

Ein topographischer Datensatz der Gletscherregion an der Station San Martín, Marguerite Bay, Antarktische Halbinsel, generiert mit digitaler Photogrammetrie

(mit 5 Bildern und 1 Tabelle)

Von *Bernhard P. Wrobel*¹, *Henning Walter*², *Mario Friehl*¹, *Ulrike Hoppe*¹, *Martin Schlüter*^{1,3} und *Dieter Steineck*¹

ZUSAMMENFASSUNG: Für die Forschungen zu Klima, Glaziologie und Geomorphologie der Antarktis werden regionale topographische Basisdaten benötigt, um die speziellen Untersuchungsmethoden des Geowissenschaftlers wesentlich stützen zu können. In diesem Beitrag schildern wir den Weg der stereophotogrammetrischen, rein digitalen Auswertung von Luftbildern hin zu einem hochaufgelösten topographischen Datensatz, der weitgehend automatisch erzeugt wurde. Er besteht im wesentlichen aus einer digitalen Luftbildkarte mit Höhenlinien, die in ausgedruckter (analoger) Form im Maßstabsbereich von ca. 1 : 25 000 bis 1 : 50 000 verwendbar ist. Zwei sehr unterschiedliche, den Besonderheiten der Antarktis angepaßte Verfahren der digitalen Photogrammetrie werden eingesetzt: das am Photogrammetrie-Institut der TU Darmstadt entwickelte „Facetten-Stereosehen“ und die Software PHODIS der Fa. Carl Zeiss. Der Bericht schildert die im Untersuchungsgebiet an der Station General San Martín erreichten Auswertergebnisse und die festgestellten Verfahrenseigenschaften der digitalen Photogrammetrie, insbesondere, welcher Zusatzaufwand in der Antarktis notwendig wurde.

Die folgenden Kapitel dieses Beitrages schildern näher die mit heutiger Stereophotogrammetrie erreichten Ergebnisse. Zunächst wird auf die für das Untersuchungsgebiet herangezogenen Luftbilder eingegangen und die notwendigen digitalen Vorverarbeitungsschritte erläutert bis hin zur Bildorientierung. Die sich stark überlappenden Bilder werden danach zum einen mit dem multitemporalen Mehrbildverfahren Facetten-Stereosehen verarbeitet und zum anderen mit der Software PHODIS, die stets auf einzelne Stereobildpaare zurückgreifen muß. In beiden Fällen sind DHM und digitales Orthobild das Ziel. Schließlich wird eine digitale Luftbildkarte generiert, die alle erzeugten und vorhandenen topographischen Daten integriert. In allen Abschnitten werden die durch die besonderen Verhältnisse in der Antarktis bedingten Schwierigkeiten aufgezeigt und Wege zur Überwindung besprochen.

Zum Schluß wird ein Blick auf künftig mögliche Verfahren der Topographiedatenerhebungen in der Antarktis geworfen, von denen aus heutiger Sicht eine Reihe von Verbesserungen zu erwarten sind: flugzeuggetragene, GPS- und INS-gestützte digitale Photogrammetrie, Laser-Scanning, interferometrisches SAR sowie die angekündigte neue Generation von hochaufgelösten optischen Satellitenbildern.

ABSTRACT: Basic cartographic data at the regional level are needed for the purpose of doing research on climate, glaciology, and geomorphology of the Antarctic, i.e. in order to be able to give substantial support to specific methods of research made use of by geoscientists. We will depict hereinafter the way of stereophotogrammetric, purely digital evaluation of airphotos towards a high-resolution topographic data set generated largely automatically. It consists

¹Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Technische Universität Darmstadt, Petersenstrasse 13, D-64287 Darmstadt, E-mail: wrobel@gauss.phgr.verm.tu-darmstadt.de

²Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), früher Institut für Angewandte Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt am Main

³Seit 1997 BKG Frankfurt am Main

essentially of a digital photomap containing contours which in analog (printed) form can be used within the scale range of ca. 1 : 25.000 to 1 : 50.000. Two very different digital photogrammetric procedures, that were adjusted to the specific requirements of the Antarctic were employed: FACETS STEREO VISION and the software PHODIS of Carl Zeiss company. The report describes the results of evaluation obtained in the test site at the station General San Martín as well as the procedural characteristics of digital photogrammetry that could be ascertained, in particular as to which additional expenditure became necessary for work in the Antarctic.

The following sections of this contribution point out details of results obtained by present-day stereophotogrammetry. First, the airphotos referred to for examining the test site, and then the required steps of preprocessing are explained up to image orientation. The strongly overlapping images are subsequently processed by means of the multi-temporal multi-image method of Facets Stereo Vision (= FAST Vision), and secondly by means of the PHODIS software, which must always have recourse to single stereo photo pairs. In both cases Digital Elevation Model (DEM) and digital orthophoto constitute the objectives. Finally, a digital photomap is generated which integrates all existing and produced topographic data. In all sections the difficulties arising from the specific antarctic conditions are pointed out and ways how to surmount them.

In their conclusion the authors have a glance at other procedures of topographic data collection in the Antarctic; they may be feasible in future which will from today's point of view no doubt bring about quite a number of improvements such as, e.g. airborne GPS and INS-supported digital photogrammetry, laser-scanning, interferometric SAR as well as the new generation of high-resolution optical satellite images, which has already been announced.

1 Einführung, Aufgaben topographischer Basisdaten und Verfahren ihrer Erfassung in der Antarktis

Für die Forschungen zu Klima, Glaziologie und Geomorphologie der Antarktis werden regionale topographische Basisdaten benötigt, um die speziellen Untersuchungsmethoden des Geowissenschaftlers wesentlich stützen zu können. In diesem Beitrag schildern wir den Weg der stereophotogrammetrischen, rein digitalen Auswertung von Luftbildern hin zu einem hochaufgelösten topographischen Datensatz, der weitgehend automatisch erzeugt wurde. Er besteht im wesentlichen aus einer digitalen Luftbildkarte mit Höhenlinien, die in ausgedruckter (analoger) Form im Maßstabsbereich von ca. 1 : 25 000 bis 1 : 50 000 verwendbar ist. Zwei sehr unterschiedliche, den Besonderheiten der Antarktis angepaßte Verfahren der digitalen Photogrammetrie werden eingesetzt: das am Photogrammetrie-Institut der TU Darmstadt entwickelte „Facetten-Stereosehen“ und die Software PHODIS der Fa. Carl Zeiss. Der Bericht schildert die im Untersuchungsgebiet an der Station General San Martín (Bild 1 u. 2) erreichten Auswertergebnisse und die festgestellten Verfahrenseigenschaften der digitalen Photogrammetrie, insbesondere, welcher Zusatzaufwand in der Antarktis notwendig wurde.

Die Generierung von digitalen topographischen Luftbildkarten gehört an sich zu den Standardaufgaben der heutigen digitalen Photogrammetrie. Spezifische Eigenschaften der Antarktis bereiten jedoch Schwierigkeiten. Zum einen sind es die schiere Größe des Gebietes und zum anderen die bekanntlich sehr erschwerte Zugänglichkeit, die jeden Bildflug zu einer logistisch sehr aufwendigen Einzelaktion werden lassen. Hinzu kommen ungewöhnliche Eigenschaften der Geländeoberfläche. Es gibt sehr große Helligkeitsunterschiede zwischen Schnee- und Eisflächen einerseits und den tiefdunklen, freiliegenden Felspartien, den Schat-



Bild 1 – Lage des Untersuchungsgebietes auf der Antarktischen Halbinsel

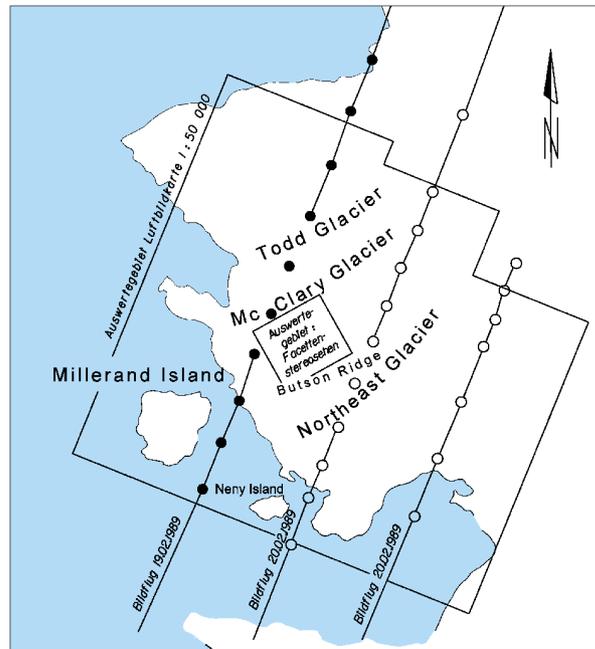


Bild 2 – Untersuchungsgebiet bei der Station San Martín, Marguerite Bay, Maßstab ca. 1 : 550 000

tenbereichen und der Meeresoberfläche andererseits. Welcher optische Sensor auch immer eingesetzt wird, sein Dynamikbereich muß deshalb außerordentlich groß und gut aufgelöst sein. Ähnlich hohe Herausforderungen bestehen an das geometrische Auflösungsvermögen des verwendeten Sensors. Die existierenden Texturen der Oberflächen sind nämlich extrem unterschiedlich in ihren Ortsspektren: sehr niederfrequent in monotonen Neuschneegebieten und sehr hochfrequent in den Spaltenarealen, in Mischgebieten von Schnee und Fels, an Felsgraten und an den zerklüfteten Kanten der ins Meer mündenden Gletscher. Es bestehen also weit überdurchschnittliche Anforderungen an den einzusetzenden Sensor. Der Inhalt des topographischen Datensatzes sollte aus den Komponenten Digitales Höhenmodell (DHM) und Digitales Orthobild (DOB) bestehen, dem aber noch topographische Daten von Expeditionen sowie geographische Namen und gelegentliche Ergänzungen aus vorhandenen Karten hinzugefügt werden sollten. Es leuchtet unmittelbar ein, daß regionale topographische Basisdaten für die glaziologischen Fragestellungen, z.B. nach Eismassenbilanzen und ihren Änderungen, nur dann unverfälschte Aussagen liefern können, wenn diese Daten einem einheitlichen, zeitlich aktualisierten geodätischen Referenzsystem angehören.

Ein solches universelles „Referenznetz Antarktis“, das Bestandteil des globalen International Terrestrial Reference Frame (ITRF) ist, wird seit etwa 1995 praktisch aufgebaut (Lindner et al. 1999), (Korth und Dietrich 1996). Das Netz wurde für die sehr hohen Genauigkeitsansprüche der Plattentektonik ausgelegt; GPS-Meßgeräte und Mareographentechnik (für die Erfassung des Meeresspiegels) spielen die Hauptrolle hierbei. Die bisher schon erzielte durchschnittliche Genauigkeit von besser als ± 2 cm für die WGS84-Koordinaten X, Y, Z reicht für topographi-

sche Datenerfassungen bei weitem aus. Lediglich die geringe Anzahl von Punkten des Referenznetzes wird wohl immer ein Problem bleiben. Immerhin werden damit künftig Bildflüge mit hochgenauer GPS-Stützung möglich werden bei erheblich geringerem Aufwand für die Messung von nur noch sehr wenigen Referenz- und Paßpunkten im Befliegungsgebiet. Auch würden sich generell die Auswerteergebnisse verbessern lassen bei dennoch niedrigeren Kosten.

Für die Erzeugung von topographischen Datensätzen unter den geschilderten Bedingungen der Antarktis scheint es zur Zeit noch kein autonomes, in allen Aspekten optimales Aufnahmeverfahren zu geben. Bevor wir in den folgenden Kapiteln zwei digitale stereophotogrammetrische Verfahren näher erläutern, ist deshalb ein kurzer, vergleichender Blick auf die im Projektzeitraum 1995–1998 miteinander konkurrierenden Verfahren interessant. Es ist aber a priori klar, daß nur großflächig erfassende, bildgebende Sensoren in Betracht kommen.

- Die **Photogrammetrie** wurde zur Erfassung von Gletschern bereits im 19. Jahrhundert mit den damals sehr mühevollen Techniken eingesetzt. Zunächst geschah dies mit terrestrischen Aufnahmen, und zwar wohl erstmalig 1889 durch den bekannten Münchener Photogrammeter und Gletscherforscher *Sebastian Finsterwalder* (1897) bei seiner Kartierung des Vernagtferners im Ötztal (Österreich). Für die arktischen Gebiete benötigt man Luftfahrzeuge. Entsprechende photogrammetrische Arbeiten geschahen schon 1931 im Rahmen der Arktisfahrt des Luftschiffes „Graf Zeppelin“, z.B. im Franz-Josef-Land (*Kostka* 1997). In der Antarktis gehen die wohl ersten Vermessungsflüge auf die britische Expedition 1934–37 unter *Rymill* zurück (*Schmidt-Falkenberg* 1990), während von deutscher Seite 1938/39 eine flugzeuggetragene Bildflugkampagne im Neuschwabenland durchgeführt und anschließend durch *O. von Gruber* (1942) kartographisch ausgewertet wurde. Verbreitete Anwendung fand die Photogrammetrie in den Gletschergebieten der USA, Kanada und in Europa jedoch erst mit der ausgereifteren Technik (Flugzeuge, Kameras, Filme, Auswertegeräte) etwa seit den 60er Jahren (*Konecny* 1966, 1972) bis in die jüngste Zeit (*Welsch et al.* 1997). Ebenso in der Antarktis geschahen systematisch angelegte photogrammetrische Bildflüge. Bis Mitte der 70er Jahre lagen von den meisten antarktischen Gebirgs- und Küstenregionen Luftbilder vor, die vor allem zur Herstellung topographischer Karten im Maßstab 1 : 250 000 dienten. Für Detailkartierungen im Maßstab von 1 : 50 000 und größer führte das BKG mit den Polarflugzeugen des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) seit der Antarktis-Expedition 1983/84 mehrere Bildflugkampagnen in der Antarktis durch (*Sievers und Walter* 1984), (*Brunk* 1992). Die Bildflugrouten und weitere Angaben zu den Luftbildern sind in Bildflugübersichten dokumentiert. Auskünfte, auch über den Bezug der Luftbilder, gibt das BKG im Internet unter <http://www.ifag.de>.

In den letzten Jahren sorgen zwei technologische Innovationen für erhebliche Leistungssteigerungen der Photogrammetrie. Es ist zum einen die schon erwähnte Integration des NAVSTAR-Positionsmeßverfahrens GPS und eines Trägheitsnavigationssystems (INS) in den Bildflug und zum anderen die nunmehr operationelle digitale Photogrammetrie. Die Bedeutung des GPS-Verfahrens für die photogrammetrische Erfassung antarktischer Gebiete kann gar nicht hoch genug angesetzt werden: Mit geringerer Bild- und Paßpunktzahl als bisher können nun sehr flexibel durch passende Wahl von Kamera, Bildüberdeckungen und Bildmaßstab maßgeschneidert die Anforderungen des Glaziologen erfüllt werden bis hin zu Detailkartierungen im Maßstab 1 : 10 000. Neben dem Bildflug profitiert vom GPS auch die anschließende digital-photogrammetrische Auswertung. Sie bringt einen hohen Automatisierungsgrad sämtlicher Arbeitsschritte mit sich, insbesondere befreit sie den photogrammetrischen Operateur weitgehend von ermüdenden Routine-

arbeiten – angesichts der riesigen Flächen monotoner Eis- und Schneeregionen der Antarktis ein sehr willkommener Effekt.

Die bisher geschilderten zahlreichen Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie belegen per se ihre Akzeptanz in den polaren Gebieten und – wie eben gezeigt – auch ihre Zukunftsfähigkeit. Doch dürfen ihre spezifischen Schwächen nicht unerwähnt bleiben: die Abhängigkeit von Wetter und Sonne (Wolken / geringe Sonnenhöhen, Polarnacht) sowie unbefriedigende Genauigkeiten des Stereomeßprinzips in strukturlosen Schnee- und Eisflächen.

Für das hier beschriebene Untersuchungsgebiet an der Marguerite Bay standen Luftbilder des Jahres 1989 zur Verfügung, die damals noch konventionell ausschließlich mit Paßpunkten am Boden ohne GPS-Daten des Bildfluges erfaßt werden mußten. Die Auswertungen geschahen aber vorteilhafterweise schon mit digitaler Photogrammetrie, worüber in den nachfolgenden Kapiteln berichtet wird.

- Mit dem Start des ersten LANDSAT-Fernerkundungssatelliten der NASA im Jahre 1972 begann die neue Phase der **optischen Fernerkundung**, auch für große Teile der Antarktis. Große Flächenleistungen und mehrkanalige spektrale Bilddaten bei allerdings geringer geometrischer Auflösung erweitern dennoch den Informationsstand über die Antarktis beträchtlich und für den Nutzer der Bilder auf kostengünstige Weise. Das Erderkundungsprogramm wurde seitdem mit immer neuen Satelliten ausgebaut und erbrachte u.a. mit den französischen Satelliten SPOT und den photographischen Satellitenbildern des russischen Forschungszentrums PRIRODA auch stereoskopisch auswertbare Bilder, geeignet für die Herstellung topographischer Karten mit DHM. Alle Auswertungen sind jedoch auf den kleineren Maßstabsbereich von etwa 1 : 100 000 und kleiner eingeschränkt. Satellitenfernerkundung, im Vergleich zu Luftbildern, vervollständigt also die Antarktisinformationen im großflächigen, kleinmaßstäbigen Bereich. Gemeinsam bleibt die Abhängigkeit von Sonne und Wetter.
- Die letztgenannten Eigenschaften der bisher betrachteten passiven optischen Sensoren wurden mit dem Einsatz des aktiven **SAR-Abtastsystems** im Mikrowellenbereich des Spektrums an Bord der ERS-Satelliten der ESA überwunden. Das für die Antarktisforschung insgesamt außerordentlich wichtige Informationspotential der SAR-Technologie (Mercer et al. 1998), (Metzig et al. 1999), (Wunderle und Schmidt 1999), (Müller et al. 1999), (Rau et al. 1999), muß dennoch mit Blick auf die Luftphotogrammetrie als mit ihr kompensatorisch in den Eigenschaften und komplementär in den Informationen angesehen werden (Brandstätter und Sharov 1998). Dies zeigt sich beispielsweise deutlich in den DHM-Berechnungen. Die SAR-Interferogramme verkörpern Höhenunterschiede von unübertroffen hoher relativer Genauigkeit, doch ihre Integration zu einem DHM in einem festen Referenzsystem wird durch Eindeutigkeitsprobleme auf rauhen Oberflächen (Flanken von Gletschern im Übergangsbereich zum unbewegten Eis, Spaltenareale, Felsen, ...) sowie durch Layover und Signalrauschen empfindlich gestört bzw. verhindert, wohingegen die für die Stereophotogrammetrie einzig schwierigen Gebiete – die glatten, texturlosen Schneeflächen – keine Hindernisse darstellen. Dies spricht eher für einen kombinierten Einsatz beider Sensoren als für nur jeweils einen von beiden.

Die folgenden Kapitel dieses Beitrages schildern nun näher die mit heutiger Stereophotogrammetrie erreichten Ergebnisse. Zunächst wird auf die für das Untersuchungsgebiet an der Station San Martín herangezogenen Luftbilder eingegangen und die notwendigen digitalen Vorverarbeitungsschritte erläutert bis hin zur Bildorientierung. Die sich stark überlappenden Bilder werden danach zum einen mit dem multitemporalen Mehrbildverfahren

Facetten-Stereosehen verarbeitet und zum anderen mit der Software PHODIS, die stets auf einzelne Stereobildpaare zurückgreifen muß. In beiden Fällen sind DHM und digitales Orthobild das Ziel. Schließlich wird eine digitale Luftbildkarte generiert, die alle erzeugten und vorhandenen topographischen Daten integriert.

In allen Abschnitten werden die durch die besonderen Verhältnisse in der Antarktis bedingten Schwierigkeiten aufgezeigt und Wege zur Überwindung besprochen. Zum Schluß wird ein Blick auf künftig mögliche Verfahren der Topographiedatenerhebungen in der Antarktis geworfen, von denen aus heutiger Sicht eine Reihe von Verbesserungen zu erwarten sind.

2 Vorverarbeitung der Luftbilder der Region an der Station General San Martín

Die Gletscher in der Region an der argentinischen Station General San Martín (Bild 2) gehören zum langjährigen Forschungsgegenstand des Instituts für Physische Geographie, Universität Freiburg. Das mit ihm vereinbarte Untersuchungsgebiet für die topographische Datenerfassung umfaßt eine Fläche von ca. $30 \times 30 \text{ km}^2$ mit einem für die Auswerteverfahren unproblematischen maximalen Höhenunterschied von 1800m zwischen dem Meer bis zum Höhenrücken der Antarktischen Halbinsel. Besondere Anforderungen stellen jedoch die schon genannten Geländecharakteristika: der Formenreichtum und der große Helligkeitskontrast. Das im Inneren gelegene kleinere Gebiet von $4,5 \times 4,5 \text{ km}^2$ wurde für die Erprobung des universelleren Auswerteverfahrens Facetten-Stereosehen ausgewählt. Es liegt an der Butson Ridge, erfaßt Teile des McClary-Gletschers und schließt die Erhebung „Schauinsland“ mit ein (Bild 2 und 3).

Die für die Untersuchungsgebiete verwendete Auswahl an Luftbildern entstammt der Befliegungskampagne 1988/89 des BKG. Es wurde eine sehr gute photographische Bildqualität erreicht, und die realisierten großen Bildüberdeckungen sind gut für Auswertungen in der Antarktis. Wesentliche Daten der Luftbilder sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

Der Bildmaßstab 1 : 70 000 läßt zuverlässige Auswertungen bis maximal etwa 1 : 25 000 zu. Damit können viele Forschungsarbeiten in der Antarktis gestützt, nicht aber detailliert alle glaziologisch relevanten Formenelemente und Ausprägungen interpretiert und erfaßt werden. Hierfür wäre der in der Glaziologie viel benutzte Maßstab 1 : 10 000 geeignet, siehe die gründlichen Untersuchungen von Brunner (1977, 1980). Dennoch, für das Ergebnis-DHM sind die Anforderungen von 30m Rasterweite und $\pm 15\text{m}$ Höhengenaugigkeit bis auf wenige Ausnahmen gut zu erfüllen. Mit diesen Eigenschaften können auch SAR-interferometrische DHM- und Geschwindigkeitsberechnungen der Gletscher gestützt werden. Mit dem Bildmaßstab 1 : 70 000 werden viele, für den Glaziologen interessante Formenelemente sehr fein abgebildet. Bei der Digitalisierung mußte daher die Pixelgröße mit $14 \times 14 \mu\text{m}^2$ recht klein gewählt werden, was aber heute kein gravierendes Speicherproblem mehr zur Folge hat.

Die extrem hohen Helligkeitsunterschiede in der Antarktis erfordern besondere Sorgfalt, sowohl beim photographischen Bildflug (Sievers und Walter 1984) als auch bei der Digitalisierung der Bilder. Nach unseren Erfahrungen sind beide Erfassungsschritte bei der heutigen Technik mit Verlusten verbunden. Optische Dichtemessungen in Schwarzweiß-Negativen ergaben einen Negativumfang bis 2,8 D. Der begrenzte Dynamikbereich der Abtastwerte des Scanners von 1 : 256 ($\cong 2,4 \text{ D}$) reicht dafür nicht aus. Darüber hinaus verursachte die Trägheit der CCD-Elemente bzw. die zu hohe, vom Nutzer nicht weiter reduzierbare Abtastgeschwindigkeit des Scanners, daß dunkle Geländeoberflächen radiometrisch nicht mehr differenziert

aufgelöst, und daß starke Grauwertkanten über viele Pixel verschmiert wurden. An sich ließe sich die Digitalisierung der analogen Luftbilder „verlustfrei“ gestalten, wenn die im Scanner intern vorhandene Grauwertauflösung von 12 bit (= Negativumfang von mehr als 3 Dichtewerten) dem Nutzer offen zugänglich wäre. Der Transfer von 12-bit-Grauwerten in 8-bit-Grauwerte könnte dann mit einer lokalen, signalangepaßten Bildfilterung (vom Typ Hochpaßfilter mit Bereinigung der Schatten- und Meeresuferkanten) verbunden werden. 8-bit-Grauwerte reichen an sich für die meisten photogrammetrischen Auswerteprozesse aus, da

Tabelle 1 – Technische Daten über die benutzten Luftbilder und Paßpunkte der Region an der Station General San Martín

Befliegung:	19.02.1989, 22:05 GMT bzw. 16:30 lokale Sonnenzeit, Sonnenhöhe ca. 15° 20.02.1989, 16:00 GMT bzw. 11:30 lokale Sonnenzeit, Sonnenhöhe 33° Flughöhe 6100m über Grund Bildmaßstab 1 : 70 000 Bildüberdeckungen: in Flugrichtung 66% – 88%, quer ca. 60% 28 Bilder
	Näheres siehe Karte Bildmittenübersicht 1 : 500 000 Adelaide Island, Grandidier Channel, Antarktis, Antarktisexpedition 1988/89, Institut für Angewandte Geodäsie (jetzt BKG), Frankfurt/M.
Kamera:	Überweitwinkelkamera Zeiss RMK A 8,5/23, Bildformat 23 x 23 cm ² , Filter D, 13% Mittentransmission
Filmmaterial:	Schwarzweiß Agfa-Gevaert AVIPHOT PAN 200, rel. Empfindlichkeit 24,5 DIN
Belichtung:	19.02.89: 1/250s, Blende 8; 20.02.89: 1/250s, Blende 22
Entwicklung:	Agfa PAKOTONE, G74c, Gradation 1,84
Digitalisierung:	Präzisions-Scanner SCAI, Fa. C. Zeiss, Grauwerte 8 bit nach Transfer von intern 12 bit mit angepaßter Transferfunktion, Pixelgröße im Bild 14 x 14 µm ² Pixelgröße am Boden ca. 1 x 1 m ² Positionsgenauigkeit der Pixel ±2 µm Datenvolumen pro Bild 270 Mbyte Datenvolumen alle 28 Bilder 7,6 Gbyte
Paßpunkte:	5 3D-Punkte und 13 Höhenpunkte in der Lambert-Projektion, hervorgegangen aus WGS72 (SIEVERS u. BENNAT, 1989)

diese im Kern nicht auf den vollen Grauwerten, sondern auf deren Gradienten basieren, die aber durch Hochpaßfilterung keinen Schaden nehmen. Ein derartig lokal optimierter Transfer (auch digital dodging genannt) war im Projekt (noch) nicht möglich, aber – immerhin – eine aus Histogrammen abgeleitete, für ein ganzes Bild gültige Transferfunktion konnte verwendet werden, die das Problem der hohen Kontraste wenigstens abmilderte. Es bleibt als Ergebnis der Untersuchungen festzuhalten, daß in der Antarktis Bildgrauwerte mit 12 bit (entspricht einem Negativumfang von mehr als 3 Dichten) herangezogen werden sollten. Laut Auskunft der Hersteller von Präzisions-Scannern sollen diese in Zukunft mit einer 12-bit-Ausgabe ausgestattet werden. Interessanterweise wird die neue Generation hochaufgelöster optischer Satellitenbilder mit 11-bit-Grauwerten diesen Anforderungen a priori gerecht.

Zur Vorverarbeitung der Luftbilder gehört vor allem die Berechnung möglichst präziser Daten der inneren und äußeren Orientierung der Luftbilder, eine Voraussetzung für jede photogrammetrische Arbeit (Kraus 1993). Während die innere Orientierung mit der Software PHODIS völlig problemlos erledigt werden kann, zeigen sich bei der Bestimmung der äußeren Orientierung durch das Verfahren der Bündelblockausgleichung bereits die Eigenheiten der Antarktis. Die Aufgabe der Bündelblockausgleichung besteht darin, die Daten der äußeren Orientierung aller Bilder gemeinsam zu bestimmen und auch die an sich vorhandenen Daten der inneren Orientierung zu verbessern mit Hilfe von Kalibrierungsfunktionen (= Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung). Der kritische Arbeitsabschnitt der Bündelblockbildung besteht in der eindeutigen Zuordnung (= Punktübertragung) und Messung korrespondierender Punkte in den Bildern. Man muß sich auf charakteristische natürliche und möglichst genau meßbare Bilddetails stützen. Solche Details sind in Bildern der Antarktis – im Vergleich zu Regionen Deutschlands – viel weniger zu finden. Diese Aufgabe hat das BKG übernommen – eine mit Risiken behaftete Tätigkeit. Nicht gerade erleichtert wird sie durch den sehr großen Öffnungswinkel von ca. 110 gon der hier benutzten Überweitwinkelkamera und wegen des Bildfluges an zwei verschiedenen Tagen (Die Schatten sind sehr unterschiedlich!). Das BKG bewältigte die Punktübertragungen erfolgreich mit der digitalen photogrammetrischen Arbeitsstation DPW 770 der Fa. LEICA.

Das photogrammetrisch-geodätische Punktfeld (bestehend aus 141 Objektpunkten einschließlich der gegebenen Paßpunkte) wurde sodann mit dem Datensatz der Tabelle 1 durch Bündelblockausgleichung (Programm BUND, ETH Zürich) definitiv bestimmt. Die Selbstkalibrierung erbrachte nur einen einzigen signifikanten Parameter k einer radialsymmetrischen Verformung $k \cdot r^3$. Sie erfaßt den bei Überweitwinkelbildern vorhandenen hohen Refraktionseinfluß. Die erreichte äußere Genauigkeit der Objektpunkte ($\sigma_x = 3,5\text{ m}$, $\sigma_y = 2,2\text{ m}$, $\sigma_z = 2,7\text{ m}$) spiegelt hauptsächlich die Unsicherheit wider, die Paßpunkte in den Luftbildern nach den Beschreibungsskizzen des Geodäten wiederzufinden; die mitenthaltene nicht lineare Anteile der Verzerrungen der Lambert-Projektion sind viel kleiner. Die innere Genauigkeit der Objektpunkte war im Mittel mit $\pm 0,50\text{ m}$ deutlich besser, die Standardabweichung σ_0 der Gewichtseinheit betrug $\sigma_0 = 8,5\ \mu\text{m} = 0,57\text{ Pixel}$. Diese Resultate sind als gut zu bezeichnen. Daß sie trotz relativ weniger Verknüpfungspunkte pro Bild erreicht wurden, liegt ganz klar an den sehr guten Überdeckungsverhältnissen des Bildverbandes. Mit der Größe von $\sigma_0 = 8,5\ \mu\text{m}$ im Bild $\hat{=} 0,60\text{ m}$ am Boden als durchschnittliches Gütemaß der Strahlenschnitte im Bündelblock wird praktisch eine Schranke für die folgenden Oberflächenrekonstruktionen gesetzt, die nicht unterschritten werden kann. Interessanterweise läßt sich die Zahl $\pm 0,50\text{ m}$ recht gut durch die Rauheit von Gletscheroberflächen erklären, vgl. Fox/Nuttall (1997). Schließlich zeigt der Vergleich von innerer mit äußerer Genauigkeit, daß für sie eine etwa vierfache Genauigkeitssteigerung möglich wäre, wenn der Bildflug mit GPS gestützt worden wäre.

3 Digitales Höhenmodell und digitales Orthobild: Berechnet mit dem multitemporalen Mehrbildverfahren Facetten-Stereosehen

Die heutigen Softwarepakete der Firmen zur Berechnung digitaler Höhenmodelle aus digitalen Luftbildern sind nicht auf die Besonderheiten der Antarktis zugeschnitten. Es werden die anderswo üblichen texturreichen Oberflächen vorausgesetzt, die mit (am besten niedrig gewachsener) Vegetation bedeckt sind oder sonstige kontrastreiche Merkmale in ausreichender Flächendichte besitzen, z.B. Felsformationen, nicht aber glatten Sand, Schnee odgl. Von den existierenden Ansätzen der digitalen Photogrammetrie zur DHM-Berechnung kommt nur der sog. intensitätsbasierte Ansatz in Frage, mit dem die Bildgrauwerte (entspricht Bildhelligkeit oder -intensität, im Kern sind nur ihre Gradienten wirksam) direkt mit der Objektoberfläche in Beziehung gebracht werden. Es können damit die in der Antarktis bisweilen seltenen Grauwert-Gradienten, vor allem auch die kleinsten zur DHM-Berechnung optimal genutzt werden. Dies wäre mit den übrigen Ansätzen (merkmalsbasierter und relationaler Ansatz) nicht möglich. Die optimale Nutzung der Gradienten wurde beim **Facetten-Stereosehen** im wesentlichen mit den folgenden Maßnahmen verfolgt:

- Nicht die Minimalzahl von zwei Bildern simultan verarbeiten, sondern mehr, im Prinzip so viele Bilder, wie erforderlich sind (**Mehrbildverfahren**). Dies reduziert eine Reihe von Fehlereinflüssen und stärkt die geometrische Konfiguration der Abbildungsstrahlen zur Oberflächenrekonstruktion. Das in Bild 2 markierte Testgebiet ist in zwei Flugstreifen in insgesamt sechs Bildern erfaßt. Sie werden sämtlich im gemeinsamen Rechenprozeß des Facetten-Stereosehens verarbeitet.
- Leider sind diese Bilder an zwei Tagen zu um ca. 5 Stunden verschiedenen Tageszeiten aufgenommen worden (Tabelle 1). Sonnenazimute und Sonnenhöhen (15° bzw. 33°) unterscheiden sich sehr stark und damit auch die sich überlappenden Luftbilder, vgl. Bild 3a mit 3b. Es mußte daher der Ansatz des Facetten-Stereosehens auf die Erzeugung von zwei digitalen Orthobildern (DOB) (je eines für den 19.02. und 20.02.1989), aber einem einzigen, gemeinsamen DHM umgestellt werden. Da das Facetten-Stereosehen ohnehin beide, DHM und DOB, in einem Ansatz umfaßt, bereitete diese Erweiterung auf die **multitemporale Bildverarbeitung** keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Die Vereinigung multitemporaler Bilddaten in einem Arbeitsschritt (Kleinste-Quadrate-Ausgleichung sämtlicher Bilddaten) bringt beträchtliche Vorteile: Reduktion des Bildrauschens ganz allgemein, Objektpartien im Schlagschatten des einen Streifens werden auswertbar, sofern sie im anderen hell genug vorkommen, und – last not least – Steigerung der Genauigkeit (*Wrobel/Schlüter* 1997).
- Die beiden Objektraummodelle im Ansatz des Facetten-Stereosehens, DHM und DOB, werden hier je durch ein quadratisches Raster (Facetten) und bilinearer Interpolationsfunktion repräsentiert. Die **Facettengrößen** müssen dem Regularisierungsbedarf der Methode und den Anforderungen des Projekts der Uni Freiburg gerecht werden. Mit den vorhandenen Pixelgrößen am Boden von ca. $1 \times 1 \text{ m}^2$ und mit den Texturen Mitteleuropas könnte man an sich eine DGM-Auflösung mit Rasterweiten von etwa $8 \times 8 \text{ m}^2$ erreichen (*Schlüter/Wrobel* 1998), bei Verwendung von Wavelets sogar bis $2 \times 2 \text{ m}^2$ (*Tsay* 1996). In der Antarktis muß man die ungünstigeren Texturen beachten und für größere Redundanz sorgen. Folgende Facettenrelationen wurden nach mehreren Experimenten gewählt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Höhenfacette} &= 8 \times 8 \text{ Grauwertfacetten} = 16 \times 16 \text{ Pixel} \\ &= 30 \times 30 \text{ m}^2 \text{ in Auflösungsstufe 2} \\ &= 15 \times 15 \text{ m}^2 \text{ in Auflösungsstufe 1.} \end{aligned}$$

Eng hiermit verknüpft sind die Gewichte der sog. „Krümmungsgleichungen“, die ganz wesentlich zur Stabilisierung der Lösung des Facetten-Stereosehens beitragen, indem sie in den genannten Problemgebieten texturlose Bereiche überbrücken. Die Gewichte mußten ebenfalls empirisch ermittelt werden.

Näheres zur Mathematik und Numerik des Facetten-Stereosehens findet man in *Wrobel* (1987), *Weisensee* (1992), *Tsay* (1996) und *Schlüter* (1999).

Das Testgebiet mitten in Bild 2 enthält alle vorher diskutierten Oberflächencharakteristika der Antarktis. Wir haben an diesen Stellen eine ganze Reihe von Tests mit dem Facetten-Stereosehen und auch mit Messungen eines Operators in den Analogluftbildern durchgeführt. Wie wir bereits betont haben, besitzen diese die bessere Qualität als die digitalisierten Bilder. Die Testergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen und bewerten:

- Überall an den Stellen, an denen gute Texturen (starke Grauwertgradienten) herrschen, werden Höhengenaugigkeiten von $\pm 0,50$ m erreicht oder $\pm 0,08\%$ der Flughöhe, ein sehr guter Wert, auch unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Mit der Zahl von $\pm 0,50$ m wird auch die überhaupt mögliche untere Schranke erreicht, die durch die Genauigkeit der Bildorientierung und mittlere Rauheit von Gletscheroberflächen gesetzt wurde (siehe Kapitel vorher). Im übrigen, die beim Facetten-Stereosehen mit berechenbaren Standardabweichungen der Höhen sind hier realistisch.
- In anderen Gebieten (Problemgebiete ausgenommen) mit schwächeren Grauwertgradienten wurden Genauigkeiten von besser als ± 1 m bis etwa ± 5 m festgestellt.
- In den zu hellen oder zu dunklen Problemgebieten sind beides, DHM-Werte und ihre Standardabweichungen, deutlich unsicherer: ± 10 m, stellenweise mehr bzw. es wird keine Lösung erreicht. Dies ist zu erwarten, da dort die Bildsignale, wie bereits erläutert, stark gestört und nicht mehr realistisch sind.
- Der Erfolg der multitemporalen Mehrbildverarbeitung durch das Facetten-Stereosehen wird beim Vergleich von Bild 3a mit 3b gut sichtbar:
 - Die Höhenlinien der Auswertung mit sechs Bildern, Bild 3b, sind lokal glatter (d.h. genauer), Gletscherareale und sonstige Feinstrukturen erscheinen im Orthobild schärfer – beim Facetten-Stereosehen ein eindeutiger Nachweis für ein besseres DHM-Ergebnis. Außerdem besitzen hier die Schattenbereiche eine differenziertere und plausiblere Morphologie.
 - Die sich besonders glatt zeigenden Bereiche oben links in Bild 3a und 3b unterscheiden sich nur wenig voneinander – ein Beleg dafür, daß schon mit je 3 Bildern allein recht gute Ergebnisse erzielbar sind, wenn sie nur mit ungestörten Bildsignalen erfaßt wurden. Hinzugefügt sei, daß die Ergebnisse vollautomatisch erzeugt wurden ohne Stützung durch Operateursmessungen oder -editierungen.

Halten wir fest: Das Facetten-Stereosehen hat sich in praktischen, kontrollierten Tests als optimale Methode der digitalen Photogrammetrie für die Antarktis herausgestellt. Einschränkend muß allerdings hinzugefügt werden, daß die zur Zeit vorhandene Software nicht über die heute übliche Operationalität verfügt: der einfache Umgang mit den vielen Gigabytes der Bilddaten und die direkte interaktive Einflußnahme des Operators in Problem- oder Zweifelsfällen, wie er im kommerziellen System im allgemeinen gegeben ist, fehlen. Die Integration des Facetten-Stereosehens in eines der kommerziellen Systeme würde diese Einschränkung beheben.

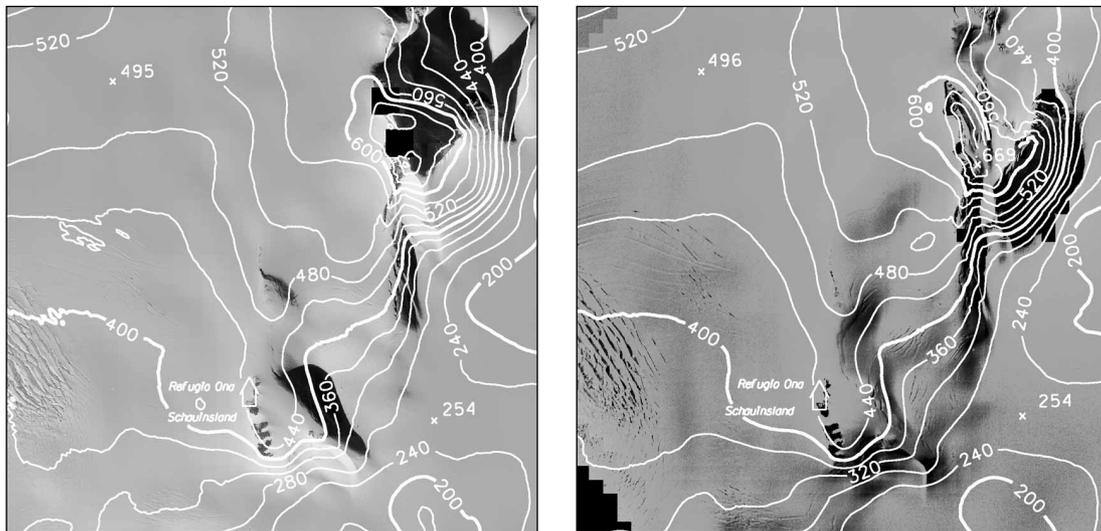


Bild 3 – Oberflächenrekonstruktion und Orthobild des Gebietes am Butson Ridge, Maßstab ca. 1 : 65 000, erzeugt mit dem Facetten-Stereosehen

Bild 3a – Unitemporales Rekonstruktionsergebnis mit den drei Bildern vom 19.02.1989, t = 22:05 GMT. Die Rekonstruktion rechts oben ist stark gestört.
Äquidistanz der Höhenlinien 40 m.

Bild 3b – Gemeinsame DTM – Rekonstruktion mit den sechs Bildern vom 19. und 20.02.1989. Das Orthobild stammt aus den Bildern vom 20.02.1989, t = 15:50 GMT.
Äquidistanz der Höhenlinien 40 m.

4 Herstellung eines topographischen Datensatzes mit dem Softwarepaket PHODIS

Die Herstellung des topographischen Datensatzes bis hin zur Luftbildkarte 1 : 50 000 für das Gebiet nach Bild 2 wurde mit dem Softwarepaket PHODIS der Fa. C. ZEISS durchgeführt. Einzelne Module aus dem Paket MICROSTATION der Fa. BENTLEY wurden hinzugezogen. Beide Pakete sind hinlänglich bekannt.

Die Arbeit setzt auf den 28 orientierten Bilddatensätzen auf (siehe vorherige Kapitel). Anstelle einer Mehrbildauswertung mußte aber nun die Auswertung mit einzelnen Stereobildpaaren erfolgen. 18 Stereobildpaare mit recht großer gegenseitiger Überdeckung wurden aus den 28 Bildern passend ausgewählt, verarbeitet und nach Kontrollen zu einem bereinigten topographischen Datensatz integriert. Dies geschah mit den folgenden Arbeitsschritten:

A Stereoskopische Messung von Gerippe-, Kanten- und Falllinien sowie von Formpunkten, Aussparungsflächen udgl. durch einen Operateur.

Die Messungen erfassen die stark gekrümmten typischen Morphologieelemente der Region, wie Bruchkanten des Eises zum Meer hin, die Berggrate und Geländekanten, enge Fallrinnen sowie relativ viele, in den monotonen, texturarmen Schneegebieten erkennbare Punkte. Die durch den Operateur erfaßten Koordinaten dieser Elemente gehen in die nachfolgenden automatischen DHM-Berechnungen ein. Sie stützen damit den an sich automatischen Vorgang nur dort, wo es sich nach Erfahrung als notwendig herausgestellt hatte. Der derartige manuelle Aufwand ist in der Antarktis deutlich größer als unter mitteleuropäischen Verhältnissen.

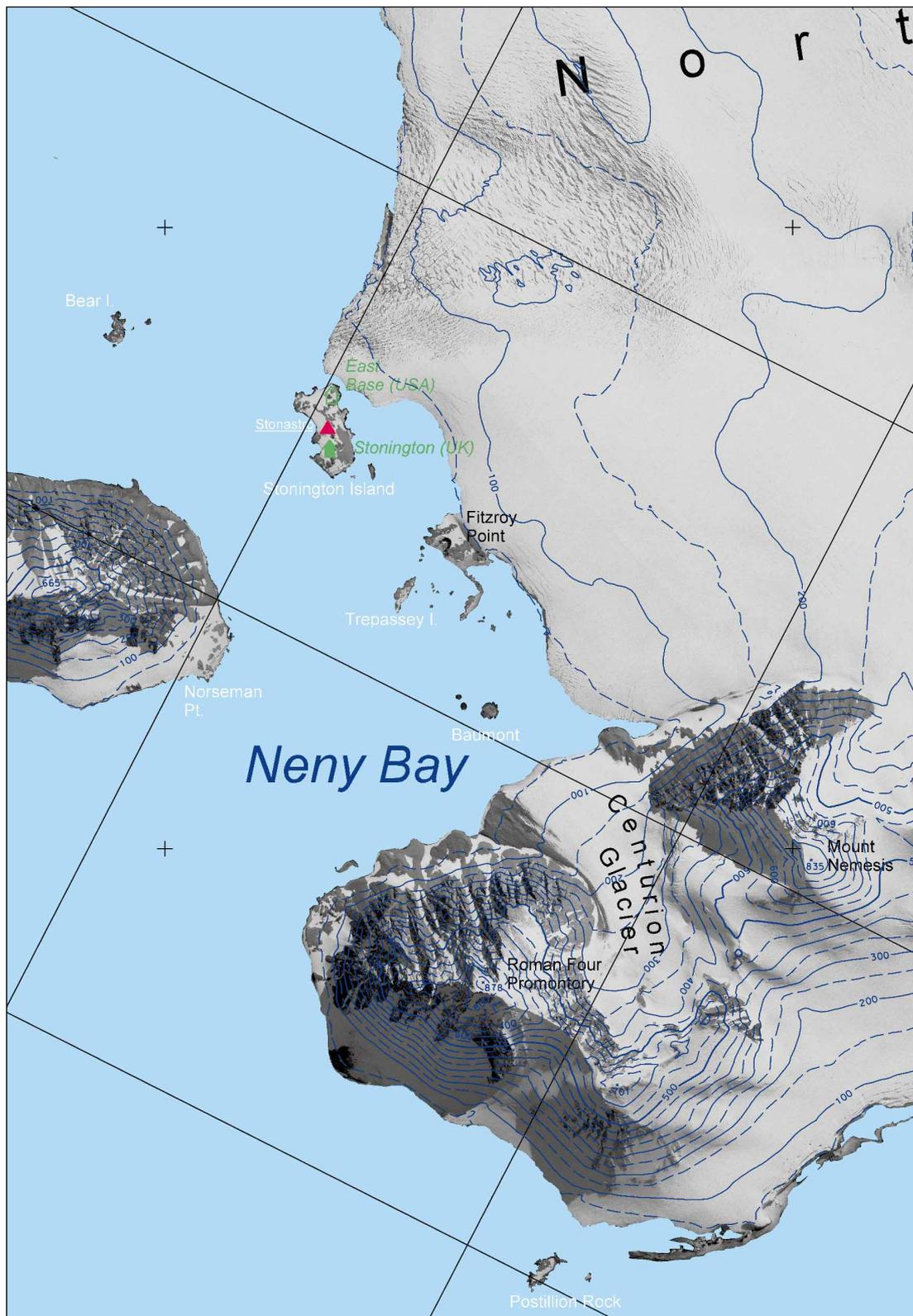


Bild 4 – Ausschnitt im Maßstab 1 : 50 000 aus der Luftbildkarte Base General San Martín, Bai Marguerite

- B** Automatische DHM-Generierung für das gewählte 30m-Raster und Berechnung von Höhenlinien.
- C** Kontrolle der Höhenlinien durch direkte stereoskopische Betrachtung von Gelände und Höhenlinien im Stereomodell. Falls notwendig, folgen Korrekturmessungen und -berechnungen mit **A** und **B**.
- D** Vereinigung der DHM-Ergebnisse der einzelnen Stereomodelle zu einem Gesamt-DHM der Region.

Wegen der vorhandenen Überlappungen der Stereomodelle sind weitere Kontrollen und Korrekturen möglich.

Die Genauigkeit des DHM ist völlig von den örtlichen Texturen abhängig. Aufgrund stereoskopischer Vergleichsmessungen und der Höhendifferenzen in den Überlappungen benachbarter Stereomodelle kommen wir zu folgenden Genauigkeitsklassen:

- ± 3–10m: Gebirge, Felsregionen, schneefreie Zonen
- ± 10–20m: Spalten, Eisverwerfungen, strukturiertes schneebedecktes Gelände
- ± 50m, stellenw. mehr: monotone Schneeflächen ohne Struktur.

Wie ersichtlich, sind die hier erzielten Genauigkeiten geringer als vorher mit dem Facetten-Stereosehen. Das DHM existiert im 30m-Raster, ASCII-Format mit X, Y und Höhe Z.

- F** Orthobildberechnungen der Region mit Hilfe des zuvor berechneten DHM.

Stärker als andere Luftbilder weisen Überweitwinkelbilder Verdeckungen in Steilhangbereichen auf, vor allem, wenn sie in der Nähe der Bildränder liegen. Dieses Problem ließ sich hier lösen durch Herausschneiden der Zentralzone der Bilder und Integration in einem Orthobild.

- G** Im letzten Arbeitsabschnitt entstand die digitale Luftbildkarte nach Integration weiterer topographischer Informationen in die Datensätze **D** und **F**.

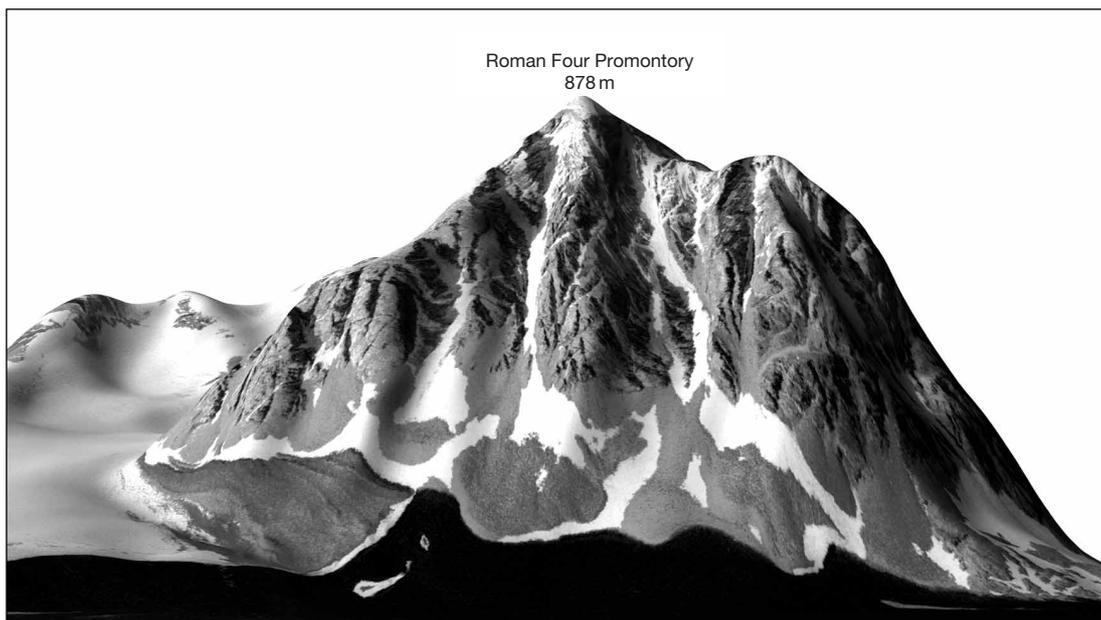


Bild 5 – Perspektivblick auf die 3D-Rekonstruktion von Gletscher Centurion und Roman Four Promontory, 1,5-fach überhöht, vgl. Bild 4

Topographische Daten, wie Ort und Namen von Stationen, von Berggipfeln etc., erhielten wir von Expeditionsteilnehmern des Instituts für Phys. Geographie der Uni Freiburg, von vorhandenen kleinmaßstäbigen Karten sowie aus *Hattersley-Smith* (1991). Als eine weitere, die Luftbilder ergänzende Informationsquelle wurden Seekarten der britischen Admiralität aus den Jahren 1960 und 1982 herangezogen. Sie waren in zweifacher Hinsicht hilfreich. Zum einen gab es infolge von Verdeckungen in den Luftbildern echte Lücken an den Küsten, die sich am Rande der Flugstreifen befinden. Zum anderen sind kleine und kleinste Inseln oder Klippen in den Luftbildern nicht oder nur sehr schwer als solche zu erkennen bzw. von treibenden Eisschollen zu unterscheiden. Im dargestellten Meeresbereich ist daher die Luftbildkarte nur so gut wie die genannten Seekarten samt ihrem eigenen Vorbehalt. Im übrigen, wegen festgestellter Lagedifferenzen zwischen Seekarten und orientierten Luftbildern wurden Seekarteninformationen stets mit lokalen Affintransformationen in die Luftbildkarte übertragen. Die fertige digitale Karte ist mehrfarbig angelegt und mit Kartenrand und einer ausführlichen Legende in Deutsch, Englisch und Spanisch versehen. Sie liegt als Datei im Datenformat der Software MICROSTATION vor (Fa. BENTLEY). Der topographische Datensatz, bestehend aus DHM (siehe **D**) und digitaler Luftbildkarte (siehe **G**; für 1 : 50 000 mit 600 dpi); kann auf Anfrage erworben werden.

Bild 4 vermittelt einen Eindruck von der visuellen Qualität der Karte. Das Beispiel zeigt nach unserer Ansicht die nach wie vor unübertroffene hohe Auflösung der Bilder von optischen Sensoren und ihre „natürliche“, leicht interpretierbare Wiedergabe des Geländes. Die digitale Form solcher Geodaten erleichtert generell die Weiterverarbeitung in den nachfolgenden Softwarepaketen des Geowissenschaftlers, und sei es zunächst nur zur näheren 3D-Betrachtung einzelner, besonders interessierender Bereiche, Bild 5.

5 **Schlußfolgerungen, Ausblick**

Mit zwei sehr verschiedenen stereophotogrammetrischen Verfahren (dem Facetten-Stereosehen und dem Softwarepaket PHODIS, Fa. C. ZEISS) wurde im Gebiet der Station General San Martín ein digitaler topographischer Datensatz aus Luftbildern des Jahres 1989 erzeugt. Aus den Ergebnissen ziehen wir folgende **Schlußfolgerungen**:

- Beide Verfahren leiden darunter, daß die in den photographischen Luftbildern vorhandenen Bildsignale wegen des großen Helligkeitsumfanges nur mit Verlusten digitalisiert werden konnten – ein an sich vermeidbarer Umstand der heutigen Scannergeneration.
- Mit beiden Verfahren können erfolgreich topographische Datensätze erzeugt werden, die die Anforderungen erfüllen. Die Informationsgewinnung mit dem Facetten-Stereosehen kann als optimal angesehen werden (sehr genau und sicher, hoher Automationsstand) wegen seiner Fähigkeit, alle vorhandenen Bilder simultan zu verarbeiten, auch multitemporale Bilder. Die PHODIS-Software ist primär (ebenso wie andere kommerzielle Software) auf Stereobildpaare ausgelegt und benötigt daher in der Antarktis – trotz aller Automation – eine relativ starke Stützung durch einen Operateur. Darüber hinaus bietet sie jedoch dem Nutzer viele Bequemlichkeiten und Module, die zusätzlich für die Herstellung einer kompletten, hochaufgelösten Luftbildkarte notwendig sind.
- Die digital-photogrammetrische Auswertetechnik kann also in der Antarktis mit Erfolg eingesetzt werden. Das Bildflugmaterial von den zahlreichen, vorhandenen Bildflügen wird künftig nach moderneren, beschleunigten Verfahren für die Antarktisforschung ausgewertet werden können.

Wie eingangs im Text näher aufgezeigt, spielen Luftbilder als Informationsquelle über arktische Gebiete, seit es Luftfahrzeuge gibt, eine unbestrittene, wichtige Rolle. Hinzu kamen in der jüngeren Vergangenheit die optischen Bilder und die SAR-Bilder der Satellitenfernerkundung. Ein kurzer **Ausblick** wird nun zeigen, daß in den letzten Jahren eine Reihe vielversprechender Entwicklungen geschehen sind, die die Möglichkeiten zur Erfassung topographischer Datensätze in der Antarktis deutlich verbessern dürften. Dies sei in aller Kürze mit uns wichtig erscheinenden Hauptmerkmalen aufgezeigt. Wir beginnen wieder mit flugzeuggetragenen Sensoren:

- Wie bereits hervorgehoben, würde die im Gebiet an der Marguerite Bay praktizierte digitale Photogrammetrie an Genauigkeit und Effektivität deutlich gewinnen, wenn bei künftigen Bildflügen eine konsequente GPS- und INS-Stützung (d.h. Messung der Kamerapositionen und -Drehwinkel im Fluge) geschehen würde. Mit einer weiteren Qualitätssteigerung ist zu rechnen, wenn anstelle einer klassischen Reihenmeßkamera (mit photographischem Analogfilm) eine digitale Dreizeilenkamera (*Fritsch* 1999) zum Einsatz käme. Beide Kameratypen haben in vielen Merkmalen vergleichbare Eigenschaften, die Dreizeilenkamera hat jedoch den durchgreifenden Vorzug der direkten digitalen Bildsignalerfassung mit 12 bit Auflösung, wodurch z.B. das Problem der Signaldegradationen, verursacht durch den sehr großen Helligkeitsumfang der Antarktis, leicht lösbar wird. Eine entsprechende Kamera, entwickelt von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt zusammen mit LEICA HELAVA SYSTEMS, befindet sich in der praktischen Erprobung und soll im Jahr 2000 auf den Markt gebracht werden (*Sandau* und *Fricker* 1999).
- In der deutschen Vermessungspraxis hat das ebenfalls flugzeuggetragene, GPS- und INS-gestützte Laser-Scanning (siehe die Beiträge in *Fritsch* 1998) in den letzten Jahren eine außergewöhnlich schnelle Azeptanz gefunden. Der Laser-Scanner gehört zu den aktiven Sensoren. Er eröffnet einen kostengünstigen, unmittelbaren Zugang zu sehr genauen (ca. ± 2 dm) und hochaufgelösten DHM (ca. 1 Höhenwert / $1-4$ m²), sogar in Waldgebieten. Bei passender Wahl der Laserwellenlänge wäre ein Einsatz in der Antarktis durchaus vorstellbar. Die Flächenleistung pro Flugstreifen ist allerdings im Vergleich zur Kamera recht niedrig, auch benötigt man zur Geländeinterpretation oder für eine Bildkarte zusätzlich normale Luftbilder.
- Über sehr gute Flächenleistungen (durch eine größere Breite der Flugstreifen und sehr hohe Fluggeschwindigkeiten bis 750 km/h!) verfügt das flugzeuggetragene interferometrische SAR-Verfahren. Es besitzt Vorzüge gegenüber dem bekannten Satelliten-SAR, wie mit den ERS1/2 oder mit RADARSAT, durch das Einwegprinzip mit zwei, im Flugzeug fest montierten Empfangsantennen und durch die weitaus größeren Signal-Rausch-Verhältnisse der Bildsignale wegen der geringeren Flughöhen. Mehrere Firmen bieten inzwischen weltweit ihre Dienste an, siehe Aero-Sensing-Radarsysteme, Dornier Satellitensysteme, Intermap Technologies. Die Leistungen dieser Systeme sind nach eigenen Angaben außergewöhnlich gut. Geländeaufnahmen für alle gängigen Kartenmaßstäbe von etwa 1 : 5 000 bis 1 : 100 000 sind durchführbar mit entsprechenden guten Genauigkeiten und Auflösungen für DHM. *Mercer* et al. (1998) berichten über Vergleichstests mit Höhen-genauigkeiten von ± 3 m in einem Raster von z.B. 5m und einer Flugstreifenbreite von 10 km. Ein durch Tests kontrollierter Einsatz eines dieser Systeme in der Antarktis ist uns bisher nicht bekannt, die Erfolgsaussichten hierfür schätzen wir im Hinblick auf die sehr weitgehende Unabhängigkeit des Radars vom Wetter und Sonnenstand als sehr hoch ein. Zu beachten bleibt, daß auch diese Radarverfahren auf Rückstreuung einer kohärenten Mikrowellenstrahlung in der Oberflächenschicht des Geländes basieren, nicht auf Refle-

xion an seiner Oberfläche. Der Eindruck solcher Bilder ist daher oft weit – im Gegensatz zu Luftbildern – vom natürlichen Eindruck des Geländes entfernt; auch stört die nicht ausreichende Auflösung der Bilder. Die allgemeine Akzeptanz von Radarbildkarten bleibt fraglich.

- Werfen wir zum Schluß einen Blick auf die künftige Bedeutung von Bilddaten satellitenge-tragener Sensoren für die Antarktisforschung. Sie bieten – wie bereits betont – dem Geo-wissenschaftler in der Regel bei großer Flächenleistung einen erheblichen Kostenvorteil. Schon aus diesem Grunde – neben anderen – wird diese Datenquelle immer von Bedeu-tung sein. Außer den auch künftig zur Verfügung stehenden SAR-Bilddaten ist eine neue Generation von optischen, sehr hoch aufgelösten Bildern angekündigt worden mit Pixeln am Boden bis minimal etwa 1 m² (Fritz 1997). Die Steuerung der Bildaufnahme ist sehr fle-xibel, so daß auch praktisch zeitgleiche Stereobildpaare mit Überdeckungen in Orbitrich-tung erfaßt werden können – mithin in einer Konfiguration (Basisverhältnis bis 1 : 1!) und Auflösung recht ähnlich den Luftbildkonfigurationen, die wir an der Marguerite Bay aus-gewertet haben. Für uns besteht daher die spannende Frage, ob sich nicht künftig mit den eben genannten SAR-Bildern und optischen Bildern das Hauptinformationsbedürfnis nach Geobasisdaten erfüllen lassen.

Insgesamt gesehen erscheint uns der Zugang zu Geobasisdaten der Antarktis in der abseh-baren Zukunft immer günstiger zu werden. „Weiße Flecken“ in topographischen Datensätzen oder in Karten der Antarktis dürften bald nur noch für das Attribut Neuschneegebiete stehen.

6 Literatur

Aero-Sensing Radarsysteme GmbH, Wessling, Deutschland: www.op.dlr.de

Brandstätter, G. und Sharov, A. (1998): Environmental monitoring in the high arctic using dif-ferent types of high resolution satellite imagery. – Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXII, Part 7, pages 201–210, Budapest.

Brunk, K. (1992): Zur Kartierung und geographischen Namengebung in der Antarktis. – Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Heft 107, S. 55-66, Institut für Ange-wandte Geodäsie, Frankfurt/M.

Brunner, K. (1977): Darstellung alpiner Gletscher in großmaßstäblichen Karten. – Dissertation Techn. Universität München.

Brunner, K. (1980): Zur heutigen Bedeutung von Orthophotokarten unter Berücksichtigung von Orthophotokarten vergletschter Gebiete. – Bildmessung und Luftbildwesen, 48, S. 151–157.

Dornier Satellitensysteme GmbH, Friedrichshafen, Deutschland: www.observe.de.

Finsterwalder, S. (1897): Der Vernagtferner, seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. – Ergänzungshefte Zeitschrift des Deutschen und Österreich. Alpen-vereins, 1. Band, 1. Heft, Graz.

Fox, A. J. und Nuttal, A.-M. (1997): Photogrammetry as a research tool for glaciology. – Photo-grammetric Record, 15 (89), pages 725–737.

Fritsch, D. (ed., 1998): Workshop: Automatische Rekonstruktion von Stadtlanschaften mit-tels Laser-Scanning. – Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.

- Fritsch, D.* (ed., 1999): Workshop: Digital aerial cameras for photogrammetry and remote sensing. – Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- Fritz, L. W.* (1997): August 1997 status of new commercial earth observation satellite systems. – In: *G. Konecny* (ed.), *Sensors and mapping from space, Workshop of the Intern. Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing, Hanover, vol. 17, proceedings, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, Universität Hannover, Germany.*
- von Gruber, O.* (1942): Das Wohlthat-Massiv im Kartenbild. – In: *A. Ritscher* (Hrsg.), *Wissenschaftliche und fliegerische Ergebnisse der Deutschen Antarktischen Expedition 1938/39, Bd. I, S. 157–230, Tafeln 29–48 und Karten 1–3, Verlag Koehler u. Amelang, Leipzig.*
- Hattersley-Smith, G.* (1991): The history of Place-names in the British Antarctic Territory. – The British Antarctic Survey, scient. report, Cambridge.
- Intermap Technologies Ltd., Calgary, Canada: www.intermap.ca
- Konecny, G.* (1966): Applications of photogrammetry to studies of arctic and mountain glaciers of North America. – *Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 3, no. 6, pages 183–198.*
- Konecny, G.* (1972): Gletscherphotogrammetrie. – In: *Jordan/Eggert/Kneisel* (Hrsg.), *Handbuch der Vermessungskunde. – Band III a/2, S. 1428–1470, J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.*
- Korth, W. und Dietrich, R.* (1996): Ergebnisse geodätischer Arbeiten im Gebiet der Schirmacherose /Antarktika 1988–1993. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft 301, München.
- Kostka, R.* (1997): Franz Josef Land – Studien zur Kartographie des nördlichsten Archipels Europas. – *Mitteilungen Österreich. Geograph. Gesellschaft, 139. Jg. (Jahresband), S. 313–326, Wien.*
- Kraus, K.* (1993): *Photogrammetry. Fundamentals and Standard Processes. – Vol. 1, 4th ed., Dümmler Verlag Bonn.*
- Lindner, K., Mayer, M., Heck, B. und Kutterer, H.* (1999): Das geodätische Referenznetz Antarktis. – In: *G. Chesi* (ed.), *X. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Heft 18 Mitteilungen des Geodät. Instituts, Universität Innsbruck.*
- Mercer, J.B., Thornton, S. und Tennant, K.* (1998): Operational DEM production from airborne interferometry and from RADARSAT stereo technologies. – ASPRS-RTI Annual Conference, Tampa.
- Metzig, R., Dietrich, R. Korth, W., Perlt, J., Hartmann, R. und Winzer, W.* (1999): Horizontal ice velocity estimation and grounding zone detection by SAR interferometry near to Schirmacherose, Antarctica. – *Polarforschung, Bremerhaven (im Druck).*
- Müller, U., Sandhäger, H., Sievers, J. und Blindow, N.* (1999): Glacio-kinematic analysis of ERS-1/2 SAR data of the Antarctic ice shelf Ekströmisen and the adjoining inland ice sheet. – *Polarforschung, Bremerhaven (im Druck).*
- Rau, F. et al.* (1999): Monitoring multi-year snow cover dynamics on the Antarctic Peninsula using radar imagery. – *Polarforschung, Bremerhaven (im Druck).*
- Sandau, R. und Fricker, P.* (1999): Digital photogrammetric cameras – possibilities and problems. – In: *D. Fritsch* (ed.), *Workshop, Digital Aerial Cameras for Photogrammetry and Remote Sensing, KWW Universität Stuttgart.*

Schlüter, M. (1999): Von der 2 1/2D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 506, München.

Schlüter, M. und *Wrobel, B. P.* (1998): Das Dezimeter-DGM durch photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen. – Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 8–9, S. 295–303.

Schmidt-Falkenberg, H. (1990): Der Einsatz von Photogrammetrie und Fernerkundung in der Antarktisforschung. – In: Festschrift *G. Konecny* zum 60. Geburtstag, Wissenschaftl. Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen, Heft 13, S. 231–242, Universität Hannover.

Sievers, J. und *Walter, H.* (1984): Photogrammetrie 1983/84 im westlichen Neuschwabenland. – Berichte zur Polarforschung, 19, S. 156–164, Bremerhaven.

Sievers, J. und *Bennat, H.* (1989): Reference systems of maps and geographic information systems of Antarctica. – Antarctic Science 1(4), p. 351–362.

Tsay, J.-R. (1996): Wavelets für das Facetten-Stereosehen. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 454, München.

Weisensee, M. (1992): Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 374, München.

Welsch, W. M., Lang, M. und *Miller, M.* (eds., 1997): Geodetic activities: Juneau Icefield, Alaska, 1981–1996. – Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Heft 50, Universität der Bundeswehr München.

Wrobel, B. P. (1987): Digital image matching by facets using object space models. – In: *Oosterlinck, A.* and *Tescher, A. G.* (eds.), Advances in image processing, pp. 325–334, proceedings SPIE 804, The Hague, The Netherlands.

Wrobel, B. P. und *Schlüter, M.* (1997): Digital terrain model generation in the Antarctic – a challenging task for digital photogrammetry. – In: *Altan, M. O.* and *Gründig, L.* (eds.), Proceedings of the 2nd Turkish-German Geodetic Days, 28th – 30th May, p. 407–416, Berlin.

Wunderle, S. und *Schmidt, J.* (1999): Estimation of glacier velocities by ERS-1/2 SAR interferometry in the area of San Martín, Marguerite Bay, Antarctic Peninsula. – Polarforschung, Bremerhaven (im Druck).

Dank

- Der vorliegende Artikel berichtet über die Forschungsergebnisse der DYPAG-Gruppe, gefördert vom deutschen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Die Verantwortung für den Inhalt tragen die Autoren.
- Wir danken Prof. *Armin Grün*, ETH Zürich, für gemeinsam durchgeführte Bündelblockausgleichungen mit seiner Software BUND.