM)

In einem ersten Schritt wird aus den Rohdaten eine georeferenzierte dreidimensionale Punktwolke generiert. Danach sind die Punkte entsprechend den Anforderungen an die Endprodukte zu prozessieren. Normalerweise werden in einem nächsten Schritt die

Abb. 2: Oberes Gabelhorn: Visualisierung von Laserpunkten, Das Bild entstand nur auf Grund der aufgenommenen Geometrie (Distanzmessungen) und den gleichzeitigen Intensitätsmessungen (Grauwerte aus Intensitätsmessung) Selbst Gletscherspalten werden durch das Lasersystem erfasst. Deutlich ist auch der Gewinn durch die Intensitätsmessung (Unterschied Fels-Schnee/Eis und unterschiedlicher Reflexionsgrad innerhalb von Schneeflächen). (© Swisssphoto)



Bodenpunkte extrahiert. Die grossen Datenmengen erfordern Algorithmen, die nicht nur effizient, sondern auch zuverlässig arbeiten. Verschiedene Ansätze sind in den vergangenen Jahren präsentiert worden, wobei jeder seine Stärken und Schwächen aufweist und in schwierigem Gelände typischerweise 90 % der Punkte, in einfacherem bis gegen 100 % richtig klassifiziert. Die Unsicherheiten in der Klassifizierung der Bodenpunkte gibt es in folgenden Situationen:

- Punkte nicht als Bodenpunkt erkannt:
- entlang steiler Kreten und Bergspitzen,
 - in steilen Einschnitten,
 - an überhängenden Felswänden,
 - bei geringer Punktdichte aufgrund von dichter Vegetation (schlechter Penetration) wie z.B. in Fichtenschonungen oder bei Befliegung nach Vegetationsausbruch.

Umgekehrt werden Punkte fälschlicherweise als Bodenpunkt klassifiziert:

- auf kleinen Brücken und Stegen,
- auf sehr grossen Industriebauten,
- auf Gebäuden, die auf zwei oder gar drei Seiten in den Boden übergehen,
- auf niedriger Vegetation, häufig in Kombination mit geringer Punktdichte.

Nach der automatischen Klassifizierung muss deshalb eine visuelle Qualitätskontrolle stattfinden. Beim operativen Prozessieren von Laserscanning Produkten hat sich gezeigt, dass die Fehler der Klassifizierung gut erkannt werden können, wenn das digitale Geländemodell, die Hangneigung, die Höhenkurven, das Punktdichtegrids und das Orthophoto, d.h. Pixelkarte miteinander kombiniert werden.

Die Problematik liegt aber nicht nur beim Algorithmus allein. Zum einen kann die Definition des digitalen Terrainmodells je nach Anwendungsgebiet leicht abweichen. Andererseits ist

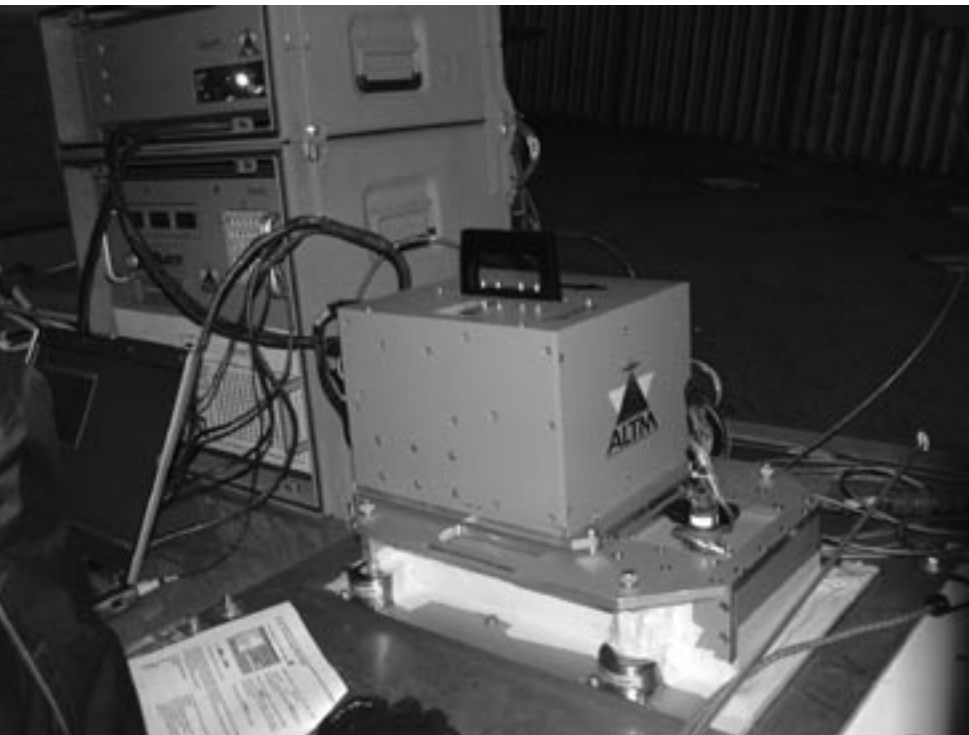


Abb. 3: ALS System ALTM3100 von Optech betriebsbereit in einem Pilatus-Porter eingebaut. In der Box im Vordergrund (ALTM) befindet sich der Laserscanner. Dahinter sind die Steuer- und Registrierheiten zu sehen. Flugrichtung nach rechts.

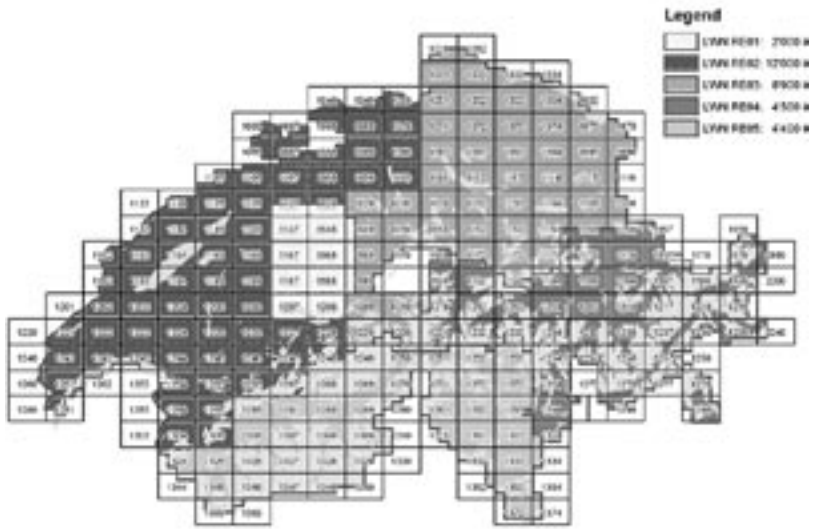
es auch für den geübten Operator nicht immer klar zu erkennen, ob ein Punkt das Terrain oder ein niedriges Objekt beschreibt. Hier zeigt sich der Nachteil zu anderen Messmethoden: es ist nämlich nicht immer nachvollziehbar, welches Objekt des angestrahlten Bereichs ausschlaggebend für die Registrierung ist. Jedoch sind die Auswirkungen meistens klein, da dieses Problem vorwiegend im Wald auftritt, wo die Anforderungen an die Genauigkeit eines Terrainmodells geringer sind, als im offenen Gebiet.

Aus den klassifizierten Punkten können anschliessend verschiedene Modelle für unterschiedliche Anwendungszwecke erzeugt werden. Das Terrainmodell wird bevorzugt durch eine Triangulation mit einer linearen Approximation dargestellt. Damit können auch Datenlücken interpoliert

werden. Die grosse Datenmenge überfordert aber viele Programme, daher muss für Anwendungen, welche auf eine Dreiecksvermaschung angewiesen sind, die Punktdichte reduziert werden. Beispielsweise konnte im Projekt «Landwirtschaftliche Nutzflächen» (siehe weiter unten), unter Beibehaltung der geforderten Genauigkeit, die Punktzahl um den Faktor zwei bis drei verringert werden.

Bei der Berechnung eines digitalen Oberflächenmodells spielt die Interpolationsmethode eine untergeordnete Rolle, wenn der mittlere Abstand zwischen den Messpunkten die gleiche Grössenordnung aufweist wie die Punktauflösung des angestrebten Modells. Zur Generierung von Umrissflächen wird häufig eine Maxima-Funktion verwendet, so dass z.B. beim Wald stets die äusserste Umhüllende wiedergegeben wird.

Abb. 4: Der Projektperimeter von LWN mit den fünf Realisierungseinheiten



Der Punktabstand im offenen Gelände beträgt im Mittel 1.3 m (ca. 600'000 Punkte pro km²). Beim Extrahieren des digitalen Terrainmodells kommt es im Siedlungsgebiet zu Datenlücken und im Wald zu einer reduzierten Punktdichte. Der mittlere Punktabstand in den Waldflächen beträgt aber trotzdem weniger als 2.5 m. Im digitalen Oberflächenmodell ist der Punktabstand über den ganzen Bereich homogen, die Punkte sind klassifiziert nach Terrain, Gebäude und Vegetation, so dass zusätzliche Analysen möglich sind.

EINIGE ANWENDUNGEN IM GEO-BEREICH **Projekt Landwirtschaftliche Nutzflächen**

In etlichen, insbesondere in abgelegenen Gebieten, sind viele natürliche Objekte, wie beispielsweise Wälder und Wasserläufe in der Amtlichen Vermessung nicht oder nur teilweise nachgeführt. Die Direktzahlungen in der Landwirtschaft erfolgen aber aufgrund der Informationen über die Bodenbedeckung, welche die Amtliche Vermessung verwaltet. Das Bundesamt für Landwirtschaft beauftragte daher das Bundesamt für Landestopografie

(Swisstopo) 1999 mit einem Projekt zur Aktualisierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen auf der Basis der Amtlichen Vermessung. Das Grossprojektes wurde auf fünf Realisierungseinheiten verteilt (siehe Abbildung 4).

Swisstopo hat sich nach verschiedenen Tests entschieden, dass ALS und Luftbilder eingesetzt werden sollen. Mittels ALS werden das digitale Oberflächenmodell und das Terrainmodell produziert. Aus der Kombination dieser beiden Datensätze können dann automatisiert Waldgrenzen abgeleitet werden. Die gleichzeitig erstellten Luftfotos dienen der Validation der Resultate. Das Projektgebiet erstreckt sich insgesamt über mehr als 30'000 km² (siehe Abbildung 4). Nicht im Perimeter eingeschlossen sind Flächen oberhalb der Waldgrenze (2'000 m.ü.M.) und diejenigen Kantone, welche bereits über ein hochauflösendes digitales Terrainmodell verfügen. Bis Ende 2005 werden alle Gebiete mit Ausnahme der Kantone Wallis und Tessin vollständig erfasst und prozessiert sein.



Abb. 5: Querschnitt durch die Messungen um eine Baumgruppe. Deutlich erkennbar die Baumstämme. In der Bildmitte ist das Profil eines Waldweges sichtbar.

Selbst Baumstämme und Hochspannungsleitungen sichtbar

Neben dem Projekt über die Landwirtschaftlichen Nutzflächen sind bereits verschiedene weitere lokale Projekte ausgeführt worden. Die Abbildung 5 stammt aus einem Projekt im Nordtesin, wo für die Planung einer Kraftwerksrestaurierung ein Datensatz mit einer mittleren Auflösung von zwei Punkten pro Quadratmeter erfasst wurde. Durch die höhere Punktdichte werden zusätzliche Details wie z.B. Baumstämme sichtbar und die Bestimmung des Geländes im Wald wird – Befliegungszeitpunkt in der laubfreien Jahreszeit vorausgesetzt – tendenziell einfacher. In bewaldeten Gebieten ist es manchmal schwierig vom Flugzeug aus den Boden zu «sehen» und dementsprechend zu detektieren. Um in solchen problematischen Fällen die Bodendetektion zu erleichtern, kann das hier beschriebene Lasersystem mehrere Reflexionen eines Pulses registrieren und auswerten. Ein Teil eines einzelnen Laserpulses kann bereits am Blätterdach und Astwerk reflektiert werden,

während ein weiterer Teil am darunter wachsenden Strauchwerk und schliesslich am Boden zurückgeworfen wird. Der Sensor misst dann verschiedene Laufzeiten des mehrfach reflektierten Pulses. Dabei stammt der erstankommene Puls meist von der Baumkrone, der letztankommende vom Waldboden. In Abbildung 5 sind die einzelnen Scanpunkte einer Baumgruppe dargestellt. Der Boden zeichnet sich deutlich ab. Ebenso können die Baumkronen identifiziert werden. Die Punkteverteilung lässt in manchen Fällen gewisse Rückschlüsse auf die Bewuchsart zu. Bemerkenswert sind auch die Punkte zwischen Astwerk und Boden, die auf Reflexionen am Baumstamm zurückzuführen sind.

Die hohe Punktdichte und das Erkennen von kleinen Objekten erlauben es, auch feine Strukturen zu vermessen. So ist es möglich die einzelnen Kabel von Hochspannungsfreileitungen zu detektieren und deren Durchhang sowie die Boden- und die Vegetationsfreiheit zu bestimmen. Verschiedene Leitungsbe-

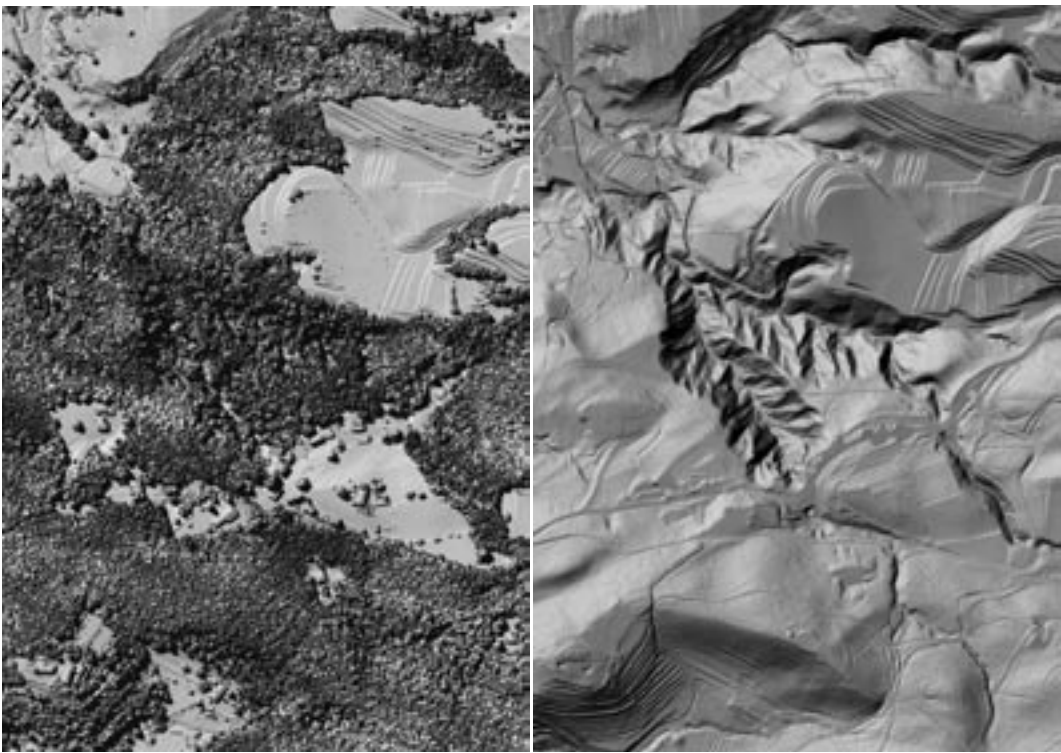


Abb. 6: Links das digitale Oberflächenmodell (DOM), rechts das digitale Terrainmodell (DTM). Die terrassierten Weinberge sind klar zu erkennen. Das DTM offenbart auch durch Wald verborgene Strukturen wie Bäche, Erosionsgebiete, z.T. Waldwege, verwaldete Terrassen (am unteren Bildrand). Gebiet im Kanton Tessin. (© Swissphoto)

treiber datieren ihre Dokumentation mit Hilfe von ALS auf.

In Schnee und Eis

Wie bereits erwähnt sind moderne Laserscanning-Aufnahmen von Bodenkontrollpunkten unabhängig. Daher bieten sich die oftmals schlecht zugänglichen Gletschergebiete für die Laservermessung an. Da die Genauigkeit der Bodenpunkte im Bereich von 10 bis 30 cm liegt, kann ALS für sehr viele glaziologische Untersuchungen herangezogen werden. Durch die wiederholte Befliegung lassen sich Massenänderungen, Oberflächendeformationen und z.T. Oberflächengeschwindigkeiten bestimmen. Diese Parameter sind äusserst wichtige Randwerte zur Modellierung des Gletscherverhaltens

und zur Berechnung von Massen- und Energiebilanzen. Dazu hat das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (ETHZ) in Zusammenarbeit mit der Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) 1998 erste Testflüge mit einem Lasersystem der Universität Stuttgart und dem Vermessungsflugzeug der swisstopo durchgeführt. Im Testgebiet des Unteraargletschers war es möglich, durch zwei Flüge im Jahresabstand geometrische Randwerte für die glaziologische Interpretation zu liefern und so die Wirksamkeit der Methode zum Nutzen der Glaziologie zu demonstrieren.

Die verborgene Landschaft

Eine genaue Terrainaufnahme in bewaldeten Gebieten stellt den Geodäten wie auch den Geologen vor grössere aber

nicht unüberwindbare Probleme. Dank der modernen Laserscanningtechnik ist es möglich, auch im Wald genügend Bodenpunkte zu messen, um ein Terrainmodell generieren zu können. Die Abbildung 6 dokumentiert das Potenzial des mit Laserscanning gewonnen digitalen Terrainmodells für die Oberflächenmorphologie. Antropogene und natürliche Terrainänderungen sind dank der hohen geometrischen Auflösung sehr deutlich zu erkennen. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass selbst im Wald Strukturen hervortreten, die in einem konventionellen Bild im besten Falle nur zu erahnen sind. Strukturen, von kleinräumigen Erosionsformen bis zu tektonisch bedingten Verwerfungen, sind in einem Laser-DTM auszumachen. Ein ausserordentliches

Plus von ALS liegt in der numerischen 3D-Erfassung des Terrains. Mit Wiederholungsflügen lassen sich damit sehr schnell Terrainänderungen, seien sie natürlicher Art oder menschenbedingt, quantitativ evaluieren. So sind z.Bsp. Volumenberechnungen an Bauten, die Bestimmung von Massenverlust oder -zuwachs von Gruben bzw. Deponien oder das Auffinden von stillgelegten Schächten relativ einfach zu bewerkstelligen.

Jürg Lüthy
Swissphoto AG
Dorfstrasse 53, 8105 Regensdorf
juerg.luethy@swissphoto.ch

Alain Geiger
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH Höggerberg, 8093 Zürich
geiger@geod.baug.ethz.ch

Literatur

- Artuso, R., S. Bovet, and A. Streilein, 2003. Practical Methods for the Verification of countrywide Terrain and Surface Models. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol. XXXIV, part 3/W13
- Bauder, A., 2001: Bestimmung der Massenbilanz von Gletschern mit Fernerkundungsmethoden und Flussmodellierungen, Eine Sensitivitätsstudie auf dem Unteraargletscher. Mitteilungen der VAW, Band 169.
- Favey, E., 2001. Investigation and Improvement of Airborne Laser Scanning Technique for Monitoring Surface Elevation Changes of Glaciers. Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Band 72.
- Favey, E., A. Wehr, A. Geiger, H.-G. Kahle, 2002. Some examples of European activities in airborne laser techniques and an application in glaciology, Journal of Geodynamics 34 (2002) 347-355.
- Kraus, K., 2002. Laser-Scanning - ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik(10).
- Landtwing, St., 2005. Airborne Laser Scanning: Genauigkeitsinformation für den Auswerteprozess. Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ.
- Li, Z., Q. Zhu and C. Gold, 2005. Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 323 pp.
- Lüthy J. und R. Stengele, 2003. 3D Mapping of Switzerland – challenges and experiences. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol. XXXVI, part 3/W19, p.42.47
- Wehr, A. and U. Lohr, 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(2/3): 68-82.