

## Photogrammetrische Analyse von Gletschern und Permafrost

A. Käab

Die Beobachtung der Oberfläche von Gletschern und Permafrost stellt eine der wichtigsten Informationsquellen in der Glaziologie dar. Photogrammetrie wiederum besitzt ein grosses Potential, die Geländeoberfläche und deren Veränderungen zu bestimmen. Mit Standardverfahren können Schwankungen in der Ausdehnung verschiedener glazialer und periglazialer Phänomene festgestellt sowie digitale Geländemodelle gemessen und daraus Höhenänderungen abgeleitet werden. Mit Hilfe spezieller Verfahren zur photogrammetrischen Bewegungsmessung ist schliesslich die räumliche Kinematik der Oberfläche von Gletschern oder Permafrost flächenhaft bekannt. Damit lassen sich Prozesse in Eis und Permafrost modellieren und entsprechende Naturgefahren frühzeitig erkennen. Als Beispiel für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren in der alpinen Glaziologie dient hier das Gebiet Gruben, Saastal, Wallis.

*L'observation de la surface des glaciers et du pergélisol est l'une des plus importantes sources d'informations de la glaciologie. La photogrammétrie possède un potentiel élevé pour déterminer des surfaces de terrains et leurs changements. A l'aide de méthodes standards, on est en mesure d'évaluer les modifications des différents phénomènes glaciaires et périglaciaires et en plus d'établir des modèles digitaux du terrain permettant de déterminer des changements d'altitudes. Avec les méthodes spécifiques de la mesure photogramétrique du mouvement on obtient l'évolution spatiale de la surface des glaciers ou du pergélisol dans une zone étendue. Ainsi, il est possible de simuler des processus se déroulant dans la glace et le permafrost et reconnaître à temps les dangers naturels correspondants. Un exemple de mise en pratique de procédés photogramétriques pour la glaciologie alpine est fourni par la région du Gruben, dans la vallée de Saas en Valais.*

L'osservazione della superficie dei ghiacciai e del permafrost rappresenta una delle più importanti fonti d'informazione della glaciologia. Anche la fotogrammetria possiede un elevato potenziale per la determinazione della superficie del terreno e dei suoi mutamenti. Con i procedimenti standard è possibile registrare le variazioni nell'estensione dei diversi fenomeni glaciali e periglaciali, nonché misurare i modelli digitali del terreno, riuscendo così a registrare le variazioni d'altezza. Inoltre, con l'ausilio di speciali metodi di misura fotogrammetrica del movimento si ottiene la cinematica spaziale della superficie dei ghiacciai o del permafrost. In tal modo, si possono modellare i processi nel ghiaccio e nel permafrost, individuando tempestivamente i relativi pericoli per la natura. Come esempio pratico per l'uso del processo fotogrammetrico nella glaciologia alpina si è presa la regione di Gruben, nella valle di Saas in Vallese.

### Photogrammetrie in der alpinen Glaziologie

Seit den Anfängen der Glaziologie leistet die Photogrammetrie bei der Erforschung von Gletschern und Permafrost wichtige Beiträge durch ihre umfassenden Möglichkeiten zur Datengewinnung. Die Abteilung Glaziologie der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) setzt Photogrammetrie intensiv ein, um das kurz-, mittel- und langfristige Verhalten von Gletschern und Permafrost sowie Prozesse in deren räumlichen Wirkungsbereich – dem sogenannten Glazial und Periglazial – zu beob-

achten. Damit werden die physikalischen Eigenschaften von alpinem Eis und Permafrost sowie deren Reaktionen auf klimatische Einflüsse untersucht. In physikalischen Computermodellen schliesslich lassen sich beteiligte Prozesse z.B. mit Hilfe der photogrammetrischen Daten simulieren. Dies erlaubt die Rekonstruktion vergangener Zustände von Gletschern und Permafrost, aber auch die Prognose ihres zukünftigen Verhaltens. Glaziologische Forschungen sind somit eng mit der Klimaforschung verknüpft.

Regelmässig dienen die gewonnenen Erkenntnisse auch der Früherkennung von Naturgefahren, die ihren Ursprung in

Eis und Permafrost haben: Ausbrechende Gletscherseen führen zu Hochwasser und Murgängen; von steilen Gletschern abbrechendes Eis gefährdet Bergsteiger und alpine Infrastruktur oder kann grosse Schneelawinen auslösen; auftauender Permafrost erhöht das Murgangrisiko und kann die Stabilität hochalpiner Einrichtungen beeinflussen.

Neben der Anwendung von Standardverfahren der analytischen Photogrammetrie werden an der VAW auch spezielle Verfahren entwickelt, die glaziologischen Fragestellungen angepasst sind.

### Befliegungen und Passpunktnetze

Entscheidende Grundlage für die photogrammetrischen Analysen ist das Luftbildmaterial, auf das die VAW zurückgreifen kann. Zum einen werden die Befliegungen zur Nachführung der Landeskarte 1:25 000 des Bundesamtes für Landestopographie (L+T) verwendet. Regelmässig stehen auch Bilder aus Spezialbefliegungen der Eidgenössischen Vermessungsdirektion (V+D) und L+T zur Verfügung. Dieses Bildmaterial reicht von hochgeflogenen Infrarot-Aufnahmen im Massstab ca. 1:30 000 bis zu tiefgeflogenen Farb- und Schwarz-Weiss-Aufnahmen im Massstab ca. 1:5000.

Abb. 1 und das Luftbild Abb. 2 (Luftaufnahme der Eidg. Vermessungsdirektion vom 10.10.94, Fluglinie 066 026, Bild-Nr.: 7054) zeigen das Gebiet Gruben oberhalb dem Dorf Saas Balen im Saastal (Wallis). Da im Gebiet Gruben ausserordentlich viele glaziale und periglaziale Phänomene zu beobachten sind, soll es im folgenden als Beispiel dienen. Der Grubengletscher fliesst vom 3993 m hohen Fletschhorn in Richtung Saas Balen. Seine teilweise stark schuttbedeckte Zunge endet auf einer Meereshöhe von ca. 2780 m vor einem Moränensee. Neben der Gletscherzunge kriecht eisreicher Permafrost und bildet einen sogenannten Blockgletscher. Auf diesem Blockgletscher liegt ein Thermokarstsee, zwischen Blockgletscher und Gletscherzunge ein Gletscherandsee.

Da Gletscher und Permafrost meist sehr träge reagieren, sind gerade in der Glaziologie lange und kontinuierliche Befliegungsreihen von grösster Bedeutung. Bei der Beobachtung von potentiellen Gefahrenzonen werden die Luftaufnahmen oft nur interpretiert. Zeichnet sich aber eine gefährliche Entwicklung ab, so steht dann mit Luftbildern eine umfassende, effektive und geometrisch analysierbare Informationsquelle über vergangene Zeitzustände zur Verfügung.

Im Hochgebirge stellt die Signalisation und Positionsbestimmung von photogrammetrischen Passpunkten oft ein schwieriges Unterfangen dar. Die Passpunkte der VAW

# Partie rédactionnelle



**Abb. 1: Flletschhorn, Grubengletscher und Blockgletscher (Saas Balen, Wallis). (Photo W. Schmid.)**

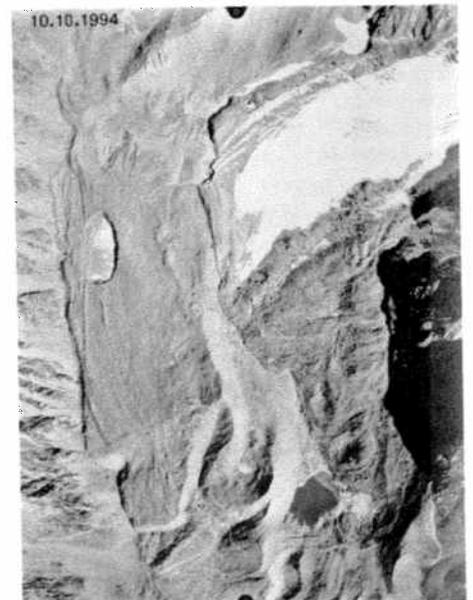
Die Zunge des Grubengletschers (Abb. 3) zog sich in den letzten Jahrzehnten zurück. In der von ihr aufgehäuften Moränenbastion ist dabei ein typischer Moränensee entstanden. Zugleich verlor ein auf den Blockgletscher aufgeschobener Gletscherteil den direkten Kontakt zum Gletscher und wurde so zu sogenanntem Toteis. Seit Mitte der 70er Jahre ist erneut ein kleiner Vorstoss in Richtung Blockgletscher zu beobachten, der allerdings mittlerweile zum Stillstand gekommen ist. Detailstudien, wie z.B. die Kartierung von Gletscherspalten, machen Prozesse in Eis und Permafrost sichtbar. Auch bei der Beobachtung ausbruchgefährdeter Gletscherseen können photogrammetrische Lageauswertungen wichtige Beiträge zur Früherkennung drohender Naturgefahren liefern. Der Thermokarstsee auf dem Gru-

werden in der Regel mit Farbe auf stabile Felsen gemalt und bleiben so über viele Jahre erhalten. Zur Vermessung der Passpunktnetze kommen teilweise GPS, wegen dessen hohen Abschattungen im Hochgebirge und aus Zeitgründen aber meist terrestrische Strecken- und Winkelmessungen zum Einsatz [1][2]. Viele dieser alpinistisch und logistisch sehr aufwendigen Signalisationen und Vermessungen können nur mit Unterstützung anderer Hochschulinstitute, öffentlicher und privater Stellen sowie Einzelpersonen durchgeführt werden. Zur Zeit verwendet und unterhält die VAW ca. 25 solcher Passpunktnetze, die im ganzen Schweizer Alpenraum verteilt sind.

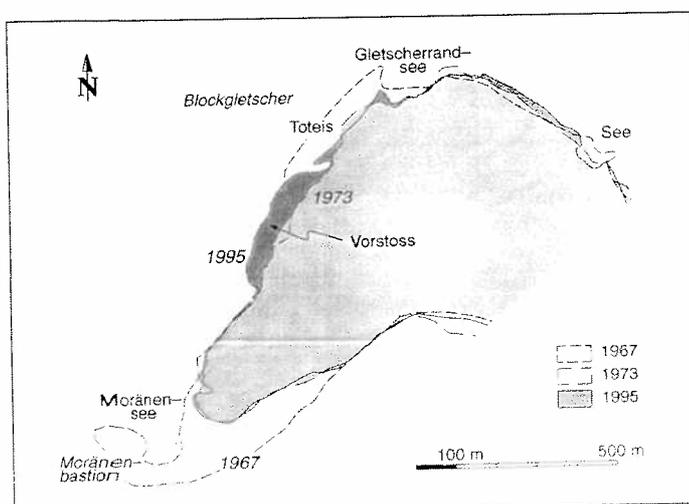
## Ausdehnung von Gletschern und Gletscherseen

Eine Vielzahl wichtiger glaziologischer Informationen kann bereits die photo-

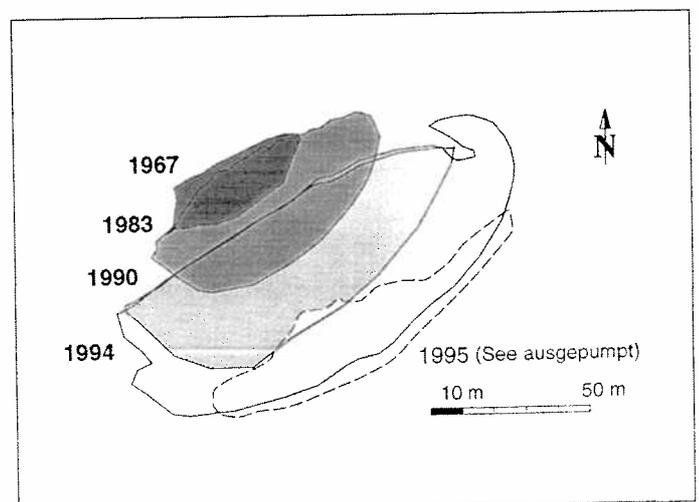
grammetrische Lageauswertung liefern. Zahlreiche Helfer erheben jährlich die Stände der Gletscherzungen einer grossen Anzahl Schweizer Gletscher [3]. Dort, wo dies mit einfachen geodätischen Methoden nicht möglich ist, wird die Umrandung der Zunge photogrammetrisch bestimmt. Der Zungenstand eines Gletschers ist ein wichtiges indirektes Klimasignal. Er ist das Ergebnis globaler und lokaler klimatischer Einflüsse, die sich über komplexe thermische und dynamische Prozessketten am Ende eines Gletschers gefiltert und verzögert, aber gut sichtbar auswirken. Während sich schuttbedeckte Gletscherzungen oft nur langsam verändern, können manche andere Alpengletscher sich bis zu vielen zehn Metern pro Jahr zurückziehen oder vorstossen. Über Gletscherspuren, wie z.B. Moränen und Gletscherschliffe lassen sich auch vergangene Gletscherstände rekonstruieren.



**Abb. 2: Zunge des Grubengletschers, Blockgletscher und periglaziale Seen im Gebiet Gruben. (Luftaufnahme der Eidgenössischen Vermessungsdirektion.)**



**Abb. 3: Flächenentwicklung der Zunge des Grubengletschers seit 1967.**



**Abb. 4: Entwicklung eines Thermokarstsees auf dem Gruben-Blockgletscher.**

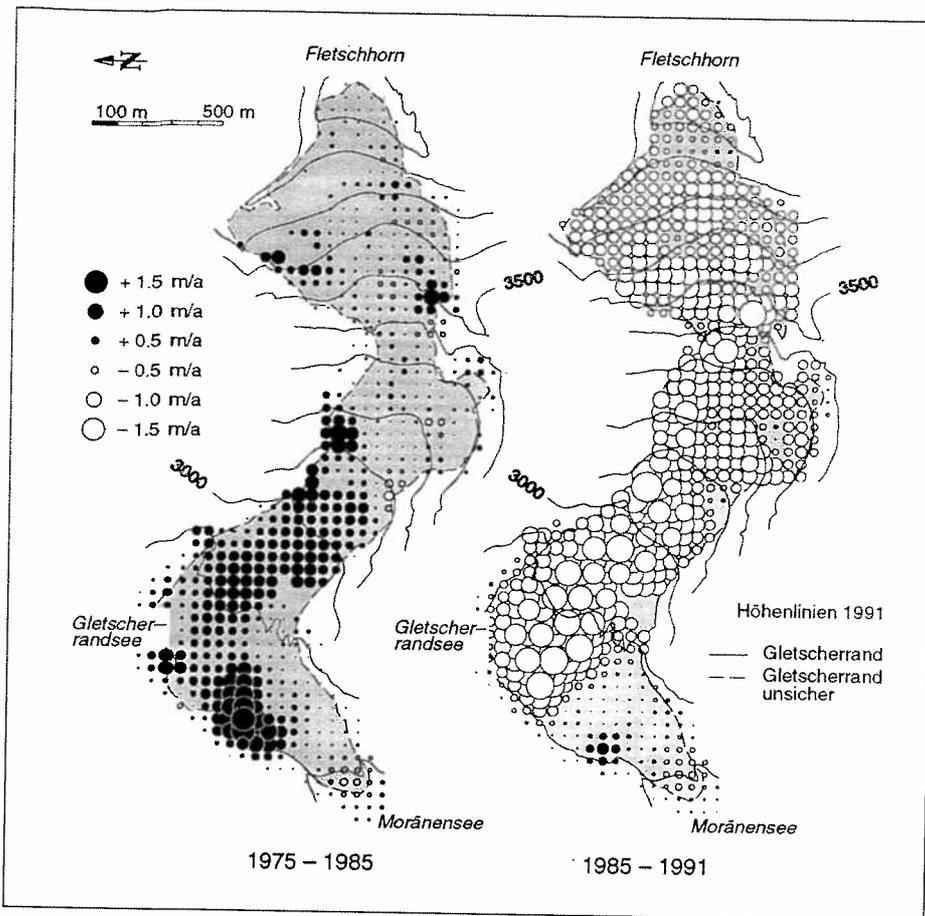


Abb. 5: Mittlere jährliche Höhenänderung des Grubengletschers 1975–1985–1991.

ben-Blockgletscher zeigte in den letzten ca. 25 Jahren ein rasantes Flächenwachstum (Abb. 4). Der See ist durch eine kleine Spalte im Toteis des Grubengletschers auf dem wasserundurchlässigem Permafrost des Blockgletschers entstanden. Thermische Konvektion transportiert durch die Sonnenstrahlung erwärmtes Seewasser zum Toteis und schmilzt es ab. Dadurch vergrößert sich die Seefläche und ihre Kapazität zur Energieaufnahme steigt. Dieser positive Rückkopplungsprozess führte zu nahezu exponentiellem Seewachstum. Da der Thermokarstsee so auszubrechen drohte und eine Gefahr für die Gemeinde Saas Balen darstellte, wurde er im Herbst 1995 ausgepumpt.

## Höhenänderungen

Viel detailliertere Erkenntnisse über das Verhalten von Eis und Permafrost sind möglich, wenn nicht nur deren Ausdehnung beobachtet wird, sondern aus Differenzen multitemporaler digitaler Terrain Modelle (DTM) auch flächenhafte Höhenänderungen bestimmt werden. Im Akkumulationsgebiet (Nährgebiet) eines Gletschers führen Schneefall und Lawinen zum ständigen Massenzuwachs. Dieser Massenüberschuss wird durch das Fliesen von Eis ins Ablationsgebiet (Zehrgebiet) transportiert, wo er schmilzt. Ein Glet-

scher steht wegen diesem ständigen Massenausgleich in einem dynamische Gleichgewicht Akkumulation – Massentransport – Ablation. So wird klar, dass die wiederholte Beobachtung flächenhafter Höhenänderungen Hinweise auf Änderungen von Niederschlag und Temperatur sowie die Dynamik des Eises gibt.

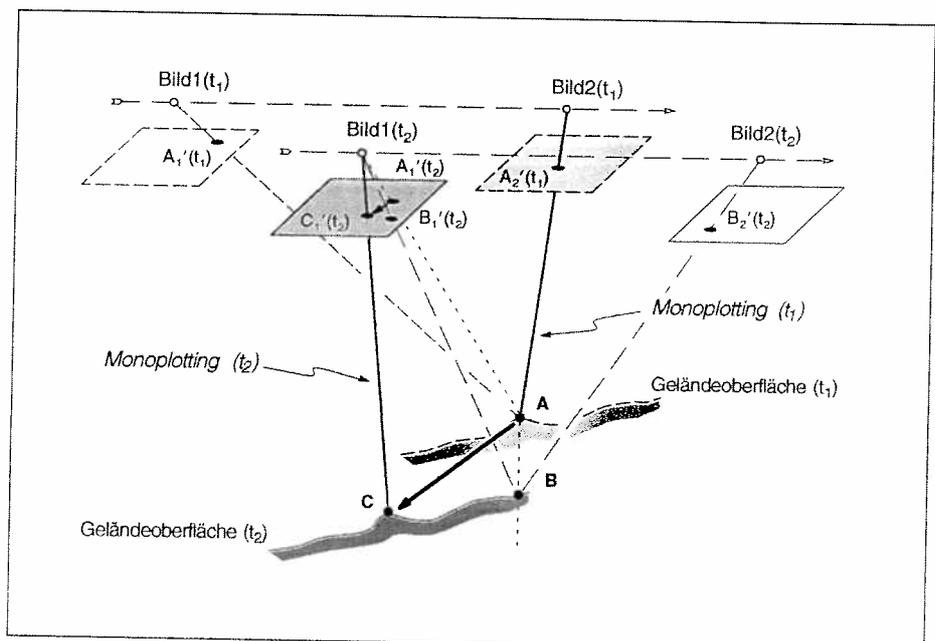


Abb. 6: Mono- und multitemporale Stereomodelle und Bewegungsmessung durch simultanes Monoplottung.

Die Oberfläche des Grubengletschers hat in den kalten und niederschlagsreichen Jahren von 1975 bis 1985 an Höhe gewonnen, in der wärmeren Periode 1985 bis 1991 dann massiv an Höhe verloren (Abb. 5). Da sich dieser Massenverlust auch auf das Akkumulationsgebiet erstreckt, ist in nächster Zukunft ein Rückgang des Eisanachschubes und damit ein Rückzug der Gletscherzunge zu erwarten. Während Akkumulationsgebiete meist nur geringere Höhenänderungen aufweisen, kann die Höhenänderung eines Gletschers im Zungenbereich durchaus mehrere Meter pro Jahr (m/a) erreichen. Die aus den Höhenänderungen ableitbaren Prognosen dienen z.B. der Früherkennung von Seeausbrüchen oder Eislawinen.

Schmilzt Eis aus dauernd gefrorenem Schutt aus, so kann sich die Oberfläche dieses Permafrostes setzen. Umgekehrt führt das Gefrieren von Schmelz- und Niederschlagswasser im Permafrost zur Frosthebung. Typischerweise erreichen die Höhenänderungen von solchem alpinem Schutt-Eis-Gemisch mehrere Zentimeter bis Dezimeter pro Jahr. Da Eisschmelze in hochalpinem Lockermaterial auch dessen Stabilität verringert, können so teilweise potentielle periglaziale Murgänge durch photogrammetrische Analysen frühzeitig erkannt werden.

Ein massgeblicher Faktor der Verbreitung von Permafrost ist neben Lufttemperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Schneelage und anderem die potentiell zur Verfügung stehende direkte Sonneneinstrahlung. Diese kann mit Hilfe eines DTM modelliert werden. So lassen sich Permafrostvorkommen abschätzen [4]. Auch in vielen anderen Bereichen der Glaziologie sind DTM eine wichtige Datengrundlage.

## Fliesen von Eis und Permafrost

### Simultanes Monoplotting im multitemporalen Stereomodell

Die mit photogrammetrischen Standardverfahren bestimmbaren Höhenänderungen sind im Hochgebirge oft das Ergebnis räumlicher dynamischer Vorgänge. Um die beteiligten Prozesse besser verstehen zu können, ist daher in der Glaziologie die Kenntnis der Oberflächenkinematik von besonderer Bedeutung. Gewöhnlich werden dazu Pegelstangen im Eis terrestrisch oder mittels GPS vermessen. Aber auch die Photogrammetrie bietet ein grosses Potential zur Bewegungsmessung. An dieser Stelle soll ein Verfahren vorgestellt werden, mit dem sich Oberflächenverschiebungen flächenhaft bestimmen lassen.

Ein Punkt A auf der Geländeoberfläche der Epoche  $t_1$  sei zum Zeitpunkt  $t_2$  der Punkt C (Abb. 6). Der Punkt B hat dieselben Lagekoordinaten wie Punkt A, liegt aber auf der Geländeoberfläche der Epoche  $t_2$ . Die Punkte A und B sind z.B. Originalpunkte der DTM beider Epochen, über die die Höhenänderung von Eis und Permafrost bestimmt wird. Diese DTM werden in der analytischen Photogrammetrie über monotemporale Stereomodelle gemessen, z.B. Bild 1 ( $t_1$ ) – Bild 2 ( $t_1$ ) oder Bild 1 ( $t_2$ ) – Bild 2 ( $t_2$ ) in Abbildung 6.

Zur Bestimmung des räumlichen Verschiebungsvektors AC wird nun ein multitemporales Stereomodell gebildet, z.B. Bild 1 ( $t_1$ ) – Bild 2 ( $t_2$ ) oder Bild 1 ( $t_2$ ) – Bild 2 ( $t_1$ ) in Abbildung 6. Die beiden Bilder dieses Modells haben unterschiedliche Projektionszentren (Raumbasis) und wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen (Zeitbasis) [5]. Die Orientierung des multitemporalen Stereomodells kann analog einem herkömmlichen monotemporalen erfolgen. Dabei dürfen jedoch nur

unbewegte Geländepunkte zur äusseren Orientierung verwendet werden. Die Orientierungsparameter der beiden Einzelbilder können aber auch aus den Orientierungen der monotemporalen Modelle oder einer Aerotriangulation übernommen werden.

Im Bild der Epoche  $t_1$  (Bild 2 ( $t_1$ ) in Abb. 6) wird die Projektion eines geeigneten Geländepunktes gewählt. Seine räumlichen Geländekoordinaten lassen sich über das sogenannte Monoplotting bestimmen: Durch das Projektionszentrum des Bildes 2 ( $t_1$ ) und den Bildpunkt  $A_2'(t_1)$  wird eine Raumgerade festgelegt. Deren Schnitt mit dem DTM der Epoche  $t_1$  liefert den gesuchten Punkt A [6]. Im Bild der Epoche  $t_2$  (Bild 1 ( $t_2$ ) in Abb. 6) werden nun mit Hilfe freier Bewegung der Bildplatte der mit A korrespondierende Punkt C gefunden und die Projektionen  $A_2'(t_1)$  und  $C_1'(t_2)$  für den Stereobetrachter zur Deckung gebracht. Dieses Vorgehen macht die Geländeverschiebung für den Betrachter in der Bildebene rückgängig. Es stellt sich dann wieder ein lokaler Stereoeindruck ein, der das Identifizieren korrespondierender Geländepunkte deutlich vereinfacht, die Messgenauigkeit steigert und zeigt, inwiefern die Bewegung am Messpunkt die Bewegung der Umgebung repräsentiert.

Auch die Geländekoordinaten des Punktes C werden über Monoplotting bestimmt. Da die Bilder beider Epochen gleichzeitig betrachtet und am Messpunkt differentiell entzerrt werden, sei das hier geschilderte Verfahren als «simultanes Monoplotting im multitemporalen Stereomodell» (kurz: Stereo-Monoplotting) bezeichnet. Das Verfahren wurde in ein operationelles Auswerteprogramm für den analytischen Plotter Kern DSR 15–18 der Firma Leica umgesetzt [7].

Das Gelände, dessen Oberflächenverschiebung gemessen werden soll, muss zwei grundlegende Bedingungen erfüllen:

- Die Geländedeformation zwischen den Aufnahmen darf nicht so gross sein, dass der Stereoeffekt oder gar die Identifizierung korrespondierender Punkte verhindert wird.
- Die zu bestimmenden Verschiebungsbeträge müssen signifikant grösser sein als die Genauigkeit des Verfahrens.

Beide Bedingungen können eventuell durch die Wahl entsprechender Befliegungsintervalle erfüllt werden. Wie Mehrfachmessungen und Vergleiche mit geodätischen Bewegungsmessungen zeigen, liefert das Stereo-Monoplotting Geländeverschiebungen mit einer Genauigkeit von bis zu 30  $\mu\text{m}$  im Bild. Während diese Genauigkeit bei kriechendem Permafrost regelmässig erreicht wird, kann sie bei Gletschern wegen der grossen Oberflächengeschwindigkeiten, der Eisschmelze und den daraus folgenden Deformationen deutlich schlechter sein. Durchschnittlich lassen sich Geländeverschiebungen mit einer relativen Genauigkeit von ca. 8% bestimmen. Die Genauigkeit kann z.B. durch feinere DTM oder Wiederholungsmessungen in anderen multitemporalen Stereomodellen (z.B. Bild 1 ( $t_2$ ) – Bild 2 ( $t_1$ ) und Bild 1 ( $t_1$ ) – Bild 2 ( $t_2$ )) gesteigert werden.

Typische Oberflächengeschwindigkeiten von Alpengletschern betragen mehrere Meter bis mehrere zehn Meter pro Jahr (m/a), können aber auch 200 Meter pro Jahr und mehr erreichen. Die Zunge des Grubengletschers wies in den letzten ca. 20 Jahren ungewöhnlich grosse Schwankungen ihrer Oberflächenbewegung auf (Abb. 7). Diese rühren von wechselnden Bedingungen im Abflusssystem unter dem Gletscher her. Seit dem Geschwindigkeitsmaximum um 1980 hat sich die Fließgeschwindigkeit des Eises halbiert. Die Verschiebungsmessungen wurden an geeigneten Stellen mittels Stereo-Mono-

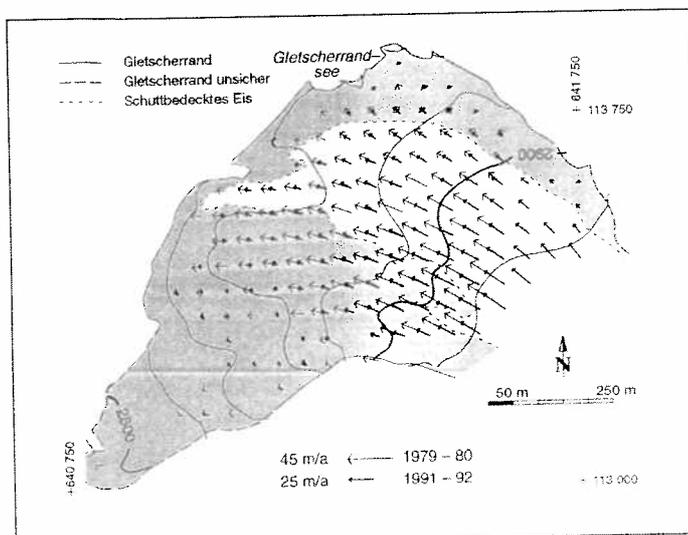


Abb. 7: Jährliche Oberflächenbewegung der Zunge des Grubengletschers.

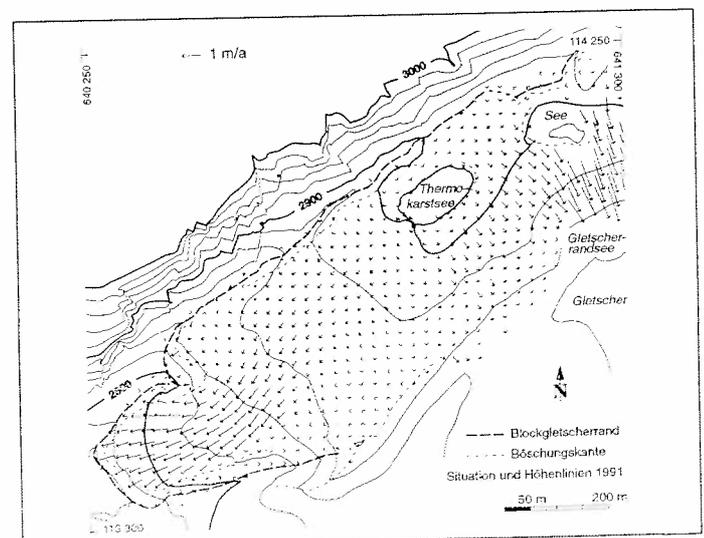


Abb. 8: Mittlere jährliche Oberflächenbewegung des Gruben-Blockgletschers 1970–1991.

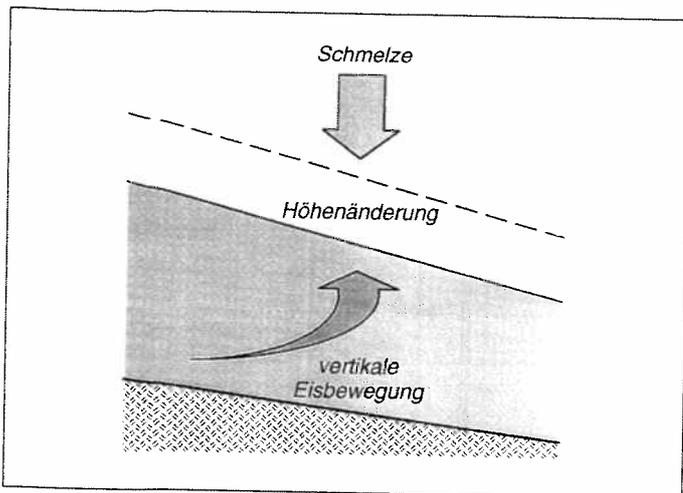


Abb. 9: Im Ablationsgebiet eines Gletschers führen Eisschmelze und Eisnachschub zu Höhenänderungen.

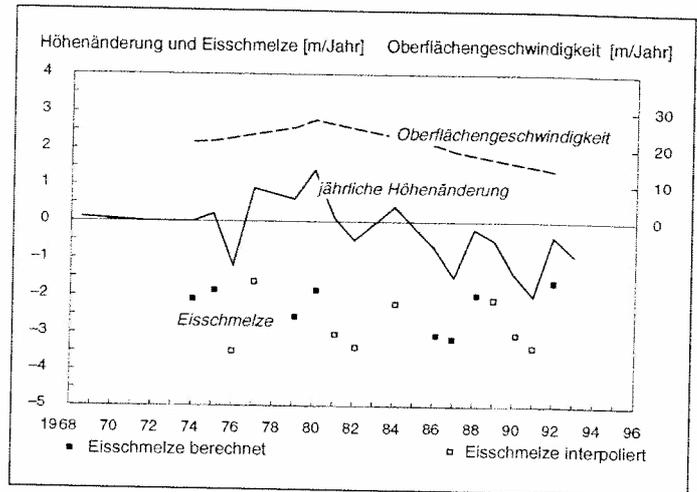


Abb. 10: Mit Hilfe photogrammetrisch bestimmter Höhenänderungen und Oberflächengeschwindigkeiten kann die Eisschmelze eines Gletschers rekonstruiert werden.

plotting durchgeführt und dann auf ein regelmässiges Raster interpoliert. Alpiner Permafrost kriecht mit Oberflächengeschwindigkeiten von höchstens wenigen Metern pro Jahr, meist aber nur einigen Zentimetern pro Jahr [8]. Das Geschwindigkeitsfeld des Gruben-Blockgletschers (Abb. 8) lässt deutlich das überschobene Toteis auf dem Blockgletscher erkennen, das derzeit mit bis zu einigen Metern pro Jahr wieder zum Gletscher zurückfließt. Im unteren Teil des Blockgletschers kriecht der nicht mehr direkt vom Gletscher beeinflusste Permafrost talabwärts.

### Modellierung der Eis- und Permafrostbewegung

Mit Hilfe photogrammetrischer Standardverfahren zur dreidimensionalen Punktbestimmung und spezieller Verfahren zur Bewegungsmessung ist nun die vollständige Oberflächenkinematik von Gletschern und Permafrost messbar. Deren Kenntnis eröffnet in der Glaziologie vielfältige Möglichkeiten. Viele lokale Prozesse, wie z.B. die Bildung von Gletscherpalten kann untersucht werden. Spalten entstehen durch grosse Gradienten im Fließfeld des Eises. Die Beobachtung der Spaltenbildung oder der räumlichen und zeitlichen Variationen des Eisfließens gibt Hinweise auf drohende Eisabbrüche und Instabilitäten von Gletscherteilen. Wegen der schlechten Kontraste durch Schneebedeckung sind photogrammetrische Verfahren in den Akkumulationsgebieten der Gletscher in der Regel nicht flächendeckend anwendbar. Auf kriechendem Permafrost und den Ablationsgebieten der Gletscher dagegen lassen sich Oberflächenverschiebungen und Höhenänderungen meist flächenhaft bestimmen. Die Höhenänderungen der Gletscher- oder Permafrostoberfläche kommen durch die Differenz von Eisnachschub und Eisverlust durch Schmel-

ze (lokale Massenbilanz) zustande (Abb. 9). Die Höhenänderungen sind aus multitemporalen DTM, die Oberflächengeschwindigkeit z.B. über Stereo-Monoplotting flächenhaft messbar.

Die Topographie des Gletscherbetts liefert geophysikalische Messungen. Dabei kommt meist Georadar zur Anwendung: Elektromagnetische Wellen werden an der Gletscheroberfläche ausgesandt, durchdringen das Eis, werden am Gletscherbett reflektiert und an der Oberfläche wieder empfangen. Aus der gemessenen Signallaufzeit und ihrer bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit kann die Gletschertiefe berechnet werden.

Mit Hilfe der Messgrößen Oberflächentopographie, Oberflächengeschwindigkeit und Gletscherbetttopographie sowie eines physikalischen Fließgesetzes für Eis kann nun die räumliche Eisbewegung im Gletscher simuliert werden. Damit ist der Eisnachschub an jeder Stelle (des Ablationsgebietes) bekannt. Über die gemessene Höhenänderung kann nun auch die lokale Eisschmelze berechnet werden. Diese lokale Massenbilanz bedeutet die direkte Auswirkung des Klimas (Lufttemperatur, Niederschlag, Bewölkung etc.) auf den Gletscher. Wiederholte photogrammetrische und einmalige geophysikalische Messungen können so eisdynamische und klimatische Zeitreihen liefern. Mit Hilfe bestehender und geeigneter Befliegungsserien kann die Eisschmelze vergangener Perioden rekonstruiert werden. Die Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Massenbilanz erlaubt wertvolle Rückschlüsse auf die Klimareaktion einzelner Gletscher. So sind schliesslich auch Prognosen über zukünftige Entwicklungen möglich.

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Oberflächengeschwindigkeit der Zunge des Grubengletschers von 1974 bis 1992. Aus den gemessenen jährlichen Höhendifferenzen wurde nun mit Hilfe der Ober-

flächengeschwindigkeit die mittlere Massenbilanz berechnet. In Jahren, in denen keine Geschwindigkeitsmessungen möglich waren, sind die Geschwindigkeiten interpoliert. Dies ist ohne bedeutenden Genauigkeitsverlust möglich, da die Oberflächengeschwindigkeiten einen deutlich ruhigeren zeitlichen Verlauf aufweisen als z.B. die Höhenänderungen. Die kurzfristigen, jährlichen Schwankungen der Oberflächenhöhe sind durch die unterschiedliche Eisschmelze, also die Witterungseinflüsse verursacht. Der langfristige Trend der Höhenentwicklung der Gletscheroberfläche dagegen wird deutlich durch das Verhalten des Eisnachschubes bestimmt. Ähnliche Modellierungen sind auch bei kriechendem Permafrost möglich. Sie gestalten sich aber wesentlich komplizierter, stellt doch das Eis-Schutt-Gemisch ein inhomogenes Medium dar, dessen physikalisches Verhalten schwierig zu formulieren ist. Die geringen Veränderungs-raten von kriechendem alpinen Permafrost (cm-dm pro Jahr) haben auf die Verfahren der photogrammetrischen Informationsgewinnung Einfluss.

Während Höhenverluste von eisübersättigtem Permafrost Hinweise auf Eisschmelze und damit Stabilitätsverlust geben, deuten kontinuierliche Bewegungsfelder auf ein spannungsübertragendes Medium im Untergrund hin: Eis. Photogrammetrische Verschiebungsmessungen geben einen Hinweis darauf, wieviel Schutt kriechender Permafrost in potentielle Murganganrisszonen transportiert und dort als erosionsgefährdetes Material akkumuliert. Versuche haben gezeigt, dass auch verschiedene andere Hanginstabilitäten, wie z.B. Rutschungen, mit dem Verfahren des Stereo-Monoplottings beobachtet werden können, wenn die Geländeoberfläche nicht durch die Bewegung zu stark verändert oder gar zerstört wird.

# Partie rédactionnelle

## Schlussbemerkungen

Den meisten Verfahren der Photogrammetrie, wie der Fernerkundung überhaupt, sind nur die Geländeoberfläche und damit nur an der Oberfläche sichtbare Prozesse zugänglich. Gerade in der Glaziologie setzt daher die Kombination von solchen Oberflächeninformationen mit geophysikalischen Daten (z.B. [9]), welche Aussagen über Verhältnisse und Vorgänge in der Tiefe liefern, erhebliche Synergien frei. Methoden der digitalen Photogrammetrie [10] und der Fernerkundung (z.B. Laserscanner [11]) können die Informationsgewinnung in der Glaziologie verbessern oder gar neue Informationen erschliessen. In manchen Bereichen der Glaziologie kommen zur Verwaltung, Analyse und Präsentation von Daten zunehmend Geoinformationssysteme (GIS) zur Anwendung. Die Integration von photogrammetrischen Daten in GIS eröffnet hier viele Möglichkeiten.

## Dank

Hermann Bösch, Martin Funk, Martin Hoelzle, Silvia à Marca und André Chervet sei für ihre Mithilfe am Manuskript gedankt. Die vorgestellten photogrammetrischen Analysen waren nur Dank der Luftbilder der Eidgenössischen Vermessungsdirektion und des Bundesamtes für Landestopographie möglich. Die Arbeiten wurden mit massgeblicher Unterstützung und im Rahmen des Nationalen For-

schungsprogramms «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» NFP 31, Projekt «Eisschmelzen und Naturkatastrophen im Hochgebirge», Prof. Wilfried Haerberli, durchgeführt.

## Literatur:

- [1] Schmid W. (1982): Ingenieur HTL in der Gletschervermessung. VPK 7/1982, S. 226–228.
- [2] Kersten Th. und Meister M. (1993): Grosser Aletschgletscher. Photogrammetrische Auswertungen als Grundlage für glaziologische Untersuchungen. VPK 2/1993, S. 75–80.
- [3] Aellen M. (1994): Die Gletscher der Schweizer Alpen. Die Alpen. Quartalsheft des SAC, Nr. IV.
- [4] Funk M. und Hoelzle M. (1992): Application of a potential direct solar radiation model for investigating occurrences of mountain permafrost. Permafrost and Periglacial Processes, 3(2), S. 139–142.
- [5] Flotron A. (1979): Verschiebungsmessungen aus Luftbildern. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 41, S. 39–44.
- [6] Grün A. und Sauermann H. (1977): Photogrammetric determination of time-dependent variations of details of a glacier surface using a non-metric camera. Symposium on dynamics of temperated glaciers and related problems. München 1977.
- [7] Käab A. (1996): Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren im Hochgebirge. Dissertation an der Abteilung für Erdwissenschaften der ETH Zürich.
- [8] Haerberli W. and Schmid W. (1988): Aerophotogrammetrical monitoring of rock glaciers. V. Internat. Conference on Permafrost, Proceedings, 1, S. 764–769.
- [9] Klingé E. und Vonder Mühl D. (1993): Gravimetrische Untersuchungen im Permafrost des Blockgletschers Mürtel-Corvatsch (Oberengadin). VPK 10/1993, S. 575–580.
- [10] Baltasvias E.P., Li H., Stefanidis A. and Sinning M. (1996): Automatic DSMs by digital photogrammetry. Surveying World, 4(2), Jan./Feb. 1996, S. 18–21.
- [11] Geiger A., Cocard M., Peter Y. und Kahle H.-G. (1995): Precise dgps and self-calibrating laser altimetry for airborne marine geoid determination and detection of glacial fluctuations. Proceedings of 7nd Int. Techn. Meeting of Institute of Navigation (ION), S. 471–476.

Adresse des Verfassers:

Dr. Andreas Käab  
Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie  
ETH Zürich-Zentrum  
CH-8092 Zürich