Andreas **KÄÄB** und Wilfried **HAEBERLI** (Zürich)

Luft- und weltraumgestützte Messtechnologie – neue Perspektiven für die weltweite Gletscherbeobachtung

1 Einführung

Wegen ihrer Nähe zum Schmelzpunkt reagiert die Kryosphäre speziell sensibel auf Klimaveränderungen, insbesondere Temperaturschwankungen (HAEBERLI / BENISTON 1998). Deshalb auch zählen Gebirgsgletscher mit zu den besten Klimaindikatoren der Erde (IPCC 2001a; 2001b). Der derzeitige globale Gletscherrückzug ist ein deutliches Zeichen für eine Erwärmung der Erdatmosphäre (HAEBERLI / MAISCH / PAUL 2002). Um dieses globale Klimasignal und seine regionalen Ausprägungen repräsentativ und zuverlässig zu beobachten, sind globale Messnetze notwendig. So sammelt, verarbeitet und publiziert der *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) eine große Anzahl von weltweiten Messungen von Gletscherlängenänderungen und Gletschermassenbilanzen (IAHS[ICSI] et al. 1998; 2001). Diese Messungen werden ausschließlich terrestrisch vorgenommen. Die angewandten Methoden sind robust, erfordern keine hochentwickelten Techniken und liefern global gut vergleichbare Daten. Andererseits erlauben moderne Fernerkundungsmethoden die Erfassung, erstens, ganz neuer glaziologischer Parameter mit, zweitens, einer bisher undenkbaren räumlichen Abdeckung und Repräsentativität. Schließlich drängt sich wegen der zunehmenden finanziellen und politischen Probleme in einer Vielzahl von Ländern die Anwendung von luft- und weltraumgestützten Verfahren auf, um so zumindest vorübergehend Lücken im Messnetz füllen zu können.

Überlegungen über eine Erweiterung bzw. Neuausrichtung der globalen Gletscherbeobachtung orientieren sich am besten an der *Global Hierarchical Observing Strategy* (GHOST) des *Global Terrestrial Observing System* (GTOS/GCOS). In Bezug auf Gletscher sieht diese internationale Beobachtungsstrategie unter anderem vor (HAEBERLI / CIHLAR / BERRY 2000; HAEBERLI / MAISCH / PAUL 2002):

- Stufe (2): Intensive, prozessorientierte Massenbilanzstudien innerhalb von Hauptklimazonen.
- Stufe (3): Regionale Beobachtung von Massenbilanzen bzw. Massenänderungen innerhalb großer Gebirgssysteme.
- Stufe (4): Repräsentative Langzeitbeobachtung von Gletscherlängenänderungen.
- Stufe (5): Globale Abdeckung durch wiederholte Gletscherinventare.

Im folgenden soll aufgezeigt werden, welche Beiträge moderne luft- und weltraumgestützte Messtechnologien bei der Verfolgung dieser Zeile leisten können. Nach einem Überblick über die zur Verfügung stehenden Methoden wird deren Einsatz in den oben genannten Stufen diskutiert.

GAMERITH, W. / MESSERLI, P. / MEUSBURGER, P. / WANNER, H. (Hrsg.) (2004): Alpenwelt – Gebirgswelten. Inseln, Brücken, Grenzen. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen. 54. Deutscher Geographentag Bern 2003. 28. September bis 4. Oktober 2003. – Heidelberg, Bern. 133-140.

2 Neue Messtechnologien

2.1 Digitale Photogrammetrie – multispektrale luftgestützte Sensoren

Digitale Analyse luftgestützter Stereodaten aus herkömmlichen Luftbildern oder Zeilensensoren erlaubt die automatische Generierung von digitalen Terrainmodellen (DTM) und die simultane Orthoprojektion der ursprünglichen Bilddaten (HAUBER et al. 2000; KÄÄB / VOLLMER 2000). So erstellte DTM haben eine vertikale Genauigkeit im Bereich einiger Dezimeter bis Meter. Die hochgradige Automatisierung vieler Verarbeitungsschritte ermöglicht die Bearbeitung großer Geländeausschnitte (WÜRLÄNDER / EDER 1998). Die erhaltenen orthoprojizierten Bilddaten können zu multispektralen Klassifikationen herangezogen werden, aber auch der hochauflösenden, flächenhaften Messung des Gletscherfließens dienen (KÄÄB 2002).

2.2 Laserscanning

Ganz neue Möglichkeiten zur Akquisition von DTM eröffnet zweifellos das Laserscanning (BALTSAVIAS et al. 2001; GEIST / STÖTTER 2003). Die resultierenden DTM haben eine horizontale Auflösung von wenigen Metern und eine vertikale Genauigkeit von wenigen Dezimetern. Ähnlich wie bei den oben genannten passiven optischen Flugzeugsensoren kann heute Dank globaler Positionierungssysteme (GPS) und inertialer Navigationssysteme (INS) an Bord der Flugweg und die Sensororientierung direkt bestimmt werden. So wird die notwendige Bodeninformation zur Rekonstruktion der geometrischen Aufnahmeparameter (Passpunkte) auf ein Minimum reduziert. In der Gletscherbeobachtung von besonderer Bedeutung ist die Eigenschaft des Laserscanning, als aktiver Sensor auch (oder sogar besonders gut) über verschneitem Gelände zu funktionieren. Wegen fehlenden optischen Kontrasts sind solche Zonen die Problemfälle passiver optischer Verfahren. Laserscanning erlaubt so erstmals die wirklich flächendeckende Bestimmung von DTM über Gletschern bzw. entsprechender vertikaler Veränderungen. Die Intensitäten der Laserreflektionen ergeben ferner eine Bildinformation, die zwar in räumlicher und radiometrischer Auflösung nicht an Luftbilder oder Zeilensensoren herankommt, aber doch einen wertvollen Datensatz bei der Datenanalyse darstellen kann.

2.3 Luftgestütztes SAR

Nur wenige Experimente liegen zur Gletscherbeobachtung mittels luftgestütztem *Synthetic Aperture Radar* (SAR) vor (VACHON et al. 1996; BINDSCHADLER / FAHNESTOCK / SIGMUND 1999; ECKERT / KELLENBERGER 2002). Im interferometrischen Modus (InSAR) steht dabei die Gewinnung von DTM im Vordergrund. Dabei werden bei räumlichen Auslösungen von einigen Metern vertikale Genauigkeiten von einigen Dezimetern erzielt. Der wesentliche Vorteil zu oben genannten optischen Verfahren ist die Wolkendurchdringung durch das Mikrowellenverfahren SAR. Noch wenig erforscht ist die thematische Information, welche die reflektierten Mikrowellen über die Eis- und Schneeoberfläche enthalten. Aus elektromagnetischen Überlegungen heraus kann dabei aber zumindest langfristig von einem großen Potential ausgegangen werden (MARSHALL / REES / DOWDESWELL 1995; ENGESET 1999).

2.4 Multispektrale Satellitensensoren

Das „Arbeitspferd" der weltraumgestützten Gletscherbeobachtung sind zweifellos die multispektralen Satellitensensoren wie zum Beispiel Landsat TM und ETM+, ASTER, IRS oder SPOT. Mit solchen Sensoren können große Gebiete mit einer Bodenauflösung von einigen Metern bis wenigen Dekametern regelmäßig beobachtet werden. Die multispektralen Daten ermöglichen eine weitgehende Automatisierung bei der Extraktion von Eis- und Schneeflächen (KÄÄB et al. 2002; PAUL et al. 2002). Stereosensoren wie ASTER erlauben sogar die simultane automatische Extraktion von DTM mit einer Auflösung und vertikalen Genauigkeit von einigen zehn Metern (Abb. 1; KÄÄB et al. 2003). Gerade bei der Analyse von hochalpinen glazialen Prozessen, die ja häufig von der Reliefenergie regiert werden, ist die Verfügbarkeit von DTM außerordentlich wichtig. Mit Sensoren wie IKONOS und QuickBird, die räumliche Auflösungen im Meter- und Submeterbereich besitzen, verschwimmen die Unterschiede zwischen optischer luft- und weltraumgestützter Fernerkundung zunehmend.

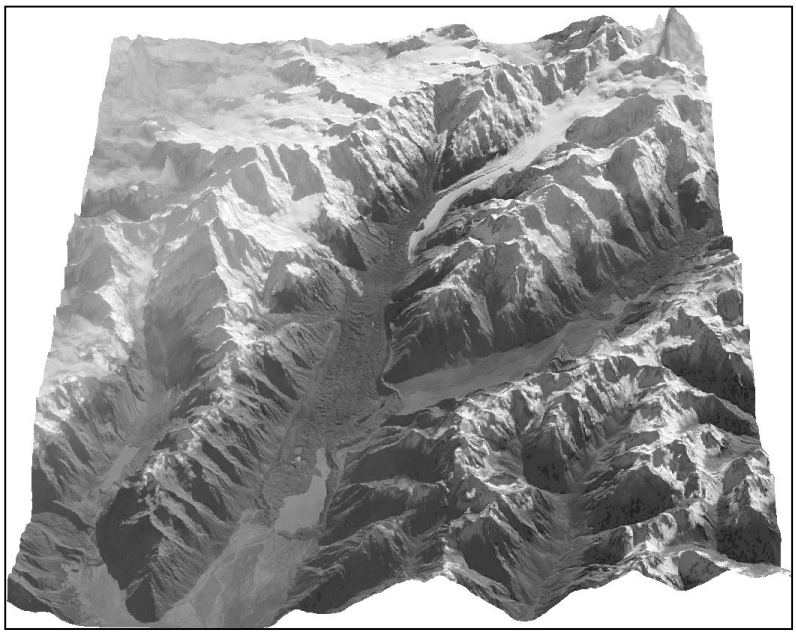

Abb. 1: Synthetische Schrägansicht der Region um den Mount Cook und des Tasman-Gletschers, Neuseeland. Aus Stereodaten des Satellitensensors ASTER wurde ein digitales Terrainmodell berechnet und die entsprechende ASTER-Nadir-Szene darüber projiziert. Seitenlänge des Ausschnitts ca. 25 km. Norden in Blickrichtung.

2.5 Weltraumgestütztes SAR

Mit ähnlicher bis leicht besserer Genauigkeit als aus optischem Satellitenstereo werden großflächige DTM aus satellitengestütztem InSAR erzeugt (TOUTIN / GRAY 2000). Dieses Mikrowellenverfahren ist besonders in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung klar überlegen. Besonders hervorzuheben ist die *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), die aufgrund einer Messkampagne im Februar 2000 für den Bereich zwischen 60° nördlicher und 54° südlicher Breite ein DTM mit 30 m Bodenauflösung und ca. 20 m horizontaler und vertikaler Genauigkeit geliefert hat (RABUS et al. 2003).

Neben der DTM Akquisition erlaubt InSAR im differentiellen Modus (DInSAR) die Messung von kleinsten Geländeverschiebungen. Von einer Anzahl großer Gletscher (vor allem in höheren Breiten) konnten so Fließfelder oder zumindest typische Eisgeschwindigkeiten ermittelt werden (RIGNOT / FORSTER / ISACKS 1996; STROZZI / GUDMUNDSSON / WEGMÜLLER 2003). Dieses Verfahren ergänzt sich in vielerlei Hinsicht hervorragend mit der Bewegungsmessung aus wiederholten optischen Satellitenbildern mit Hilfe von image-matching-Verfahren.

3 Intensive Prozessstudien (Stufe 2) und regionale Beobachtung von Gletschermassenänderungen (Stufe 3)

3.1 Fließfelder

Auf der Stufe der intensiven Prozessstudien (Stufe 2) ist einer der wesentlichsten Beiträge moderner Luft- und Weltraumverfahren an die weltweite Gletscherbeobachtung die Ermittlung von Oberflächenbewegungen. Aus wiederholten digitalen Luft- oder Satellitenbildern können durch Bildvergleichsverfahren dichte Gletscherfließfelder bestimmt werden (KÄÄB 2002). Optische Verfahren sind dabei auf den Erhalt von Oberflächenstrukturen wie Gletscherspalten oder Schuttflächen angewiesen. Die Resultate ergeben die zweidimensionale Oberflächenkinematik in bisher kaum erreichter räumlicher Auflösung. Das ermöglicht neue Erkenntnisse im Bereich der Gletscherdynamik und ihrer raum-zeitlichen Variationen. Auch terrestrisch unzugängliche Gebiete können so untersucht werden. Die luftgestützte Variante dieser Methodik wird sicher nur auf ausgewählten Gletschern angewendet werden (Stufe 2). Dort allerdings ist sie durchaus operationell einsetzbar, wenn ein bis zwei Befliegungen pro Jahr durchgeführt werden können. Basierend auf Satellitenbildern kann die Methode – mit geringerer Genauigkeit allerdings – auch großflächig eingesetzt werden (Abb. 2; vgl. Stufe 5; KÄÄB 2002).

Sowohl für großflächige Anwendungen als auch für Detailstudien sind Fliessfelder aus satellitengestütztem DInSAR geeignet. In mittleren Breiten werden Bewegungen nur in Blickrichtung des Sensors erhalten (STROZZI / GUDMUNDSSON / WEGMÜLLER 2003), in höheren Breiten bei Kombination von auf- und untergehendem Orbit aber zwei Verschiebungskomponenten (JOUGHIN / KWOK / FAHNESTOCK 1999). Das hochgenaue Verfahren stellt die einzige Möglichkeit dar, Fliessfelder von schneebedeckten Gletschern bzw. Akkumulationsgebieten zu messen. Einerseits hat die Technik die operationelle Stufe wohl erreicht, andererseits wird ihre regelmäßige Anwendung durch die wechselnden Spezifikationen der möglichen Sensoren aber derzeit erschwert. Für Detailstudien (Stufe 2) an großen Gletschern ist die Methodik jedoch sehr geeignet.

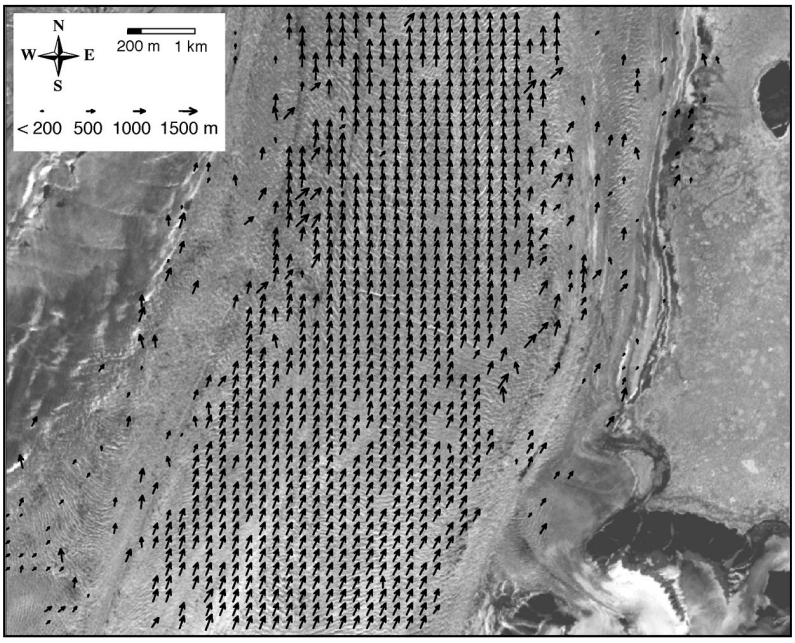

Abb. 2: Fliessfeld eines Ausschnitts des Mittiegletschers, Manson Icecap, Ellesmere Island, Kanadische Arktis, berechnet aus Landsat ETM+ pan Daten zwischen 13. Juli 1999 und 27. Juni 2000. Die Verschiebungen betragen bis zu 1.500 m. Das originale Messraster von 100 m wurde aus Gründen der Lesbarkeit auf 200 m reduziert. Während der Messperiode vollführte der Mittiegletscher einen Surge. Die Satellitendaten wurden zur Verfügung gestellt von Luke Copland, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Canada.

3.2 Gletschermassenänderungen

Wiederholte DTM sind das Standardmittel, Eisdickenveränderungen großflächig zu ermitteln. Je nach Genauigkeit dieser DTM sind solche Messungen für Detailstudien (Stufe 2) oder regionale Untersuchungen (Stufe 3) prädestiniert. Photogrammetrische Verfahren sind dabei am besten etabliert (KÄÄB 2001), Laserprofiling oder besser -scanning stellt aber zumindest für mit Flugzeugen zugängliche Regionen eine sehr vielversprechende Methode dar (ARENDT et al. 2002). Wenn zusätzlich keine gut aufgelöste Bildinformation verlangt wird, dürfte sich Laserscanning zum Mittel der Wahl entwickeln, wo Gletschermassenänderungen auf lokaler bis regionaler Ebene (Stufen 2 und 3) operationell beobachtet werden sollen.

Trotz ihrer geringeren Genauigkeit können aber satellitengestützte Photogrammetrie und InSAR interessant sein, um in abgelegenen Gebieten über längere Zeiträume (einige Jahrzehnte) Gletschermassenveränderungen zu beobachten (KÄÄB 2003). Die SRTM hat hier eine Grundlage von enormer Bedeutung geschaffen (RIGNOT / RIVERA / CASASSA 2003).

Werden in Detailstudien (Stufe 2) Fliessfelder und vertikale Veränderungen der Eismächtigkeit jährlich beobachtet, kann die Massenbilanz eines Gletschers flächenhaft mit Hilfe der Massenkontinuität modelliert werden (REEH / MADSEN / MOHR 1999; KÄÄB 2001).

4 Repräsentative Langzeitbeobachtung von Gletscherlängenänderungen (Stufe 4) und globale Abdeckung durch Gletscherinventare (Stufe 5)

4.1 Gletscherfläche

Die regionale bis globale Kartierung von Landeisflächen bzw. von deren Veränderungen ist klar eine Domäne der optischen Satellitendaten. Diese ermöglichen erstmals ein globales Inventar der Gletscherflächen, wie es derzeit im Programm GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) erstellt wird (KIEFFER et al. 2000). Die weitgehend automatisierbaren Verfahren liefern eine vollständige Stichprobe über alle Gletscher einer Region und sind so viel repräsentativer als terrestrische Messungen (KÄÄB et al. 2002; PAUL et al. 2002). In der Tat werden so, wie das Beispiel des neuen Schweizer Gletscherinventars aus Satellitenbildern zeigt, durchaus neue Erkenntnisse über die Klimareaktion von Gletschern gewonnen. Kleine Gletscher verschwinden derzeit in großer Anzahl; große Gletscher können auf die derzeitige beschleunigte Klimaerwärmung gar nicht mehr dynamisch durch Rückzug reagieren, sondern zerfallen an Ort und Stelle (sogenanntes *downwasting*) (Abb. 3; PAUL 2003). Optische Satellitenfernerkundung zur wiederholten Gletscherinventarisierung hat klar ein operationelles Stadium erreicht und muss ein fester Bestandteil weltweiter Gletscherbeobachtung werden.

4.2 Eisgeschwindigkeit

Neben den klassischen, weltweit beobachtbaren glaziologischen Parametern wie der Gletscherfläche erlauben moderne weltraumgestützte Techniken die großflächige Erfassung von Parametern, deren Einbezug in die globale Beobachtungsstufe (5) bisher völlig unmöglich war. Als Beispiel sei hier die Gletschergeschwindigkeit genannt. „Matching“ von wiederholten Satellitenbildern oder DInSAR liefern Eisgeschwindigkeiten von einer Vielzahl von Gletschern, so dass dieser Parameter Teil von Gletscherinventaren werden kann (RIGNOT / FORSTER / ISACKS 1996). Der Parameter kann wichtige Hinweise auf die zu erwartende Klimare-

aktion eines Gletschers geben bzw. eine beobachtete Reaktion zu erklären helfen. Gezielte Beobachtungsstrategien müssen entwickelt werden.

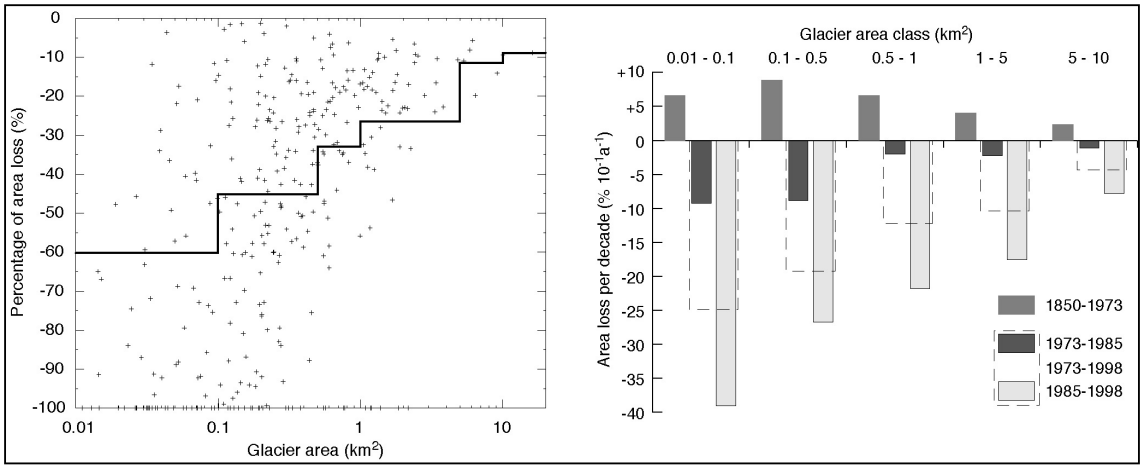

Abb. 3: Links: Veränderungen in Gletscherfläche von 1973 bis 1998 für schuttfreie Gletscher im Wallis und Berner Oberland, Schweiz. Die 1973er Daten entstammen Karten, Feldbegehungen und Luftbildinterpretationen (vgl. MAISCH et al. 1999), die Daten von 1998 sind aus Landsat-TM-Bildern abgeleitet. Die durchgezogene Stufen-Linie stellt den Mittelwert einzelner Größenklassen dar. Je kleiner die Gletscher, umso größer ist die Varianz ihrer Veränderung und umso größer ist ihr prozentualer Flächenverlust. Rechts: Gletscherflächenverlust pro Dekade für die Periode 1973-1985-1998 für die oben genannte Stichprobe aus den Schweizer Alpen. Der Verlust von 1850 bis 1973 ist aus MAISCH et al. (1999) entnommen. Alle prozentualen Veränderungen beziehen sich auf die Flächen von 1973. Der totale Flächenverlust von 1973 bis 1998 beträgt neun Prozent pro Jahrzehnt. Die gestrichelten Säulen sind das Mittel von 1973 bis 1998. (Quelle: KÄÄB et al. 2002)

5 Ausblick

Angesichts, einerseits, der derzeitigen Bedürfnisse an die weltweite Gletscherbeobachtung und, andererseits, der wesentlichen neuen Möglichkeiten, die sich aus modernen luft- und weltraumgestützten Messtechnologien ergeben, resultieren zwei grundlegende Herausforderungen:

Die *technische und wissenschaftliche Herausforderung* besteht darin, die verfügbaren Daten und Methoden sinnvoll zu fusionieren. Diese Herausforderung bezieht sich sowohl auf die Integration bestehender und bewährter terrestrischer Methoden mit den Fernerkundungsverfahren, als auch auf die verschiedenen Fernerkundungsverfahren untereinander. Luftgestützte Photogrammetrie und Laserscanning werden – vermutlich sogar sensorseitig – verschmelzen. Großes Potential – und eine Reihe offener Forschungsfragen – liegt in der Fusion von optischen und Mikrowellen-Verfahren.

Die *wissenschaftspolitische Herausforderung* besteht in der großflächigen (oder globalen) Anwendung operationeller Verfahren der luft- und raumgestützten Gletscherbeobachtung. Oft werden solche Verfahren entwickelt und erprobt, ihre Anwendung aber nicht mehr als Wissenschaft gefördert. Während diese Sichtweise aus dem methodischen Blickwinkel durchaus sinnvoll sein kann, ist sie für die Klimaforschung problematisch. Gerade globale und standardisierte Datensätze sind nötig, um die derzeitige Klimaveränderung und ihre regionalen Ausprägungen beobachten und verstehen zu können.

Literatur

ARENDT, A. A. et al. (2002): Rapid wastage of Alaska Glaciers and their contribution to rising sea level. – In: Science 297(5580). – 382-386.

BALTSAVIAS, E. P. et al. (2001): Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. – In: Photogrammetric Record 17(98). – 243-273.

BINDSCHADLER, R. / FAHNESTOCK, M. / SIGMUND, A. (1999): Comparison of Greenland ice sheet topography measured by TOPSAR and airborne laser alitmetry. – In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 37(5). – 2530-2535.

ECKERT, S. / KELLENBERGER, T. (2002): Qualitätsanalyse automatisch generierter digitaler Geländemodelle aus ASTER Daten. – In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Zu neuen Märkten – auf neuen Wegen – mit neuer Technik. (= Tagungsbände der Wissenschaftlichen-Technischen Jahrestagungen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation DGPF, 11). – Neubrandenburg. 337-345.

ENGESET, R. V. (1999): Comparison of annual changes in winter ERS-1 SAR images and glacier mass balance of Slakbreen, Svalbard. – In: International Journal of Remote Sensing 20(2). – 259-271.

GEIST, T. / STÖTTER, H. (2003): First results of airborne laser scanning technolgy as a tool for the quantification of glacier mass balance. – In: EARSel eProceedings 2(1). – 8-14.

HAEBERLI, W. / BENISTON, M. (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. – In: AMBIO – A Journal of the Human Environment 27. – 258-265.

HAEBERLI, W. / CIHLAR, J. / BARRY, R. (2000): Glacier Monitoring within the Global Climate Observing System - a contribution to the Fritz Müller Memorial. – In: Annals of Glaciology 31. – 241-246.

HAEBERLI, W. / MAISCH, M. / PAUL, F. (2002): Mountain glaciers in global climate-related observation networks. – In: World Meteorological Organization Bulletin 51(1). – 18-25.

HAUBER, E. et al. (2000): Digital and automated high resolution stereo mapping of the Sonnblick glacier (Austria) with HRSC-A. – In: EARSeL eProceedings 1. – 246-254.

IAHS(ICSI) et al. (eds.) (1998): Fluctuations of Glaciers 1990-1995. (= Fluctuations of Glaciers, 7). – Paris.

IAHS(ICSI) et al. (eds.) (2001): Glacier Mass Balance Bulletin. (= Glacier Mass Balance Bulletin, 6.). – Zürich.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001a): Climate Change 2001 – Impacts, Adaption and Vulnerability. Third Assessment Report of the Working Group II. – Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001b): Climate Change 2001 – The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report of the Working Group I. – Cambridge.

JOUGHIN, I. R. / KWOK, R. / FAHNESTOCK, M. A. (1999): Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes. – In: IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 36(1). – 25-37.

KÄÄB, A. (2001): Photogrammetric reconstruction of glacier mass balance using a kinematic ice-flow model: a 20-year time-series on Grubengletscher, Swiss Alps. – In: Annals of Glaciology 31. – 45-52.

KÄÄB, A. (2002): Monitoring high-mountain terrain deformation from air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. – In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 57(1-2). – 39-52.

KÄÄB, A. et al. (2002): The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: II. First results. – In: Annals of Glaciology 34. – 362-366.

KÄÄB, A. et al. (2003): Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications. – In: EARSel eProceedings 2(1). – 43-53.

KÄÄB, A. / VOLLMER, M. (2000): Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. – In: Permafrost and Periglacial Processes 11(4). – 315-326.

KIEFFER, H. H. et al. (2000): New eyes in the sky measure glaciers and ice sheets. – In: EOS Transactions, American Geophysical Union 81(24). – 265, 270-271.

MAISCH, M. et al. (1999): Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850 – Aktuelle Vergletscherung – Gletscherschwund-Szenarien 21. Jahrhundert. (= Schlussbericht NFP 31). – Zürich.

MARSHALL, G. J. / REES, W. G. / DOWDESWELL, J. A. (1995): The discrimination of glacier facies using multitemporal ERS - 1 SAR data. – In: ASKNE, J. (ed.): Sensors and environmental applications of remote sensing. – Rotterdam. 263-269.

PAUL, F. (2003): The new Swiss glacier inventory 2000 – application of remote sensing and GIS. [Ph.D. thesis, University of Zurich].

PAUL, F. et al. (2002): The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: I. Methods. – In: Annals of Glaciology 34. – 355-361.

RABUS, B. et al. (2003): The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. – In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 57(4). – 241-262.

REEH, N. / MADSEN, S. N. / MOHR, J. J. (1999): Combining SAR interferometry and the equation of continuity to estimate the three-dimensional glacier surface vector. – In: Journal of Glaciology 45(151). – 533-538.

RIGNOT, E. / FORSTER, R. / ISACKS, B. (1996): Interferometric radar observations of Glaciar San Rafael, Chile. – In: Journal of Glaciology 42(141). – 279-291.

RIGNOT, E. / RIVERA, A. / CASASSA, G. (2003): Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. – In: Science 302. – 434-437.

STROZZI, T. / GUDMUNDSSON, H. / WEGMÜLLER, U. (2003): Estimation of the surface displacement of Swiss alpine glaciers using satellite radar interferometry. – In: EARSel eProceedings 2. – 3-7.

TOUTIN, T. / GRAY, L. (2000): State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. – In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 55(1). – 13-33.

VACHON, P. W. et al. (1996): Airborne and spaceborne SAR interferometry: application to the Athabasca Glacier Area. – In: Institute of Electrical and Electronics Engineering (ed.): Remote Sensing for a Sustainable Future. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '96. – Lincoln/Nebraska. 2255-2257.

WÜRLÄNDER, R. / EDER, K. (1998): Leistungsfähigkeit aktueller photogrammetrischer Auswertemethoden zum Aufbau eines digitalen Gletscherkatasters. – In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 34(2). – 167-185.