



Herleitung digitaler Oberflächenmodelle aus hochauflösenden Stereo-Bilddaten im alpinen Gelände

Karlheinz Gutjahr ¹, Johannes Raggam ², Reinhold Wessely ³

¹ *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

² *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

³ *Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **93** (2), S. 83–95

2005

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Gutjahr_VGI_200508,  
Title = {Herleitung digitaler Oberfl{"a}chenmodelle aus hochaufl{"o}senden  
Stereo-Bilddaten im alpinen Gel{"a}nde},  
Author = {Gutjahr, Karlheinz and Raggam, Johannes and Wessely, Reinhold},  
Journal = {VGI -- {"O}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {83--95},  
Number = {2},  
Year = {2005},  
Volume = {93}  
}
```



Herleitung digitaler Oberflächenmodelle aus hochauflösenden Stereo-Bilddaten im alpinen Gelände



Karlheinz Gutjahr, Hannes Raggam und Martina Franke, Graz

Zusammenfassung

Hochauflösende optische Satellitensysteme, welche nominelle Bodenauflösungen von wenigen Metern bzw. im Submeterbereich erreichen, kommen in der Fernerkundung verstärkt zum Einsatz. Diese Systeme bieten vielfach auch die Möglichkeit, Stereodaten in einem einzigen Überflug aufzunehmen. Im Forschungsprojekt „Operational Monitoring of European Glacial Areas“ im 5. EU-Rahmenprogramm wurde das Potential solcher hochauflösender Stereo-Bilddaten zur Herleitung digitaler Oberflächenmodelle anhand eines alpinen Testgebietes in den Ötztaler Alpen demonstriert. In dieser Arbeit werden die einzelnen Schritte der stereometrischen Prozessierungskette diskutiert und die erzielten Ergebnisse anhand von Referenzdaten analysiert.

Abstract

High resolution optical spaceborne systems which achieve nominal ground resolutions of a few meters or less than one meter, respectively, are increasingly used in remote sensing. These systems in many cases are equipped with the capability to acquire stereo data in a single overflight. In the research project „Operational Monitoring of European Glacial Areas“ of the 5th EU framework programme the potential of such high resolution stereo image data to generate digital surface models was demonstrated for an alpine test area in the Ötztal alps. In this paper the individual steps of the stereometric processing chain are discussed and the obtained results are analysed with respect to reference data.

1. Einleitung

In der Fernerkundung etablieren sich vermehrt hochauflösende optische Satellitensysteme, welche Aufnahmen mit hohem Detailreichtum und einer Bildpunktauflösung im Meter- und Submeterbereich ermöglichen und im weitesten Sinne den Brückenschlag zur Luftbild-Photogrammetrie herstellen. Zusätzlich zur hohen Bodenauflösung bieten diese Systeme vielfach auch die Möglichkeit, Stereo-Bildpaare innerhalb eines Überflugs („in-track“) aufzunehmen.

Dies erfolgt durch Aufnahme eines Gebietes durch vorwärts- bzw. rückwärts-verschwenkte Sensoren. Hierfür können zwei separate Sensoren verwendet werden, wie z.B. beim HRS (High Resolution Stereo)-Instrument von Spot 5 oder dem PRISM-Instrument der japanischen Alos-Mission, oder es kann ein einzelner Sensor zur Akquisition der Stereo-Bilddaten entsprechend gesteuert werden, wie dies z.B. bei den Systemen von Eros, Ikonos oder Quickbird der Fall ist. Der Vorteil dieser „in-track“-Stereo-Konstellationen liegt in der nahezu zeitgleichen Datenaufnahme, sodass die Daten nicht mit zeitlich bedingten unterschiedlichen Bildinhalten behaftet sind.

Die gegenständliche Arbeit bezieht sich auf das Potential hochauflösender Stereo-Daten der Sensoren Eros und Ikonos im Zusammenhang mit der Herleitung von Oberflächenmodellen in alpinem Gelände. Der Hintergrund der Untersuchungen ist durch das Forschungsprojekt „Operational Monitoring of European Glacial Areas“ (OMEGA; Sharov et al., 2002) im 5. EU-Rahmenprogramm gegeben. Im Rahmen dieses Projektes wurde für den Hintereisferner-Gletscher in den Ötztaler Alpen versucht, die aktuelle Gletscheroberfläche aus hochauflösenden Stereo-Bilddaten zu berechnen und zu Aussagen hinsichtlich des Gletscher-Rückgangs im Vergleich zu Referenzdaten aus dem Jahre 1974 zu kommen.

Die wesentlichen Schritte der klassischen stereometrischen Prozessierungskette bestehen in der Sensormodellierung (Orientierung), in der automatischen Bildkorrelation sowie in der Herleitung von Oberflächenmodellen aus den Korrelationsergebnissen. Diese Aspekte wurden für die genannten hochauflösenden Sensoren Eros und Ikonos im Rahmen dieser Arbeit durchleuchtet. Darüber hinaus wurde auch ein alternatives Verfahren zur Herleitung von 3D-Oberflächenmodellen untersucht, welches auf vorentzerrten

Stereo-Bilddaten (Stereo-Orthophotos) beruht (siehe auch Schenk et al., 1990 oder Norvelle, 1996).

Zur Auswertung wurde das *Remote Sensing Software Package Graz* (RSG; JOANNEUM RESEARCH, 2005) verwendet, welches am Institut entwickelt wurde. Dieses ist für geometrische Prozessierungsanforderungen einer Vielzahl von Fernerkundungsbilddaten konzipiert und bietet somit auf die gegenständlichen Arbeiten bezogen auch die grundlegenden Algorithmen bzw. die Basis für allfällig notwendige algorithmische Erweiterungen.

2. Die Aufnahmesysteme Eros und Ikonos

Zusätzlich zur hohen Bodenauflösung bieten der Eros- wie auch der Ikonos-Sensor die Möglichkeit, Stereobilder während eines Überflugs aufzunehmen. Erreicht wird dies durch Verschwenken eines Sensors während des Überflugs (siehe Abbildung 1). Einige Kenngrößen dieser beiden Aufnahmesysteme sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Eros A1 hat nur einen panchromatischen Sensor, dessen nominelle Bodenauflösung bei etwa 1.8 Metern im Falle von Nadiraufnahmen liegt. Der Sensor ist in jede beliebige Richtung um bis zu 45° aus dem Nadir verschwenkbar. Die geplanten B-Satelliten sollen eine höhere Auflösung von 0.9 Metern aufweisen und zusätzlich mit einem multispektralen Sensor ausgestattet werden. Der Eros-Satellit zeichnet nicht wie andere optische Satelliten in einem synchronen Modus mit konstantem Aufnahmewinkel auf, sondern asynchron. Hierbei wird der Sensor entgegen der Flugrichtung nachgedreht (siehe Abbildung 2), um eine im Vergleich zur Fluggeschwindigkeit geringere Aufnahmegeschwindigkeit und dadurch die hohe Bildauflösung zu erreichen.

An Bord von Ikonos befinden sich ein panchromatischer Sensor, welcher bei einer Nadiraufnahme mit einer nominellen Bodenauflösung von 1 Meter aufzeichnet und ein multispektraler Sensor mit vier Kanälen, der Daten mit einer Bodenauflösung von nominell 4 Metern liefert. Ikonos ist in der Lage, seine Aufnahmesysteme um bis zu 26° in jede Richtung zu verschwenken. Mehr Details können auf den Homepages der Betreiberfirmen Imagesat International und Space Imaging (Ref. [5] bzw. Ref. [13]) nachgelesen werden.

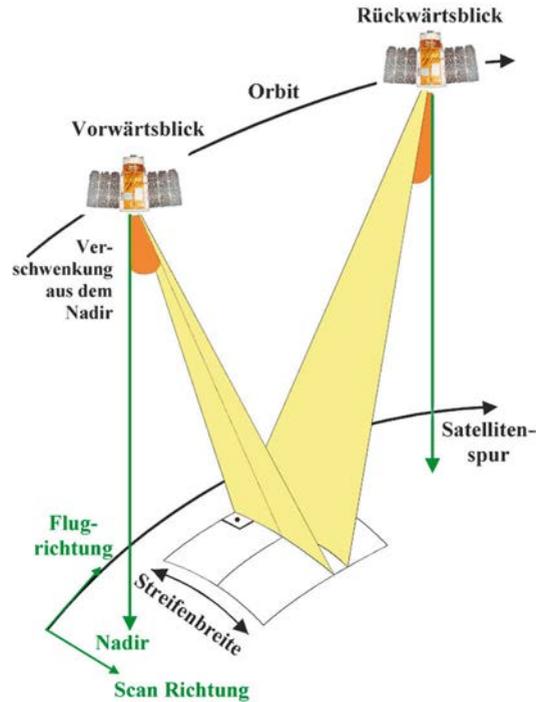


Abb. 1: In-track Stereoaufnahme

	Eros 1A	Ikonos
Start	05.12.2000	24.09.1999
Betreiber	ImageSat Int.	Space Imaging
Flughöhe	480 km	618 km
Inklination	97.3°	98.1°
Streifenbreite	13.5 km	11 km
Auflösung	1.8 m Pan	1 m Pan, 4 m MS
Verschwenkung	Max. 45°	Max. 26°

Tab. 1: Kenngrößen der verwendeten Aufnahmesysteme

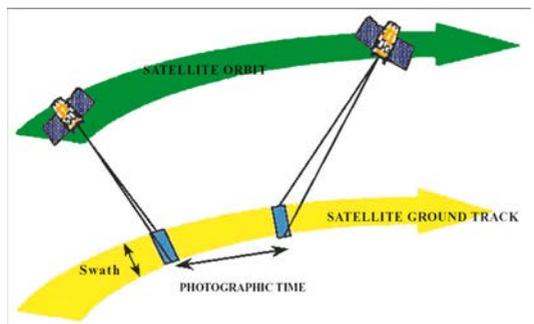


Abb. 2: Aufnahmedynamik des Eros-Sensors (Homepage Imagesat International; Ref. [5])

3. Bild- und Referenzdaten

3.1. Bilddaten

Der Hintereisferner-Gletscher befindet sich in den Öztaler Alpen südwestlich von Innsbruck (siehe Abbildung 3). Dieser Gletscher wird seit langem auch durch terrestrische Messungen beobachtet, weshalb er auch beispielhaft für die Untersuchungen im Rahmen des OMEGA-Projektes gewählt wurde.

Parameter	Eros	Ikonos
Aufnahmedatum	01.10.2002	12.08.2003
Aufnahmezeit	09:30 GMT	10:22 GMT
Basis/Höhe	≈ 1.19	≈ 0.54
Off-Nadir / Fwd	37.03° – 24.15°	28.99°
Off-Nadir / Bwd	24.21° – 37.54°	15.72°
Auflösung	2.4 m	1.0 m

Tab. 2: Aufnahmeparameter der Eros- und Ikonos-Bildpaare

Für die Arbeiten wurden panchromatische Stereodaten des Eros-Systems sowie panchromatische Ikonos-Stereoaufnahmen verwendet. Bei den Eros-Daten deckt der Vorwärtsblick nur den Bereich der Gletscherzunge des „Hintereisferners“ ab, in allen anderen Bildern ist der gesamte Gletscherbereich abgebildet. In Tabelle 2 sind einige geometrisch relevante Aufnahmeparameter dieser Bilddaten zusammengestellt. Die Stereo-Bilddaten von Eros bzw. Ikonos sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu sehen.

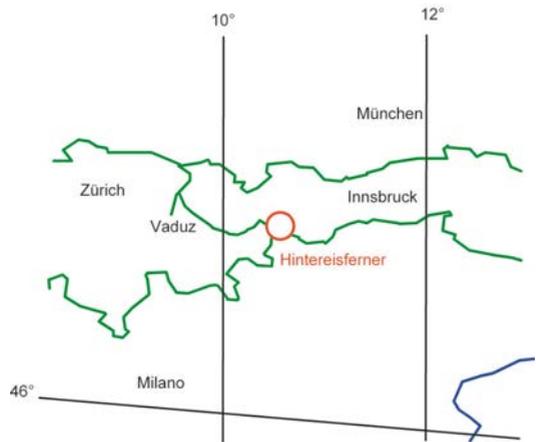


Abb. 3: Lage des Testgebietes

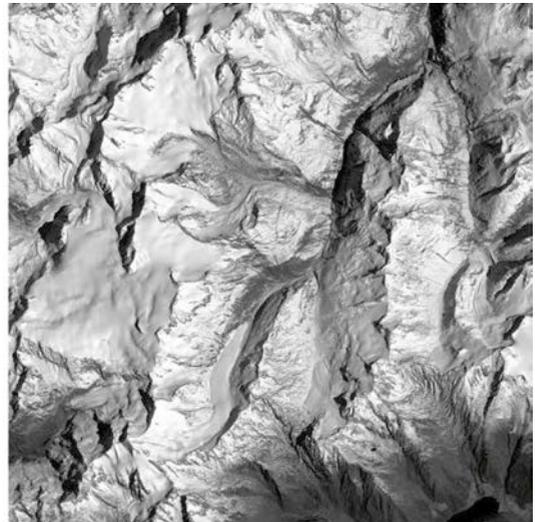


Abb. 4: Eros-Stereobilddaten (Links: Vorwärtsblick; rechts: Rückwärtsblick).

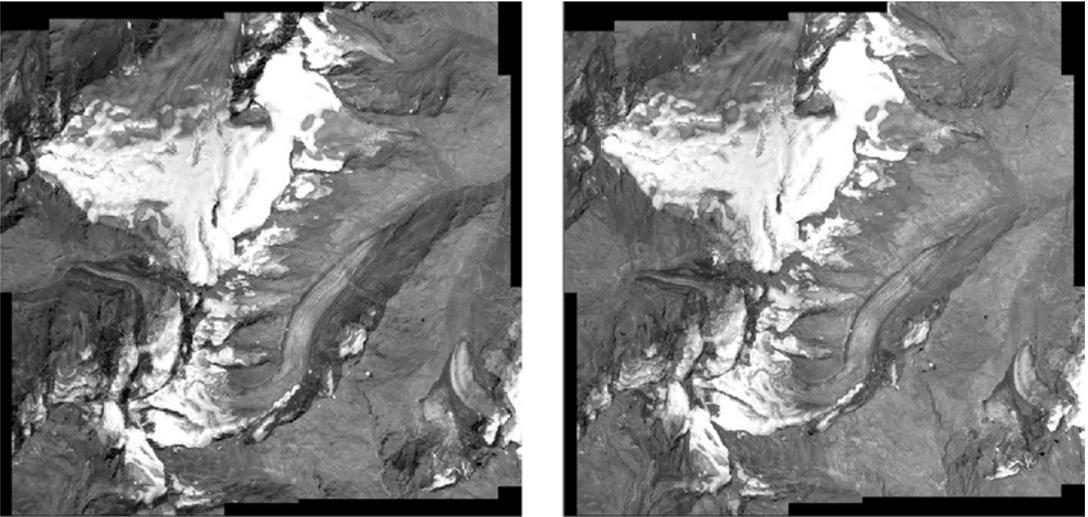


Abb. 5: Ikonos- Stereobilddaten (Links: Vorwärtsblick; rechts: Rückwärtsblick).

3.2. Referenzdaten

Für die geometrische Sensormodellierung, zur Evaluierung der Sensor-Abbildungsgenauigkeit sowie zur Verifizierung allfälliger Ergebnisse werden in der Regel Kontrollpunkte und anderweitige Referenzdaten benötigt. Zur Passpunkt-messung standen für dieses Testgebiet digitale Orthophotos des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen aus dem Jahr 1997 mit einer Auflösung von 2 Metern sowie Katastertriangulierungspunkte zur Verfügung.

Als Höhenreferenz konnte ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 25 Metern

verwendet werden. Dieses wurde am Institut aus topographischen Karten im Maßstab 1 : 50.000 hergeleitet, welche den Status des Jahres 1974 repräsentieren. Auf Grund dieser zeitlichen Referenz, aber auch auf Grund des reduzierten Detailgehalts der zugrunde liegenden Karten ist dieses Geländemodell nur bedingt im Zusammenhang mit kartographischen Anwendungen hochauflösender Satellitenbilddaten brauchbar, da diese in der Regel ein wesentlich höheres Genauigkeitspotential bieten. Eine beleuchtete Darstellung des digitalen Referenz-Höhenmodells mit dem Detailgebiet des Hintereisferners zeigt Abbildung 6.

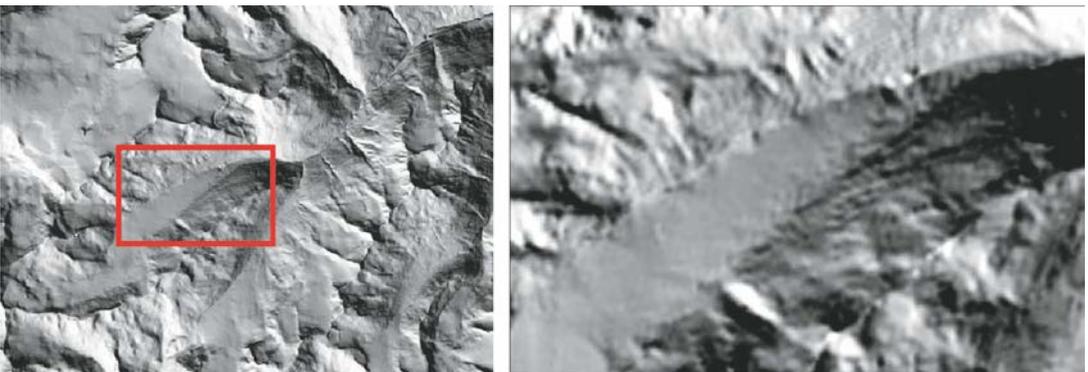


Abb. 6: Digitales Referenz-Geländemodell (links) und Detail-Testgebiet „Hintereisferner“ (rechts).

4. Stereoprozessierung der Eros- und Ikonos-Bilddaten

4.1. Sensormodellierung

Das mathematische Abbildungsmodell (Sensormodell) dient der Transformation eines Bildpunktes zum entsprechenden Bodenpunkt auf der Erdoberfläche. Das konventionelle Sensormodell für optische Zeilenscanner enthält im wesentlichen Parameter der äußeren Orientierung. Diese werden auf Grund der dynamischen Aufnahmecharakteristik von Zeilenscannern im Allgemeinen zeitvariabel modelliert. Daraus folgen modifizierte Kollinearitätsgleichungen, welche z.B. die Transformation zwischen Bodenpunkt (X, Y, Z) und Bildpunkt (x, y) ermöglichen:

$$\begin{aligned}x &= g_x(X, Y, Z) \\y &= g_y(X, Y, Z)\end{aligned}$$

Die Berechnung von Bodenkoordinaten (X, Y, Z) aus stereoskopischen Bildpunktmessungen $(x_1, y_1; x_2, y_2)$ beruht auf einem Paar solcher Kollinearitätsgleichungen und einem auf Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate beruhenden räumlichen Vorwärtsschnitt (Raggam et al., 1990).

Für einige Aufnahmesysteme der jüngeren Vergangenheit wurde dazu übergegangen, anstatt oder auch zusätzlich zu Informationen bzgl. der äußeren Orientierung sogenannte rationale Polynomkoeffizienten (RPC – rational polynomial coefficients) zur Verfügung zu stellen. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen Boden- und Bildkoordinaten durch den Quotienten zweier kubischer Polynome beschrieben:

$$x = \frac{f_x(X, Y, Z)}{g_x(X, Y, Z)} \quad y = \frac{f_y(X, Y, Z)}{g_y(X, Y, Z)}$$

Die rationalen Polynomkoeffizienten beziehen sich hierbei grundsätzlich auf geographische Bodenkoordinaten sowie das globale WGS84-Erdellipsoid.

Dieser Ansatz trifft im gegenständlichen Fall für die Ikonos-Stereodaten zu. Aus diesem Grund musste auch die RSG-Software um die RPC-basierte Abbildungsvorschrift und die damit verbundenen Transformationsroutinen erweitert werden. Für die Eros-Daten konnte grundsätzlich der für optische Zeilenscanner-Daten implementierte Modellierungsansatz verwendet werden. Für beide Datensätze mussten jedoch entsprechende Import-Funktionen implementiert werden, um die Bilddaten und die zugehörigen Abbil-

dungsparameter bzw. rationalen Polynomkoeffizienten zu lesen und weiterführend aufzubereiten.

In der Regel sind die auf diesem Weg geschaffenen Initial-Abbildungsmodelle zu ungenau oder überhaupt unvollständig. Unter Verwendung von Passpunkten und Ausgleichsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate können die Abbildungsmodelle optimiert werden. In Bezug auf die rationalen Polynome von Ikonos wurde hierbei von Dial und Grodecki (2002) festgestellt, dass es ausreichend ist, die Genauigkeitsdefizite der RPC-basierten Transformation durch zusätzliche Parameter, welche einer Affin-Transformation entsprechen, zu kompensieren:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{x,0} \\ C_{y,0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{x,x} & C_{x,y} \\ C_{y,x} & C_{y,y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Referenzdaten konnten 18 Passpunkte in den Eros-Szenen bzw. 24 Passpunkte in den Ikonos-Szenen gemessen werden und mit diesen die zugehörigen Sensormodelle wie erwähnt optimiert werden.

Aussagen über die Modellierungsgenauigkeit können bezogen auf das Einzelbild durch Rücktransformation eines Passpunktes ins Bild und Vergleich der errechneten mit den gemessenen Bildkoordinaten gewonnen werden. Statistische Kenngrößen der für die Eros- und Ikonos-Bilddaten resultierenden Punktlagefehler sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Für die Eros-Daten wird eine Lagegenauigkeit von knapp 2 Pixel (1σ) erreicht, während jene der Ikonos-Bilddaten im Subpixel-Bereich liegt. Die schlechtere Genauigkeit der Eros-Daten ist auf den asynchronen Aufnahmemodus und den Umstand zurückzuführen, dass diese Asynchronität im Vergleich zu herkömmlichen Zeilenscanner-Bilddaten und mit den dafür verwendeten Ansätzen prinzipiell schwierig zu modellieren ist.

Bezogen auf das Stereo-Bildpaar können für homologe Passpunktmessungen mittels räumlichem Vorwärtsschnitt Bodenkoordinaten errechnet und mit den gemessenen Bodenkoordinaten verglichen werden. Statistische Parameter der für die Testdaten resultierenden 3D-Punktresiduen sind in Tabelle 4 zusammengestellt und erlauben Rückschlüsse auf erzielbare (a-posteriori) Genauigkeiten. Für die Eros-Stereodaten wurde auf diesem Weg eine Lage- und Höhengenaugigkeit von ca. 3 Metern (1σ) prognostiziert. Für die Ikonos-Stereodaten ergeben sich der höheren Bildpunktauflösung und Aufsetzgenauigkeit ent-

sprechend eine Lagegenauigkeit von weniger als 1 Meter (1σ) und eine Höhengenaugigkeit von 1.5 Metern (1σ).

		Azimut	Scan	Länge
Eros-Fwd (22 Punkte)	RMS	1.50	0.99	1.80
	MIN	-2.24	-2.08	0.33
	MAX	4.34	1.66	4.44
Eros-Bwd (33 Punkte)	RMS	1.44	1.59	2.14
	MIN	-2.84	-3.37	0.57
	MAX	3.38	3.83	4.97
Ikonos-Fwd (24 Punkte)	RMS	0.51	0.78	0.93
	MIN	-1.10	-2.22	0.25
	MAX	0.91	1.85	2.23
Ikonos-Bwd (24 Punkte)	RMS	0.56	0.49	0.75
	MIN	-1.29	-1.07	0.15
	MAX	1.09	1.36	1.53

Tab. 3: Punktresiduen der verwendeten Bilddaten.

		Ost	Nord	Höhe	Länge
Eros (18 Punkte)	RMS	2.8	2.1	3.2	-4.7
	Min	-6.4	-4.4	-5.6	2.2
	Max	4.8	4.2	5.4	8.1
Ikonos (24 Punkte)	RMS	0.6	0.5	1.5	1.7
	Min	-1.9	-1.0	-2.6	0.4
	Max	1.1	1.1	3.3	3.3

Tab. 4: A-posteriori-Aufsetzgenauigkeit der Eros- und Ikonos-Stereomodelle

4.2. Automatische Bildkorrelation

Bei der automatischen Bildkorrelation (*Image Matching*) werden einander entsprechende Bildpunkte mit Hilfe der Grauwertverteilung in den beiden Stereobildern gesucht. Die relativen Positionsdifferenzen dieser Bildpunkte sind als Stereo-Parallaxen bekannt. Im Programmpaket RSG sind verschiedene Methoden zur Bildkorrelation mit zahlreichen Prozessierungsoptionen implementiert, welche von Perko (2001) zusammenfassend beschrieben wurden.

Für die Stereo-Korrelation von Fernerkundungs-Bilddaten früherer Aufnahmesysteme wurde unter Berücksichtigung von Rechenzeit und Qualität der Ergebnisse bevorzugt das von Paar und Pölzleitner (1992) implementierte „Feature-Vector-Verfahren“ verwendet. Für neue, hochauflösende Bilddaten hingegen hat sich in

Untersuchungen von Franke (2003) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen wie Wald, Vegetation oder bebauten Gebiet die Kreuzkorrelation als bestgeeignetes Verfahren erwiesen.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde die Entwicklung eines hybriden Korrelations-Verfahrens ins Auge gefasst und von Caballo-Perucha (2003) realisiert, in welchem die beiden genannten Verfahren verknüpft werden. Neben den zahlreichen für das Feature-Vector-Matching vorgesehenen Operatoren kann hierbei auch der Kreuzkorrelations-Koeffizient als zusätzliche Feature-Ebene verwendet werden. Dieses Verfahren hat sich in ersten Tests als sehr leistungsfähig herausgestellt und wurde demnach auch für das gegenständliche Vorhaben verwendet.

Für die Bildkorrelation ist es in der Regel vorteilhaft, die Bilder vorweg grob zueinander zu registrieren, wodurch pseudo-epipolare Bildpaare mit einer zumindest bei klassischen Stereo-Bilddaten ausgezeichneten Parallaxenrichtung erzeugt werden. Dadurch kann der Suchbereich bei der Bildkorrelation eingeschränkt und damit sowohl Rechenaufwand als auch Fehlkorrelationen reduziert werden. Bei den Ikonos-Szenen erübrigt sich dieser Vorverarbeitungsschritt, da diese bereits in einer quasi-epipolaren Geometrie mit den Parallaxen in einer ausgezeichneten Richtung vorliegen. Andererseits kann für die Eros-Szenen auf Grund des asynchronen Aufnahmemodus auch durch die Grobregistrierung keine ausgezeichnete Parallaxenrichtung gefunden werden (Abbildung 7; Raggam et al., 2004). Dieses Parallaxenverhalten wird auch aus den Illustrationen der Abbildung 8 ersichtlich, welche Anaglyphendarstellungen der (registrierten) Stereo-Bilddaten zeigt.

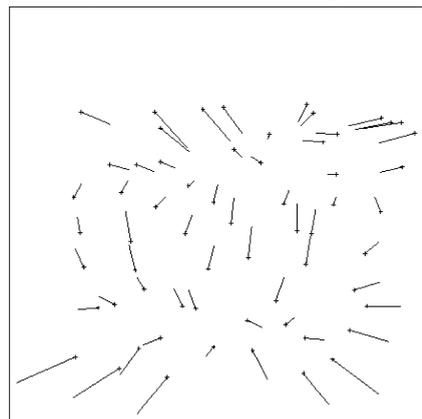


Abb. 7: Stereo-Parallaxen der Eros-Stereobilddaten.

Die Erfolgsrate der automatischen Bildkorrelation hängt grundsätzlich von den geometrischen und radiometrischen Eigenschaften der Stereo-Bilddaten ab. Starke geometrische Unterschiede aufgrund von extremen Aufnahmesituationen, d.h. bei großem Basis/Höhen-Verhältnis, sowie homogene Bildbereiche mit wenig Textur erschweren das Korrelationsvorhaben. Während ersteres Problem speziell bei den vorliegenden Eros-Bilddaten mit einem Basis/Höhen-Verhältnis von etwa 1.2 auftritt, ist die durch schnee- und gletscherbedeckte Bereiche oder auch durch Schattenzonen bedingte radiometrische Homogenität ein grundlegendes Problem für dieses alpine Testgebiet. Eine Illustration beider Faktoren ist für einen Detailausschnitt in Abbildung 9 dargestellt. Das Eros-Bildpaar zeigt hier im Vergleich zu den Ikonos-Bilddaten sowohl extreme geometrische Unterschiede wie auch ausgedehnte abgeschattete Bereiche, in welchen das Geländere relief nicht mehr erkennbar ist.

Als Kontroll- und Qualitätskriterium für die Korrelation der vorliegenden Bilddaten wurde die Rückwärtskorrelation („Backmatching“) verwendet. Die Lagedifferenz zwischen Ausgangs-Bild-

punkt und dem über die Rückwärtskorrelation gefundenen Punkt kann als Indikator für eine erfolgreiche Bildkorrelation verwendet werden. Je größer diese Backmatching-Distanz ist, desto fragwürdiger ist das Korrelationsergebnis.

In der Tabelle sind statistische Angaben zur Backmatching-Distanz für die vorliegenden Stereo-Bilddaten zusammengestellt. Erwartungsgemäß ist der Prozentsatz fragwürdiger Matching-Ergebnisse – in diesem Fall solche mit einer Backmatching-Distanz größer 3 Pixel – für die Eros-Daten deutlich höher als für die Ikonos-Daten. Die kritischen Bereiche der Bildkorrelation werden auch durch Abbildung illustriert, in welcher die aus dem Backmatching resultierenden Lageunterschiede den Bilddaten in Blau überlagert dargestellt sind.

	Eros	Ikonos
Mittelwert	2.41	0.65
Standardabweichung	3.63	1.09
> 3 Pixel	22.37 %	4.09 %

Tab. 5: Backmatching-Statistik für die Korrelation der Stereo-Bilddaten.

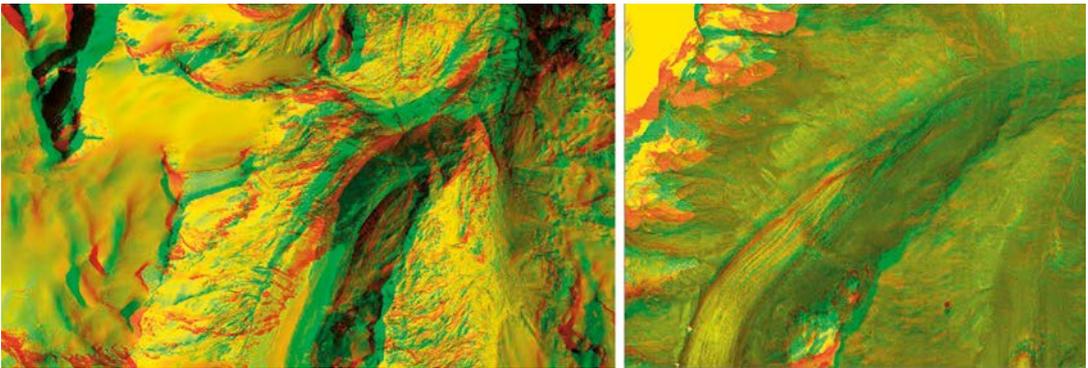


Abb. 8: Anaglyphendarstellung (Rot: Vorwärtsblick; Grün: Rückwärtsblick) der Eros- (links) bzw. Ikonos-Bilddaten (rechts).

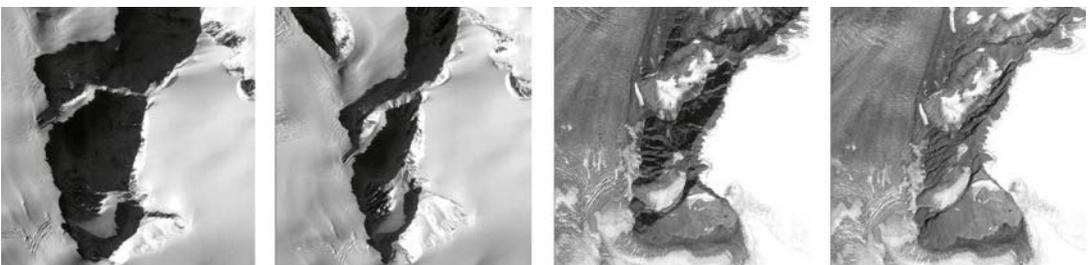


Abb. 9: Illustration geometrischer Unterschiede in Eros- (links) bzw. Ikonos-Bilddaten (rechts).

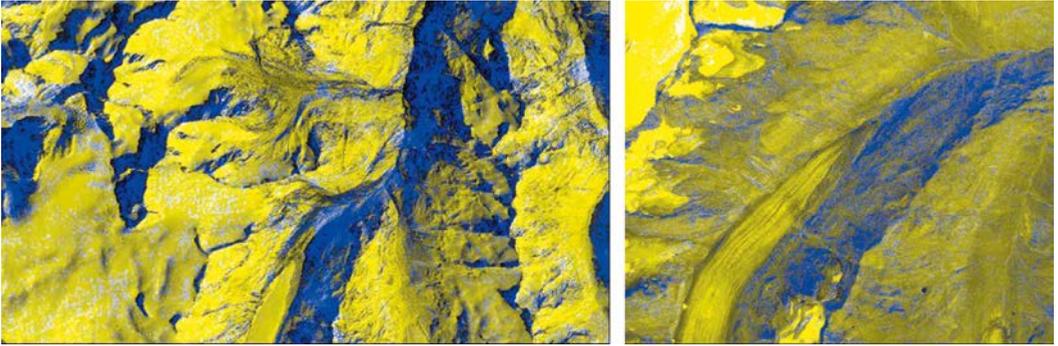


Abb. 10: Kritische Bereiche (in blau) bei der Korrelation der Eros- (links) und Ikonos-Bilddaten (rechts).

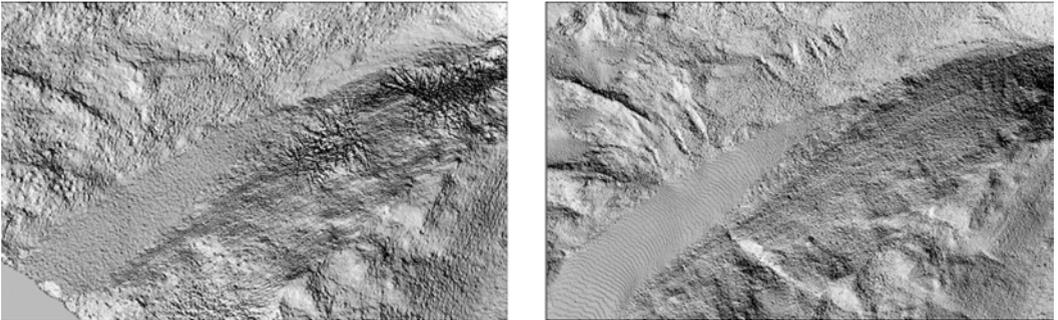


Abb. 11: Stereo-Oberflächenmodell in Reliefdarstellung für Eros (links) bzw. Ikonos (rechts).

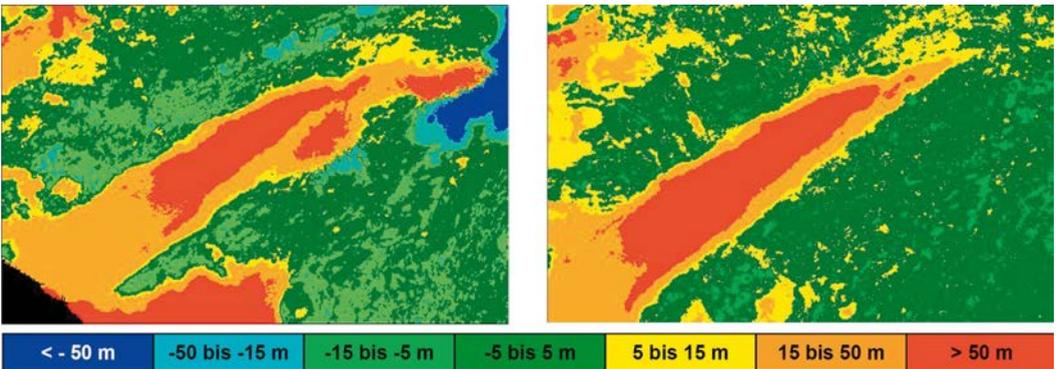


Abb. 12: Höhendifferenzen zum Referenz-Geländemodell für Eros (links) bzw. Ikonos (rechts)

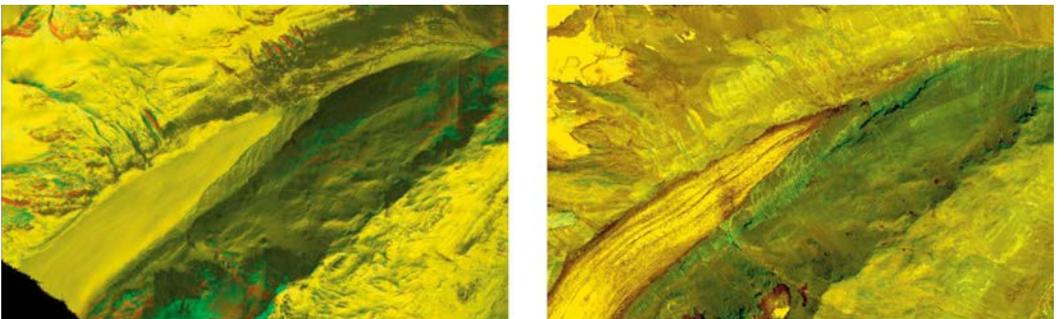


Abb. 13: Mittels Stereo-Oberflächenmodell erstellte Stereo-Orthophotos in Anaglyphendarstellung (l: Eros; r: Ikonos).

4.3. Generierung von Oberflächenmodellen

Zur Generierung von Oberflächenmodellen werden zunächst aus den Korrelationsergebnissen mittels räumlichem Vorwärtsschnitt die zugehörigen Bodenkoordinaten berechnet. Diese Prozedur ist im Softwarepaket für jegliche herkömmliche Abbildungsgeometrien implementiert (Raggam et al., 1990) und musste für diese Untersuchungen auf die RPC-Abbildungsvorschrift der Ikonos-Stereodaten adaptiert werden. Aus der resultierenden 3D-Punktwolke wird schlussendlich mittels geeigneter Interpolationsverfahren ein regelmäßiges Raster-Oberflächenmodell generiert.

Abbildung 11 zeigt die für das Detailtestgebiet des Hintereisferner-Gletschers aus den Eros- bzw. Ikonos-Stereodaten hergeleiteten Oberflächenmodelle. Eine naheliegende Maßnahme zur Genauigkeitsabschätzung dieser Oberflächenmodelle besteht im direkten Vergleich mit dem Referenz-Geländemodell. Die daraus resultierenden Höhenunterschiede sind in Abbildung 12 für Eros bzw. Ikonos dargestellt. In beiden Fällen ergeben sich große Höhenunterschiede im Bereich zwischen 50 und 100 Metern über dem Hintereisferner-Gletscher (Bildmitte) wie auch über dem Vernaglwandferner-Gletscher (links oben). Diese spiegeln somit den Gletscherrückgang seit dem Jahr 1974 wider, nachdem sich das Referenz-Geländemodell auf diesen Zeitraum bezieht.

Das aus den Eros-Daten hergeleitete Oberflächenmodell zeigt auch in Bereichen außerhalb der Gletscherzonen – insbesondere in den abgeschatteten und somit für die Bildkorrelation kritischen Nordwest-Hängen – extrem große Höhenfehler und entspricht hier keinesfalls der prognostizierten Stereo-Genauigkeit (rechts oben bzw. links unten; vergleiche auch Abbildung 10).

Eine weitere Möglichkeit zur qualitativen Einschätzung der generierten Oberflächenmodelle besteht in der Generierung von Stereo-Orthophotos. Hierbei werden die beiden Stereo-Bilder mit diesen Oberflächenmodellen entzerrt. Sofern diese eine ansprechende Höhengenaugkeit aufweisen, sollten die Stereo-Orthophotos eine gute lagemäßige Übereinstimmung zeigen. Dies lässt sich durch Anaglyphendarstellungen, d.h. Rot-Grün-Überlagerungen der beiden Bilder sehr einfach visuell überprüfen. Abbildung 13 zeigt solche Darstellungen für die Eros- bzw. Ikonos-Stereo-Orthophotos. Während die Ikonos-Bilder eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, sind für die Eros-Daten höhenfehlerbedingte Abweichun-

gen der Orthophotos deutlich erkennbar, da sich die höhenfehlerbehafteten Bereiche verstärkt in Rot oder Grün abheben. Zu beachten ist, dass solche Farbunterschiede auch durch grundlegende radiometrische Unterschiede der Stereo-Bilddaten verursacht werden können. Über dem Hintereisferner-Gletscher ist die Übereinstimmung in beiden Fällen sehr gut, was darauf schließen lässt, dass die aktuelle Gletscheroberfläche recht genau rekonstruiert werden konnte.

5. Verwendung von Stereo-Orthophotos

5.1. Beschreibung der Methode

Eine wirksame Methode, um allfällige Probleme bei der Stereo-Korrelation zu reduzieren, besteht in der Generierung von Stereo-Orthophotos mit Hilfe eines gegebenenfalls relativ ungenauen a-priori vorliegenden Geländemodells. Dadurch werden quasi besser zueinander registrierte Bildpaare generiert, für welche die Bildkorrelation auf Grund der größeren geometrischen Ähnlichkeit sowohl zeitlich als auch qualitativ in der Regel ein besseres Verhalten zeigt (siehe auch Schenk et al. 1990 oder Norvelle, 1996).

In der Abbildung 14 ist die Prozedur zur stereoskopischen Herleitung von Oberflächenmodellen aus derart vorregistrierten Bildpaaren dargestellt. In einem ersten Schritt werden die Originalbilder mit einem *A-priori-Geländemodell*, welches keine hohen Genauigkeitsanforderungen erfüllen muss, entzerrt. Auf Grund allfälliger Höhenfehler des A-priori-Geländemodells zeigen die resultierenden *Pseudo-Orthobilder* gegebenenfalls Lagefehler (Ortho Parallaxen), da im Zuge der Entzerrung infolge eines Höhenfehlers Δh der wahre Punkt P in die lageversetzten Punkte P_1 bzw. P_2 projiziert wird (siehe Abbildung 15).

Mittels Korrelation der Pseudo-Orthobilder sowie durch Einbeziehung des A-priori-Geländemodells wird die räumliche Lage von P_1 und P_2 bestimmt. Diese definieren mit den zugehörigen Aufnahmeorten zwei windschiefe Geraden in Raum, deren „Schnittpunkt“ den korrekten Punkt P liefert, welcher der Oberfläche des aktuellen Geländes entspricht. Aus den Korrelationsergebnissen kann somit wieder eine entsprechende 3D Punktwolke und durch nachfolgende Interpolation ein regelmäßiges Raster-Oberflächenmodell hergeleitet werden, welches letztendlich eine Aktualisierung des A-priori-Geländemodells repräsentiert. Dieses wird in weiterer Folge als Ortho-Stereo-Oberflächenmodell bezeichnet.

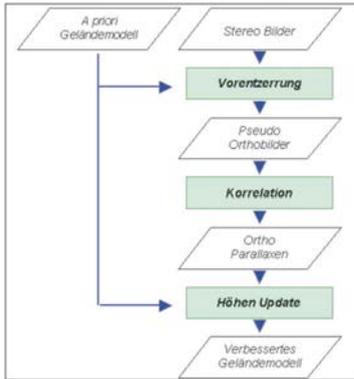


Abb. 14: Herleitung eines digitalen Oberflächenmodells aus vorentzerrten Stereobildern (Ortho-Stereo-Oberflächenmodell)

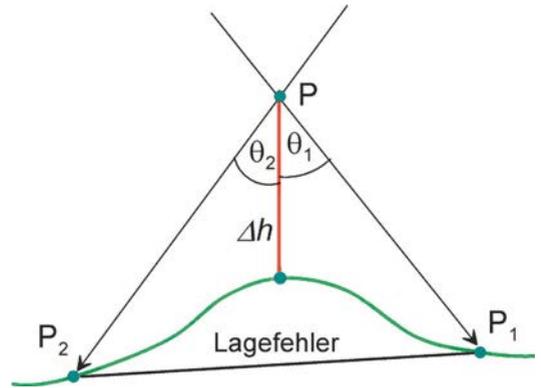


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Höhenfehler und Parallaxe der vorentzerrten Stereobilder

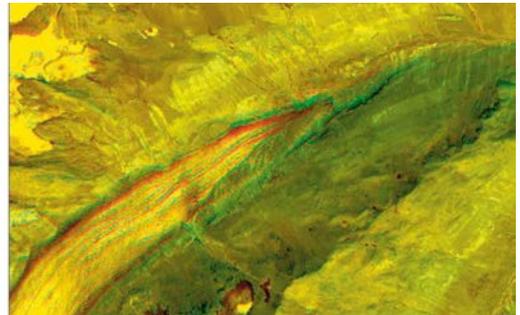
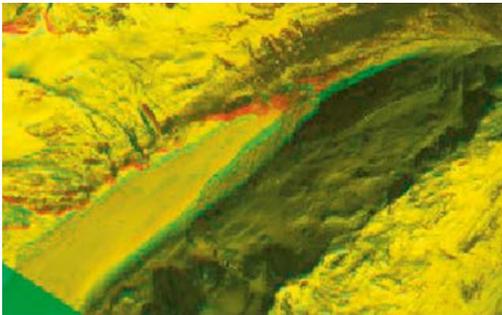


Abb. 16: Mittels Referenz-Geländemodell erstellte Stereo-Orthophotos in Anaglyphendarstellung (l: Eros; r: Ikonos).



Abb. 17: Aus Stereo-Orthophotos hergeleitete Oberflächenmodelle (links: Eros; rechts: Ikonos).

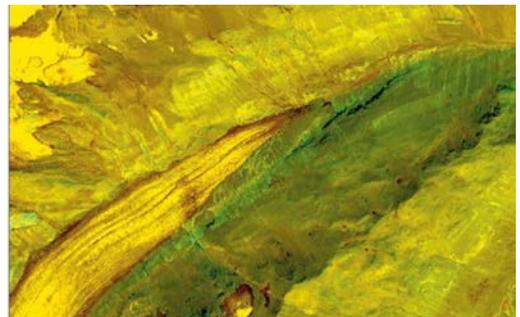
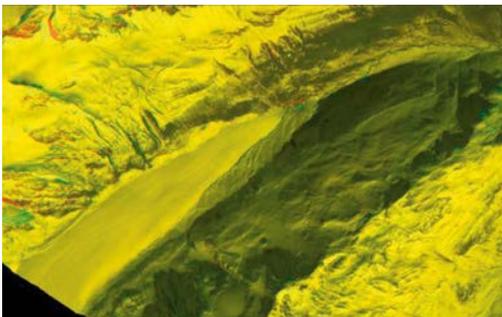


Abb. 18: Mittels Ortho-Stereo-Oberflächenmodell erstellte Stereo-Orthophotos in Anaglyphendarstellung (links: Eros; rechts: Ikonos).

5.2. Anwendungsbeispiel

Zur Vorentzerrung der vorliegenden Stereo-Bild-daten wurde das den Status des Jahres 1974 repräsentierende Referenz-Geländemodell mit einer Basis-Maschenweite von 25 Metern verwendet. Die daraus resultierenden Stereo-Ortho-photos sind in Abbildung 16 dargestellt. In diesem Fall werden insbesondere die durch die falschen bzw. nicht aktuellen Gletscherhöhen verursachten Lagefehler deutlich. Die Korrelation dieser Bild-paare ist erwartungsgemäß mit weniger Proble-men verbunden, wie aus der Backmatching-Statistik der Tabelle 6 hervorgeht. In beiden Fällen liegt die Backmatching-Distanz bzw. der Prozent-satz fragwürdiger Korrelationsergebnisse deut-lich unter jener der Original-Stereodaten.

Die aus den Korrelationsergebnissen errech-neten Oberflächenmodelle sind in Abbildung 17 dargestellt (Ortho-Stereo-Oberflächenmodelle), während Abbildung 18 zwecks visueller Qualitäts-analyse wiederum Stereo-Orthophotos in Anagly-phendarstellung zeigt, welche eben mit diesen Oberflächenmodellen generiert wurden.

Diese Oberflächenmodelle zeigen einerseits relativ zueinander eine gute Übereinstimmung, andererseits besteht jetzt auch eine durchwegs sehr gute Übereinstimmung sowohl für die Eros- als auch für die Ikonos-Stereo-Orthophotos. Dies belegt, dass durch die Vorentzerrung die Problem-zonen für die Korrelation weitgehend eliminiert wurden und die Korrelationsergebnisse zu Ober-flächenmodellen führen, welche den A-priori-Genauigkeitsabschätzungen wesentlich besser entsprechen.

	Eros	Ikonos
Mittelwert	0.77	0.36
Standardabweichung	1.20	0.49
> 3 Pixel	3.21 %	0.53 %

Tab. 6: Backmatching-Statistik für die Korrelation der Stereo-Orthobilder.

6. Qualitätskontrolle mittels Profilmessungen

Jährlich werden von der Universität Innsbruck im Bereich des „Hintereisferners“ terrestrisch Quer-profile und Pegel eingemessen. Für eine nume-rische Genauigkeitsbeurteilung der stereome-trisch abgeleiteten Oberflächenmodelle wurde ein solches Profil aus dem Jahr 2002 für Eros bzw. 2003 für Ikonos herangezogen. Zudem wurde von JOANNEUM RESEARCH ein Längsprofil zum Zeitpunkt der Ikonos-Aufnahme mittels RTK-GPS

aufgenommen. Die Lage beider Profillinien ist in Abbildung 19 dargestellt.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 sind jeweils die Differenzen zwischen den Höhen des terre-strisch (in situ) gemessenen Querprofils und den Höhen der entsprechenden Punkte aus dem Ortho-Stereo- und dem Stereo-Oberflächenmo-dell der Eros- bzw. Ikonos-Stereodaten darge-stellt.

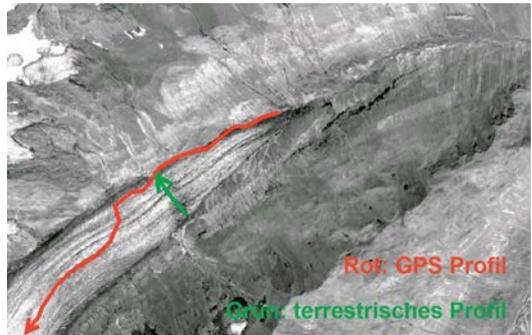


Abb. 19: Profillinien

Anhand von Abbildung 20 werden abermals die Probleme für die Eros-Daten deutlich. Die Höhendifferenzen des Stereo-Oberflächenmo-dells für das Querprofil liegen im Mittel 0.3 m unter den in situ gemessenen und weisen insgesamt eine stärkere Streuung auf.

Dagegen bestätigten die Werte aus dem Ortho-Stereo-Oberflächenmodell für das Querprofil die Vorteile der Vorentzerrung. Die Werte liegen zwar ebenfalls durchschnittlich 0.3 m tiefer als die terrestrisch gemessenen, zeigen aber keine groben Ausreißer.

Für beide aus den Ikonos-Daten hergeleiteten Oberflächenmodelle ergeben sich im Vergleich zu den in situ Messungen hingegen nur geringe Abweichungen im Submeterbereich (siehe auch Tabelle 7).

	In situ minus	Mittel [m]	Std.Abw. [m]
Ikonos	Stereo DOM	0,60	0,39
	Ortho-Stereo DOM	0,70	0,32
Eros	Stereo DOM	0,33	0,97
	Ortho-Stereo DOM	0,32	0,70

Tab. 7: Statistik der für das Querprofil resultierenden Höhenfehler der digitalen Oberflächenmodelle (DOM).

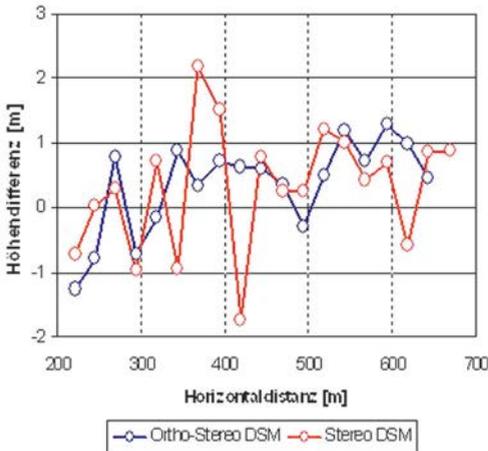


Abb. 20: Höhendifferenz zwischen den in situ Messungen im Jahr 2002 und den Eros-Oberflächenmodellen

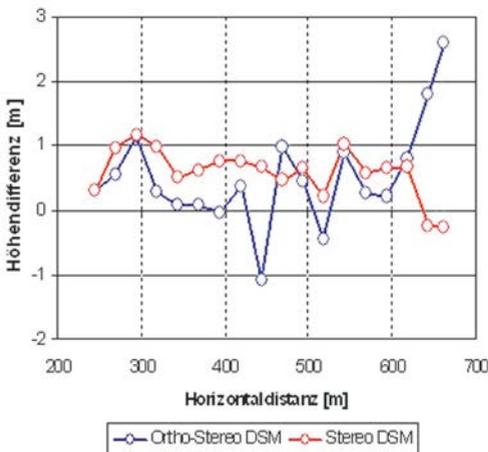


Abb. 21: Höhendifferenz zwischen den in situ Messungen im Jahr 2003 und den Ikonos-Oberflächenmodellen

Während die Ikonos-Daten fast zeitgleich mit den terrestrischen Einmessungen aufgenommen wurden, muss bei den Eros Daten noch eine Zeitdifferenz von fast 2 (Sommer-) Monaten mit entsprechenden Abschmelzprozessen am Gletscher berücksichtigt werden.

Insgesamt zeigt ein Vergleich der Statistik der Querprofile (Tabelle 7) mit der Statistik der a-posteriori Aufsetzgenauigkeit (Tabelle 4) eine gute Übereinstimmung bzw. wurde die Aufsetzgenauigkeit meist sogar unterschritten.

Zusätzlich wurden für die aus den Ikonos-Daten hergeleiteten Stereo- bzw. Ortho-Stereo-Oberflächenmodellen die Höhendifferenzen für die mit GPS eingemessenen Punkten des Gletscher-Längsprofils berechnet. Beide Oberflächenmodelle liegen hier im Durchschnitt 1 Meter unter dem gemessenen GPS-Profil (siehe Tabelle 8). Auch hier weist das Stereo-Oberflächenmodell wieder eine größere Standardabweichung auf, was abermals darauf hindeutet, dass sich durch die Vorentzerrung der Daten eine Genauigkeitsverbesserung für das resultierende Ortho-Stereo-Oberflächenmodell erzielen lässt.

Ikonos	Stereo	Ortho-Stereo
Mittel [m]	1,003	1,003
Std.Abw. [m]	0,729	0,670

Tab. 8: Statistik der Höhenfehler im GPS Profil

7. Zusammenfassung und Diskussion

Grundsätzlich konnte mit den vorliegenden Ergebnissen die Machbarkeit der automationsgestützten Herleitung von Oberflächenmodellen aus Daten aktueller hochauflösender, optischer Sensoren demonstriert werden.

Üblicherweise lassen sich anhand von Referenzdaten Aussagen über die erreichte Qualität der Bildkorrelation und Sensormodellierung treffen. In unseren Untersuchungen zeigte sich aber, dass die Qualität der Referenzdaten speziell für solches Gelände oft als unzureichend und als sehr kritischer Punkt zu erachten ist.

Nichtsdestotrotz entsprechen die erzielten Genauigkeiten in etwa den sich aus a-priori-Abschätzungen sowie den geometrischen Rahmenbedingungen ergebenden Erwartungen. Eine Verbesserung der Korrelationsergebnisse konnte durch Vorabentzerrung der Stereobilddaten mit einem vorhandenen Höhenmodell erreicht werden.

Hier wurden nur die Ergebnisse der Vorabentzerrung mit (bis auf die vergletscherten Bereiche) relativ genauer a priori Höheninformation gezeigt. Weitere Untersuchungen wurden auch mit dem freierhältlichen, globalen Geländemodell GTOPO30 (USGS, 2002) durchgeführt, welches eine Auflösung von 30 Bogensekunden hat. Die Ergebnisse entsprechen den hier gezeigten. Als weitere Alternative bietet sich nun auch das freierhältliche, globale Oberflächenmodell der Shuttle Radar Topography Mission mit einer Auflösung von 3 Bogensekunden (Czegka et al., 2004) an.

Dank

Die verwendeten Eros- und Ikonos-Bilddaten wurden im Rahmen des OMEGA-Projektes vom Projektpartner *Novosat* (Helsinki, Finnland) zur Verfügung gestellt. Profilmessungen des Hintereisferner-Gletschers wurden von Dr. H. Schneider (Institut für Mathematik, Universität Innsbruck) bereitgestellt.

Literatur

- [1] Caballo-Perucha M. (2003): Development and analysis of algorithms for the optimisation of automatic image correlation. Master thesis Post-graduate University Course Space Science, Karl-Franzens-Universität Graz, Dezember 2003
- [2] Czegka W., Behrends K., Braune S. (2004): Die Qualität der SRTM-90m Höhendaten und ihre Verwendbarkeit in GIS. *Homepage* UNIGIS update KONFERENZ 2004: http://www.unigis.ac.at/club/u2/2004/unterlagen/SRTM_update2004.pdf
- [3] Dial G., und Grodecki J. (2002): Block adjustment with rational polynomial camera models. Proceeding of ASCM-ASPRS Annual Conventions, Washington D.C., April 2002.
- [4] Franke M. (2003): Generierung digitaler Gelände-modelle aus hochauflösenden optischen Satellitenbilddaten. Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung, November 2003
- [5] Imagesat International (2005): Satellite overview. *Homepage* published at <http://www.imagesatintl.com>
- [6] JOANNEUM RESEARCH (2005): RSG Software Documentation, Version 3.0, RSG-Release 4.60. <http://dib.joanneum.at/rsg>
- [7] Norvelle F.R. (1996): Using iterative orthophoto refinement to generate and correct digital elevation models (DEM's). *Digital Photogrammetry: An addendum to the Manual of Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA, Seiten 151 - 155.
- [8] Paar G. und Pölzleitner W. (1992): Robust disparity estimation in terrain modelling for spacecraft navigation. Proc. 11th ICPR, International Association for Pattern Recognition, 1992
- [9] Perko R. (2001): Korrelationsmethoden für multispektrale Satellitenbilder. Diplomarbeit in technischer Mathematik an der Technischen Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Juni 2001
- [10] Raggam H. und Almer A. (1990): Mathematical Aspects of Multi-Sensor Stereo Mapping. In Proc. of 10th Annual IGARSS Symposium: Remote Sensing - Science for the Nineties, Vol. III, Seiten 1963-1966.
- [11] Raggam H., Franke M. und Gutjahr KH. (2004): Surface Model Extraction from High Resolution Stereo Data over Alpine Terrain. 24th Earsel Symposium "New Strategies for European Remote Sensing", Dubrovnik, May 25 – 27, 2004.
- [12] Schenk T., Jin-Cheng Li und Toth C.K. (1990): Hierarchical approach to reconstruct surfaces by using iteratively rectified imagery. SPIE (1395) Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision, Seiten 464-470.
- [13] Space Imaging (2005): Homepage published at <http://www.spaceimaging.com>
- [14] Sharov A., Raggam H., Gutjahr KH. (2002): Digital terrain models of test glaciers generated from satellite remote sensing data. Report No. 7 of 5th EC framework programme "Operational Monitoring of European Glacial Areas", Contr. No. EVK2-CT-2000-0069, Aug. 2002
- [15] U.S. Geological Survey (2002): Eros Data Center: GTOPO30. Homepage: <http://lpdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp>

Anschrift der Autoren

Dr. Karlheinz Gutjahr, Dr. Hannes Raggam, und Dipl.-Ing. Martina Franke: Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Wastian-gasse 6, 8010 Graz. karlheinz.gutjahr@joanneum.at 