

*Diplom-Geograph Thomas Geist ist in dem interdisziplinären Forschungsprojekt OMEGA zusammen mit Kollegen aus Finnland und Norwegen dem Verhalten von Gletschern in Skandinavien und den Alpen auf der Spur.*

## **Digitale Geländemodelle aus flugzeuggestützten Laserscanner-Daten und ihre Anwendung für glaziologische Fragestellungen**

von Thomas Geist

### *1 Der Rahmen - Das EU-Projekt OMEGA*

Das Ziel des von der Europäischen Union finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojekts OMEGA (Laufzeit 4/2001 - 3/2004) ist die Entwicklung eines Prototyps für ein operationelles Monitoringsystem, das genaue und aktuelle Informationen über ausgewählte europäische Gletscher zur Verfügung stellen soll (Development of an **O**perational **M**onitoring system for **E**uropean **G**lacial **A**reas.) Neben dem Institut für Geographie sind noch sieben weitere Partner aus Norwegen, Finnland und Österreich beteiligt. Die Partner repräsentieren universitäre Forschungseinrichtungen (neben der Universität Innsbruck sind das noch die Universität Turku und die Technische Universität Helsinki in Finnland), Privatwirtschaft (Novosat Oy/Finnland, Norut IT/Norwegen, Joanneum Research/Österreich) sowie den öffentlichen Dienst (NVE/Norwegische Energie- und Wasserbehörde).

Teilziele in OMEGA sind (I) die Evaluierung des Potentials satelliten- und flugzeuggestützter Fernerkundungsmethoden für glaziologische Fragestellungen, (II) der Aufbau des Prototyps eines operationellen Monitoringsystems für Gletscher and (III) der Aufbau eines Muster-Datenpools für die OMEGA - Untersuchungsgebiete (Pellikka et al. 2001).

Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Erstellung digitaler Geländemodelle (im weiteren als DGM bezeichnet) mit Hilfe unterschiedlicher technischer Verfahren sowie deren Vergleich und Bewertung. Neben erprobten Methoden (z.B. photogrammetrische Auswertung von Luftbildern) werden auch moderne, satellitengestützte Verfahren (z.B. Erstellung von DGMs aus geometrisch hochauflösenden IKONOS-Daten) einbezogen.

Das Institut für Geographie der Universität Innsbruck hat in diesem Rahmen die Aufgabe, DGMs aus flugzeuggestützten Laserscannerdaten zu erstellen. Diese Modelle sollen eine Art Link zwischen den direkten Verfahren am Gletscher und den weni-

ger hoch auflösenden satellitengestützten Verfahren darstellen. Neben der Bereitstellung dieser Kalibrierungsdaten werden im Rahmen des Projektes die Möglichkeiten und Limitierungen der Technologie als unabhängige Methode für glaziologische Fragestellungen (z.B. Abschätzung der Massenbilanz) herausgearbeitet sowie allgemein Erfahrungen im Umgang mit dieser modernen Methode zur topographischen Geländeerfassung gesammelt.

Die OMEGA Untersuchungsgebiete liegen in Norwegen (Svartisen) und in Österreich (Ötztal). Die Svartisen-Eiskappen liegen auf der Höhe des Polarkreises im nördlichen Norwegen unter maritimen Klimabedingungen (13°59' E; 66°40' N, 221 km<sup>2</sup> and 148 km<sup>2</sup>). Die Höhererstreckung des vergletscherten Gebietes reicht von ca. 1600 m ü. M. bis fast auf Meeresniveau. Besonders die Westseite ist bestimmt durch maritime Klimabedingungen mit einem Jahresniederschlag von mehr als 2000 mm. Im Ostteil von Svartisen beträgt der Jahresniederschlag bereits weniger als 1000 mm. Als Hauptuntersuchungsgebiet für OMEGA wurde der Engabreen (38 km<sup>2</sup>) gewählt, ein nach Nordwesten exponierter Auslassgletscher der westlichen Eiskappe. Dort gibt es seit 1903 Aufzeichnungen über die Zungenlängenänderungen, seit 1945 wurden mehrere Luftbildbefliegungen durchgeführt und seit 1970 gibt es regelmäßige Messungen der Massenbilanz. Zusätzlich sind Daten über die Topographie des Gletscherbettes vorhanden. Als weiterer Gletscher ist der benachbarte Svartisheibreen in die OMEGA-Untersuchungen eingebunden.

In Österreich wurde mit dem Hintereisferner (8 km<sup>2</sup>) ein typischer Talgletscher mit einer relativen einfachen Geometrie als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Er hat eine Höhererstreckung von 3750 m ü. M bis ca. 2500 m ü. M. Für die Erstellung der Geländemodelle wurde auch der benachbarte Kesselwandferner einbezogen, der mit dem Hintereisferner noch zu Beginn des 20. Jhdts. verbunden war. Seit 1894 werden am Hintereisferner kontinuierliche Bewegungsmessungen durchgeführt, im gleichen Jahr erfolgte die erste Vermessung mit terrestrischer Photogrammetrie. Jährliche Massenbilanzmessungen werden seit 1952 gemessen und meteorologische Daten aus umliegenden Wetterstationen sind seit Mitte des 18. Jahrhunderts erhältlich. Die Topographie des Gletscherbettes wurde mit Hilfe von GPR (Ground Penetrating Radar) ermittelt (Kuhn et al. 1999, Span et al. 1997).

## *2 Flugzeuggestütztes Laserscanning (Airborne Laser Scanning) – wie funktioniert das?*

Airborne Laser Scanning ist eine moderne Methode zur topographischen Geländeaufnahme, die durch einen weitgehend automatisierten Meßablauf, eine digitale Datenaufzeichnung und eine computerbasierte Auswertung gekennzeichnet ist. In den letzten 10 Jahren hat sich diese Technologie aus dem experimentellen Stadium zu einem operationell einsetzbaren Verfahren entwickelt.

Die Laserscannermessung basiert auf einem Multisensorsystem mit den folgenden Hauptkomponenten (Abb. 1): **Laserdistanzmesser** mit Scanvorrichtung, **GPS-Empfänger** und **Inertiales Navigationssystem (INS)**. Ein Computer steuert die Einzelkomponenten und speichert die Daten zeitsynchron.

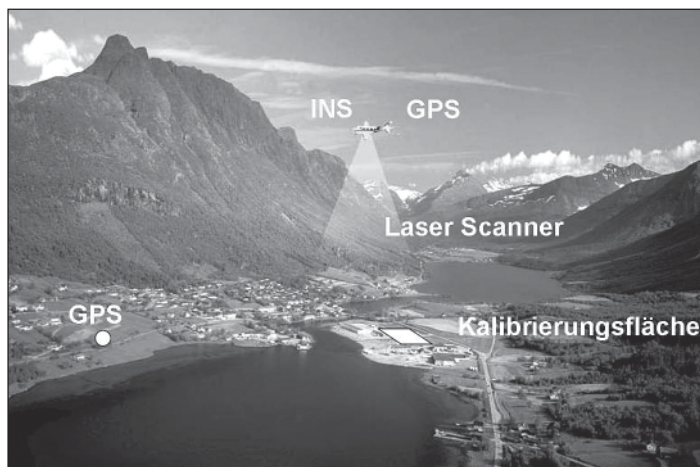


Abb. 1: Die Hauptkomponenten eines flugzeuggestützten Laserscanning-Systems.

Quelle Hintergrundbild: [www.optech.on.ca](http://www.optech.on.ca)

Der Laserstrahl wird durch einen Spiegel quer zur Flugrichtung abgelenkt und die Laufzeit des ausgesendeten und von einer Oberfläche reflektierten Signals gemessen. Auf diese Weise wird ein Geländestreifen entlang des Flugweges abgetastet. Aus dem Abtastwinkel des Scanners und der Messfrequenz ergibt sich zu-

sammen mit der Flughöhe über Grund, der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand der Fluglinien die Dichte und Verteilung der Meßpunkte im Aufnahmegebiet. Die Position und die Lage des Sensors im Raum werden aus den GPS- und INS-Messungen berechnet. Um die erwünschte Genauigkeit zu erhalten werden die GPS-Daten differentiell korrigiert. Zu diesem Zweck werden GPS-Daten an zusätzlichen Referenzstationen gesammelt. Die Systemkalibrierung stützt sich auf Überlappungsbereiche zwischen einzelnen Streifen und Kontrollflächen mit möglichst geringer Oberflächenrauigkeit (z.B. Sportplätze, große Parkplätze). Die Kontrollflächen werden mit einem unabhängigen Verfahren (z.B. Tachymetrie) höhenmäßig erfasst. Insgesamt kann eine Genauigkeit der Datenpunkte von +/- 15 cm in der Z-Komponente erreicht werden (Wever, 1999). Eine ausführliche Übersicht über Airborne Laser Scanning im Allgemeinen bietet Ackermann (1999).

Primäres Resultat der Messung sind X, Y, Z-Koordinaten für jeden Punkt an der Erdoberfläche, an dem der Laserstrahl reflektiert wird. Ergebnis der Auswertung ist eine Punktmenge, die die Erdoberfläche im Aufnahmegebiet beschreibt. Digitale Geländemodelle sind daraus abgeleitete Standardprodukte.

Der Hauptanwendungsbereich von Airborne Laser Scanning Technologie ist die topographische Geländeaufnahme, vor allem in bewaldeten Gebieten, da aufgrund

der hohen Messdichte genügend Punkte die Vegetationsschicht durchdringen und so eine ausreichende Modellierung der realen Geländeoberfläche zulassen. Daneben gibt es bereits Anwendungen in zahlreichen anderen Bereichen, wie Waldmanagement, Küstenschutz, Stadtplanung und Naturgefahrenmanagement (Ackermann, 1999). Wenige Erfahrungen konnten bisher bei der Aufnahme von Eis- und Schneeoberflächen gesammelt werden. In den letzten Jahren gab es Messkampagnen am Hardangerjøkulen, Norwegen (Kennett & Eiken 1997) und Unteraarferner, Schweiz (Favey et al. 1999).

Airborne Laser Scanning hat folgende Vorteile gegenüber der herkömmlichen photogrammetrischen Erfassung (durch Auswertung von Luftbildern) von Gletscheroberflächen:

Man benötigt keine Passpunkte und ist unabhängig von einer Textur der Oberfläche, was besonders im Bereich der Akkumulationsgebiete eines Gletschers ein großer Vorteil gegenüber der photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern ist. Man kann aufgrund der hohen Messpunktdichte die Gletscheroberfläche wesentlich detaillierter modellieren, was im Hinblick auf gletscherdynamische Vorgänge interessant ist. Aufgrund der Möglichkeit, mit Airborne Laser Scanning Genauigkeiten von 0,15 m im Z-Wert einer Koordinate zu erreichen, müsste man Luftbilder im Maßstab 1:5000 oder genauer aufnehmen.

### *3 Datenerfassung*

Bei der Datenerfassung arbeitet das Institut für Geographie der Universität Innsbruck mit der TopScan GmbH, Steinfurt, Deutschland zusammen. TopScan führt die Befliegungen mit dem Laserscanningssystem und das Preprocessing der Rohdaten durch. Bei dem von TopScan verwendeten Aufnahmesystem (**ALTM - Airborne Laser Terrain Mapper**) wird zusätzlich für jeden Koordinatenpunkt die am Empfänger ankommende Intensität des reflektierten Lasersignals gemessen.

Im Rahmen von OMEGA sind 3 Datenerfassungskampagnen in Norwegen und 10 Datenerfassungskampagnen im Ötztal vorgesehen. Die drei Flüge in Norwegen wurden im September 2001, Mai 2002 und August 2002 durchgeführt, was eine Beobachtung des glaziologischen Jahres 2001/2002 – unterteilt in Akkumulationsperiode und Ablationsperiode – ermöglicht. Bei allen drei Befliegungen wurde der Engabreen aufgenommen, während der ersten Befliegung zusätzlich noch der benachbarte Svartisheibreen. Bei dieser Befliegung befand sich außerdem eine digitale Kamera im Flugzeug. Zeitgleich mit den Befliegungen wurden glaziologische und geodätische Referenzdaten an den Gletschern erhoben (z.B. Schneehöhensondierungen, GPS-Messungen, Terrestrische Photogrammetrie).

Für die differentielle Korrektur der GPS-Daten des Laserscanning-Systems wurde während des Fluges ein GPS-Empfänger an einem nahe gelegenen Vermessungspunkt

betrieben, sowie Daten einer Permanentstation des staatlichen norwegischen Positionierungsdienst SATREF verwendet. Als Kalibrierungsfläche wurde ein Fußballplatz in der Gemeinde Halsa eingemessen.

Von den 10 Datenerfassungskampagnen im Ötztal wurden zwischen Oktober 2001 und September 2002 bereits sieben Befliegungen durchgeführt, was die Möglichkeit bietet, das glaziologische Jahr 2001/2002 zeitlich hochauflösend abzubilden. Die drei noch ausstehenden Flüge werden für die Aufnahme des glaziologischen Jahres 2002/2003 genutzt. Bei allen Flügen wurden Hintereisferner und der benachbarte Kesselwandferner aufgenommen, im August 2002 zusätzlich noch der Vernagtferner. Für die differentielle Korrektur der GPS-Daten des Laserscanning-Systems wurden Daten von GPS-Permanentstationen an Patscherkofel und Krahberg/Venet verwendet. Als Kalibrierungsfläche wurde der Fußballplatz in Zwieselstein eingemessen.

Das Preprocessing der Rohdaten beinhaltet die Integration der Daten aller Systemkomponenten (INS, GPS, Laufzeitmessung des Lasers, Scanwinkel, Kalibrierungsfläche) und als Ergebnis die Berechnung der Koordinaten mit X, Y, Z-Komponenten im gewählten geodätischen Bezugssystem (WGS84). Eine Zusammenfassung der benötigten Arbeitsschritte bietet Wever (1999).

#### 4 Auswertung der Daten - ausgewählte Beispiele

Nach dem Preprocessing liegen die vorverarbeiteten Daten als ASCII-Datensatz vor, wobei für jeden Datenpunkt eine Zeile im Format X, Y, Z, I (Positionswerte in WGS84 und UTM-Projektion mit orthometrischen Höhenwerten, Intensität des rückgestreuten Signals) angelegt wird.

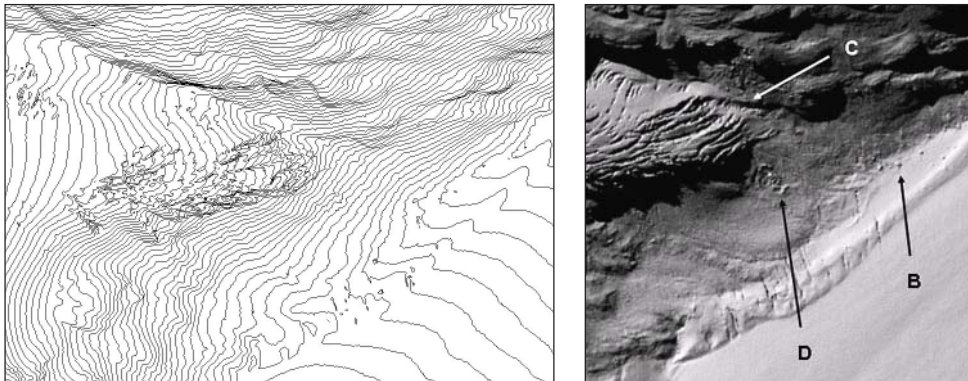
Eine Herausforderung besteht dabei in der großen Datenmenge, die für die weitere Bearbeitung anfällt. Eine Beispielübersicht (Abb. 2) zeigt die wichtigsten Systemparameter und die daraus resultierende Datenmenge für die Befliegungskampagne des Hintereisferners am 10. Oktober 2001.

Meßfrequenz	25.000 Hz	Aufgenommene Fläche	36 km <sup>2</sup>
Scanwinkel	+/- 20°	Anzahl der Flugstreifen	14
Scanfrequenz	25 Hz	Streifenbreite	ca. 500 m
Maximale Einsatzhöhe über Grund	2000 m	Durchschnittliche Flughöhe über Grund	ca. 1000 m
		Anzahl der Datenpunkte (X, Y, Z; I)	27.625.916
		Punktdichte (Punkte/km <sup>2</sup> )	769.524
		Durchschnittlicher Abstand zwischen den Datenpunkten	1.14 m

Abb 2: Ausgewählte Systemparameter des ALTM 1225 Laser Scanning System (linke Tabelle) sowie daraus resultierende Kennwerte für die Befliegung von Hintereisferner und Kesselwandferner am 10.10.2001.

Für die weitere Analyse wird für jeden Datensatz aus der vorhandenen Punktmenge ein DGM als regelmäßiges Raster (GRID) mit einer Zellengröße von 1 m gerechnet. Für eine erste Interpretation der Topographie werden aus diesem Raster Höhenlinienkarten und schattierte Reliefs erstellt.

Ein Beispiel für das Potential, das die Daten hinsichtlich geomorphologischer und glaziologischer Interpretation haben, bietet der in *Abb. 3* dargestellte Ausschnitt aus dem Konfluenzbereich von Hintereisferner und Langtaufererjochferner (Geist & Stötter 2002). Aufgrund der geringen Interpolationsdistanz wird die Topographie weitaus besser abgebildet als mit herkömmlichen Verfahren zur Geländeaufnahme. Selbst Details wie Gletscherspalten verschiedener Größe oder einzelne Eis- und Felsblöcke werden erfasst.



*Abb. 3: Konfluenzbereich von Hintereisferner und Langtaufererjochferner. Beide Gletscher waren noch bis zur zweiten Hälfte der 1990er Jahre miteinander verbunden.  
li.: Höhenlinienkarte mit einem Isolinienintervall von 5 m  
re.: Schattiertes Relief. Gut erkennbar ist die Mittelmoräne zwischen beiden Gletschern. B = Blöcke C = Gletscherspalten D = Eisblöcke*

In einem nächsten Schritt können Datensätze verschiedener Erfassungskampagnen miteinander verglichen werden. *Abb. 4* zeigt denselben Ausschnitt des Engabreen zum Zeitpunkt der ersten Befliegung im September 2001, der zweiten Befliegung im Mai 2002 sowie ein Differenzbild aus beiden DGMs.

Die multitemporale Auswertung der digitalen Geländemodelle ermöglicht die Quantifizierung von Veränderungen des Gletschervolumens im jeweiligen Zeitraum ( $\Delta V/\Delta t$ ). Unter Berücksichtigung von Materialdichte und eisdynamischen Prozessen kann damit auch eine Abschätzung über Massenveränderungen des Gletschers angestellt werden.

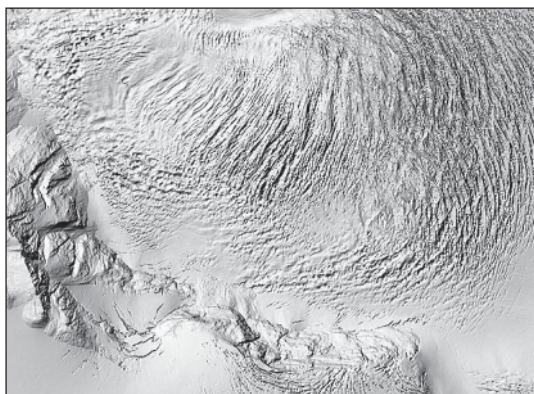


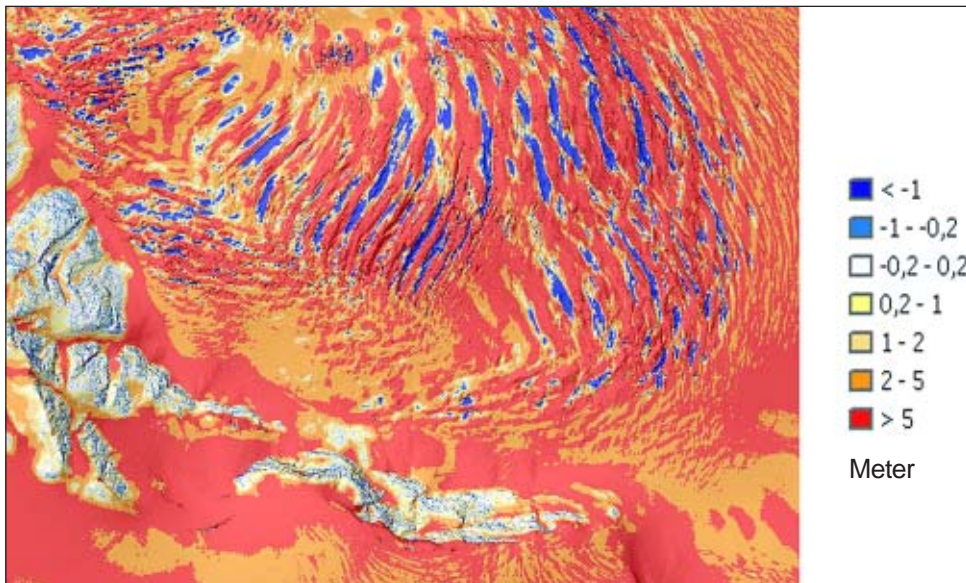
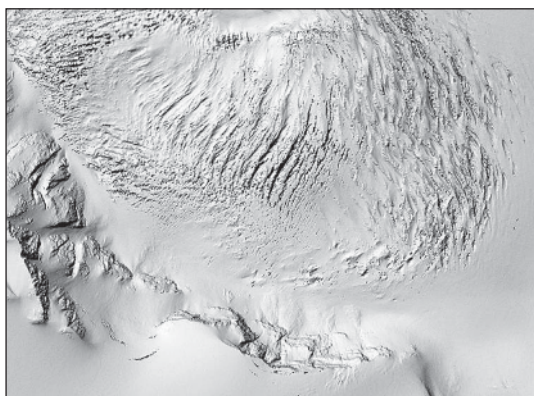
Abb. 4: Ausschnitt des Engadreen.

Oben: Schattierte Reliefdarstellung des DGM vom September 2001

Mitte: Schattierte Reliefdarstellung des DGM vom Mai 2002

Unten: Differenzdarstellung der Geländemodelle (Subtraktion DGM Mai 2002 - DGM September 2001).

Orange Farben zeigen Bereiche an, in denen die Geländeoberfläche im Mai 2002 „höher“ war als im September, was sich leicht durch Schneeakkumulation während des Winters erklären lässt. Blaue Farben zeigen Bereiche, die im September „höher“ gelegen sind als im Mai. Dabei handelt es sich vor allem um Gletscherspalten, die sich während beider Befliegungszeitpunkte neu gebildet oder ihre Lage verändert haben. Weiße Bereiche haben in beiden DGMs eine konstante Z-Komponente. Hier handelt sich um steilere Felsbereiche, auf denen sich kein Schnee ablagern konnte.



## 5 Kommende Aufgaben, Ausblick

Neben der Durchführung der drei noch ausstehenden Befliegungen am Hintereiserner sowie der Vorbereitung der Daten für den Prototyp des OMEGA Monitoring Systems haben folgende Aufgaben im weiteren Verlauf des Projektes eine hohe Priorität:

- Überprüfung der Qualität der aus den Laserscannerdaten erstellten DGMs:  
Erste Vergleiche der Laser DGMs am Engabreen mit während der Befliegung durchgeführten differentiell korrigierten GPS-Positionsbestimmungen (ca. 6000 Messungen) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung in Bezug auf die Z-Komponente der Koordinaten (Abweichung voneinander ca. 3 +/- 7,5 cm).  
Im weiteren Verlauf des Projektes sollen durch einen Vergleich mit anderen, im Rahmen von OMEGA erstellten, Geländemodellen weitergehende Aussagen zu Genauigkeit und Präzision der Laser DGMs ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang sind die terrestrischen Stereophotografien sehr interessant, die zeitgleich mit einer Laserscanner-Befliegung im Bereich der Zunge des Hintereiserners aufgenommen wurden. Das aus diesen Daten gewonnene Geländemodell sollte aufgrund seiner durch das Messverfahren bedingten großen Genauigkeit eine weitgehende Qualitätsbewertung des Laserscan DGM ermöglichen.
- Multitemporale Auswertung und Interpretation der Daten:  
Nachdem die vorverarbeiteten Datensätze der bisher sieben am Hintereiserner durchgeführten Befliegungen in Kürze vorliegen werden, wird ein Schwerpunkt der Arbeit im Jahr 2003 auf der multitemporalen Auswertung der Daten und deren glaziologischer Interpretation liegen (besonders im Hinblick auf eine Abschätzung der Massenbilanz sowie eisdynamischer Vorgänge). Diese Arbeit wird fachübergreifend in enger Kooperation mit dem Institut für Meteorologie und Geophysik durchgeführt werden.
- Auswertung der Intensitätswerte:  
Viel versprechende Perspektiven bietet die Auswertung der mit jedem Koordinatenpunkt abgespeicherten Werte für die Intensität des empfangenen Lasersignals. Die Reflexion des Laserstrahls erfolgt in der Regel diffus und in Abhängigkeit von den jeweiligen Oberflächeneigenschaften. Im Rahmen einer Diplomarbeit (Eric Lutz, in Vorbereitung) werden die durch die Aufnahmegeometrie (z.B. Flughöhe, Scanwinkel) bedingten Faktoren untersucht, welche den gespeicherten Intensitätswert beeinflussen. Mit den geometrisch normalisierten Intensitätsdaten wird das Potential der Laserscannerdaten hinsichtlich der Aussagefähigkeit über Eigenschaften der Geländeoberfläche evaluiert. Ziel ist die Klassifikation verschiedener Oberflächentypen (Eis, Firn, Schnee, Fels).



- Auswertung der Schneevertelung in Abhängigkeit von der Topographie:

In einer weiteren Diplomarbeit soll dieser Aspekt in den nicht vergletscherten Teilen der gescannten Einzugsgebiete flächenhaft untersucht werden.

Nach Ablauf des Projektes wird am Institut für Geographie der Universität Innsbruck ein Fundament an Erfahrungen über die Durchführung von flugzeuggestützten Laserscannerkampagnen sowie die Auswertung der daraus gewonnenen Daten vorhanden sein, das Perspektiven für die Anwendung dieser state-of-the-art-Technologie zur topographischen Geländeerfassung in weiteren Arbeits- und Forschungsvorhaben des Instituts eröffnet. Ein wichtiger und nicht zu unterschätzender Nebenaspekt sind die wertvollen Erfahrungen in dem interdisziplinären und international ausgerichteten Umfeld dieses Forschungsvorhabens.

### *Literatur*

- Ackermann, F. 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 64-67.
- Favey, E., Geiger, A., Gudmundsson, G.H., Wehr, A. 1999. Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler*, 81A (4): 555-561.
- Geist, Th., Stötter, H. 2002. First results of airborne laser scanning technology as a tool for the quantification of glacier mass balance. *Proceedings, EARSeL workshop on observing our cryosphere from space: techniques and methods for monitoring snow and ice with regard to climate change*, 11 - 13 März 2002, Bern.
- Kennett, M., Eiken, T. 1997. Airborne measurement of glacier surface elevation by scanning laser altimeter. *Annals of Glaciology*, 24: 293-296.
- Kuhn, M., Dreiseitl, E., Hofinger, S., Markl, G., Span, N., Kaser, G. 1999. Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. *Geografiska Annaler*, 81 A (4): 659-670.
- Lutz, E. *in Vorbereitung*. Determination of the reflection characteristics of surface types in glacial environments using an airborne laser scanning system. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- Pellikka, P., Kajuutti, K., Koskinen, R., Jackson, M., Stötter, J., Haggren, H., Luukkonen, K.-M., Guneriusson, T., Sharov, A. 2001. Development of an operational monitoring system for glaciers – synthesis of earth observation data of the past, present and future. *Proceedings of International Workshop on Geo-Spatial Knowledge Processing on Natural Resource Management*: 283-288. Varese.
- Span, N., Kuhn, M., Schneider, H. 1997. 100 years of ice dynamics of Hintereisferner, Central Alps, Austria, 1894-1994. *Annals of Glaciology*, 24: 297-302.
- Wever, Ch. 1999. Laserscannermessungen – ein Verfahren setzt sich durch. *GIS Geoinformationssysteme*, 2/99: 12-17.



- ▲ Kooperation zwischen Forschung, Industrie und öffentlicher Verwaltung
- ▲ Transdisziplinär vernetzte Forschungs- und Entwicklungsplattform im Umfeld Naturraum – Mensch – Gesellschaft, insbesondere
  - ▲ Optimierung des Umgangs mit Naturgefahren
  - ▲ Integrales Risikomanagement
  - ▲ *Global Change* Prozesse
- ▲ Praxisbezogen und zielgerichtet
- ▲ Flexible und maßgeschneiderte Lösungen für Ihren Bedarf (*public private partnership*)
- ▲ Hohe Attraktivität durch Fördermöglichkeit im Kplus Programm
- ▲ Weitere Informationen und Kontakt

[www.alps-gmbh.com](http://www.alps-gmbh.com)  
[info@alps-gmbh.com](mailto:info@alps-gmbh.com)



Mit freundlicher Unterstützung von

