

Vermessung
Photogrammetrie
Kulturtechnik

Mensuration
Photogrammétrie
Génie rural ■

Februar 1993
Février 1993
91. Jahrgang
91e année

2 | 93



Grosser Aletschgletscher

Photogrammetrische Auswertungen als Grundlage für glaziologische Untersuchungen

Th. Kersten, M. Meister

Anhand des Beispiels «Grosser Aletschgletscher» werden das Leistungsvermögen und die vielfältigen Möglichkeiten aufgezeigt, die der Einsatz der Photogrammetrie für Anwendungen in der Glaziologie bietet. Die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertungen als eine Grundlage für Gletscherforschungsarbeiten werden vorgestellt. Aus Luftbildern der Gletscherbefliegung (Bildmassstab 1 : 12000) vom August 1991 wurde ein Digitales Terrain Modell (DTM) für den Bereich von der Gletscherzunge bis zur Höhe des Bettmerhorns in einem 20 m Raster gemessen. Die 3-D-Informationen der Gletscherzunge konnten mit einem DTM verglichen werden, das aus Luftbildern von 1987 erstellt wurde, so dass die Abschmelzung der Gletscherzunge quantitativ nachgewiesen und dargestellt werden konnte. Auch moderne Visualisierungsverfahren der digitalen Photogrammetrie wurden eingesetzt, um z.B. aus dem DTM und einem Digitalen Orthophoto synthetische perspektive 3-D-Ansichten des Gletschers abzuleiten.

En prenant comme exemple le grand glacier d'Aletsch, on se propose de montrer les performances atteignables et le large éventail des possibilités offertes par l'utilisation de la photogrammétrie dans le domaine de la glaciologie. On présentera les résultats de la restitution photogrammétrique, base des travaux de recherche sur les glaciers. Un Modèle Numérique de Terrain (MNT – [grille de vingt mètres] – de la langue glacière, jusqu' à la hauteur du Bettmerhorn, a été obtenu par interprétation des vues aériennes issues d'un survol du glacier en août 1991 (échelle de l'image 1 : 12 000). Les informations tridimensionnelles relatives à la langue glacière ont pu être comparées à un MNT établi à partir d'images aériennes prises en 1987. Ainsi la fonte de la langue du glacier a pu être quantitativement démontrée et représentée. Les méthodes de visualisation les plus modernes de la photogrammétrie numérique ont été mises en œuvre, notamment pour obtenir des vues perspectives tridimensionnelles du glacier à l'aide du MNT et d'une orthophoto numérique.

1. Einleitung

Am Grossen Aletschgletscher werden im Rahmen der Gletscherforschungsarbeiten seit über 100 Jahren verschiedenartigste Untersuchungen durchgeführt. Die Bewegungen von Punkten der Gletscheroberfläche, Gletscherprofile und Vermessungspunkte eines Festpunktnetzes können mit Methoden der Geodäsie bestimmt werden. Für die Bestimmung der Lage und des Gletschervolumens werden regelmäßige Befliegungen durchgeführt. In einer Aerotriangulation lassen sich in den schwer zugänglichen Gebieten des Aletschgletschers eine grosse Anzahl von Punkten unter Verwendung von wenigen Passpunkten photogrammetrisch bestimmen. Neben dem hohen dokumentarischen Wert bieten Luftbilder die Möglichkeit, das Gebiet an einem photogrammetrischen Auswertegerät (z.B. Prime-Wild S9-AP) zu kartieren oder auch ein Digitales Terrain Modell (DTM) zu erstellen. Eine bemerkenswerte Kartierung des Grossen Aletschgletschers ist 1957 aus Luftaufnahmen im Massstab 1 : 10 000 durchgeführt

worden, die von Kasser und Röthlisberger (1966) beschrieben wird. Mit Hilfe von DTM-Daten können Volumen bzw. Volumenänderungen der Gletschermasse bestimmt werden. Darüberhinaus dient das DTM als Grundlage für die Herstellung von

Orthophotos, zur Ableitung von Profilen, Höhenlinien und 3-D-Darstellungen.

Im Rahmen des Diplomvermessungskurses (DVK), der im August 1991 vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich durchgeführt wurde, wurden die Grundlagen für eine Befliegung in Absprache mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) gelegt. Studenten der Fachrichtung Vermessungswesen und Kulturtechnik hatten die Aufgabe, innerhalb von drei Wochen am Grossen Aletschgletscher (vom Märjelensee bis zur Gletscherzunge) ein Passpunktnetz anzulegen, geodätisch zu vermessen und photogrammetrisch zu signalisieren. Bei der Vermessung des Passpunktnetzes wurden terrestrische und GPS-Methoden kombiniert. Die Resultate der Vermessungsarbeiten und der photogrammetrischen Auswertungen werden im folgenden vorgestellt. Die Ergebnisse der Auswertungen und Daten wurden der VAW für weitere Gletscherforschungsarbeiten zur Verfügung gestellt.

2. Aerotriangulation

2.1 Aufnahmegebiet

Der Grosse Aletschgletscher erstreckt auf einer Länge von 24 Kilometern vom Konkordiaplatz (Firngebiet) bis zur Gletscherzunge. Seit dem Ende der letzten kleinen Eiszeit im Jahre 1850 nimmt das Volumen und die Länge des Gletschers, abgesehen von kleinen zwischenzeitlichen Vorstössen, ab. Die eindrucksvollsten Veränderungen sind im Bereich der Gletscherzunge zu beobachten. Daher wurde u.a. auch das photogrammetrische Aufnahmegebiet in den Bereich vom Märjelensee bis zur Gletscherzunge gelegt. Der Höhenunterschied in diesem Gebiet beträgt fast 1000 m. Das Gebiet ist durch eine kontrastarme Mischung von Stein, Sand, Fels und Eis gekennzeichnet, welche die Signalisierung im Felde und das Auffinden der Signale in den Luftbildern erschwerte.

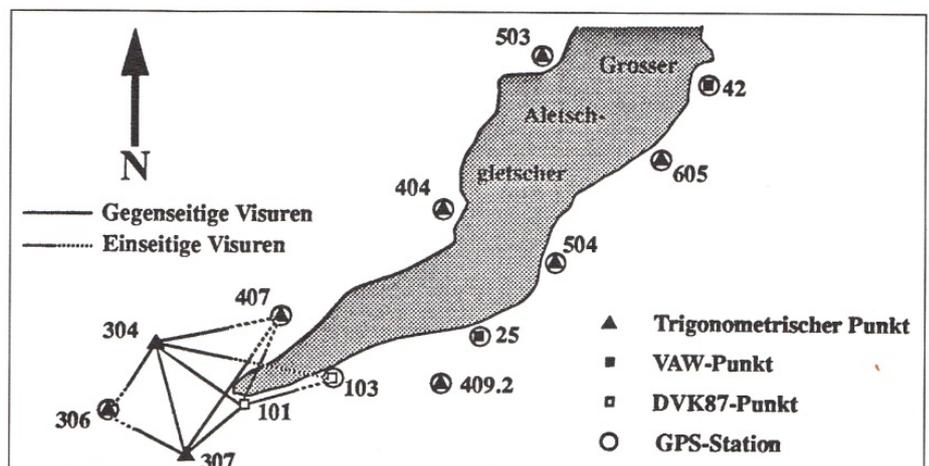


Abb. 1: Passpunktnetz am Grossen Aletschgletscher (Skizze).

Die zerklüfteten Gletscherzonen und die teilweise sehr steilen Hänge an beiden Seiten des Gletschers beeinträchtigten die photogrammetrischen Auswertungen zusätzlich.

2.2 Passpunktnetz

Für die Auswahl der Netzpunkte standen trigonometrische Punkte (TP), Vermessungspunkte der VAW und Punkte aus dem DVK von 1987 zur Verfügung. Die Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Punkte des Passpunktnetzes. Bei der Auswahl der Punkte für die Netzdisposition mussten neben vermessungstechnischen Gesichtspunkten – wie z.B. stabile Lage, freie Sichten für terrestrische und keine Horizontverdeckungen für GPS-Messungen – auch zeitliche und personelle Aspekte berücksichtigt werden. Daher hatte die zeitliche Begrenzung des Kurses und die limitierte Anzahl der Studenten einen Einfluss auf die Grösse des Netzes. Denn für die Vermessung des Netzes musste die schwere Ausrüstung eigenhändig zu den teilweise beschwerlich erreichbaren Punkten transportiert werden.

Als Grundlage des Passpunktnetzes wurden an beiden Seiten des Gletschers gut verteilt zehn Punkte (siehe Abb. 1) in einer GPS-Kampagne bestimmt. Bei dieser Kampagne konnten drei Receiver vom Typ WM 102 zeitgleich eingesetzt werden. Dabei wurde ein Punkt (Punkt 409.2 auf der Moosfluh, Höhe 2333 m) mit einem Receiver ständig besetzt, und die anderen beiden Empfänger wechselten beidseitig des Gletschers von Punkt zu Punkt. Während der Messzeit von 15.00 Uhr bis 21.00 Uhr konnten gleichzeitig auf allen drei Messstationen Signale von vier und manchmal fünf Satelliten empfangen werden. Aufgrund der guten Bedingungen während der GPS-Messungen konnten die Koordinaten der Netzpunkte mit einer Genauigkeit von besser als einen Zentimeter bestimmt werden.

Im Bereich der Gletscherzunge wurde das GPS-Netz mit terrestrisch bestimmten Punkten verdichtet. Auf drei Stationen (304, 307, 101) wurden Richtungen und Distanzen zu sechs bekannten Netzpunkten gemessen (siehe Abb. 1). In einer Netzausgleichung wurde die Koordinatengenauigkeit in der Lage mit 6 mm und in der Höhe mit 14 mm bestimmt.

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit der GPS-Software PoPS (Post Processing Software von Wild) sowie mit Ausgleichs- und Transformationsprogrammen des IGP. PoPS lieferte die Koordinaten der GPS-Punkte im WGS-84, von wo sie anschliessend mit Standardtransformationsparametern in ein genähertes Landeskoordinatensystem mit ellipsoidischen Höhen transformiert wurden. In diesem Koordinatensystem wurden die terrestrisch gemessenen Punkte in einer Netzausgleichung

auf drei mit GPS gemessenen Punkte (103, 306, 407) transformiert. Somit lagen alle zu bestimmenden Punkte in einem genäherten Landeskoordinatensystem mit ellipsoidischen Höhen vor. Aufgrund der Software mussten für die räumliche Lagerung des Netzes die genäherten und gegebenen Landeskoordinaten vorher in geozentrisch-kartesische Koordinaten auf dem Bessel-Ellipsoid umgerechnet werden. Durch Lagerung auf vier TP (307, 407, 503, 605) konnten die Transformationsparameter zwischen dem genäherten und bekannten System berechnet und alle Passpunkte in das letztere transformiert werden. Die geozentrisch-kartesische Koordinaten mit ellipsoidischen Höhen wurden zuletzt mit Hilfe der Geoidundulation in das gewünschte Landeskoordinatensystem mit orthometrischen Höhen umgerechnet.

Die Genauigkeit der Punktkoordinaten lag bei 1 cm in der Lage und der Höhe. Den Vergleich zwischen errechneten und gegebenen Landeskoordinaten (Stand 1927) zeigt Tabelle 1. Die maximalen Differenzen in der Lage und Höhe liegen unter fünf Zentimeter, wenn man von der grossen Höhendifferenz (15.9 cm) auf Punkt 504 absieht. Diese Abweichung deutet auf einen Höhenmessfehler oder auf ein Absinken des TP's hin. Die zweite Vermutung wird durch die geologisch instabile Lage nahe dem Gletscher unterstützt und durch die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertungen (Aerotriangulation) bestätigt.

Punkt	dx [cm]	dy [cm]	dz [cm]
307	0.3	0.2	2.6
404	-1.8	3.3	-2.5
407	-0.8	0.8	-3.7
503	3.1	0.3	1.8
504	-4.3	3.1	15.9
605	-2.6	-1.2	-0.7

Tab. 1: Differenzen der Passpunktkoordinaten zu den Landeskoordinaten.

2.3 Signalisierung, Bildflug

Für den Erfolg einer Aerotriangulation ist eine gute Signalisierung des Gebietes eine unbedingte Voraussetzung. Die Abbildung 2 zeigt die Signalgrösse und -form. Als Signale wurden 60 × 60 cm grosse, weisse Aluminiumplatten verwendet. In einem Abstand von ca. 1 Meter vom Signal wurden rechtwinklig zueinander Hinweisstreifen mit weisser Farbe auf den Fels gemalt und aufgrund der kontrastarmen Umgebung mit schwarzer Kontrastfarbe umgeben.

Wenige Tage nach Beendigung des DVK wurde der Grosse Aletschgletscher durch den Flugdienst der Eidgenössischen Vermessungsdirektion in zwei Streifen mit

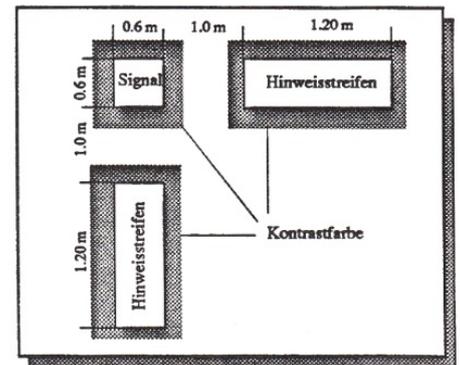


Abb. 2: Signalisierung am Grosse Aletschgletscher.

80% Längsüberdeckung im Bildmassstab von 1 : 12 000 befliegen. Die Abbildung 3 zeigt die Lage der Flugstreifen über dem Grosse Aletschgletscher. Die Flughöhe lag im 1. Streifen bei 3700 m und im 2. Streifen bei 4100 m über N.N. Der Bildflug wurde bei guten Wetterbedingungen mit der Weitwinkelkamera Wild RC20 15/4 durchgeführt. Die Befliegungs- und Blockdaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Gebietsgrösse:	8.5 × 3.5 km ²
Geländehöhe:	1490 m bis 2450 m
Flughöhe über N.N.:	3700 m bzw. 4100 m
Kamera:	Wild RC 20 15/4, UAGA-F, Nr. 13129
Bildmassstab:	1 : 12 000
Längsüberdeckung:	80%
Anzahl Streifen:	2
Anzahl Bilder:	31
Befliegungsdatum, -uhrzeit:	20. August 1991, 14.20 Uhr
Film (S/W):	AGFA Panatomic-X

Tab. 2: Befliegungs- und Blockdaten «Grosse Aletschgletscher».

2.4 Vorbereitung und Ausführung der Messungen

Die signalisierten Punkte wurden auf Papierabzügen der Luftbilder markiert, um sie während der Messung am Auswertegerät schneller in den Negativen auffinden zu können. Die Bildkoordinatenmessungen wurden am Analytischen Plotter Prime-Wild S9-AP des IGP im Stereomodus durchgeführt. Die natürlichen Verknüpfungspunkte wurden während der Messung am S9 ausgewählt, in den Pa-

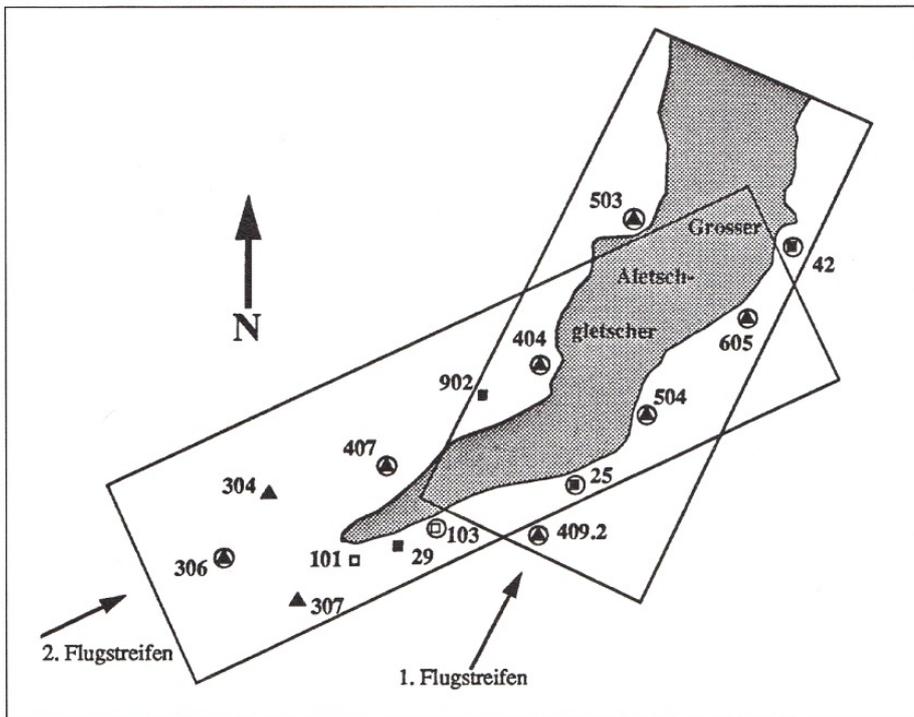


Abb. 3: Lage der Flugstreifen über dem Grossen Aletschgletscher (Skizze).

pierabzügen markiert und durch Punkt-skizzen festgehalten. Die Messungen wurden im relativ orientierten Modell registriert. Aus Gründen der Zuverlässigkeit und für die bessere Verknüpfung der Modelle in Streifenrichtung wurden in den «Gruber-Positionen» jeweils Punktpaare gemessen. Insgesamt wurden neben den 12 Passpunkten weitere 88 natürliche Verknüpfungspunkte gemessen. Die registrierten Maschinenkoordinaten wurden durch eine Affintransformation über die Rahmenmarken in das Bildkoordinatensystem transformiert, wobei Korrekturen wegen radialer Verzeichnung und Refraktion berücksichtigt wurden. Die reduzierten Bildkoordinaten beider Streifen wurden auf einer Arbeitsstation von Sun Microsystems nach der Bündelmethode mit dem Bündelprogrammpaket «bun» des IGP ausgeglichen.

2.5 Rechenversionen, Ergebnisse

Für die abschliessende Bündelausgleichung musste nur eine Beobachtung als grober Fehler aufgrund einer Punktverwechslung zwischen dem 1. und 2. Streifen eliminiert werden. Der bereinigte Datensatz wurde in verschiedenen Rechenvarianten ausgeglichen. Die Varianten unterschieden sich bezüglich Passpunktverteilung (PPV1, PPV2, PPV3) und Kalibrierungsverfahren (mit und ohne Selbstkalibrierung, 12 und 44 zusätzliche Parameter). Die Passpunktversion 1 (PPV 1) stellt die Passpunktverteilung auf vier gut verteilten Voll- und einem Höhenpasspunkt dar, während bei der Version 3 (PPV 3) alle Passpunkte für die Ausgleichung verwendet werden. In Version 2 werden die bei-

den Streifen auf sechs Vollpasspunkten und drei Höhenpasspunkten gelagert. Alle drei Versionen wurden mit und ohne Selbstkalibrierung gerechnet. Die Ausgleichung mit Selbstkalibrierung kompensiert systematische Bildfelder (Verzeichnungs-, Refraktionsrestfehler, Änderung der Bildhauptpunktlage und der Kammerkonstanten, Bilddeformationen, etc.) durch 12 bzw. 44 zusätzliche Parameter (ZP). Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen.

Alle Versionen der Bündelausgleichung wurden mit a priori Standardabweichungen von $\sigma_{xy} = 1 \text{ cm}$, $\sigma_z = 1 \text{ cm}$ für die Passpunktkoordinaten und von $\sigma_0 = 5 \mu\text{m}$ für die Bildkoordinaten gerechnet. Die em-

pirischen Genauigkeitsmasse μ_{xy} , μ_z wurden aus dem Vergleich zwischen den photogrammetrisch bestimmten Punkten und den Kontrollpunkten – hier sind die geodätischen Koordinaten der nicht für die Bündelausgleichung verwendeten Passpunkte gemeint – ermittelt. Durch Inversion des Normalgleichungssystems wurden die theoretischen Genauigkeitsmasse σ_{xy} , σ_z der Neupunkte bestimmt, die mit der entsprechenden geschätzten Standardabweichung $\hat{\sigma}_0$ berechnet wurde. Die Genauigkeitsmasse μ_{xy} und σ_{xy} stellen das quadratische Mittel aus den x- und y-Werten dar.

In Version 3 (PPV 3) wurde eine theoretische Punktgenauigkeit von 8 cm in der Lage und 17 cm in der Höhe für die Neupunkte erreicht. Der Vergleich zwischen den photogrammetrisch und geodätisch bestimmten Punkten brachte eine praktische Genauigkeit von 6 cm in der Lage und 16 cm in der Höhe. Die praktische Genauigkeit ist geringfügig besser als die theoretische, da für die Berechnung der theoretischen Genauigkeit nur natürliche Neupunkte und für die praktische Genauigkeit nur die signalisierten Punkte verwendet wurden. Die geringen Abweichungen zwischen den theoretischen und praktischen Genauigkeitsmassen lassen sich auch auf die kleine Anzahl von Passpunkten und Kontrollpunkten in der Ausgleichung mit Selbstkalibrierung zurückführen. Eine signifikante Steigerung der praktischen Genauigkeit wird durch den Einsatz von zusätzlichen Parametern erreicht. Der 12er Parametersatz verbessert die Genauigkeit um den Faktor 2 gegenüber der Version ohne Kompensation der systematischen Fehler, während die 44 zusätzlichen Parameter die Genauigkeit bis zu Faktor 2.7 steigern. Hierbei wird eine markante Genauigkeitsverbesserung durch die zusätzlichen Parameter in der Höhe ersichtlich.

Version	PP		KP		ZP	$\hat{\sigma}_0$ (μm)	σ_{xy} (m)	σ_z (m)	μ_{xy} (m)	μ_z (m)
	Lage	Höhe	Lage	Höhe						
PPV1	4	1	7	1	0	5.5	0.13	0.22	0.19	0.40
	4	1	7	1	12	4.9	0.13	0.21	0.10	0.20
	4	1	7	1	44	4.7	0.15	0.25	0.07	0.17
PPV2	6	3	3	3	0	5.7	0.10	0.20	0.10	0.41
	6	3	3	3	12	4.9	0.09	0.18	0.08	0.21
	6	3	3	3	44	4.6	0.10	0.20	0.06	0.16
PPV3	12	12	–	–	0	6.0	0.09	0.19	–	–
	12	12	–	–	12	5.1	0.08	0.17	–	–
	12	12	–	–	44	4.7	0.09	0.19	–	–

ZP..... Anzahl der zusätzlichen Parameter	$\hat{\sigma}_0$ geschätzte Standardabweichung
PP..... Anzahl der Passpunkte	σ_{xyz} theoretisches Genauigkeitsmass
KP..... Anzahl der Kontrollpunkte	μ_{xyz} praktisches (empirisches) Genauigkeitsmass

Tab. 3: Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen «Grosser Aletschgletscher».

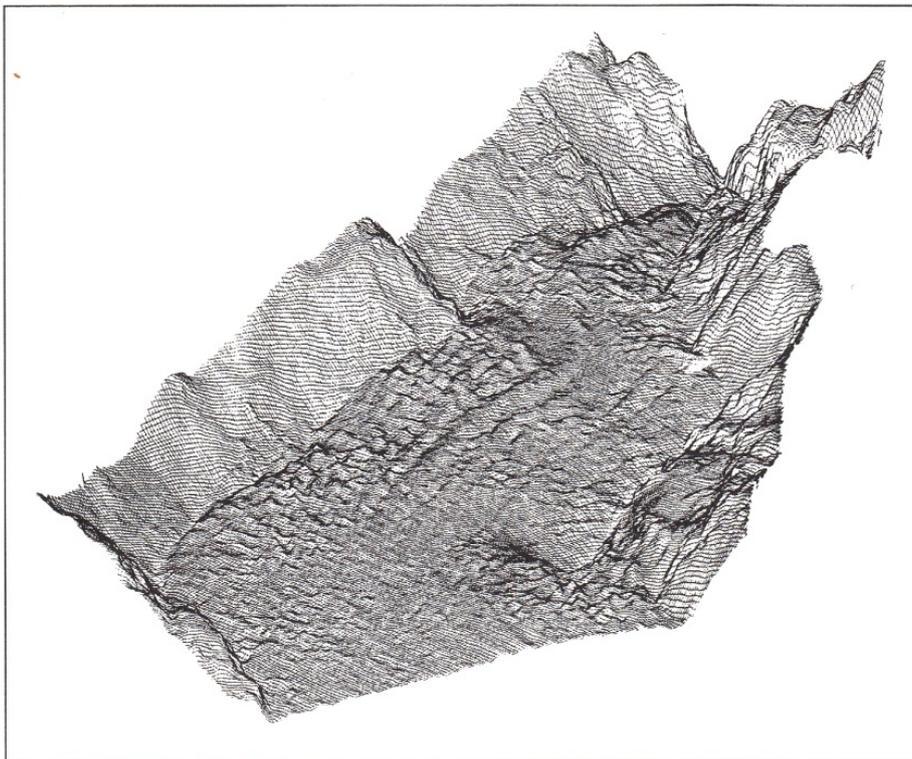


Abb. 4: Digitales Terrainmodell vom Teil des Grossen Aletschgletschers (Sicht von Nordosten auf die Gletscherzunge).

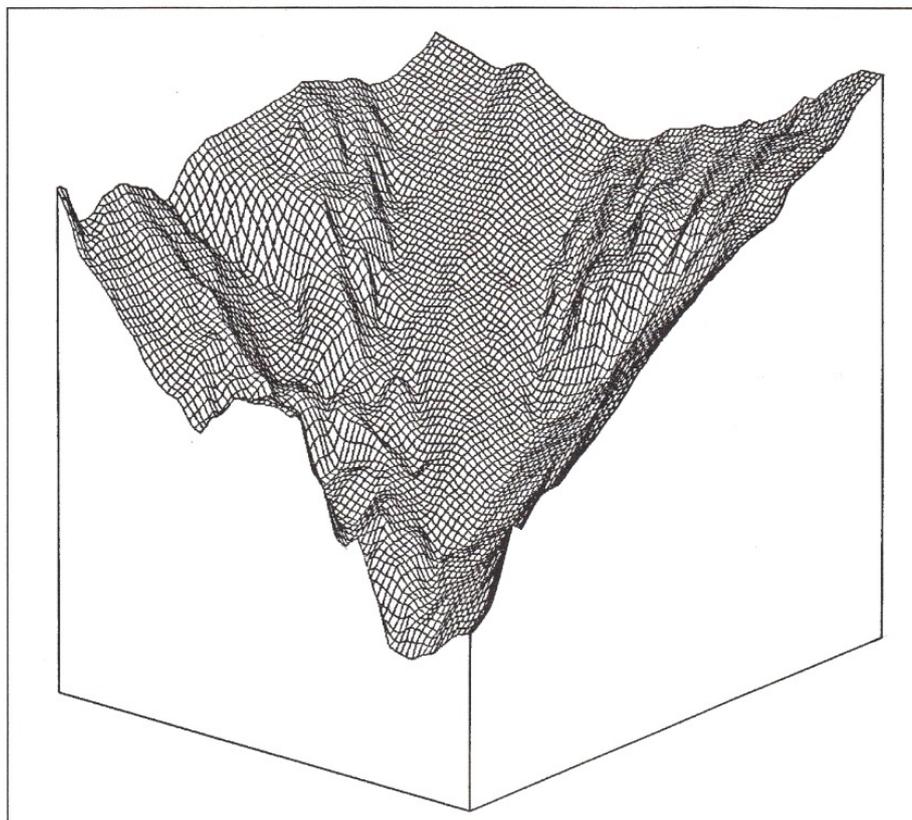


Abb. 5: Ausschnitt (Testgebiet) aus dem DTM des Grossen Aletschgletschers (Blick von Südwesten auf die Gletscherzunge).

3. Digitales Terrain Modell

Nach erfolgter Aerotriangulation standen genügend signalisierte und natürliche Passpunkte zur Verfügung, um jedes Modell der beiden Streifen orientieren zu kön-

nen. Vom unteren Teil des Aletschgletschers (von der Gletscherzunge bis etwa zur Höhe des Bettmerhorns) wurde ein DTM erstellt. Dazu wurden drei Modelle mit 80%iger Überdeckung am analyti-

schen Plotter S9-AP ausgewertet. Die Punkte wurden in einem regelmässigen Gitter mit einem Punktabstand von 20 m gemessen. Das Gitter wurde parallel zu den Landeskoordinatenachsen gelegt, wobei als Startwert ein runder Koordinatenwert gewählt wurde, um einen Vergleich der Höhendifferenzen mit Datensätzen aus anderen Zeitepochen zu erleichtern. Zusätzlich wurde der Gletscherrand als Bruchkante gemessen. Die Gletscherpalten wurden bei den Messungen vernachlässigt. Insgesamt wurden 14 964 Raster- und 1378 Bruchlinienpunkte erfasst. Nach Bereinigung der groben Messfehler erfolgte eine Weiterverarbeitung der DTM-Daten mit Hilfe des institutseigenen Programmpakets «DTMZ». Das Programm arbeitet nach folgendem Prinzip:

- Dreiecksvermaschung, d.h. Unterteilung des Geländes in Dreiecke, wobei nur dann 3 Punkte ein Dreieck definieren, wenn der durch diese 3 Punkte gegebene Kreis keine weiteren Punkte enthält. Hierbei gelten die Bruchlinien immer als Dreiecksseiten.
- Interpolation der Höhenlinien, wobei jedes Dreieck in 16 bezüglich der X-Y-Koordinaten kongruente Dreiecke unterteilt wird (Methode der finiten Elemente). Die Z-Koordinaten werden mit Hilfe einer bikubischen Interpolation mit den Koordinaten der Hauptdreiecke und den Vermaschungsfunktionen nach Zienkewicz errechnet.
- Ableitung eines regelmässigen Gitters, perspektivische Darstellungen des DTM's (3-D-Gittermodelle) usw.

Die Abbildung 4 zeigte eine 3-D-Ansicht des Grossen Aletschgletschers vom Zungenbereich bis zur Höhe des Bettmerhorns.

Im Bereich der Gletscherzunge wurde ein kleines Testgebiet von verschiedenen Operateuren gemessen und die Datensätze miteinander verglichen. Es zeigte sich auf dem Gletscher lediglich Differenzen in Dezimeter-Bereich. Sehr grosse Abweichungen, die in Ausnahmen bis zu 30 m betrugten, liessen sich nur im steilen zerklüfteten Gelände und in den Schluchten feststellen, wo Messungen aufgrund von Verdeckungen und Schatten besonders schwierig waren. Für die weitere Auswertung der Gletscheroberfläche spielen diese Abweichungen aber keine Rolle.

4. Das DTM als Grundlage für glaziologische Analysen

Vom Grossen Aletschgletscher, insbesondere von der Gletscherzunge, existieren jährliche Luftaufnahmen, die bis in die 50er Jahre zurückgehen. Mit Hilfe von erstellten DTM's aus verschiedenen Zeitepochen können das Fliessverhalten des Gletschers, die Erosionswirkung und die

Veränderungen bei der Eisbildung modelliert werden, was für verschiedene Wissenschaften (Glaziologie, Klimatologie, usw.) von Interesse ist. Hieraus können z.B. klimatologische Rückschlüsse gezogen oder Gefahrensituationen simuliert werden.

Im vorliegenden Fall wurde das DTM der Gletscherzunge (Abb. 5) mit einem entsprechenden Datensatz, der aus Luftbildern von DVK 1987 erhoben wurde, verglichen. Dazu wurden die Höhendifferenzen an lagemässig gleichen Punkten bestimmt. Aus den Differenzen wurde mit dem Programm «DTMZ» ein 3-D-Gittermodell abgeleitet, das in Abb. 6 anschaulich die Gletschermasse zeigt, welche im Zeitraum von 1987 bis 1991 weggeschmolzen ist. Diese Volumenänderung kann mit Hilfe von speziellen Algorithmen auch quantifiziert werden. So wurde aus den beiden DTM's der unterschiedlichen Zeitperioden ein Eisvolumenrückgang von 2,9 Mio. m³ berechnet. Auf die Fläche von 1987 bezogen entspricht das 15 m³ Eisverlust pro Quadratmeter, was auf die vier Jahre umgerechnet eine Eisabschmelzung von 3.8 m³ pro Quadratmeter im Jahr bedeutet.

Zusätzlich wurde in den Luftbildern vom DVK 1987 und 1991 die Lage der Gletscherzunge photogrammetrisch bestimmt, um den Rückgang der Gletscherzunge für den Zeitraum zwischen den beiden Bildflügen (29. 8. 87 bis 20. 8. 91) zu ermitteln. Die Koordinaten für den vordersten Punkt auf der Gletscherzunge wurden in beiden Modellen gemessen und aus diesen Koordinaten der Gletscherückgang errechnet. Der Rückgang der Gletscherzunge betrug 55 m, was einer Abschmelzung von 13.8 m pro Jahr ausmacht. Diese ermittelten Werte stimmen mit Angaben im Bericht der Gletscherkommission (Aellen 1991) überein.

Das DTM wurde ausserdem zur Herstellung eines Digitalen Orthophotos genutzt. Dazu wurde ein Luftbild am Scanner Optronics 5040 des Instituts für Kartographie mit einer Pixelgrösse von 50 µm × 50 µm digitalisiert und unter Hinzunahme der DTM-Information an der Digitalen Orthophoto Workstation (Baltsavias et al., 1991) digital entzerrt. Das Orthophoto wurde dem DTM überlagert, so dass daraus synthetische 3-D-Bilder des Geländes in Parallelprojektion produziert werden konnten (siehe Abb. 7 und 8). Solche 3-D-Ansichten aus verschiedenen Zeitperioden dokumentieren Änderungen des Gletschervolumens anschaulich.

5. Schlussbemerkungen

In diesem Projekt wurde in relativ kurzer Zeit in einem schwer zugänglichen Gebiet (Grösse ca. 8.5 km × 3.5 km) ein stabiles Passpunktnetz angelegt, geodätisch (terrestrische und GPS-Messungen kombi-

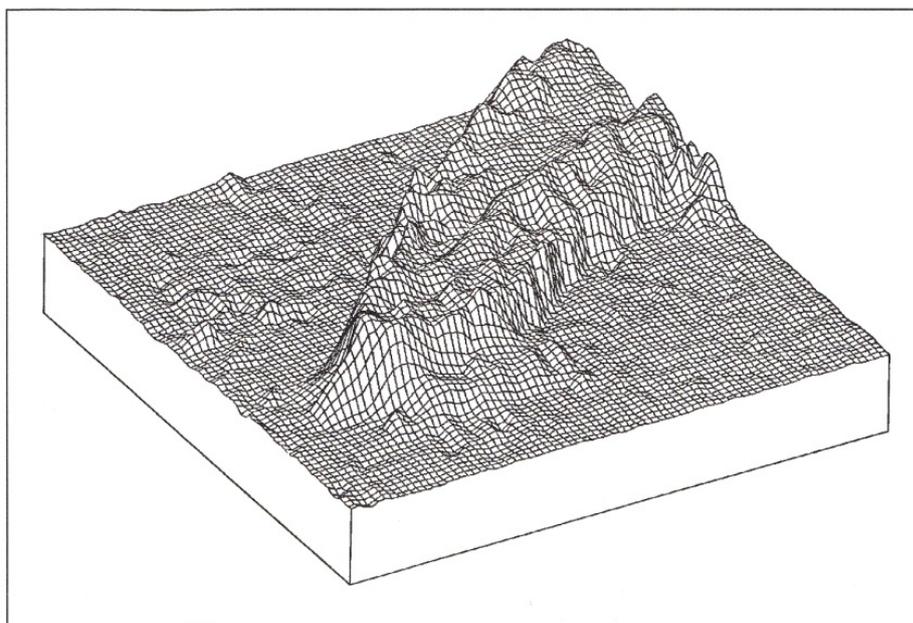


Abb. 6: Geschmolzene Gletschereismasse vom Gletscherzungenbereich des Grossen Aletschgletschers (1987–1991).

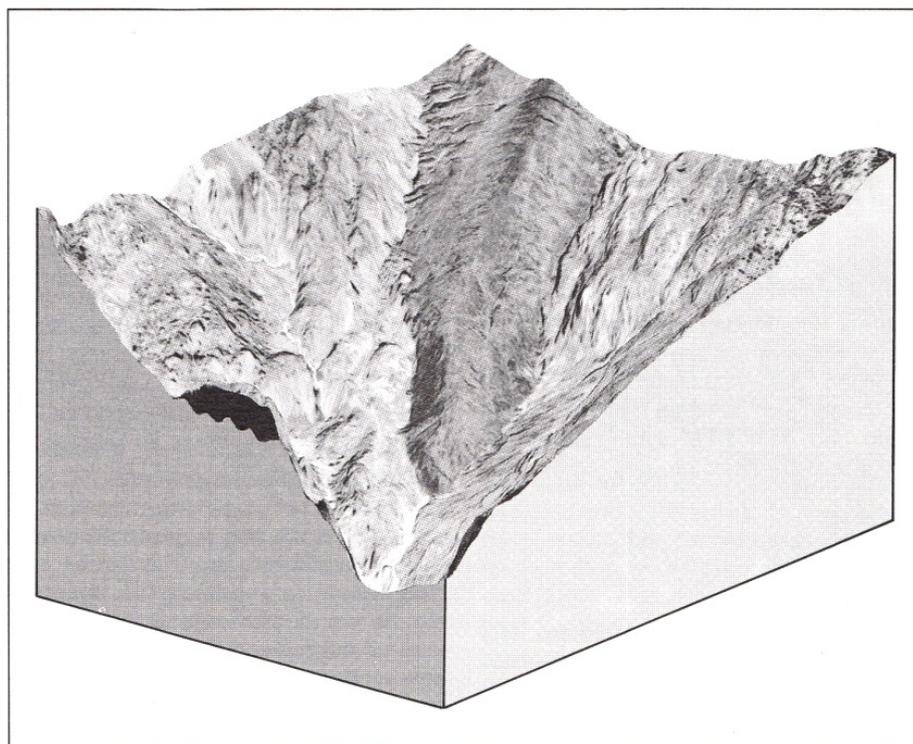


Abb. 7: Synthetische 3-D-Darstellung der Gletscherzunge des Grossen Aletschgletschers (Blick von Südwesten auf die Gletscherzunge).

niert) vermessen und photogrammetrisch signalisiert. Dabei hat sich der zusätzliche Einsatz des GPS-Verfahrens – trotz der schweren zu transportierenden Ausrüstung – wegen der Messgeschwindigkeit und Messgenauigkeit bewährt. Ein Helikoptereinsatz für Transportzwecke hätte die Messkampagne wesentlich verkürzen können. Die Punktkoordinatengenauigkeit nach der Netzausgleichung lag bei 1 cm in der Lage und der Höhe. Eine sorgfältige Signalisierung der Punkte

ermöglichte ein rasches und unproblematisches Auffinden der signalisierten Punkte in den Luftbildern und eine zügige Messung bei der Aerotriangulation. Für die ausgewertete Streifenlängsüberdeckung von 60% wurde in der Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung eine praktische Koordinatengenauigkeit der Neupunkte von 6 cm in der Lage und 16 cm in der Höhe bestimmt. Diese Genauigkeit reicht für die vorliegende Aufgabenstellung aus.

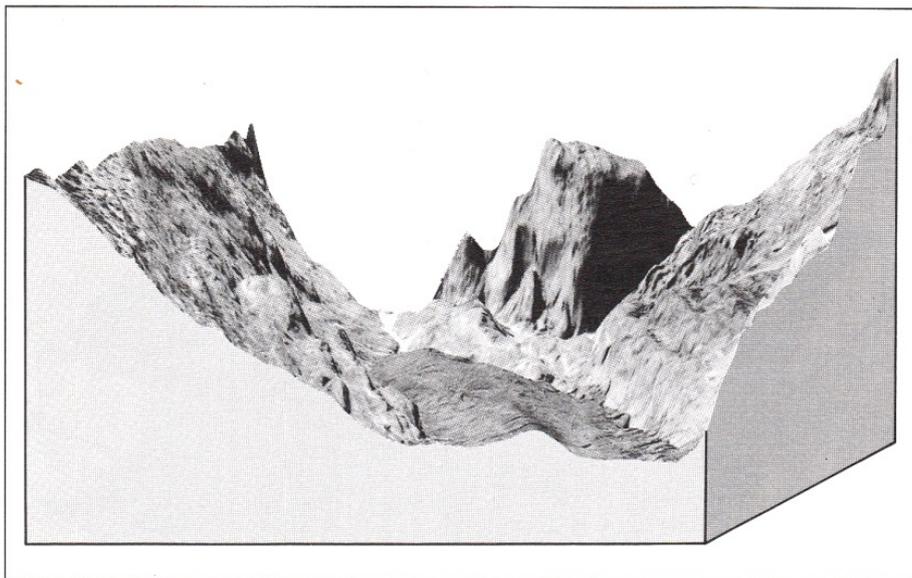


Abb. 8: Synthetische 3-D-Darstellung der Gletscherzunge des Grossen Aletschgletschers (Blick von Nordosten auf die Gletscherzunge).

Ein DTM des Grossen Aletschgletschers vom Bereich der Gletscherzunge bis zur Höhe des Bettmerhorns wurde erstellt. Vergleiche von DTM's aus verschiedenen Zeitepochen ermöglichen glaziologische Analysen. So konnten aus den DTM-Daten eines kleinen Testgebiets aus den Jahren 1987 und 1991 Volumenänderungen bzw. Abschmelzungen des Gletschers quantitativ nachgewiesen und qualitativ dargestellt werden. Durch die Verarbeitung von DTM's und Digitalen Orthophotos sind mit Hilfe moderner Verfahren der digitalen Bildverarbeitung zusätzliche Möglichkeiten der Visualisierung gegeben. Z.B. lassen sich aus dem Digitalen Orthophoto und dem DTM synthetische perspektive 3-D-Ansichten des Gletschers

ableiten. Die Produktion ganzer Bildsequenzen für eine Video-Animation (z.B. eine simulierte Überfliegung) ist möglich.

Dank

Wir danken H. Bösch (VAW) für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit, Dr. B. Wirth für seinen engagierten Einsatz bei der GPS-Kampagne, R. Stengele für die gute Beratung bei der Auswertung im Feldkurs, L. Hurni (Kartographie) für das Scannen des Luftbildes und das Ausdrucken der 3-D-Bilder sowie allen freiwilligen und unfreiwilligen Helfern während des Vermessungskurses. Unser Dank gilt aber ganz besonders den Studenten für ihr hervorragendes Engagement im Diplomkurs und bei der Auswertung der Daten.

Literatur:

Aellen, M., 1991. Die Gletscher der Schweizer Alpen im Jahr 1989/90. Auszug aus dem 111. Bericht der Gletscherkommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften. Die Alpen, Zeitschrift des Schweizer Alpen-Clubs, Jahrgang 67, 4. Quartal 1991.

Aström, H., Brodmann, R., Huonder, S., König, A., Schlatter, P., Sauer, D., Zanini, M., 1991. Diplomvermessungskurs «Aletschgletscher», unveröffentlichter Bericht. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich, 8/1991.

Baltsavias, E., Grün, A., Meister, M., 1991: Digitale Orthophoto Workstation (DOW) – Ein System zur Generierung digitaler Orthophotos aus Luftbildern und SPOT-Szenen. Vermessung – Photogrammetrie – Kulturtechnik, Nr. 10/91, pp. 553–559.

Brodmann, R., 1991. Aerotriangulation am unteren Aletschgletscher. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich, 11/1991.

Huonder, S., König, A., 1991. Digitales Terrainmodell des unteren Aletschgletschers. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich, 12/1991.

Kasser, P., Röthlisberger, H., 1966. Some Problems of Glacier Mapping Experienced with the 1 : 10 000 Map of the Aletsch Glacier. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 3., No. 6, Paper No. 8, 1966.

Adresse der Verfasser:

Dipl.-Ing. Thomas Kersten
Dipl.-Ing. Martina Meister
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Die Geschenk- idee!

**1 Jahres-Abonnement
unserer Fachzeitschrift**

**Vermessung
Photogrammetrie
Kulturtechnik**

Möchten Sie Ihren Mitarbeitern,
Ihren Verwandten oder Freunden eine
Freude bereiten?
Dann rufen Sie uns für ein Geschenk-
abonnement an.

12mal jährlich informiert
unsere Fachzeitschrift aus-
führlich und informativ über

- ◇ Vermessung
- ◇ Photogrammetrie
- ◇ Kulturtechnik
- ◇ Raumplanung
- ◇ Umweltschutz und
- ◇ Geo-Informationssysteme.

SIGWERB AG
Dorfmatenstrasse 26
5612 Villmergen
Telefon 057 / 23 05 05