

Abgrenzung schuttbedeckter Gletscher aus Satellitenbildern unter Verwendung morphometrischer Parameter

Tobias Bolch, André Kunert, Manfred F. Buchroithner

Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden,
{tobias.bolch},{andre.kunert},{manfred.buchroithner}@tu-dresden.de

Zusammenfassung

Im Rahmen einer noch laufenden Studie werden Methoden zur Abgrenzung schuttbedeckter Gletscher unter Verwendung morphometrischer Parameter von Gletschern der Bernina-Gruppe (Schweizer Alpen), des nördlichen Tien Shan (Kasachstan/Kyrgyzstan) und des Everest-Massivs (Nepalesischer Himalaja) vorgestellt.

Die morphometrischen Analysen basieren auf selbst generierten ASTER-DGM und SRTM-Daten und – für die Bernina-Gruppe – auf dem Schweizer DHM25 (©Swisstopo). Ein vorgestellter Ansatz berücksichtigt die typischen Wölbungseigenschaften der Gletscher. Durch eine Kombination von vertikaler und horizontaler Wölbung mit Hilfe einer Clusteranalyse können die Oberflächen und Ränder – inklusive der schuttbedeckten Bereiche – der Talgletscher alpinen Typs gut identifiziert werden. Die Größe der identifizierbaren Gletscher wird wesentlich durch die Auflösung und die Qualität des DGM bestimmt.

Die schuttbedeckten Gletscher im Himalaja weisen andere Charakteristika auf als die untersuchten Alpen- und Tien-Shan-Gletscher, denn oft liegen deren gesamte Zungen unter mächtigem Schutt und weisen vielfältige Kryokarstformen auf. In diesem Fall sind die Wölbungen hervorragend geeignet, um die Oberflächeneigenschaften zu beschreiben; eine eindeutige Abgrenzung ist allerdings meist nicht möglich. Daher müssen für diesen Gletschertypus mehr Parameter mit einbezogen werden. Der vorgestellte Ansatz basiert neben der Wölbung auf der absoluten Höhe, der Neigung und statistischen Parametern wie der Standardabweichung und der Diversität der Wölbung. Zusätzlich wird ein ASTER-Thermal-Kanal integriert, um dieses Modell zu verbessern.

Summary

Morphometry-based methods to delineate debris-covered-glaciers of the Bernina-Group/Alps, the northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) and of the Mt.-Everest-area (Nepalese Himalaya) are presented in this ongoing study. The morphometric analyses are based on self-generated ASTER DEMs and SRTM data and – for the Bernina-Group – on the Swiss DHM25 (©Swisstopo). The presented approach includes the typical curvature characteristics of the glaciers. Combining plane and profile curvatures in a cluster analysis, both the surface and the margins of the valley glaciers - including the debris-covered parts – could be well identified in the Bernina Group and the northern Tien Shan. Clearly, the number of the identifiable distal glacier portions depends on both the resolution and the quality of the DEM. However, due to the different characteristics of the Himalayan debris-covered glaciers, the approach using curvature as the only mapping criterion is very useful to describe the surface characteristics of these glaciers. Yet, their delineation is mostly not possible. Hence, the morphometry-based glacier mapping (MGM) method has to be applied to these glaciers in a more complex way. This approach includes besides the curvature on the altitude, the slope and statistical parameters like the standard deviation. In addition the thermal band of the ASTER sensor is included.

Keywords: Schuttbedeckte Gletscher, Gletscherkartierung, morphometrische Analyse, ASTER-DGM, SRTM-DGM, Khumbu Himal, Tien Shan, Bernina-Gruppe.

Einführung

Die Gletscher der Erde reagieren sensibel auf das Klima und stellen somit einen wichtigen Indikator für die Erfassung der Klimaänderungen dar. Da terrestrische Vermessungen von Gletschern zeitintensiv sind und Luftbildbefliegungen zur Gletscherkartierung mit hohem Aufwand verbunden sind, werden in zunehmenden Maße Satellitendaten zur flächendeckenden Erfassung und Analyse von Gletscheränderungen eingesetzt. Dies gilt insbesondere für entlegene Hochgebirgsregionen der Erde. Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, dass Schnee- und Eisflächen aus multispektralen Daten mit hoher Genauigkeit abzugrenzen sind. Häufig angewandte Methoden sind die überwachte Klassifikation und die Segmentierung von Ratio-Bildern (u.a. BAYR et al. 1994, SIDJAK & WHEATE 1999, PAUL et al. 2002). Mit diesen Methoden können jedoch die schuttbedeckten Gletscherflächen auf Grund der sehr ähnlichen oder gleichen spektralen Signatur wie die umgebenden Schuttflächen nicht oder nur ungenügend erfasst werden (HEMPEL 2005). Mittel- und Obermoränen sind allerdings für eine nicht unerhebliche Anzahl von Gletschern charakteristisch. Insbesondere die Gletscher in semi-ariden Hochgebirgen, wie in großen Gebieten des Himalaja, sind oft von mächtigen Schuttbedeckungen gekennzeichnet. Aber auch die Zungen einiger Alpengletscher sind mit Moränenmaterial bedeckt. Die Schuttauflage und Oberflächenstrukturen eines Gletschers variieren je nach seiner Aktivität (HERBST et al. 2006). Die schuttbedeckten Flächen werden immer noch zumeist manuell mit Expertenwissen abgegrenzt. Das erfordert jedoch einen hohen Zeitaufwand und ist folglich für die Erfassung von größeren Gebieten wenig geeignet. Neuere Forschungsansätze konzentrieren sich daher auf die präzisere Abgrenzung der schuttbedeckten Gletscher, z.B. auf Basis morphometrischer Informationen (PAUL et al. 2004, BOLCH & KAMP 2006, BUCHROITHNER et al. 2006) oder der Oberflächentemperatur (RANZI et al. 2004).

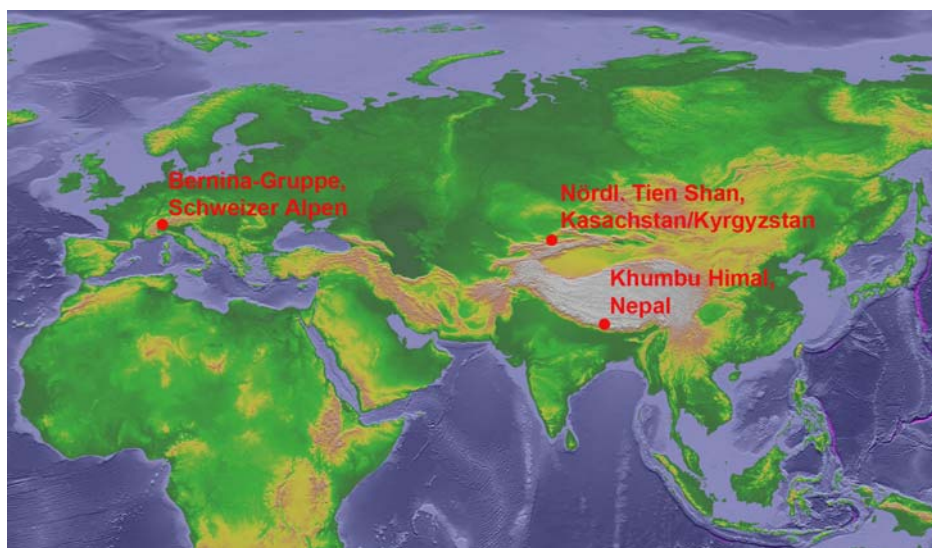


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, das Potenzial mittelauflösender Satellitenbilddaten zur Abgrenzung schuttbedeckter Gletscher unter Verwendung von morphometrischen Informationen, die aus digitalen Geländemodellen abgeleitet werden, und thermalen Informationen aufzuzeigen. Als Beispielgebiete dienen die Gletscher der Bernina-Gruppe/Schweiz, des nördlichen Tien Shan (Kasachstan/Kyrgyzstan) sowie insbesondere die Gletscher des Chomolungma- (Mt.-Everest-) Massivs im Nepalesischen Himalaja. Während die größeren Gletscher der ersteren beiden Untersuchungsgebiete meist nur auf den Zungenenden Ober- und Mittelmoränen aufweisen, sind die Zungen der größeren Gletscher in

letzterem Gebiet häufig kilometerlang mit mächtigem Schutt bedeckt (MORIBYASHI & HIGUCHI 1977, Abb. 2). In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass eine eindeutige Abgrenzung der Gletschertermini auch mit hochauflösenden Luft- oder Satellitenbildern (z.B. Ikonos, Quickbird) und selbst im Gelände nicht oder nur sehr vage möglich ist. Zudem besitzen nahezu alle untersuchten schuttbedeckten Gletscherzungen im Khumbu Himal im vorderen Cluster inaktive Zonen, die zwar mit dem aktiven Gletscher in Verbindung stehen, sich aber von der Oberfläche her stark unterscheiden. Die Endmoränen weisen dort teilweise blockgletscherartige Strukturen auf. Dies ist beispielhaft für den Khumbu Gletscher gut beschrieben (u.a. IWATA et al. 1980, WATANABE et al. 1986, GADES et al. 2000). Die Toteisareale werden meist den Gletschern hinzugerechnet, so z. B. auch beim Gletscherinventar von Nepal (MOOL et al. 2001). Gleiches gilt zunächst auch für diese Studie.

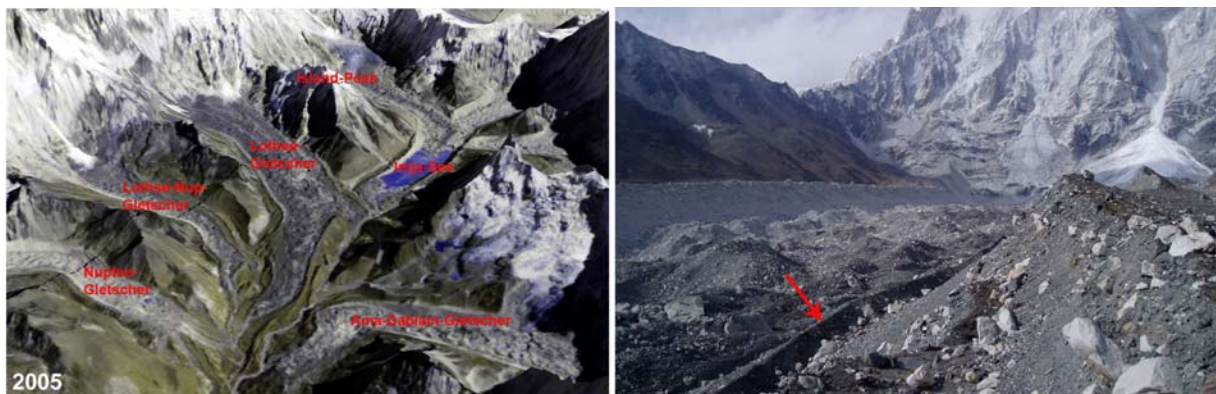


Abbildung 2: links: 3D-Ansicht (ASTER-3-3-1auf ASTER-DGM) der schuttbedeckten Gletscher im Imja-Tal, Khumbu Himal; rechts: Foto eines mit Schutt bedeckten Gletschers (Lohtse Nup); der Pfeil verweist auf die sekundäre Moräne.

Datengrundlagen und Methodik

Bernina-Gruppe und Tien Shan

Die morphometrischen Analysen basieren auf ASTER- und SRTM-DGM und, für die Bernina-Gruppe, auf dem DHM25, Level 2 (DHM25L2, ©Swisstopo) der Schweiz. Dieses DGM mit einer Auflösung von 25 m beinhaltet Strukturinformationen und bildet die Talgletscher sowie deren Moränen hervorragend ab (SWISSTOPO 2004). Nachteil des DHM25L2 ist, dass es nicht den aktuellen Gletscherstand, sondern den des Jahres 1991 repräsentiert. Das DGM des Untersuchungsgebietes im nördlichen Tien Shan wurde aus zwei ASTER-Level 1A Szenen generiert. Insgesamt konnten 33 Referenzpunkte (Ground Control Points, GCP), basierend auf GPS-Messungen im Gelände und topographischen Karten (1:100.000), und 45 Passpunkte (Tie points, TP) identifiziert werden. Störende Artefakte und Datenlücken, meist verursacht durch Wolken und Schlagschatten, wurden durch SRTM-Daten beseitigt bzw. gefüllt (BOLCH et al. 2005). Im Vergleich zum SRTM3-DGM weist das generierte ASTER-/SRTM3-DGM durch die notwendigen Nachbearbeitungen jedoch eine kaum bessere Qualität auf, so dass für die Gletscherabgrenzung das reine SRTM-DGM verwendet wurde.

Zur Gletscherabgrenzung wurde der Ansatz von SCHMIDT & DIKAU (1999) weiterverfolgt, die Oberflächenformen anhand von Wölbungsparametern beschreiben. Für das Schweizer Testgebiet wurde zunächst das DHM25L2 mit einem 3x3-Filter geglättet und anschließend die horizontale und vertikale Wölbung mit der Software SAGA berechnet. Anschließend konnten Oberflächen mit ähnlichen Eigenschaften mittels einer Clusteranalyse aggregiert werden (BOLCH & KAMP 2006, Abb. 3A). Die hellblauen Flächen stellen Bereiche mit geringer Wölbung dar, wie z.B. die Gletscheroberflächen oder den Talgrund. Dunkelblaue

Flächen repräsentieren (stark) konvexe Oberflächen, wie z. B. Ufermoränen oder Bergrücken. Rote Flächen sind dagegen (stark) konkav gewölbt und charakterisieren z.B. den Übergang der Gletscher zu den umgebenden Ufermoränen oder Berghängen. Abb. 3A verdeutlicht, dass die Zungen der Gletscher inklusive der schuttbedeckten Flächen durch die morphometrie-basierte Kartierungsmethode (Morphometric Glacier Mapping [MGM]-Method) nahezu vollständig abgrenzbar sind und dieses Verfahren das Potenzial zur Automatisierung besitzt. Ähnlich verhält es sich bei den schuttbedeckten Gletscherzungen im nördlichen Tien Shan. Während durch die multispektrale Analyse, wie z.B. eine Segmentierung durch ein Landsat TM4/TM5-Ratio-Bild, nur die schuttfreien Schnee- und Eisflächen erfasst werden, kann der gesamte Gletscher mit Hilfe der beschriebenen Clusteranalyse gut abgegrenzt werden (BOLCH & KAMP 2006, Abb. 3B). Die Größe der identifizierbaren Gletscher wird wesentlich durch die Auflösung und die Qualität des DGM bestimmt.

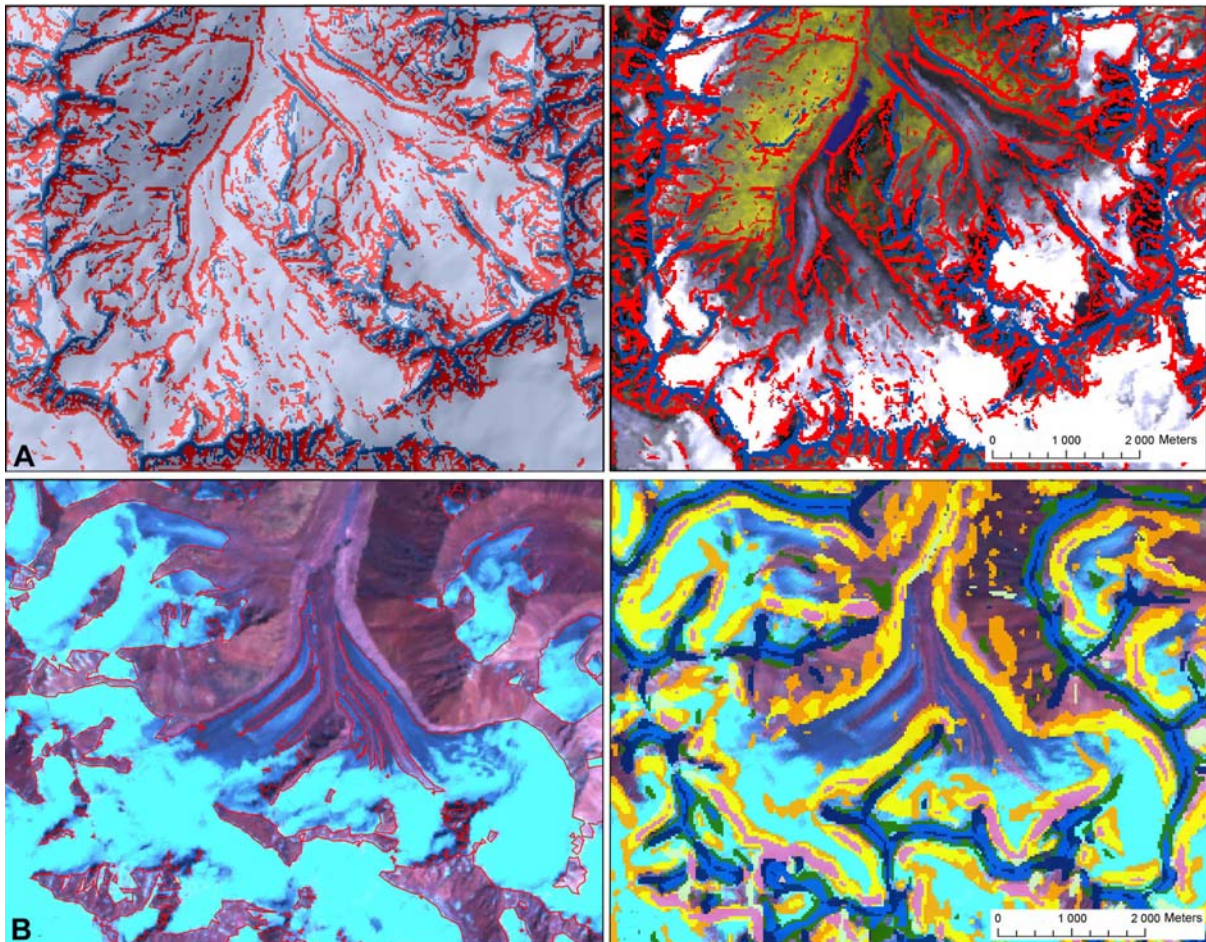


Abbildung 3: A: Morphometrische Gletscherabgrenzung in der Bernina-Gruppe basierend auf dem DHM25L2 (©Swisstopo, BA057533); links: Cluster aus horizontaler und vertikaler Wölbung, rechts: Cluster auf Landsat-TM-Szene aus dem Jahr 1991; B: Gletscherabgrenzung im nördlichen Tien Shan basierend auf SRTM3-DGM, links: Abgrenzung durch Landsat TM4/TM5 Ratio-Bild (rote Polygone), rechts: Cluster aus horizontaler und vertikaler Wölbung auf Landsatbild des Jahres 1999 (Quelle: Bolch & Kamp 2006).

Chomolungma (Mt. Everest)

Als Grundlage für die Erfassung der Morphometrie im Gebiet des Chomolungma dient ein selbst erstelltes ASTER-DGM. Hierfür standen drei ASTER-Szenen aus den Jahren 2001, 2002 und 2003 zur Verfügung. Die DGM Generierung erfolgte mit dem Modul OrthoEngine des Programmpaketes Geomatica 9.1. Anhand von je 18 GCP und je ca. 100 TP wurden die Szenen einzeln verarbeitet und für die jeweiligen Jahre entsprechende Höhenmodelle

generiert. Als Lage- und Höhenreferenz diente dabei die Karte „Mount Everest“ der National Geographic Society (*NATIONAL GEOGRAPHIC*). Auf Grund des extremen Reliefs weisen alle gerechneten DGM z. T. große Datenlücken auf, die sich insbesondere im Cluster der Steilhänge und der Gipfel befinden (Abb. 4 links). Zudem treten einige unnatürliche Spitzen (Peaks) auf. Die Gletscher sind hingegen weitgehend vollständig abgebildet. Zum Zwecke der Orthobildgenerierung und zur Visualisierung sollten die fehlerhaften Gebiete minimiert werden. Ein Grossteil der Peaks konnte durch die Subtraktion der DGM identifiziert und die entsprechenden Bereiche mit einem Buffer ausgeschnitten werden. Durch die anschließende Addierung und Mittelung der drei erstellten DGM wurden einige Datenlücken beseitigt. Zum Füllen der verbliebenen Löcher dienten die digitalisierten Höhenlinien der National-Geographic-Karte. Das finale DGM besitzt keine Datenlücken mehr (Abb. 4 rechts). Die SRTM3-Daten konnten nicht verwendet werden, da diese im Untersuchungsgebiet ebenfalls große Datenlücken aufweisen.

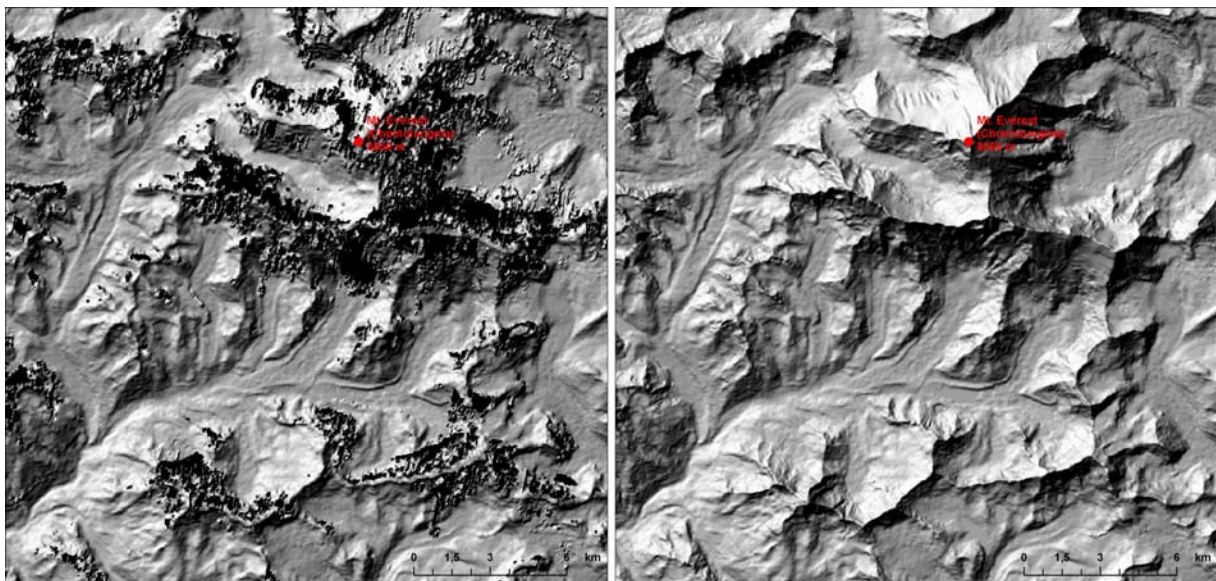


Abbildung 4: links: ASTER-DGM mit Löchern; rechts: ASTER-DGM, Löcher gefüllt.

Der für die Bernina-Gruppe und den nördlichen Tien Shan vorgestellte Ansatz zur Gletscherabgrenzung über die Wölbungsparameter eignet sich auch für die schuttbedeckten Gletscher im Himalaja hervorragend zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften. Auf Grund der bereits erwähnten unterschiedlichen Charakteristika ist hiermit eine eindeutige Abgrenzung jedoch nicht möglich. Daher musste ein komplexerer Ansatz verfolgt werden. Betrachtet man die Oberfläche der Gletscher, so fällt auf, dass diese aufgrund der Gletscherbewegungen, der unterschiedlichen Schuttbedeckung und der Ablationsprozesse stark strukturiert ist und sich von der mesoskaligen Oberflächenrauigkeit von der Umgebung abhebt.

Eine weitere Abgrenzungsmöglichkeit besteht in der Erfassung der Oberflächentemperatur über den Thermalkanal, weil anzunehmen ist, dass der den Gletscher bedeckende Schutt kühler ist als jener, der keinem Eis aufliegt. RANZI et al. (2004) zeigten am Miage Gletscher in den Alpen das Potenzial des thermalen Kanals zur Gletscheridentifizierung bei einer Schuttbedeckung von maximal 40-50 cm auf. Eigene Untersuchungen bestätigen, dass insbesondere im ASTER-Thermal-Band 12 große Bereiche der Gletscherflächen zu erkennen sind. Problematisch ist jedoch die Tatsache, dass die abgeschatteten extraglazialen Gebiete ebenso kühle Oberflächentemperaturen wie die Gletscherflächen aufweisen, während die sonnenbeschienenen schuttbedeckten Gletscher wärmer sind. Dies verhindert insbesondere in den abgeschatteten Moränenbereichen, die direkt an den Gletscher anschließen, eine klare Unterscheidung zwischen Gletscher- und Nicht-Gletscherarealen. Weiterhin ist es sehr

wahrscheinlich, dass die Schuttbedeckung der untersuchten Gletscher, ähnlich der des ebenfalls mit unseren Methoden studierten Khumbu Gletschers (WATANABE et al. 1986), zum Ende der Gletscherzunge hin meist deutlich höher als 50 cm ist. Als alleiniges Kriterium eignet sich der thermale Kanal daher ebenfalls nicht.

Eine Kombination der genannten Größen brachte jedoch viel versprechende Ergebnisse. Um den schuttbedeckten Gletscher anhand dieser Größen abzugrenzen, wurden ausgehend von manuell digitalisierten Polygonen von Referenzgletschern jeweils statistische Parameter wie Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung berechnet, für jede der gewählten Größen das für den schuttbedeckten Cluster charakteristische Intervall zwischen dem Minimum und dem Maximum bestimmt und anschließend alle Resultate verschnitten (Abb. 5). Mit diesem Ergebnis konnten die schuttbedeckten Gletscherareale des gesamten Untersuchungsgebietes berechnet werden (Abb. 6).

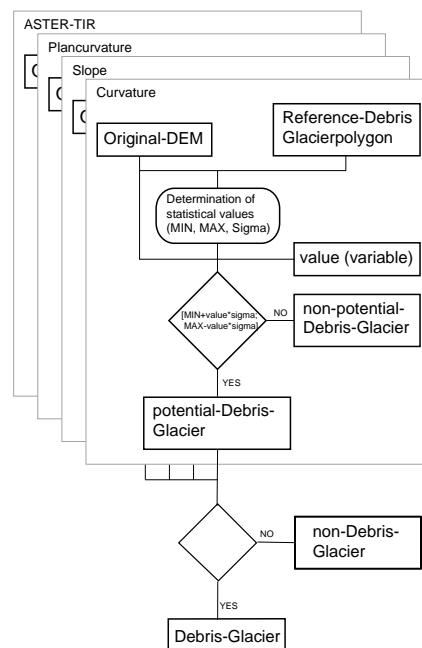


Abbildung 5: Ansatz zur morphometrischen Gletscherabgrenzung (Morphometric Glacier Mapping, MGM) im Khumbu Himal.

Ergebnisse und Diskussion

Das Ergebnis der morphometrie-basierten Gletscherabgrenzung auf Basis des erstellten ASTER-DGM zeigt eine überraschend hohe Übereinstimmung mit den tatsächlich vorhandenen Gletscherflächen (Abb. 6). Die Abweichung zwischen den manuell digitalisierten Flächen liegt im Mittel bei unter 2 %. Problematisch ist insbesondere die Abgrenzung der proximalen und lateralen Schuttbereiche. Aktuelle Überprüfungen im Gelände zeigten, dass eine Grenzziehung selbst dort visuell nicht eindeutig nachvollziehbar ist. Dies gilt insbesondere für Bereich der Gletschertermini, die eine Schuttbedeckung mit einer Mächtigkeit von teilweise mehreren Metern besitzen und inaktive Zonen aufweisen. Letztere sind durch eine homogenere Oberfläche gekennzeichnet als die aktiven Zonen. Weiterhin fiel bei den Geländearbeiten das Vorkommen von kleinen sekundären lateralen Moränen auf (Abb. 2 rechts), die die aktuelle Begrenzungen der aktiven Gletscher darstellen, im Geländemodell aber aufgrund der geringern Auflösung nicht abgebildet werden. Die weiteren Projektarbeiten werden sich darauf konzentrieren, die Oberflächencharakteristika aktiver Gletscherbereiche besser zu erfassen und zu beschreiben, um diese besser abgrenzen zu können. Hierzu werden zusätzlich hochauflösende Satellitendaten (Ikonos oder Quickbird)

hinzugezogen. Der Vergleich der Flächen- und insbesondere der Volumenänderung, berechnet aus multitemporalen Satellitendaten und daraus generierten DGM, wird einen verbesserten Aufschluss über das Gletscherverhalten geben.

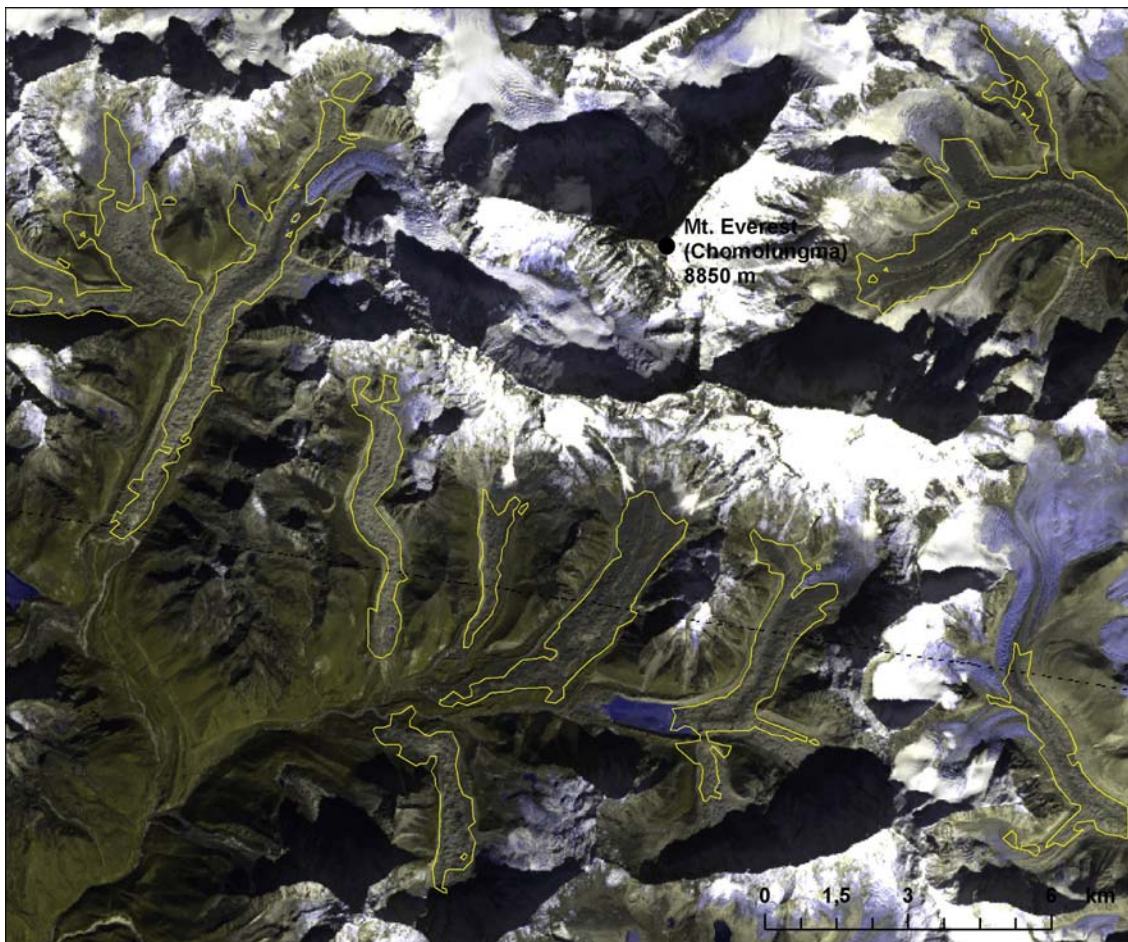


Abbildung 6: Auf Basis der MGM-Methode automatisch abgegrenzte schuttbedeckte Gletscher (gelbe Polygone).

Danksagung

Das Projekt wird von der DFG unter der Nr. BU 949/15-1 finanziert. Es basiert auf einem Projektentwurf von Prof. Ulrich Kamp (University of Montana), der diesen zur Einreichung zur Verfügung stellte. Hierfür möchten sich die Autoren ausdrücklich bedanken. Dank schulden die Autoren zudem Prashant Chaturvedi (IIT Kanpur, Indien), Helmut Hornik (Deutsche Geodätische Kommission München), Gunter Kröber (Emendis GmbH), Armin Buchroithner, Linda Moser (TU Graz) sowie Heike Predel (Henfling-Gymnasium Meinigen) für die tatkräftige Unterstützung beim Geländeaufenthalt im Everest-Gebite. Die verwendeten ASTER-Daten wurden von NASA/USGS im Rahmen des GLIMS-Projektes kostenlos zur Verfügung gestellt.

Literatur

- BAYR, K. J., D. K. HALL & W. M. KOVALICK, 1994: Observations on glaciers in the eastern Austrian Alps using satellite data. – *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 1733-1742.
- BOLCH, T. & U. KAMP, 2006: Glacier Mapping in High Mountains using DEMs, Landsat and ASTER Data. – *Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography*, 20-27 March 2005, La Paz, Bolivia: im Druck.
- BOLCH, T., U. KAMP & J. OLSENHOLLER, 2005: Using ASTER and SRTM DEMs for Studying Geomorphology and Glaciation in High Mountain Areas. – M. OLUIC (Hg.): *New Strategies for European Remote Sensing*, Millpress, Rotterdam: 119-127.
- BUCHROITHNER, M. F. BOLCH, T. KUNERT, A. & U. KAMP, 2006: Morphometry-based mapping of debris-covered glaciers. – *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 10360, 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-10360.
- GADES, A., H. CONWAY, N. NERESON, N. NAITO & T. KADOTA, 2000: Radio echo-sounding through supraglacial debris on Lirung and Khumbu Glaciers, Nepal Himalayas. – *IAHS Publication*, **264**: 13-22.
- HEMPEL, A., 2005: Vergleich von Methoden zur Abgrenzung schuttbedeckter Gletscher im Khumbu Himal mit ASTER- und Landsatdaten. – *Studienarbeit*, 70 S., Institut für Kartographie, TU Dresden.
- HERBST, P., NEUBAUER, F. & M. SCHÖPFER, 2006: The development of brittle structures in an alpine valley glacier: Pasterzenkees, Austria, 1887–1997 – *Journal of Glaciology* **52** (176): im Druck.
- IWATA, S., O. WATANABE & H. FUSHIMI, 1980: Surface morphology in the ablation area of the Khumbu glacier. – *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice* **41**(Special Issue): 9-17.
- MOOL, P. K., S. R. BAJRACHARRYA & S. P. JOSHI, 2001: Inventory of Glaciers, Glacial Lakes, Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region, Nepal. – 386 S., ICIMOD, Kathmandu, Nepal.
- MORIBYASHI, S. & H. HIGUCHI, 1977: Characteristics of glaciers in the Khumbu region and their recent variations. – *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice* **39** (Special Issue): 3-6.
- NATIONAL GEOGRAPHIC*, 1988: Karte “Mount Everest – Sargarmatha (Nepali) – Qomolangma (Chinese)”, Maßstab 1:50.000.
- PAUL, F., C. HUGGEL & A. KÄÄB, 2004: Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping of debris-covered glaciers. – *Remote Sensing of Environment* **89**(4): 510-518.
- PAUL, F., A. KÄÄB, M. MAISCH, T. KELLENBERGER & W. HAEBERLI, 2002: The new remote sensing derived Swiss Glacier Inventory: I. Methods. – *Annals of Glaciology* **34**: 355-361.
- RANZI, R., G. GROSSI, L. IACOVELLI & T. TASCHNER, 2004: Use of multispectral ASTER images for mapping debris-covered glaciers within the GLIMS Project. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* **Vol. II**: 1144-1147.
- SCHMIDT, J. & R. DIKAU, 1999: Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - semantics, methods, future needs. – R. DIKAU & H. SAURER

(Hg.):_GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modeling of the Natural Environment: 153-173.

SIDJAK, R. W. & R. D. WHEATE, 1999: Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. – International Journal of Remote Sensing **20**: 273-284.

SWISSTOPO, 2004: DHM25 - Das digitale Höhenmodell der Schweiz. – 15 S., Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

WATANABE, O., S. IWATA & H. FUSHIMI, 1986: Topographic characteristics in the ablation area of the Khumbu Glacier, Nepal Himalaya. – Annals of Glaciology **8**: 177-180.