

# Hochgenaue Generierung des DGM vom vergletscherten Hochgebirge – Potential von Airborne Laserscanning

(mit 8 Bildern und 3 Tabellen)

*Von Dominik Lenhart, Helmut Kager, Konrad Eder, Stefan Hinz und Uwe Stilla, München und Wien*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Airborne Laserscanning (ALS) bietet die Möglichkeit, hochgenaue digitale Geländemodelle (DGM) mit einem hohen Automationsgrad zu erzeugen. Während das Genauigkeitspotential dieser Technologie in ländlichen und städtischen Gebieten bereits in vielen Studien und Anwendungen unter Beweis gestellt wurde, wird in dem vorliegenden Artikel das Genauigkeitspotential dieser Aufnahmemethode im vergletscherten Hochgebirge analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels einer Georeferenzierung durch simultane Streifenanpassung sowohl die Differenzen zwischen benachbarten Längsstreifen minimiert sowie die Daten auf wenige Zentimeter an GPS Passinformation angefeldert werden können. So beträgt z.B. die innere Genauigkeit 5–8 cm in glatten Bereichen wie z.B. Schneeoberflächen und ca. 17–30 cm in raueren Felsregionen. Neben der hohen Genauigkeit bietet auch die Punktdichte des Datensatzes einen interessanten Analyseaspekt. Z.B. erschließen – für ein DGM an sich negative – partielle Aufnahmeausfälle im Gletscherzungenbereich (bedingt durch Absorption und möglicherweise gerichtete Reflexion) neue Untersuchungsmöglichkeiten wie die lokale Schätzung des Wasser-, Eis- oder Firnanteils oder die automatische Erkennung von Gletscher- und Firngrenzen.

**ABSTRACT:** Airborne laserscanning (ALS) offers the possibility to derive high-accurate digital terrain models (DTM) with a large degree of automation. While the accuracy and reliability of ALS in rural and urban areas is well known and has been thoroughly investigated in many studies and applications, this article gives an insight in the accuracy potential of ALS when applied to glacial high alpine areas. To fully exploit the internal accuracy of ALS, differences between neighbouring laser scanner strips were minimized by a georeferencing method based on simultaneous strip adjustment, and the data set was aligned to GPS reference data up to a few centimetres. Our results show an inner accuracy of approx. 5–8 cm for smooth areas like snow surfaces and approx. 17–30 cm for cragged regions. The point density of the data set supplies another interesting aspect for analysis. Absorption and possibly regular reflection of the laser beam in the area of the glacier tongue cause a rapid decrease in point density. Though not wanted for DTM generation, these effects open up other research issues like the local estimation of the glacier's water, ice or snow content or the automatic detection of the glacier boundary.

**RÉSUMÉ:** Le système de scannage par Laser aéroporté (ALS/Airborne Laserscanning) offre la possibilité de générer des modèles de terrain numériques (MTN) avec un haut degré d'automatisation. Pendant que le potentiel de précision inhérent à cette technologie a déjà été mis à l'épreuve dans beaucoup d'études et d'applications, le présent article analyse le potentiel de précision de cette méthode lorsqu'elle est appliquée en haute montagne couverte de glaciers. Les résultats montrent qu'au moyen d'un géoréférencement par voie d'adaptation simultanée de bandes avoisinantes, non seulement les différences existant entre des bandes longitudinales peuvent être minimisées, mais aussi les données peuvent être rattachées jusqu'à quelques centimètres à l'information GPS de référence. Ainsi, la précision intérieure est de l'ordre de 5–8 cm pour des régions lisses telles que des surfaces de neige, et d'environ 17–30 cm pour les régions rocheuses rugueuses. En dehors de la haute précision, c'est la densité de points du jeu de données qui offre un aspect intéressant d'analyse. Par exemple, des pertes partielles d'enregistrements – normalement nuisibles à un DGM – dans la région de la langue glacière (dues à l'ab-

sorption et probablement aussi à la réflexion régulière) ouvrent de nouvelles possibilités d'études telles que l'estimation locale du contenu d'eau, de glace ou de névé, ou aussi la reconnaissance automatique de limites de glaciers et de névés.

## 1 Einführung und Datenüberblick

Das flugzeuggetragene (engl. = airborne) Laserscanning (ALS) dient seit mehreren Jahren zur Gewinnung dreidimensionaler, topographischer Daten (Ackermann 1999). Durch seinen hohen Automationsgrad und die sehr hohe Punktdichte eignet es sich hervorragend zur Erfassung von Punktdaten, die als Grundlage zur Generierung von digitalen Geländemodellen (DGM) dienen. Neben vielen anderen Anwendungsgebieten stellen Gletscherbeobachtungen einen interessanten Aufgabenbereich für ALS dar. So gibt es unter anderem Untersuchungen, wie aus multitemporaler Analyse von Laserscannerdatensätzen Veränderungen eines Gletschers zu detektieren sind (Geist et al. 2003).

Im Rahmen des OMEGA-Projekts (Development of Operational Monitoring Systems for European Glacial Areas, siehe OMEGA 2005) fand im August 2002 eine Laserscannerbefliegung statt, wobei ein Ausschnitt des Vernagtferners dem Institut für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) der TU München für Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde. Dieser Datensatz diente bereits als Grundlage für mehrere Arbeiten (Unteregger 2003, Würländer et al. 2004). Im Rahmen einer Diplomarbeit (Lenhart 2005) in Kooperation zwischen dem IPK und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien sollte das Genauigkeitspotential von Laserscannerdaten im vergletscherten Hochgebirge unter spezieller Berücksichtigung einer hochgenauen Georeferenzierung analysiert werden.

Zunächst soll ein kurzer Überblick über die Aufnahmemethode und die vorhandenen Daten gegeben werden. In Bild 1 ist das Prinzip des ALS dargestellt. Mittels eines GPS-Empfängers

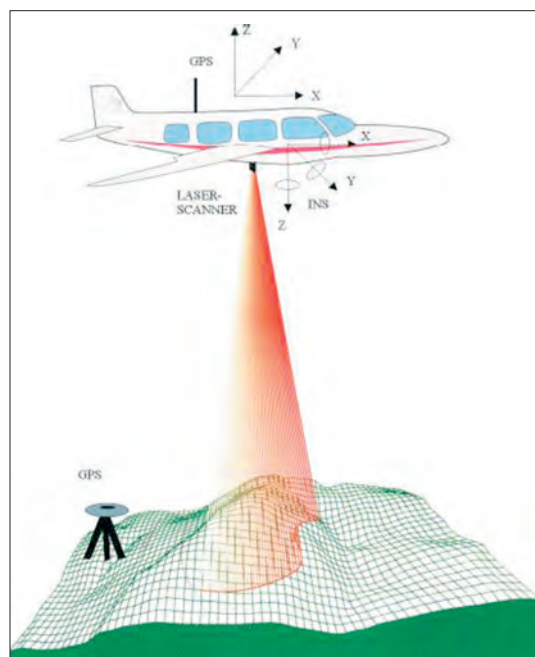


Bild 1 – Prinzip des flugzeuggetragenen Laserscannings.  
(Graphik in Anlehnung an TopScan 2005)

und eines *Inertial Navigation Systems* (INS) werden Ort ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) und Lage (Querneigung  $\omega$ , Längsneigung  $\rho$ , Kantung  $\kappa$ ) des Scanners bestimmt. Zusammen mit der gemessenen Distanz  $r$  und dem Auslenkwinkel  $v$  des Scanners können so Oberflächenpunkte dreidimensional koordiniert werden.

Die Befliegung fand am 19. August 2002 statt und wurde von der Firma TopScan durchgeführt. Die Aufnahme dauerte von ca. 7:30h bis 8:15h. Zum Einsatz kam dabei der Laserscanner ALTM 1225 (*Airborne Laser Terrain Mapper*) der Firma Optech Inc., welcher sowohl das erste empfangene Signal (*first pulse*) als auch das letzte empfangene Signal (*last pulse*) eines gesendeten Laserpulses aufzeichnen kann (TopScan 2005). Bei diesem Messflug beschränkte man sich auf die Aufzeichnung des *last pulses*. Der Datensatz enthält Ausschnitte von 11 annähernd parallelen Längsstreifen. Das in Bild 2 dargestellte Polygon zeigt die Grenze des Untersuchungsgebiets, das den Datensatz mit einer Punktzahl von ca. 8,5 Mio. Punkten umschließt.

Neben den Laserpunktdaten standen auch die Messdaten der beiden Komponenten GPS und INS zur Verfügung, welche in einer Taktrate von 20Hz vorlagen. Diese Daten geben die Flugzeit, die 3D-Koordinaten sowie die 3 Neigungswinkel des Laserscanners an. Aus diesen GPS/INS-Daten musste für jeden Laserpunkt ein Aufnahmezeitpunkt (*time-stamp*) bestimmt werden, da die Laserdaten keinen *time-stamp* enthielten (Lenhart 2005, S. 46).

Tabelle 1 enthält detaillierte Informationen über die Flug- und Systemparameter.

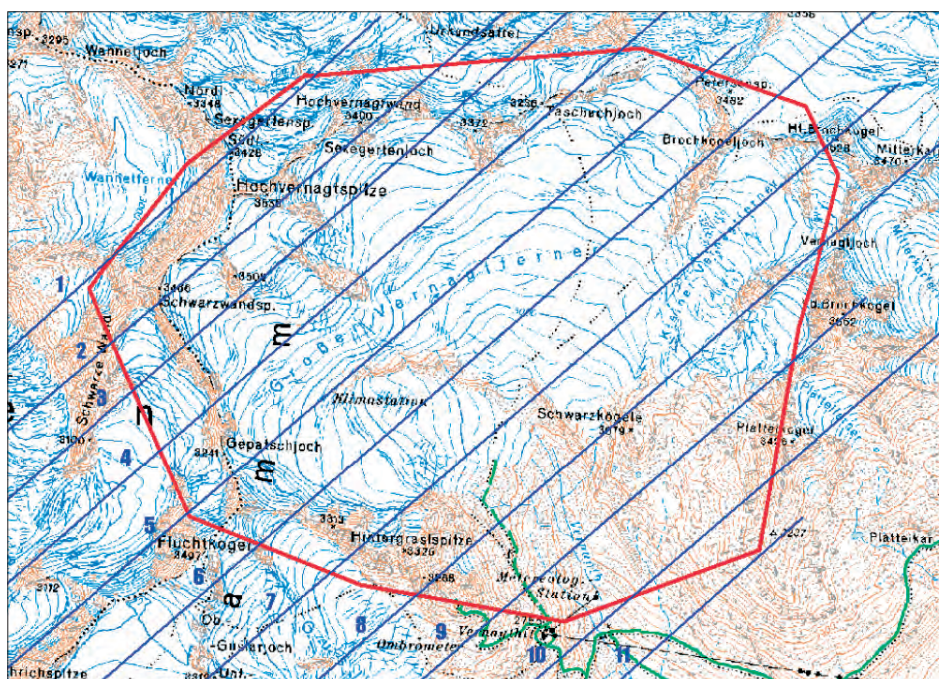


Bild 2 – Projektgebiet (rot) und schematische Darstellung der Flugtrajektorien (blau).  
(Ausschnitt aus der ÖK50, siehe BEV 2005)

Um Vergleichsdaten für die Laserscannermessungen zu erhalten, wurde vier Tage vor der Befliegung eine GPS-Kampagne im Vernagtgebiet durchgeführt. Mittels des Verfahrens *Real-Time Kinematic*-GPS (RTK-GPS) wurden ca. 1000 Kontrollpunkte in acht verschiedenen Zonen aufgenommen. Die Zonen repräsentieren Bereiche des Gletschers und seines Umfeldes mit unterschiedlichen topographischen Eigenschaften (siehe Bild 3). Dies hatte zum Ziel, Genauigkeitsaussagen in Abhängigkeit der lokalen Topographie ableiten zu können.

Tabelle 1 – Flug- und Systemparameter (entnommen aus TopScan 2002)

Abstand der Flugachsen	500 m
Mittlere Flughöhe über Grund	900 m
Fluggeschwindigkeit	75 m/s ~ 146 Kn
Lasermessrate	25000 Hz
Scanfrequenz	25 Hz
Scanwinkel	20 deg
Streifenbreite	655 m
Streifenüberlappung	155 m
mittlerer Punktabstand	1,5 m

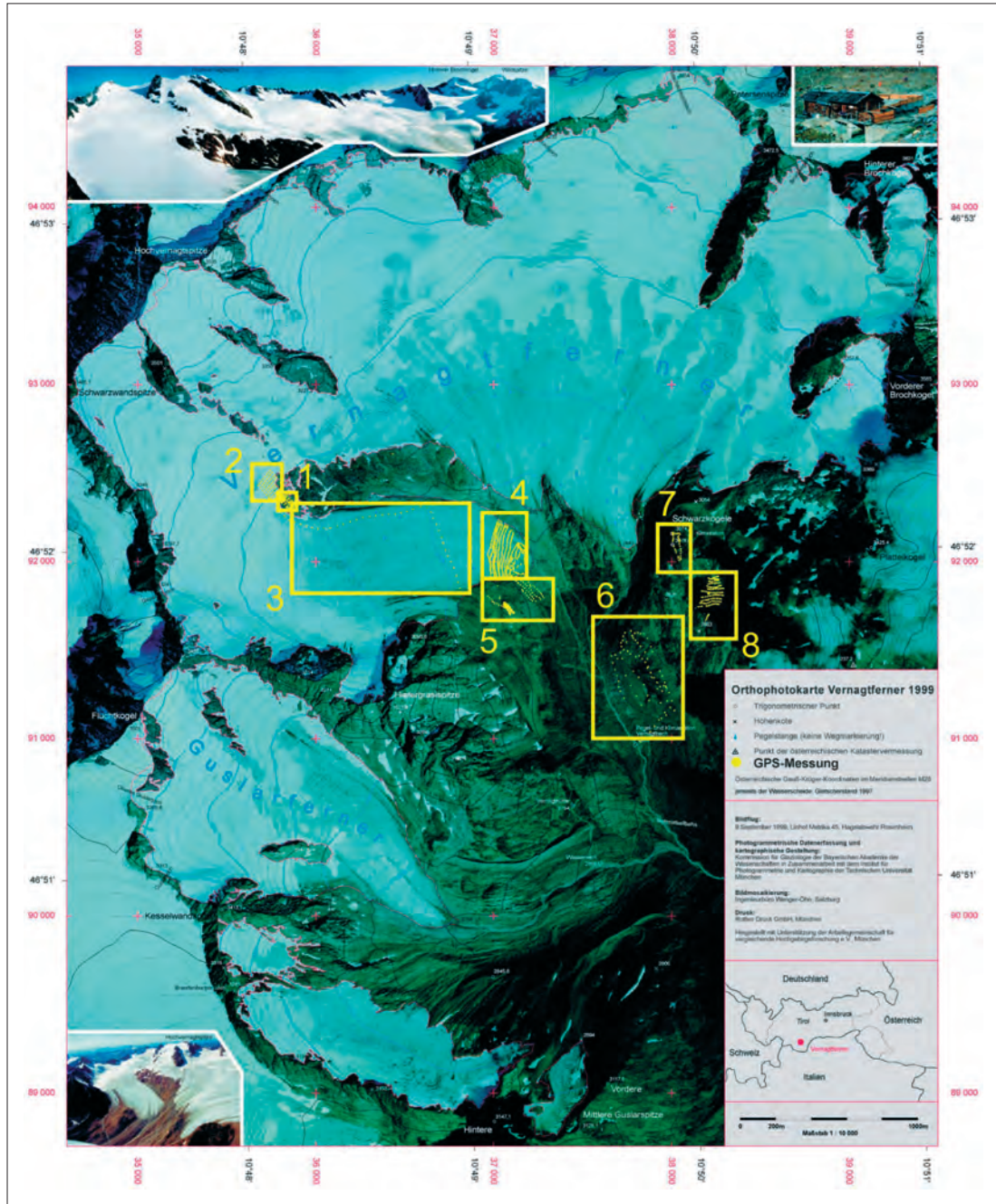


Bild 3 – Gebiete der Kontrollpunkte (Kartengrundlage entstanden in *Endres* 2001).

- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1 - Gletschermittle Fels | 5 - Gletscherzunge Vorfeld  |
| 2 - Gletschermittle Firn | 6 - Moräne                  |
| 3 - Gletscher Profil     | 7 - Schwarzkögele           |
| 4 - Gletscherzunge Eis   | 8 - unterhalb Schwarzkögele |

Anhand dieser Daten soll das Genauigkeitspotential des Laserscannings für die Generierung hochgenauer DGM sowie die Besonderheiten der Aufnahmemethode im vergletscherten Hochgebirge untersucht werden. In Kapitel 2 wird die Analyse der Rohdaten erläutert. Dazu werden die Ergebnisse des Vergleichs der Laserdaten mit den Kontrolldaten sowie die berechneten Streifendifferenzen dargestellt. Anschließend behandelt Kapitel 3 die Problematik der Georeferenzierung und Streifenanpassung, bevor in Kapitel 4 der korrigierte Datensatz untersucht wird. Kapitel 5 geht auf die Punktdichte im Bereich der Gletscherzunge und die daraus resultierenden Probleme und Möglichkeiten ein.

## 2 Analyse der Rohdaten

Aus den gesamten Laserpunkten wurde ein digitales Geländemodell (DGM) mittels Interpolation nach kleinsten Quadraten abgeleitet (Kraus 2000, S. 154 ff.). Zu diesem DGM wurden die Höhendifferenzen der Kontrolldaten berechnet. Die Ergebnisse sind durch Mittelwert, Standardabweichung und maximaler Betrag der Höhendifferenzen in Tabelle 1 dargestellt.

Für Aussagen über die interne Qualität des Laserscannings dienen in erster Linie die Standardabweichungen. Sehr niedrige  $\sigma(\Delta z)$  im Bereich von 4–7 cm findet man in den relativ glatten Gebieten mit Schnee- und Eisbedeckung („Gletschermitteln Firn“ und „Gletscherprofil“). Einzige Ausnahme ist mit einem  $\sigma(\Delta z)$  von 22 cm das Gebiet „Gletscherzunge Eis“. Hier kommt es aufgrund der niedrigen Stützpunktzahl (siehe auch Kapitel 5) zu einer ungenauen DGM-Generierung.

Die Mittelwerte weisen auf systematische Effekte zwischen den Laserdaten und den Kontrolldaten hin. Durch die Ablation des Gletschers in den vier Tagen zwischen den jeweiligen Aufnahmen, die im Gletscherzungenbereich über 20 cm betragen kann (Unteregger 2003, S. 37), kommt es zu den negativen Differenzen. In den rauen Felsbereichen („Schwarzkögele“, „Moräne“, „unterhalb Schwarzkögele“) liegt das DGM höher als die Kontrollpunkte. Bei der Messung der Kontrollpunkte wurden mit Hinblick auf die *last-pulse*-Aufnahme des Laserscannings stets die niedrigsten Bodenpunkte anstelle von Punkten z.B. auf einem Felsblock gewählt. Trifft der *foot-print* eines Laserpulses komplett auf einen höheren Felsblock, so ergibt sich ein *last-pulse*-Laserpunkt über dem Niveau der Kontrollpunkte. Trifft dies für eine Vielzahl von Laserpunkten zu, erhält man ein höheres DGM-Niveau und dementsprechend positive Differenzen.

Allerdings zeigen insbesondere die Gebiete „Gletschermitteln Fels“ und „Gletscherzunge Vorfeld“ aufgrund ihrer negativen Differenzen, dass noch weitere systematische Effekte vorliegen, die jedoch nicht mit großer Sicherheit erklärt werden können. Möglicherweise spielt die Verwendung unterschiedlicher GPS-Referenzstationen bei der GPS-Messung und der Befliegung eine Rolle.

Um die Homogenität der Daten im Überlappungsbereich benachbarter Streifen zu untersuchen, wurden pro Streifen ein DGM und von jeweils zwei sich überlappenden Streifen ein Differenzmodell berechnet. Zur Visualisierung wurden die Differenzmodelle farbcodiert und über eine Schummerung des gesamten DGM gelegt (siehe Bild 4).

Solche Streifendifferenzen entstehen durch Aufnahmefehler während der Befliegung, die trotz Systemkalibrierung nicht beseitigt werden konnten. So führen Offset oder Drift der GPS- und INS-Systeme zu fehlerhafter Positions- und Lagebestimmung, die sich als systematische Effekte in den Daten widerspiegeln. Katzenbeisser (2005) beschreibt detailliert die verschiedenen Fehlerquellen und deren Auswirkungen, die beim Laserscanning auftreten können. Diese beinhalten neben den oben genannten Orientierungsfehlern auch Fehler des Scanners selbst. Hierzu zählen unter anderem Ungenauigkeiten bei der Registrierung des Auslenkwinkels und Fehler bei der Distanzmessung.

Tabelle 2 – Differenzen zu Kontrolldaten vor Georeferenzierung.

$$\Delta z = z(\text{DGM}) - z(\text{Kontr.})$$

Kontrollbereich	$\mu(\Delta z)$	$\sigma(\Delta z)$	Max. abs( $\Delta z$ )
Gletschermittte Fels	-0,273	0,274	1,081
Gletschermittte Firn	-0,328	0,043	0,433
Gletscher Profil	-0,376	0,068	0,531
Gletscherzunge Eis	-0,415	0,219	1,961
Gletscherzunge Vorfeld	-0,194	0,178	0,837
Moräne	0,751	0,213	1,083
Schwarzkögele	0,427	0,359	0,947
unterhalb Schwarzkögele	0,689	0,310	1,590
<b>Durchschnittswert:</b>	<b>0,035</b>	<b>0,208</b>	

Typische Situationen, die helfen, die Differenzbilder zu verstehen, sind in Bild 5 dargestellt. Die rechte Graphik zeigt die Auswirkungen einer Lageverschiebung zwischen zwei Streifen. Durch einen Lageversatz wird ein Grat in beiden Streifen an unterschiedlichen Positionen dargestellt, so dass es bei steilem Relief zu großen Höhendifferenzen mit jeweils entgegengesetzten Vorzeichen kommt. Neben einem Fehler in der Positionsbestimmung durch GPS können auch Fehler der Längs- und Querneigungsmessungen zu Verschiebungen in der x- und y-Komponente führen.

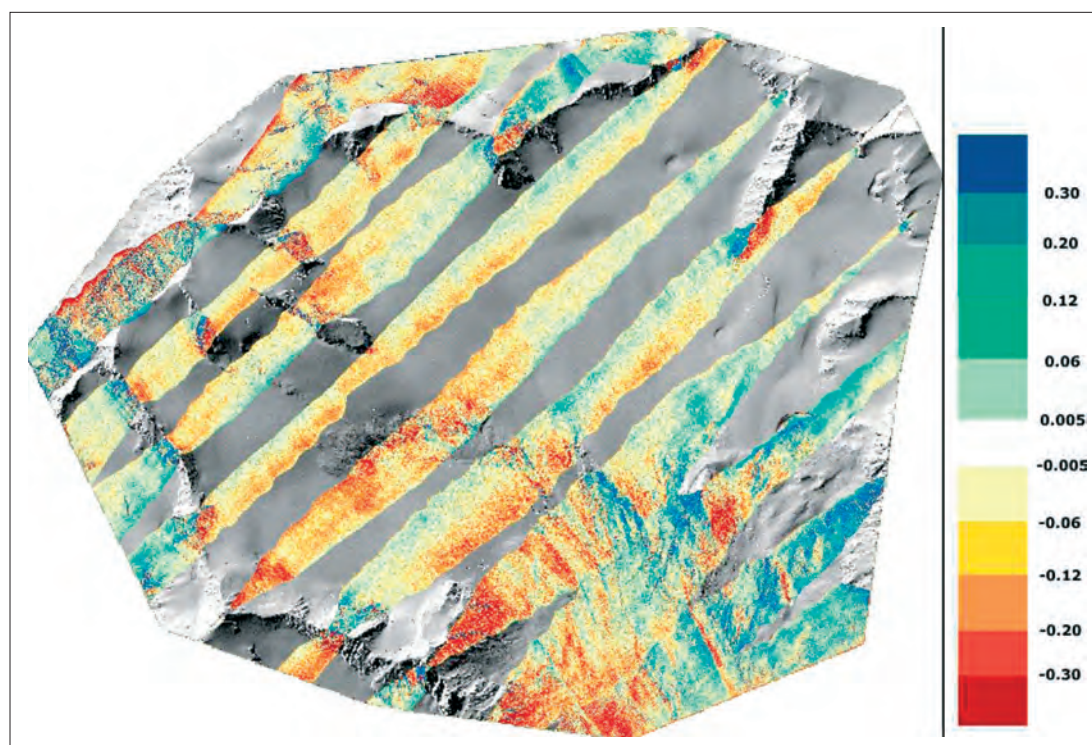


Bild 4 – Streifendifferenzen vor Georeferenzierung (Skala in m).

Eine durch fehlerhafte Bestimmung der Querneigung  $\omega$  verursachte Verkippung der Streifen hingegen führt zu gegenseitig geneigten Differenzmodellen. Wegen der entgegengesetzten Richtung des (systematischen) Querneigungsfehlers bei Hin- und Rückflug erhalten die Differenzmodelle benachbarter Überlappungsbereiche umgekehrtes Vorzeichen (siehe linke Graphik in Bild 5).

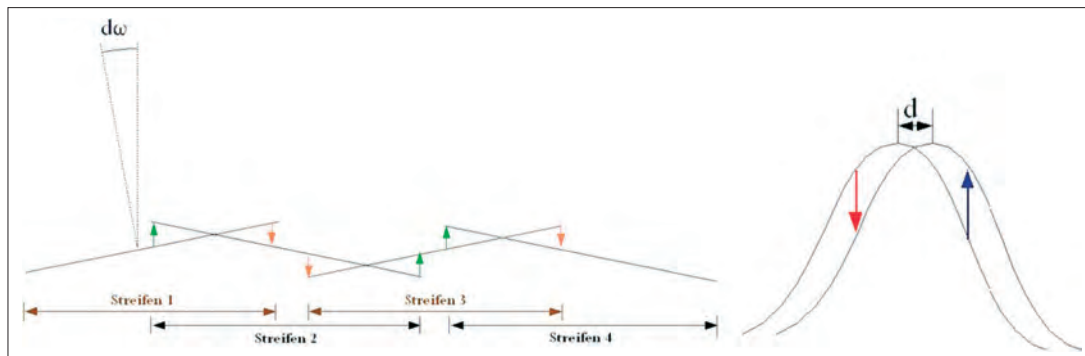


Bild 5 – Resultierende Streifendifferenzen aufgrund von konstantem Querneigungsfehler  $d\omega$  und Lageverschiebung  $d$ .

### 3 Streifenanpassung und Georeferenzierung

Um die oben genannten Streifendifferenzen zu beseitigen, wird eine Georeferenzierung durch simultane Streifenblockausgleichung durchgeführt (vgl. Kager 2003). Dieser Ansatz ist annähernd vergleichbar mit dem bekannten Verfahren der Bündelblockausgleichung mit Luftbildern. Anstatt der homologen Bildpunkte werden hier jedoch Punktmengen mit Ebenencharakter, so genannte Patches, verwendet, da homologe Punkte in einem Laserdatensatz praktisch nicht auftreten. Ebenen lassen sich hingegen leichter auffinden und bieten die beste Form von Verknüpfungselementen zwischen benachbarten Streifen, insbesondere wenn sie eine signifikante Neigung aufzeigen.

#### 3.1 Definition und Detektion von Patches

Ein Patch ist eine Menge benachbarter Laserpunkte, die mit einer bestimmten Genauigkeit eine Ebene beschreiben. Aus den Laserpunkten, die um einen so genannten Saatpunkt – einem beliebigen Ausgangspunkt – liegen, wird eine ausgleichende Ebene berechnet. Erfüllt sie vorgegebene Qualitätskriterien (z.B.  $\sigma_0 \leq 5$  cm), so wird sie als Patch angenommen, anderenfalls verworfen.

Zur Reduzierung der Rechenzeit werden für jeden Patch nur vier der zugehörigen Punkte als Ankerpunkte gewählt, welche den Patch umschließen. Für jeden Ankerpunkt werden die Trajektorienwerte  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$  aus den Flugdaten interpoliert sowie die dreidimensionalen polaren Koordinaten  $\nu, \chi, \tau$  der in die Ausgleichsebene projizierten Laserpunkte im System des Laserscanners bestimmt. Der Winkel  $\chi$  beschreibt – ähnlich dem Höhenwinkel beim Theodoliten – den Winkel des Laserstrahls außerhalb der Schwingungsebene des Scanners. In der Regel ist  $\chi = 0$ , aufgrund von Ungenauigkeiten in der Fertigung, beim Einbau des Scanners oder durch Rundungsfehler bei der Rückrechnung aus den Bodenpunkten kann es jedoch zu Abweichungen kommen.

Der Patch wird durch einen Verschiebungs- und zwei Rotationsparameter bezüglich des festen Saftpunktes beschrieben. Somit wird ein Patch durch seine vier polaren Ankerpunkte sowie seine Parameter repräsentiert.

Bei den Patches kann zwischen Pass- und Verknüpfungspatches unterschieden werden. Ein Passpatch ist ein zu einem Passelement korrespondierender Patch, während Verknüpfungspatches homologe ebene Gebiete im Überlappungsbereich zweier Streifen sind, die zu deren relativen Orientierung dienen. Als Passelemente dienen vorzugsweise Ebenen, wie z.B. Dachflächen in unterschiedlichen Expositionen, die durch jeweils mindestens drei Punkte beschrieben werden. Auch einzelne Passpunkte sind möglich, die in einer Ebene liegen und diese stützen können. Die Stellung der Ebene wird dann ausschließlich durch die Laserpunkte bestimmt.

Für diese Untersuchungen lagen nur die Kontrollpunkte als zusätzliche Daten vor, somit wurden diese als einzelne Passpunkte verwendet. Auf die Punkte der Eis- und Schneeregionen wurde allerdings verzichtet, um nicht durch eine mögliche Ablation des Gletschers Unstimmigkeiten zu erhalten.

### 3.2 Durchführung der Streifenblockausgleichung

Wie in Kager (2003) beschrieben, sollen in einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung Koeffizienten bestimmt werden, die die Fehler der GPS- und INS-Komponente des Laserscannings als Polynome beschreiben. Dies sind die Verschiebungskoeffizienten  $a_i, b_i, c_i$  für die GPS-Komponente und Verkippungskoeffizienten  $\omega_i, \rho_i, \kappa_i$  für die INS-Komponente mit jeweils  $i = 0, 1 \dots n$ . Dabei steht der Index  $i$  für die Potenz der Zeit

$$\text{(z.B.: } \Delta X_0 = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i \text{),}$$

d.h.  $i=0$  bedeutet eine Additionskonstante,  $i=1$  steht für eine lineare, zeitabhängige Drift der entsprechenden Größe. Zudem sollen die systemspezifischen Parameter  $dv, d\chi, dr, \frac{dv}{v}, \frac{d\chi}{\chi}, \frac{dr}{r}$  mitgeschätzt werden.

Als weitere Unbekannte sollen die Korrekturen der Verschiebungs- und der Rotationsparameter der Patchebenen in der Ausgleichung ermittelt werden.

In die Ausgleichung fließen die Ankerpunkte der gefundenen Patches mit ihren dreidimensionalen polaren Koordinaten  $v, \chi, r$  der Ankerpunkte als Beobachtungen sowie die Koordinaten  $X_0, Y_0, Z_0$  und Orientierungen  $\omega, \rho, \kappa$  der Aufnahmeplattform zu jedem Ankerpunkt als beobachtete Konstanten ein. Auch die Koordinaten der Bodenpasspunkte dienen als Beobachtungen. Außerdem wird die Annahme, dass  $a_i, b_i, c_i$  und  $\omega_i, \rho_i, \kappa_i$  gleich Null sind, als Beobachtung formuliert.

Die Ausgleichung zielt darauf ab, die Residuen bzw. Restklaffungen in den Ankerpunkten, die Residuen in den Bodenpasspunkten bezüglich der zugehörigen Patches und die Fehlerpolynomkoeffizienten der GPS/INS-Komponente nach der Methode der kleinsten Quadrate zu minimieren. Dabei können die Koeffizienten getrennt pro Streifen, pro Streifengruppen oder gemeinsam für den gesamten Flug bestimmt werden. Die Systemparameter werden einheitlich für die ganze Befliegung geschätzt. Die erhaltenen Koeffizienten werden schließlich mittels eines Hypothesentests auf ihre Signifikanz untersucht. Dieser Test soll klären, ob die geschätzten Parameter tatsächlich ungleich Null sind, oder ob die zufällige Messungenauigkeit zu Ergebnissen ungleich Null führte.

Anschließend werden für jeden Laserpunkt die Orientierungen und Koordinaten des Sensors zum Aufnahmezeitpunkt bestimmt und die Polarkoordinaten  $v, \chi, r$  berechnet. An diese insgesamt 9 Parameter werden die in der Ausgleichung bestimmten Korrekturwerte bzw. Kor-



rekturpolynome angebracht. Mit den so korrigierten Parametern wird jeder Laserpunkt neu berechnet.

Wegen der schlechten Konfiguration der Passinformation wurde auf eine Bestimmung von zeitlich abhängigen Korrekturparametern (mit  $i > 0$ ) verzichtet, um eine Überparametrisierung der Ausgleichung zu vermeiden.

#### 4 Analyse der Streifenanpassung und Georeferenzierung

Aus den korrigierten Laserdaten wurde wie in Kapitel 2 ein DGM abgeleitet und mit den Kontrolldaten verglichen. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen. Wie zu erwarten war, sind die Laserdaten stark an die Kontrolldaten angefeldert worden. Das zeigt sich am geringen Mittelwert der Differenzen. Eine Aussage über die allgemeine Qualität des Datensatzes lässt sich alleine daraus nicht folgern. Jedoch wird deutlich, dass mit Hilfe von geeigneten Referenzflächen eine absolute Orientierung der Laserscannerdaten in das Referenzsystem mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern möglich ist.

Die mittlere Standardabweichung hat sich durch die Georeferenzierung geringfügig verbessert. In den Bereichen „Gletscherzunge Vorfeld“ (von  $\sigma(\Delta z) = 18$  cm auf  $\sigma(\Delta z) = 15$  cm) sowie „Gletscherzunge Eis“ (von  $\sigma(\Delta z) = 22$  cm auf  $\sigma(\Delta z) = 19$  cm) und „Schwarzkögele“ (von  $\sigma(\Delta z) = 36$  cm auf  $\sigma(\Delta z) = 22$  cm) sind Verbesserungen zu erkennen. Im Durchschnitt beträgt die Verbesserung der Standardabweichung  $\sigma(\Delta z) = 3$  cm. Dies kann sowohl auf die Anfelderung auf die Pass- bzw. Kontrollpunkte, aber auch auf die verringerten Streifendifferenzen und die daraus resultierende homogenere DGM-Generierung zurückgeführt werden.

Wie man in Bild 6 im Vergleich zu Bild 4 erkennen kann, haben sich die Streifendifferenzen durch die Georeferenzierung deutlich verringert. Die Differenzen liegen nur noch im Bereich von  $\pm 20$  cm. Die extremen Differenzen vor der Streifenanpassung besonders in den Gratbereichen konnten beseitigt werden.

Die Auswirkungen auf die Generierung des gesamten DGM lassen sich in Bild 7 erkennen. Im linken Ausschnitt sieht man eine Linie von links unten nach recht oben (gekennzeichnet durch rote Pfeile). Diese stellt die Grenze zwischen Überlappungsbereich (untere Hälfte) und dem Bereich eines einzigen Streifens dar. Der Überlappungsbereich erscheint unruhig, d.h. die Oberfläche erscheint durch die Streifendifferenzen rauer als sie tatsächlich ist. Nach der Georeferenzierung ist die Grenze zum Überlappungsbereich nicht mehr erkennbar.

Tabelle 3 – Differenzen zu Kontrolldaten nach Georeferenzierung.

$$\Delta z = z(\text{DGM}) - z(\text{Kontr.})$$

Kontrollbereich	$\mu(\Delta z)$	$\sigma(\Delta z)$	Max. abs( $\Delta z$ )
Gletschermitte Fels	-0,007	0,277	0,819
Gletschermitte Firn	-0,137	0,056	0,267
Gletscher Profil	0,062	0,075	0,253
Gletscherzunge Eis	-0,098	0,192	1,390
Gletscherzunge Vorfeld	0,011	0,147	0,684
Moräne	0,012	0,186	0,557
Schwarzkögele	0,199	0,217	0,755
unterhalb Schwarzkögele	0,015	0,284	1,632
<b>Durchschnittswert:</b>	<b>0,007</b>	<b>0,179</b>	

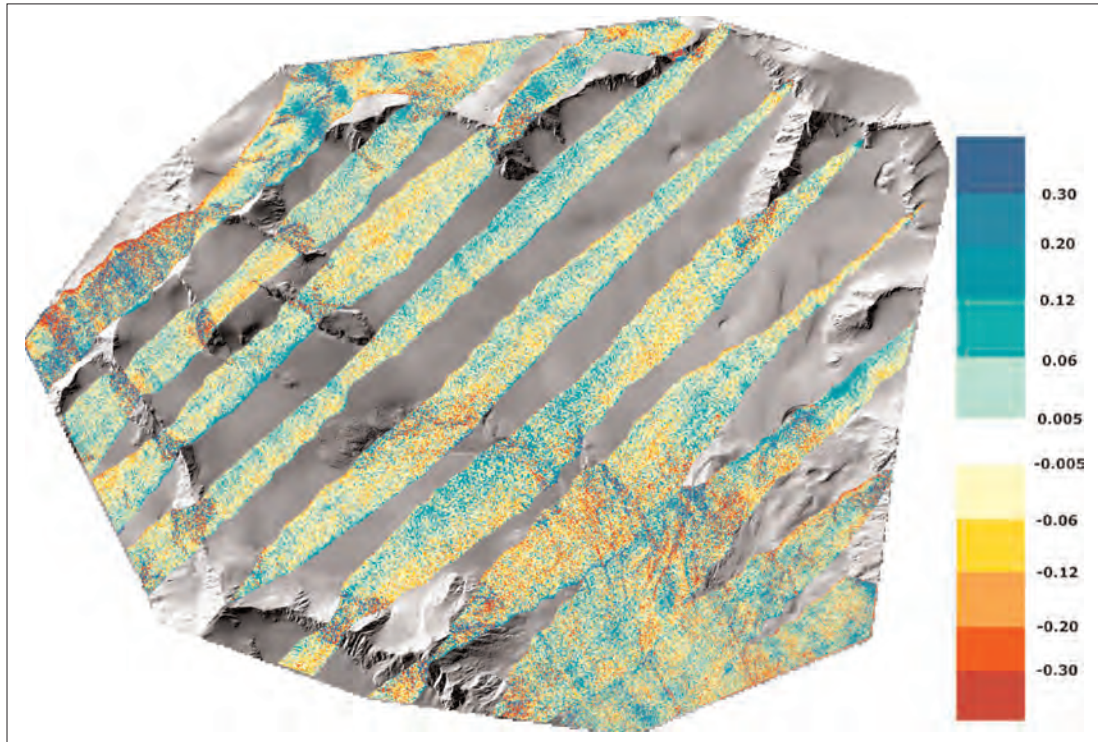


Bild 6 – Streifendifferenzen nach Georeferenzierung (Skala in m).

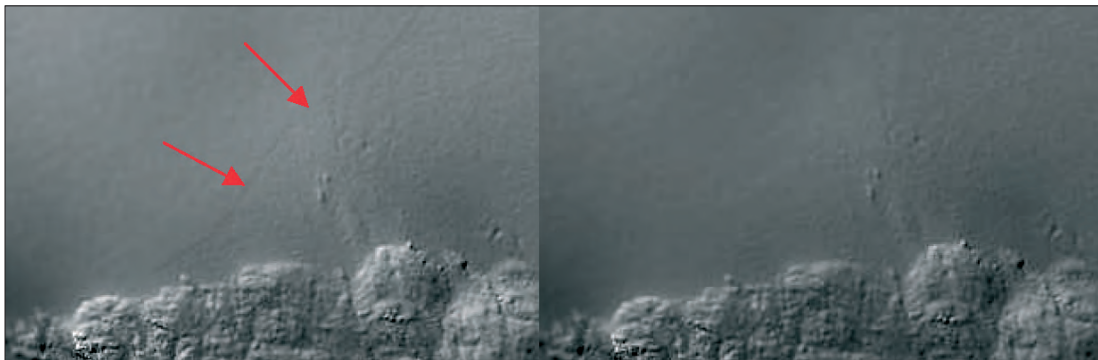


Bild 7 – Schummerung des DGM vor (links) und nach (rechts) der Georeferenzierung.

## 5 Punktdichte in vergletscherten Bereichen

Ein interessanter Aspekt des Laserscannings ist die Punktdichte. Bild 8 zeigt das abgeleitete Dichtebild der Daten für das gesamte Befliegungsgebiet. Die Farbskala reicht von weiß (0 Punkte/m<sup>2</sup>) über grün zu dunkelbraun (2 Punkte/m<sup>2</sup>). Die Überlappungsbereiche (braun) lassen sich deutlich erkennen. In der Mitte des Datensatzes sind aufgrund der geringeren Punktdichte das Abbild der Gletscherzunge sowie einige Rinnsale im Dichtebild zu erkennen. Dies liegt darin begründet, dass es auf Wasseroberflächen zu einer starken Absorptionsrate der Laserimpulse und somit zu Ausfällen in der Punktaufzeichnung kommt. Durch Schmelzwasser auf der Gletscherzunge entsteht ein Wasserfilm, der die Absorption verursacht. Allerdings wäre auch eine gerichtete Reflexion des Gletschereises als Grund für die Signalausfälle denkbar.

Die deutlich niedrigere Punktdichte im Bereich der Gletscherzunge führt zu einer ungenaueren DGM-Generierung (vgl. Kapitel 3 und 5). Sie stellt somit einen kritischen Bereich für das Laserscanning dar. In den höheren Lagen des Gletschers, also im Schnee- und Firnbereich, herrscht hingegen eine große Punktdichte vor. Es sind keine merklichen Signalausfälle zu verzeichnen. Insbesondere hier ist das ALS der klassischen Photogrammetrie überlegen, da es unabhängig von der Textur ist.

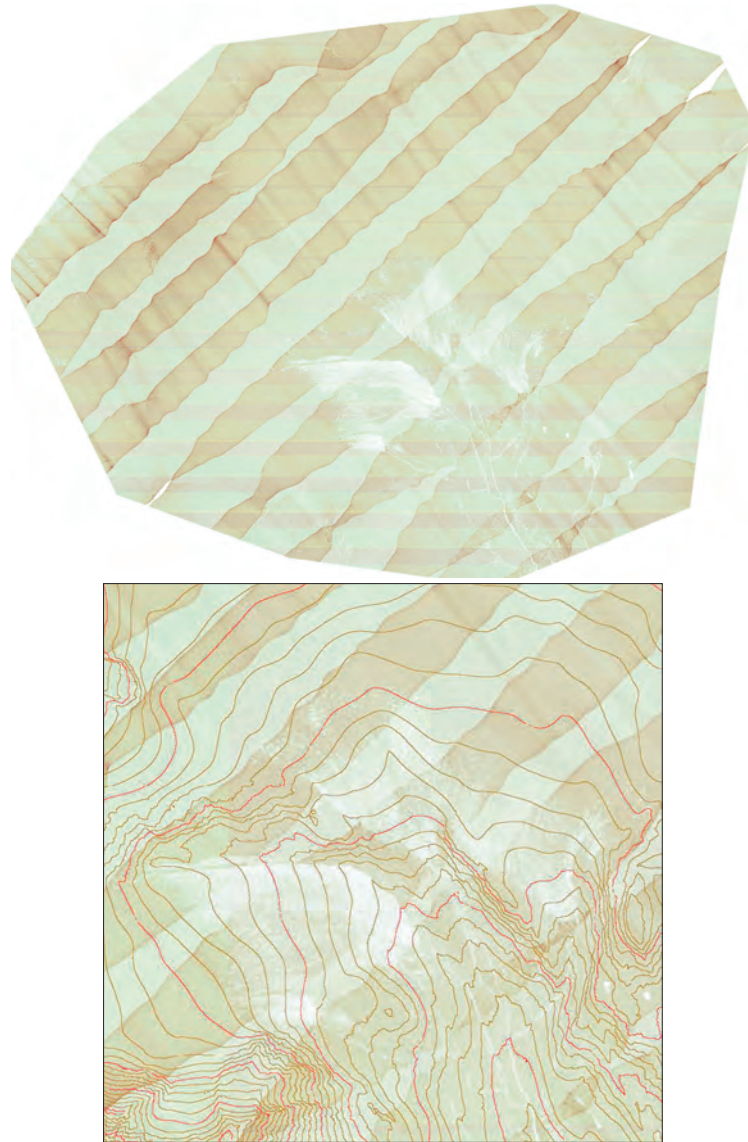


Bild 8 – Dichtebild des Laserscannerdatensatzes, unten mit Höhenlinien überlagert.

Auffällig ist, dass die untere Grenze der Ausfallregion etwa entlang des Randes der Gletscherzunge verläuft und der obere etwa entlang der Firngrenze. Der obere Rand des lückenhaften Datenbereichs stellt die Schmelzgrenze bzw. die Schneegrenze dar, je nachdem ob man von Absorption oder gerichtete Reflexion als Grund für die Ausfälle ausgeht. Ungeachtet dessen verläuft diese Grenze näherungsweise entlang einer Höhenlinie. Diese Tatsache bietet somit die Möglichkeit, anhand von Schmelzzonen meteorologische Aussagen aus dem Dichtebild

einer Laserscanneraufnahme von einem Gletscher abzuleiten. Weiterhin sollte es mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden möglich sein, diese Grenzen automatisch zu detektieren und für Visualisierungen aufzubereiten. Sind mehrere Datensätze vorhanden, ließe sich somit die zeitliche Variation der Gletscher- und Firngrenze darstellen.

Die Dichteverteilung des Datensatzes kann in Zusammenhang mit eingehenden meteorologischen Daten und der Oberflächenrauigkeit auch Rückschlüsse über lokale Anteile von Schmelzwasser, Eis und Firn auf dem Gletscher zulassen. Durch eine Schätzung solcher Parameter könnte die Berechnung von Gletscherabflussmodellen unterstützt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit unseren Untersuchungen wurde gezeigt, dass die in den gelieferten Laserdaten enthaltenen Streifendifferenzen durch eine qualifizierte Georeferenzierung beseitigt werden können. Diese ermöglicht auch, den Datensatz an Referenzdaten anzufeldern und somit eine hochgenaue Transformation in das übergeordnete System durchzuführen. Besonders beim Vergleich verschiedener Datensätze ist dies zwingend nötig.

Trotz nicht idealer Passinformation konnte ein weitgehend homogener Datensatz erzeugt werden. Eine weitere Verbesserung der Georeferenzierung könnte durch Befliegung eines oder mehrerer Quersteifen und Aufnahme von geeigneten Passflächen geschehen. Als Passflächen sind ebene Flächen im Projektgebiet, aber auch künstlich errichtete, großflächige Objekte (mind. ca. 20 m<sup>2</sup>) wie Dächer oder Plattformen denkbar. Dabei ist auf unterschiedliche Exposition der Flächen zu achten, um die Freiheitsgrade einer Transformation bestimmen zu können (siehe *Kager* 2003).

Die innere Genauigkeit der aus den Laserdaten erzeugten DGM liegt in ebenen Regionen (z.B. Schnee und Eis) bei ca. 5–7 cm. Dieser Bereich ist für die Gletscherbeobachtungen zur Berechnung von Massenbilanzen besonders interessant. In unruhigerem Gelände beträgt die Genauigkeit je nach Oberflächenrauigkeit zwischen ca. 17–30 cm.

Diese Genauigkeit von DGM aus ALS-Daten übersteigt damit die Möglichkeiten der Stereoluftbilddauswertung zur Erzeugung von DGM (ca. 50–100 cm) (*Würländer* und *Eder* 1998). Letztere eignet sich daher eher zur Erzeugung eines groben Überblicks des Geländes (*Attwenger* und *Briese* 2003). Aufgrund des hohen Automationsgrades und der hohen Punktdichte stellt ALS eine ideale Aufnahmemethode für Daten zur hochgenauen, detailreichen DGM-Berechnung dar.

Insbesondere in den Bereichen von Schnee und Firn bietet ALS gerade durch die dichte Datenaufnahme ein hohes Potential. In diesen Bereichen gestaltet sich die Luftbilddauswertung aufgrund der nicht vorhandenen Textur äußerst schwierig. Der einzige Bereich, der einen Schwachpunkt des Laserscannings offenbart, ist die Gletscherzunge. In diesem Bereich reduziert sich die Punktdichte aufgrund der Absorption der Laserimpulse durch das Schmelzwasser und möglicherweise durch gerichtete Reflexion des Eises enorm. Die entstehenden Datenlücken führen zu Ungenauigkeiten bei der DGM-Generierung und können unter Umständen sogar, je nach verwendeter Interpolationsmethode und Wahl der Interpolationsparameter, grobe Fehler von einigen Metern verursachen. Die hier verwendete Methode der Interpolation nach kleinsten Quadraten erwies sich jedoch als sehr robust gegenüber großen Stützpunktlücken.

Allerdings ergeben sich aufgrund der Abhängigkeiten der Datendichte vom Wassergehalt der Oberfläche auch neue Einsatzbereiche. Das Dichtebild bietet Möglichkeiten sowohl für die Extraktion oder Digitalisierung von Gletschergrenzen als auch für meteorologische Auswertungen anhand der Schmelzlinie.

Für weitere Untersuchungen ist besonders im Hinblick auf die mögliche Schätzung von Wasser-, Eis- und Firnanteilen eine genauere Analyse der Rückstreuungseigenschaften des Gletschereises von großem Interesse. Befliegungen zu unterschiedlichen Tages- oder Jahreszeiten könnten darüber Aufschluss geben. Das Verhalten der Reflexion der Laserimpulse bei gefrorenem und schmelzendem Eis ließe sich dadurch beobachten und genauere Zusammenhänge zwischen Punktdichte und Oberflächenbeschaffenheit ableiten. Idealerweise wären solche Untersuchungen an umfangreiche meteorologische Messungen vor Ort über Temperatur, Abschmelzung etc. geknüpft.

Hinsichtlich der Sensorik lassen neue Aufnahmemethoden noch detailliertere Auswertungen erwarten. So kann z.B. mit Hilfe eines Laserscanners, der das gesamte rückgestreute Signal hochaufgelöst aufzeichnet, eine Oberflächenklassifizierung anhand des Amplitudenbildes erfolgen (Jutzi und Stilla 2003, Wagner et al. 2004).

Auch ein gekoppeltes System aus Luftbildkamera und Laserscanner bietet gerade im Hinblick auf die Ergänzung von lückenhaften Laserdaten interessante Möglichkeiten. So kann eine gemeinsame Georeferenzierung erfolgen, zu der dann Punkte als Passinformation genutzt werden können, sofern die relative Lage zwischen den beiden Aufnahmegeräten bekannt ist.

## Literatur

Ackermann, F. (1999): Airborne laser scanning – present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, S. 64–67.

Attwenger, M. und Briese, C. (2003): Vergleich digitaler Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 91. Jahrgang, Heft 4/2003, S. 271–280. VGI, Wien.

BEV (2005): ÖK50 des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV). Austrian Map Fly, Version 4.0, 2005.

Endres, J. (2001): Farborthokarte „Vernagtferner 1999“ aus Amateur-Luftbildern. Diplomarbeit am Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.

Geist, T.; Lutz, E. und Stötter, J. (2003): Airborne Laser Scanning Technology and its Potential for Applications in Glaciology. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop, „3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data“, Dresden, 2003.

Jutzi, B. und Stilla, U. (2003): Laser pulse analysis for reconstruction and classification of urban objects. In: Ebner, H.; Heipke, C.; Mayer, H.; Pakzad, K. (eds) Photogrammetric Image Analysis PIA03. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 34, Part 3/W8, 151–156.

Lenhart, D. (2005): Untersuchungen zur hochgenauen Georeferenzierung und Streifenanpassung von Laserscannerdaten im vergletscherten Hochgebirge. Diplomarbeit am Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.

Kager, H. (2003): Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 91. Jahrgang, Heft 4/2003, S. 235–242. VGI, Wien.

Katzenbeisser, R. (2003): About the Calibration of LiDAR Sensors. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop, „3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data“, Dresden, 2003.

*Kraus, K.* (2000): Topographische Informationssysteme. Photogrammetrie, Band 3, Dümmler-Verlag, Bonn.

OMEGA (2005): <http://omega.utu.fi> (Zugriff am 23.09.2005)

TopScan (2002): Projektbericht zur Laserscannermessung am Vernagtferner (Österreich). 2002.

TopScan (2005): <http://www.topscan.de> (Zugriff am 30.09.2005)

*Unteregger, G.* (2003): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Laserscanning im vergletscherten Hochgebirge. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.

*Wagner, W.; Ullrich, A.; Melzer, T.; Briese, C. und Kraus, K.* (2004): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. ISPRS XXth Congress, Istanbul, Vol XXXV, Part B/3, pp. 201–206.

*Würländer, R. und Eder, K.* (1998): Leistungsfähigkeit aktueller photogrammetrischer Auswertemethoden zum Aufbau eines digitalen Gletscherkatasters. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 34, S. 167–185.