



Praktische Anwendung von speziellen Spline-Verfahren zur Gletscherkinematik am Beispiel eines aktiven Blockgletschers (Tirol)

Olga Wälder ¹, Karl Krainer ², Wolfram Mostler ³

¹ *Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, Mommsenstraße 13, D-01062 Dresden*

² *Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck*

³ *Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck*

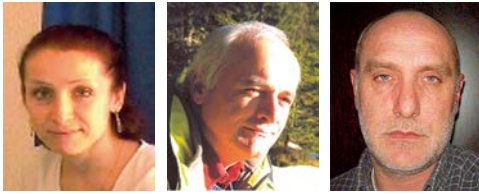
VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **92** (3–4), S. 107–117

2004

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Waelder_VGI_200409,  
Title = {Praktische Anwendung von speziellen Spline-Verfahren zur  
Gletscherkinematik am Beispiel eines aktiven Blockgletschers (Tirol)},  
Author = {W{\a}lder, Olga and Krainer, Karl and Mostler, Wolfram},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {107--117},  
Number = {3--4},  
Year = {2004},  
Volume = {92}  
}
```





Olga Wälder, Dresden;

Karl Krainer und Wolfram Mostler, Innsbruck

Praktische Anwendung von speziellen Spline-Verfahren zur Gletscherkinematik am Beispiel eines aktiven Blockgletschers (Tirol)

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen an einem hochaktiven Blockgletscher im Inneren Reichenkar (westliche Stubai Alpen, Tirol) vorgestellt. Die Erfassung der Fließbewegung, insbesondere ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung, ist sehr wesentlich für das Verständnis des Bewegungsmechanismus und der Dynamik eines Blockgletschers. Die Verwendung des GPS-Meßsystems führte im Hochgebirge im Vergleich zu herkömmlichen geodätischen und photogrammetrischen Methoden zu verbesserter Messgenauigkeit. Ein mathematisches Modell und seine praktische Anwendung bei der Beschreibung sowie Interpretation von zeitlich-räumlichen Prozessen am Blockgletscher werden diskutiert.

Abstract

In this paper some investigations on the highly active rock glacier Reichenkar (western Stubai Alps, Tyrol) are presented. The study of the flow velocity of rock glaciers is very important for understanding the flow mechanism and the dynamic of rock glaciers. Of special interest is the time-space distribution of the movement. The use of the GPS-method leads to an improved accuracy of measurements compared to the classical geodetic and photogrammetric methods. A mathematical model and its practical application in describing and interpreting time-space processes of a rock glacier are discussed.

1. Einleitung

Alle Prozesse bzw. Gesetzmäßigkeiten, die in den Geowissenschaften untersucht werden, können räumlich-zeitlichen Phänomenen zugeordnet werden. Die Erfassung von Datenmaterial spielt bei der weiteren Analyse eine enorm wichtige Rolle.

Die mathematische Basis der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen stellen spezielle Interpolationsmethoden für differentialgeometrische Größen dar, die eine bequeme und aussagekräftige Analyse von solchem Datenmaterial ermöglichen, das nicht auf konventionelle Weise bearbeitet werden kann, siehe [46]-[49]. Als geeignetes Beispiel solcher Daten können die Untersuchungen zur Gletscherkinematik genannt werden, vgl. Abschnitt 2.

Im Rahmen von Forschungsprojekten werden seit 1997 an einigen ausgewählten Blockgletschern der westlichen Stubai Alpen (Inneres Reichenkar, Sulzkar), westlichen Ötztaler Alpen (Kaiserbergtal, Ölgrube) und der Schobergruppe sowohl die äußere Morphologie als auch der interne Aufbau aktiver Blockgletscher im Detail erfasst, wobei auch das geologische und hydrogeologische Umfeld (Gesteinsaufbau, Zerlegungsgrad der Gesteine, Verwitterungsgrad, Schuttanfall,

Vergletscherung im Einzugsgebiet, Niederschläge etc.) in die Untersuchungen miteinbezogen wird, siehe [5], [24]-[29]. Erstmals wurden die Bewegungsraten am hochaktiven Blockgletscher im Inneren Reichenkar mit der GPS-Methode gemessen, siehe [9], [10]. Die Erfassung der Fließbewegung, insbesondere der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Fließbewegung, ist sehr wesentlich für das Verständnis des Bewegungsmechanismus und der Dynamik eines Blockgletschers. Allerdings lässt sich aus der Fließbewegung allein noch kein Fließmodell ableiten.

Die Anwendung des GPS-Meßsystems führte im Hochgebirge im Vergleich zu den herkömmlichen geodätischen und photogrammetrischen Methoden zu verbesserter Messgenauigkeit. Darüber hinaus bilden die Messergebnisse eine wichtige Grundlage zur Interpretation des Fließverhaltens und der Dynamik aktiver Blockgletscher. Es ist geplant, die Messungen über einen längeren Zeitraum fortzuführen. Umso wichtiger ist es, ein geeignetes mathematisches Modell zur Beschreibung sowie Interpretation dieser Prozesse weiter zu entwickeln bzw. zu modifizieren. In der vorliegenden Arbeit werden einige Ergebnisse vorgestellt und kurz diskutiert.

2. Aktive Blockgletscher

2.1 Definition und Entstehung

Blockgletscher sind lappen- bis zungenförmige Körper aus gefrorenem Lockermaterial (Hangschutt, Moräne) und Eislinen bzw. Eiskörpern, die sich langsam hangabwärts bewegen. Die Bewegung erfolgt ähnlich wie bei Gletschern durch Kriechprozesse als Folge der internen Deformation. Die Entstehung von Blockgletschern ist nach wie vor sehr umstritten. Während in [3], [4] und [16], [17] Blockgletscher ausschließlich als Erscheinungen des alpinen Permafrostes auffassen („ice-cemented rock glaciers“) und andere Entstehungsmöglichkeiten strikt ablehnen, betonen andere Autoren wie [1], [11], [19], [20], [21], [31], [34], [34], [41]-[43], [44], [45] auch die Möglichkeit der Entstehung aus zurückschmelzenden Kargletschern („ice-cored rock glaciers“). Im Rahmen einer von der American Geophysical Union initiierten Chapman Conference im August 1996 sind alle Teilnehmer einstimmig zur Auffassung gekommen, dass es auch Blockgletscher glazialen Ursprungs (ice-cored rock glacier) gibt, siehe [12]. Damit sollte der jahrzehntelange Streit über die Entstehung von Blockgletschern nun endgültig beendet sein. Auf alle Fälle zählen Blockgletscher zu den wichtigsten und häufigsten morphologischen Erscheinungen des Hochgebirges.

Blockgletscher sind in den Ostalpen, vor allem in den Zentralalpen oberhalb ca. 2.500 m Seehöhe weit verbreitet. In einem jüngst veröffentlichten Blockgletscherinventar hat [30] für den östlichen Teil der österreichischen Alpen 1451 Blockgletscher (1169 fossile und 282 intakte) aufgelistet. Auch aus den Stubai- und Ötztal- Alpen sowie aus der Silvretta Gruppe sind zahlreiche, teils sehr große und hochaktive Blockgletscher bekannt, siehe [13], [14]. Während aus den Westalpen, insbesondere aus den Schweizer Alpen bereits zahlreiche Detailstudien von Blockgletschern vorliegen, sind in den Ostalpen bislang nur wenige Blockgletscher untersucht worden, siehe [30], moderne Untersuchungen fehlen weitgehend.

2.2 Bedeutung von Blockgletschern

In den letzten 150 Jahren (seit 1850) haben durch die Erwärmung die Alpengletscher ca. ein Drittel ihrer Fläche und die Hälfte ihrer Masse verloren, da die Schneegrenze um ca. 100 m angestiegen ist. Die Veränderungen der Alpengletscher werden auch seit gut hundert Jahren aufgezeichnet, so dass wir darüber sehr gut Bescheid wissen.

Kaum bekannt sind dagegen die Veränderungen der aktiven Blockgletscher in diesem Zeitraum. Veränderungen an aktiven Blockgletschern sind deshalb nahezu unbekannt, weil das Eis der aktiven Blockgletscher unter einer mehr oder weniger dicken, nicht gefrorenen Schuttlage verborgen und daher direkten Untersuchungen nicht zugänglich ist. In aktiven Blockgletschern sind derzeit große Schuttmassen im Hochgebirge stabilisiert, indem sie gefroren sind.

Die gegenwärtige Erwärmung könnte allerdings in den periglazialen Bereichen des Hochgebirges durch das fortschreitende Abschmelzen des Eises in aktiven Blockgletschern in nächster Zukunft zu einer beträchtlichen Zunahme von Massenbewegungen (Murgängen, Hangrutschungen, Felsstürzen etc.) führen und dadurch Straßen, Seilbahnen, Schipisten etc. gefährden. Beispiele aus den Schweizer Alpen verdeutlichen diese Problematik.

2.3 Bewegungsmessungen an aktiven Blockgletschern

Bewegungsmessungen werden an aktiven Blockgletschern bereits seit über 70 Jahren durchgeführt, langjährige Messreihen existieren jedoch im Vergleich zu normalen Gletschern nur von ganz wenigen Blockgletschern. Die Messmethodik reicht von einfachsten, recht ungenauen Vermessungen der Stirn oder von Steinreihen am Blockgletscher bis hin zu geodätischen Präzisionsmessungen mit Theodoliten und photogrammetrischen Auswertungen von Luftbildern, siehe [16], [3]. Eine Zusammenfassung der bislang gemessenen Bewegungsraten von aktiven Blockgletschern ist in den Arbeiten von [3], [16] und [38] enthalten.

Die ersten Messdaten über Fließbewegungen stammen vom Val Sassa Blockgletscher in den Schweizer Alpen mit einer durchschnittlichen Bewegungsrate von 168 cm/Jahr, vgl. [7], [8]. Laut [40] wurden in einer mehrjährigen Messreihe (1949 – 1957) am Clear Creek Blockgletscher in den Alaska Range durchschnittliche Fließbewegungen von 57 cm/Jahr im unteren Teil und 64 cm/Jahr im oberen Teil festgestellt. Seither wurden auch an vielen anderen aktiven Blockgletschern Bewegungsmessungen durchgeführt, wobei meistens nur ein oder zwei Profile quer zur Bewegungsrichtung eingemessen wurden. Jede Profilreihe besteht meist aus 5-6 markierten Gesteinsblöcken. Die Messungen erfolgten meist nur über wenige Jahre.

In Österreich hat Pillewizer bereits 1938 mit der systematischen Vermessung von aktiven Blockgletschern der Ötztaler Alpen (ueres und Inneres Hochebenkar bei Obergurgl, Rotschliffkar im Taschachtal, lgruben-Blockgletscher im Kaunertal) begonnen. Der Blockgletscher im äußeren Hochebenkar bei Obergurgl wird seither als einziger Blockgletscher laufend nachgemessen, weist somit in Österreich den weitaus längsten Beobachtungszeitraum von immerhin 70 Jahren auf, siehe [18], [36] und [37]. Seit 1994 werden auch am Dosener Blockgletscher (Ankogelgruppe) umfangreiche Bewegungsmessungen durchgeführt.

Nach [23] ist die Stirn des Blockgletschers im äußeren Hochebenkar in den letzten 50 Jahren um 148 m vorgestoßen, was einer mittleren jährlichen Fließgeschwindigkeit von 3 m/Jahr entspricht.

Nach luftbildphotogrammetrischen Auswertungen betrug die mittlere jährliche Fließgeschwindigkeit des Dosener Blockgletschers (Ankogelgruppe) im Zeitraum 1954 – 1975 21 cm und hat sich im Zeitraum 1975 – 1993 auf 12 cm verlangsamt. Von 1954 bis 1993 hat sich die Blockgletscherstirn um 6.6 m vorbewegt, vgl. [23].

Die meisten aktiven Blockgletscher zeigen jährliche Bewegungsraten von einigen cm bis 1 m (vgl. [16]), meist liegensie deutlich unter 1 m (vgl. [4], [6], [33]–[35], [40]). Nach [3] liegen die Werte zwischen 1 – 2 cm (Minimum) und 100 – 200 cm (Maximum). Höhere Fließbewegungen sind sehr selten und meist auf spezielle topographische Verhältnisse (extrem steiles Gefälle im Stirnbereich) zurückzuführen. Die bislang höchsten Fließbewegungen wurden am Blockgletscher im äußeren Hochebenkar mit 5 m/Jahr gemessen, vgl. [37].



Abb. 1: Der aktive Blockgletscher Reichenkar in den österreichischen Alpen (Quelle: K. Krainer, Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck).

2.4 Reichenkar Blockgletscher

Der Reichenkar Blockgletscher liegt im Inneren Reichenkar, einem kleinen Seitental, das in Form eines Hangetales in das Sulztal mündet, siehe Abb. 1 und 2. Das Innere Reichenkar liegt ca. 4 km SE von Längenfeld im otztal bzw. 3 km S von Gries im Sulztal (westliche Stubaier Alpen).

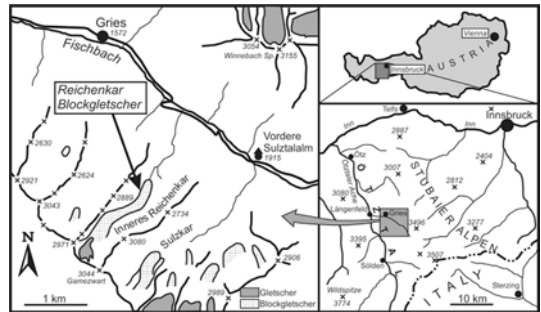


Abb. 2: Geographische Übersichtskarte zur Lage des Reichenkar Blockgletschers

Der Reichenkar Blockgletscher entwickelt sich aus einem schuttbedeckten Kargletscher, ist somit ein typischer „ice-cored rock glacier“ (Blockgletscher mit einem Kern aus Gletschereis) im Sinne von [33].

Im hintersten Teil des Inneren Reichenkars befindet sich ein kleiner schuttfreier Kargletscher. In einer deutlich ausgebildeten, ca. 5 m tiefen Depression im Übergangsbereich Kargletscher-Blockgletscher in ca. 2.730 m Seehöhe ist deutlich zu erkennen, wie das Gletschereis unter die Schuttmassen des Kargletschers hineinzieht.

Die Schuttmassen stammen vor allem aus den steilen östlichen Karwanden. Eindrucksvoll ist zu erkennen, wie die Schutfahnen auf den Kargletscher herunterziehen, am Blockgletscher umbiegen und von diesem mittransportiert werden.

Dadurch entstehen am Blockgletscher im oberen Teil markante longitudinale Rücken und Furchen.

Von der Depression bis zur Stirn ist der Blockgletscher 1.400 m lang; im mittleren und unteren Teil 170 – 190 m breit und zeigt die Form eines Talgletschers. Mit seiner imposanten, über 30 m mächtigen aktiven Stirn überfährt er eine Almweide, die Stirn endet in einer Seehöhe von 2.310 m. Am Fuße der Stirn befindet sich eine Blockgletscherquelle, an der die gesamte Schmelzwassermenge des Blockgletschers austritt. Während die Abflussmenge starken täglichen und saisonalen Schwankungen unterworfen ist,

bleibt die Wassertemperatur den ganzen Sommer hindurch konstant bei $0.7 - 0.9^{\circ}\text{C}$.

Der steile mittlere Abschnitt weist eine unruhige Oberfläche auf, hervorgerufen durch besonders aktive Schuttkörper und quer zur Fließrichtung ausgebildete, schuttverfüllte Spalten. Der relativ flache Zungenbereich ist durch zahlreiche transversale Loben charakterisiert.

Der Festgesteinsuntergrund des Einzugsgebietes besteht aus SE-NW-steichenden, steil nach N einfallenden, stark geklüfteten und von zahlreichen Störungen durchzogenen Amphiboliten und Eklogiten, die im Kambereich und entlang von Störungen infolge Frostverwitterung stark aufglockert sind. Entsprechend setzt sich der Blockgletscher ausschließlich aus Amphibolit- und Eklogitschutt zusammen.

2.5 GPS-Vermessung

Die Fließbewegung eines Gletschers wird dadurch festgestellt, dass Punkte auf der Gletscheroberfläche eingemessen und deren Lage- und Höhenkoordinaten berechnet werden. Bei Wiederholungsmessungen in bestimmten Zeitabständen werden je nach Aufgabenstellung neue Koordinaten und Höhen berechnet. Aus deren zeitlichen Veränderungen folgt das Fließverhalten des Gletschers.

Die Markierung und das Wiederauffinden der Messpunkte sind bei einem Blockgletscher nicht so schwierig wie bei einem Eisgletscher. Zusätzlich stellt sich bei Blockgletschern jedoch die Aufgabe, die individuellen Bewegungen der Steinblöcke, auf welchen die Messmarken eingemeißelt sind, von der allgemeinen Fließbewegung zu trennen. Die wichtigste Aufgabe bei Bewegungsmessungen ist die Herstellung eines fixen, über lange Zeiträume stabilen und reproduzierbaren Koordinatensystems. Jede Veränderung des Koordinatensystems täuscht Bewegungsvektoren vor, die in Wirklichkeit nicht vorkommen. Gelingt es nicht, ein reproduzierbar stabiles Koordinatensystem zu schaffen, sind sämtliche Messungen und deren Ergebnisse unbrauchbar.

Herkömmliche Messmethoden mit Theodolit und Entfernungsmesser waren darauf angewiesen, dass entlang der Gletscherränder fixe, unbewegliche Punkte, im allgemeinen Felspunkte, gefunden wurden, von denen aus die einzelnen Gletscherpunkte eingemessen werden konnten. Die Nähe fester Felspunkte zum fließenden Gletscher war entscheidend für den Erfolg und die Genauigkeit der Bewegungsmessungen.

Mit der Entwicklung von hochpräzisen GPS-Satellitennavigationsgeräten ist das Problem des stabilen Koordinatensystems wesentlich leichter lösbar. Feste Felspunkte müssen nicht mehr nahe dem Gletscher liegen, es braucht auch keine Sichtverbindung zu den Messpunkten vorhanden sein. Methoden der Gletschervermessungen mittels GPS werden im vorliegenden Projekt entwickelt. Erste Ergebnisse lassen eine hohe Genauigkeit erwarten und bestätigen die Zuverlässigkeit von GPS für die Gletscherforschung.

2.6 Messmethodik

Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens des aktiven Blockgletschers im Reichenkar wurden am Blockgletscher insgesamt 46 markierte Messpunkte (größere Felsblöcke mit eingemeißelten und mit roter Farbe markierten Messmarken) sowie 5 außerhalb des Blockgletschers liegende Fixpunkte mit dem Satellitennavigationssystem GPS (Global Positioning System) eingemessen.

Die Messpunkte 1 – 26 liegen im flacheren Zungenbereich und umfassen 5 Profilreihen. Die Messpunkte 27 – 31 bilden eine Profilreihe am Fuße des steileren Mittelteiles, die Messpunkte 32 – 37 bilden eine Profilreihe im unteren Mittelteil, die Messpunkte 38 – 41 eine Profilreihe im mittleren Steilbereich, und die Punkte 42 bis 46 liegen im flachen oberen Teil des Blockgletschers.

Die erste Messung („Nullmessung“) erfolgte vom 28. – 30. Juli 1997, die erste Nachmessung wurde Ende Oktober (23. – 24.10) 1997 durchgeführt, wobei witterungsbedingt nur die Messpunkte 1 – 37 nachgemessen werden konnten (Zunge und unterer Abschnitt der Steilstufe). Die zweite Nachmessung aller Punkte erfolgte am 29. und 30. Juli 1998, seither wurden mit Ausnahme des Jahres 1999 (extreme Schneelage) die Messpunkte jährlich nachgemessen.

Aus Luftbildvergleichen (Luftbilder 1954 und 1990) konnte für diesen Zeitraum von 36 Jahren für den Reichenkar-Blockgletscher ein Vorstoß der Zunge um insgesamt ca. 23 m ermittelt werden, was einer durchschnittlichen jährlichen Bewegungsrate von 0.64 m entspricht. Die GPS-Messungen ergaben eine deutlich höhere Fließgeschwindigkeit. Offensichtlich hat die Fließgeschwindigkeit in den letzten Jahren erheblich zugenommen.

Generell ergaben die Messungen hohe Bewegungsraten für die Zunge, extrem hohe Bewegungsraten für den Steilbereich und niedrige Bewegungsraten für den oberen, flachen Bereich.

Die drei morphologischen Abschnitte des Reichenkar Blockgletschers (flacher Zungenteil, steiler Mittelteil, flacher oberer Teil) zeigen auch deutliche Unterschiede in den jährlichen Bewegungsraten:

Der relativ flache Zungenbereich zeigt über-raschend hohe und einheitliche Bewegungsraten mit maximaler Fließbewegung bis zu 2.5 m im zentralen Teil, die Bewegungen nehmen zu den Rändern hin gleichmäßig ab.

Im steilen Mittelteil sind die Bewegungen sehr unterschiedlich, teilweise deutlich geringer als im Zungenbereich (Punkte 32 – 35 mit 48 – 99 cm), teilweise extrem hoch mit bis zu fast 7 m. Die Bewegungsmessungen zeigen auch sehr schön, dass die orographisch linke Seite des Blockgletschers deutlich höhere Bewegungen zeigt und somit wesentlich aktiver ist als die orographisch rechte Seite. Innerhalb der aktiveren, linken Seite sind die Fließbewegungen recht unterschiedlich.

Im oberen, flachen Abschnitt wurden dagegen die geringsten Fließbewegungen gemessen, sie liegen durchwegs unter 50 cm.

Die Messungen wurden zunächst mit dem LEICA System GPS 200, seit 2002 mit dem GPS-Gerät Z Extreme 12 Kanal L1 und L2 von Ashtec, und ab 2004 mit dem neuen, verbesserten Gerät Z Max durchgeführt. In den Jahren 2000 und 2001 wurden zur Kontrolle der GPS-Messungen die Punkte auch mit einem Theodoliten vermessen.

Die GPS-Geräte sind relativ leicht und auch leicht zu transportieren und im Gelände einfach zu bedienen. Die Messung erfolgt relativ schnell (mit dem LEICA System pro Punkt 10-15 min, mit den neuen Geräten von Ashtec wenige Sekunden). Außerhalb des Blockgletschers sind nur wenige Fixpunkte erforderlich, vor allem ist ein Sichtkontakt zwischen den einzelnen Messpunkten und Fixpunkten nicht notwendig.

Es können mehrere Geräte gleichzeitig eingesetzt werden. Die Messgenauigkeit liegt bei ± 0.5 mm.

Die Messstellen können der Abb. 3 entnommen werden. Aufgrund der ständigen Fließbewegung des Blockgletschers verkippem einzelne Messpunkte. Man läuft zwar auf dem Blockgletscher von Jahr zu Jahr näherungsweise identische Routen, Fehler können aber nicht ausgeschlossen werden. Es kann auch passieren, dass einzelne Messpunkte nicht mehr aufgefunden werden. Aufgrund von Witterungseinflüssen

im Hochgebirge können manchmal einige Stellen unpassierbar sein oder nicht erreicht werden. Die markierten Messstellen verteilen sich nicht gitterförmig auf dem Blockgletscher. Daher war eine geeignete Interpolation der gewonnenen Daten vor dem Beginn weiteren Untersuchungen notwendig, vgl. Abschnitt 3.

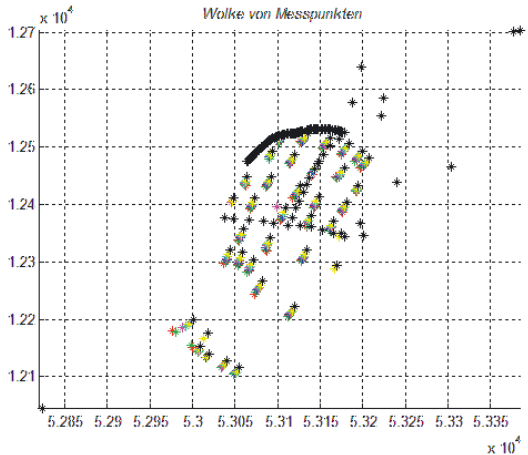


Abb. 3: Die räumlich-zeitliche Darstellung der Messungen am aktiven Blockgletscher Reichenkar (1997-2004 durch rot-grün-blau-margenta-cyan-gelb-schwarz).

3. Eine kurze Darstellung des mathematischen Modells

Beim theoretischen Modell handelt es sich um so genannte gemischte Wavelet-Splines, vgl. [46]-[49]. Diese dienen unter anderem der Erhöhung der Approximationsgenauigkeit des Georeliefs, vgl. [48], [49]. Die ursprüngliche Interpolation der Daten wurden nach dem speziell für anisotrope Medien entwickelten Verfahren aus [49] durchgeführt.

Es wird vorausgesetzt, dass die unbekannte Funktion $z = z(x, y)$ der Oberfläche des Georeliefs die folgende sequentielle Approximation (Wavelet-Spline-Darstellung) $P_k(x, y)$, $k = 1, 2, \dots$ erlaubt, siehe [46]:

$$\begin{aligned}
 P_1(x, y) &= a_0 + a_1 f_1(x) + b_1 f_1(y) + c_1 f_1(x) f_1(y), \\
 P_2(x, y) &= P_1(x, y) + a_2(x, y) f_2(x) + b_2(x, y) f_2(y) + \\
 &\quad c_2(x, y) f_2(x) f_1(y), \dots \\
 P_{k+1}(x, y) &= P_k(x, y) + a_{k+1}(x, y) f_{k+1}(x) + \\
 &\quad b_{k+1}(x, y) f_{k+1}(y) + \\
 &\quad c_{k+1}(x, y) f_{k+1}(x) f_{k+1}(y), \\
 k &= 2, 3, \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

wobei mit $f_k(\cdot)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ die Wavelet-funktionen bezeichnet werden. Mit k wird der Feinheitsgrad der Approximation beschrieben. Wir benutzen im vorliegenden Beitrag sinusoidale, zickzackförmige und polynomiale Waveletfunktionen. Zum Beispiel gilt für sinusoidale Waveletfunktionen:

$$f_k(x) = \sin(2^{k-2}\pi x), \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Die Koeffizienten a, b, c sind Amplituden. Diese werden individuell für jede Gittermasche bestimmt. Dies führt zur lokalen Adaption von Wavelet-Splines aus (1) im Gegensatz zu klassischen Ansätzen der Wavelet-Theorie. Die Besonderheit bei der Verwendung gemischter, also nicht auf eine Art der Waveletfunktion fixierter Waveletfunktionen besteht darin, dass die zusätzlich eingebaute, schrittweise Überwachung der Genauigkeit verschiedener Möglichkeiten zur Auswahl der geeignetsten Kombination von Waveletfunktionen im Laufe des Approximationsprozesses führt.

Wir bezeichnen mit $S(x, y)$ eine für bestimmten Parameter k berechnete Wavelet-Spline-Darstellung $P_k(x, y)$ aus (1). Der Begriff „Reliefenergie“ R ist in der Kartografie geläufig und kann in Matrixform wie folgt berechnet werden:

$$R = R(i, j) = \begin{cases} \frac{(\max(S_4(i, j)) - \min(S_4(i, j)))}{|x_{i+1} - x_i| \times |y_{j+1} - y_j|}, & \text{für } i, j = 1, N - 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{mit } S_4(i, j) = [S(x_i, y_i), S(x_{i+1}, y_i), S(x_{i+1}, y_{i+1}), S(x_i, y_{i+1})]$$

Wenn zwei verschiedene, mittels (1) approximierte zeitliche Epochen $z_1(x, y)$ und $z_2(x, y)$ auf ihre zeitliche Verzerrung analysiert werden sollen, kann der Begriff „Surface Dilatation“ (Oberflächenverzerrung, hier mit DIL bezeichnet) zur Analyse herangezogen werden, vgl. [39]. Für zwei zeitliche Epochen eines dynamischen Georeliefs gilt in diesem Fall:

$$DIL = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{mit} \quad (4)$$

$$\lambda_1 = 0.5 \cdot \left(PAR_1 + \sqrt{PAR_1^2 - 4 \cdot PAR_2} \right),$$

$$\lambda_2 = 0.5 \cdot \left(PAR_1 - \sqrt{PAR_1^2 - 4 \cdot PAR_2} \right) \quad \text{und}$$

$$PAR_1 = tr(E \cdot A^{-1}), \quad PAR_2 = det(E \cdot A^{-1}),$$

wobei

$$A = \begin{pmatrix} 1 + \left(\frac{\partial z_1(x, y)}{\partial x} \right)^2 & \frac{\partial z_1(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial z_1(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial z_1(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial z_1(x, y)}{\partial y} & 1 + \left(\frac{\partial z_1(x, y)}{\partial y} \right)^2 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 + \left(\frac{\partial z_2(x, y)}{\partial x} \right)^2 & \frac{\partial z_2(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial z_2(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial z_2(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial z_2(x, y)}{\partial y} & 1 + \left(\frac{\partial z_2(x, y)}{\partial y} \right)^2 \end{pmatrix},$$

$$E = 0.5(C - A)$$

Die Deformationsanalyse der Oberfläche kann dann mittels der auf Intervall (0,1) transformierten (normierten) Surface Dilatation aus (4) veranschaulicht werden.

Die praktische Anwendung dieses Verfahrens wird an Hand der Analyse von induzierter Gletscherkinematik vom Blockgletscher Reichenkar im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

4. Eine Fallstudie: Blockgletscher Reichenkar

Durch die zeitliche Untersuchung des Blockgletschers Reichenkar konnte teilweise eine Veränderung der Gletscheroberfläche nachgewiesen werden, siehe Abb. 4–6. Dies kann entweder mit der Zunahme der Fließbewegung oder mit der Veränderung der Eismasse erklärt werden.

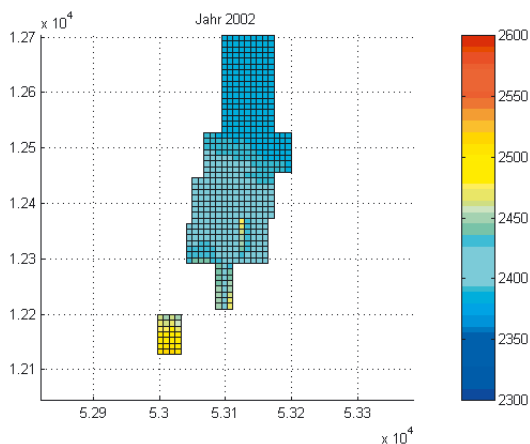


Abb. 4: Die mittels Splines interpolierte Oberfläche des Blockgletschers Reichenkar im Jahr 2002, [m].

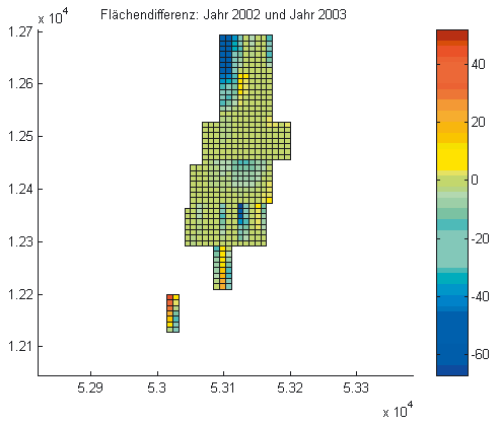


Abb. 5: Die Veränderung der Oberfläche des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2002 und 2003, [m].

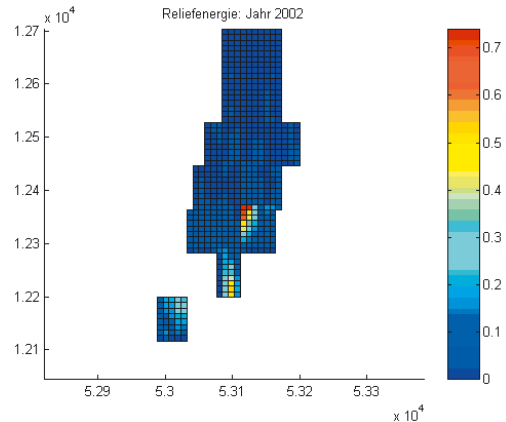


Abb. 7: Die Reliefenergie des Blockgletschers Reichenkar im Jahr 2002, [1/m].

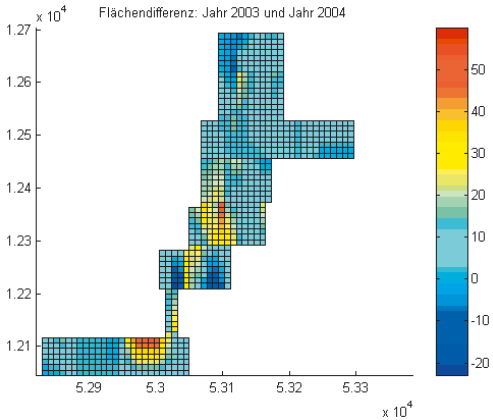


Abb. 6: Die Veränderung der Oberfläche des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2003 und 2004, [m].

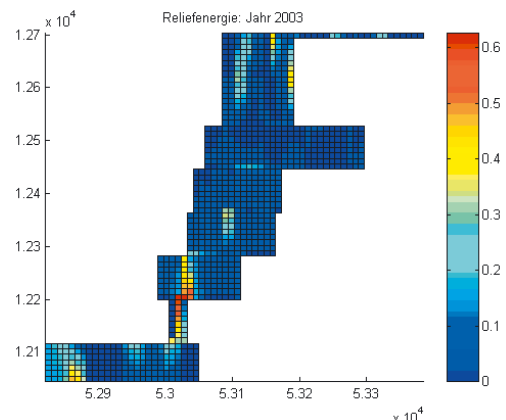


Abb. 8: Die Reliefenergie des Blockgletschers Reichenkar im Jahr 2003, [1/m].

Es ist interessant, dass die Extremstellen der Flächendifferenz aus Abb. 6 entlang eines Pfades verteilt sind. Dieser Pfad entspricht möglicherweise dem Verlauf einer unter der Blockgletscheroberflache verlaufenden Schmelzwasserrinne.

Mit Hilfe der erzeugten Spline-Oberflächen konnten einige räumlich-zeitliche, differentialgeometrische Größen aus Abschnitt 3 wie Reliefenergie, Surface Dilatation (Oberflächenverzerrung) abgeleitet werden, siehe Abb. 7–11.

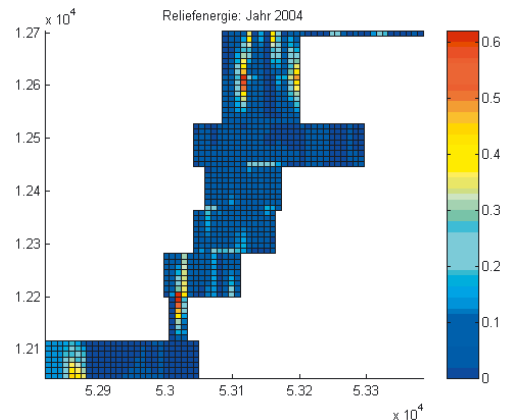


Abb. 9: Die Reliefenergie des Blockgletschers Reichenkar im Jahr 2004, [1/m].

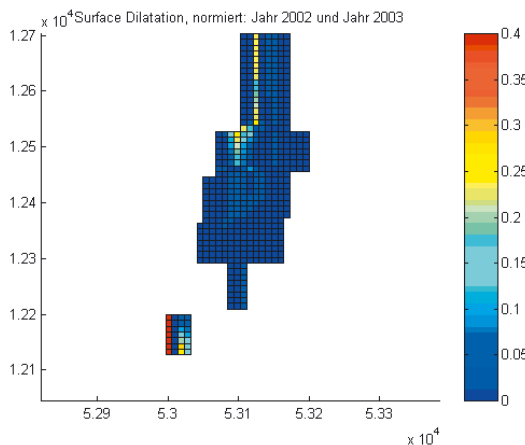


Abb. 10: Surface Dilatation (Oberflächenverzerrung, normiert) des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2002 und 2003.

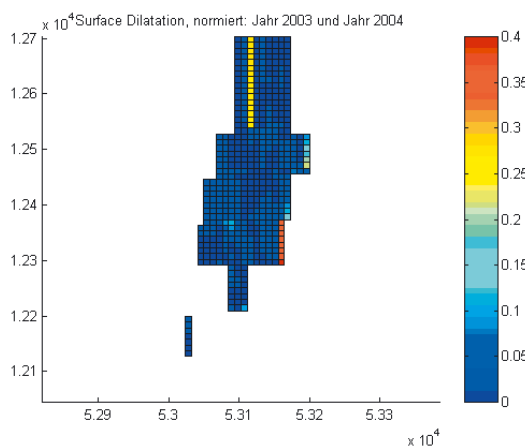


Abb. 11: Surface Dilatation (Oberflächenverzerrung, normiert) des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2003 und 2004.

Die Reliefeenergie wie in Abb. 9 dient als Maß für die Variabilität der Höhenunterschiede im Relief. Man kann erkennen, dass im Zungenbereich diese Variabilität am stärksten ausgeprägt ist. Die Extremstellen der Surface Dilatation, siehe Abb. 10, 11, zeichnen die Bereiche aus, in denen die Oberflächenzerrung am auffälligsten ist. Im mittleren Bereich des Gletschers können solchen Stellen mit den Umrissen der Eiskörper zusammenhängen.

Die spezielle Untersuchung der Länge des Verschiebungsvektors wies einige Extremstellen nach, siehe Abb. 12-13. Eine weitere Detailuntersuchung ihrer Verteilung kann möglicherweise die

Hypothese überprüfen, ob ihre räumliche Lage, ergänzt durch das Bild der Extremstellen der Oberflächenzerrung, stark mit der Lage des Eiskernes korreliert.

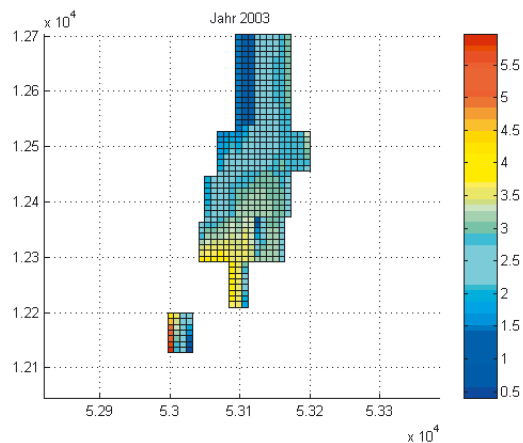


Abb. 12: Die Länge des Verschiebungsvektors des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2002 und 2003, [m].

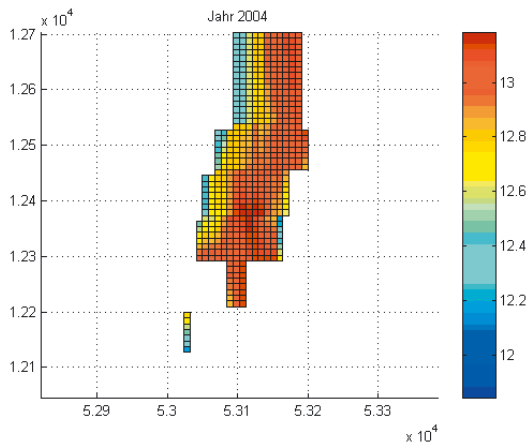


Abb. 13: Die Länge des Verschiebungsvektors des Blockgletschers Reichenkar in den Jahren 2003 und 2004, [m].

5. Ausblick und Diskussion

Der Reichenkar Blockgletscher zeigt eine Reihe von Merkmalen, die ihn als typischen „ice-cored rock glacier“ im Sinne von [33] ausweisen: ein kleiner, im wesentlichen schutfreier Kargletscher, der unter die Schuttlage (aktive Lage des Blockgletschers) hineinzieht und sich unter der Schuttbedeckung fortsetzt. Im Steilbereich kommt stellenweise massives Eis (Gletschereis)

wieder zum Vorschein. Aufgrund derverstarkten Ablation des schuttfreien Kargletschers ist im Übergangsbereich Kargletscher – schuttbedeckter Gletscher (Blockgletscher) eine schüsselförmige Depression entstanden. Charakteristisch sind auch die langgestreckten Rücken, die auf den Hangschutthalden senkrecht zur Fließrichtung des Blockgletschers verlaufen, bei Erreichen des Blockgletschers jedoch umbiegen und am Blockgletscher ausgeprägte longitudinale Rücken parallel zur Fließrichtung bilden. Ein weiteres Merkmal ist die ausgeprägte zungenförmige Form mit einem Längen-/Breitenverhältnis von 5.8. Die relativ flache Zunge des Reichenkar Blockgletschers bewegt sich derzeit mit außergewöhnlich hoher Geschwindigkeit (> 2 m/Jahr) über permafrostfreien Almboden vor. Diese Merkmale sind eindeutige Belege, dass sich der Reichenkar Blockgletscher aus einem schuttbedeckten Kargletscher entwickelt hat (Details siehe [24], [25], [28])

Nach [3] und [16] ist die Bewegung von Blockgletschern auf Kriechprozesse der gefrorenen Schuttmassen („mountain permafrost“) zurückzuführen.

Nach [41] hängt der Bewegungsmechanismus vom Blockgletschertyp ab (Permafrost- Blockgletscher oder Eiskern-Blockgletscher).

Nachdem der Reichenkar Blockgletscher ein typischer „Eiskern-Blockgletscher“ (ice-cored rock glacier) ist, kann angenommen werden, dass die Bewegung auf die interne Deformation des Gletschereises zurückgeht und der Schutt passiv am Gletschereis mittransportiert wird.

Nach [41] hängt die Fließgeschwindigkeit vor allem vom Gefälle und von der Mächtigkeit des Blockgletschers ab. Die kritische Mächtigkeit liegt bei 30 m, darunter sind keine merklichen Fließgeschwindigkeiten zu erwarten.

Im flachen, oberen Teil des Blockgletschers werden die vor allem von den steilen östlichen Karwanden auf den Reichenkar Ferner herabziehenden Hangschuttmassen passiv am Rücken des Gletschers mit sehr langsamen Fließbewegungen (sehr flach) weitertransportiert.

Die für aktive Blockgletscher extrem hohen Fließbewegungen im steilen Mittelteil sind möglicherweise auch auf Gleitbewegungen des Lokermaterials auf darunterliegendem Toteis (Gletschereis) zurückzuführen. Im Sommer 1997 konnte in einem extrem steilen Abschnitt auf der orographisch linken Seite in ca. 2.600 m Seehöhe reines, grobkörniges, massives Eis

festgestellt werden. Offensichtlich handelt es sich dabei um Toteis des zerfallenden, stark schuttbedeckten Zungenbereiches des Reichenkar Ferners. Im Steilbereich deutet die Oberflächenmorphologie darauf hin, dass es unterhalb der aktiven Lage massive Eiskörper gibt, die zerbrechen und sich zunehmend mit Blockwerk vermischen. Im Zungenbereich besteht der Blockgletscher vermutlich ebenfalls aus einem massiven Eiskern und einer auflagernden, mächtigeren Schuttlage. Die Zunge bewegt sich mit immer noch sehr hohen, recht einheitlichen Fließgeschwindigkeiten (kompressives Fließen) über den permafrostfreien Almboden. BTS-Messungen und Messungen der Quelltemperatur belegen eindeutig, dass sich auch noch im Zungenbereich unter einer mehrere m mächtigen ungefrorenen Schuttlage Eis befindet.

Die für den flachen Zungenbereich nach einem klassischen Verfahren aus [41] berechneten Fließgeschwindigkeiten von 0.2 – 0.4 m/Jahr sind viel niedriger als die tatsächlich gemessenen Werte von > 2 m/Jahr. Hydrogeologische Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Schmelzwässer des Blockgletschers, vor allem im Zungenbereich, grotells an der Basis des Blockgletschers fließen, was die Reibung an der Basis des Blockgletschers stark herabsetzt. Wir nehmen daher an, dass neben der internen Deformation basales Gleiten eine wesentliche Rolle spielt. Außerdem weisen die Fließbewegungen darauf hin, dass auch noch im Zungenbereich ein hoher Eisanteil vorhanden ist.

Gemischte Wavelet-Splines als mathematisches Modell zur Oberflächenapproximation stellen ein bequemes Werkzeug zur Analyse der Gletscherkinematik dar. Die sequentielle Berechnung und lokale Anpassung ihrer Koeffizienten erhöhen ihre praktische Relevanz. Die Visualisierung der nach diesem Verfahren gewonnenen Oberflächen wirkt „natürlich ungeglatet“ im Vergleich zu klassischen, auf der Triangulation oder sonstigen Vermaschungen basierenden, Spline-Darstellungen. Mit Hilfe der gewonnenen analytischen Gleichung der Oberfläche konnte die Ableitung von weiteren differentialgeometrischen Größen erleichtert werden.

Die Extremstellen der Surface Dilatation sprechen für auffällige Oberflachenzerrungen. Sie grenzen so zusagen die Bereiche besonderer Gletscheraktivitat ab. Zum Beispiel kann diese Aktivität unter der mit Schutt überdeckten Gletscheroberfläche aufgrund der Ab- bzw. Zunahme der Eismasse, des Gleitens der Eis-

körper an- bzw. miteinander hervorgerufen werden. Die Extremstellen der Länge der Verschiebungsvektoren können auf die Lage der Eiskörper deuten.

Eine detaillierte Überprüfung der Hypothese über den Zusammenhang der Verteilung der Extremstellen der Länge der Verschiebungsvektoren, der Surface Dilatation der Gletscheroberfläche und der Lage der Eiskörper des Blockgletschers ist bei späteren Untersuchungen vorgesehen.

Dank

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes (P 15218) durchgeführt, wir danken dem FWF – Der Wissenschaftsfonds für die finanzielle Unterstützung. Herrn Univ.-Prof. Dr. Günter Chesi und Dr. Thomas Weinold (Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck) für die Hilfe bei den GPS-Messungen.

Zudem sei dem Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst des Freistaates Sachsen gedankt, das durch die Gewährung einer Habilitationförderung ebenfalls zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Literatur

- [1] *Ackert, R. P. (1998): A rock glacier/debris-covered glacier system at Galena Creek, Absaroka Mountains, Wyoming. Geografiska Annaler 80, 267-276.*
- [2] *Barsch, D. (1992): Permafrost Creep and Rockglaciers. Permafrost and Periglacial Processes 3, 175-188.*
- [3] *Barsch, D. (1996): „Rockglaciers. Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments.“ Springer-Verlag, Berlin.*
- [4] *Benedict, J. B., Benedict, R. J., und Sanville, D. (1986): Arapaho Rock Glacier, Front Range, Colorado, U.S.A.: A 25-year Resurvey. Arctic and Alpine Research 18, 349-352.*
- [5] *Berger, J., Krainer, K. und Mostler, W.: Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). – Quaternary Research 62(3), 233-242.*
- [6] *Calkin, P. E., Haworth, L. A., und Ellis, J. M. (1987): Rock glaciers of Central Brooks Range, Alaska, U.S.A. In "Rock Glaciers." (J. R. Giardino, J. F. S. Jr., and J. D. Vitke, Eds.), pp. 65-82, London.*
- [7] *Chaix, A. (1919): Coulées de blocs (rock-glacier, rock stream) dans le Parc National Suisse de la Basse-Engadine. C. R. Séances Soc. Phys. Hist. Nat. Genève 36, 12-15.*
- [8] *Chaix, A. (1923): Les coulées de blocs du Parc National Suisse d'Engadine (Note préliminaire). Le Globe 62, 1-35.*
- [9] *Chesi, G., Krainer, K., Mostler, W. und Weinold, T. (1999): Bewegungsmessungen am aktiven Blockgletscher Inneres Reichenkar mit der GPS-Methode. – 10. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 1999, 223-227.*
- [10] *Chesi, G., Geissler, S., Krainer, K., Mostler, W. und Weinold, T. (2003): 5 Jahre Bewegungsmessungen am aktiven Blockgletscher Inneres Reichenkar (westliche Stubaier Alpen) mit der GPS-Methode. – In: Chesi, G. & Weinold, T. (Hrsg.), 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003, 201-205, H. Wichmann-Verlag, Heidelberg.*
- [11] *Clark, D. H., Clark, M. M., und Gillespie, A. R. (1994): Debris-Covered Glaciers in the Sierra Nevada, California, and Their Implications for Snowline Reconstructions. Quaternary Research 41, 139-153.*
- [12] *Clark, D. H., Steig, E. J., Potter, N., und Gillespie, A. R. (1998): Genetic variability of rock glaciers. Geografiska Annaler 80 A, 175-182.*
- [13] *Gerhold, N. (1967): Zur Glazialgeologie der westlichen Ötztaler Alpen. Veröffentlichungen des Museum Ferdinandeum 47, 5-50.*
- [14] *Gerhold, N. (1969): Zur Glazialgeologie der westlichen Ötztaler Alpen unter besonderer Berücksichtigung des Blockgletscherproblems. Veröffentlichungen des Museum Ferdinandeum 49, 45-78.*
- [15] *Glen, J. W. (1955): The creep of polycrystalline ice. Proc. R. Soc. London, Series A 228, 519-538.*
- [16] *Haeberli, W. (1985): Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich 77, 1-142.*
- [17] *Haeberli, W. (1989): Glacier ice-cored rock glaciers in the Yukon Territory, Canada. Journal of Glaciology 35, 294-295.*
- [18] *Haeberli, W., und Patzelt, G. (1982): Permafrost-kartierung im Gebiet der Hochebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 18, 127-150.*
- [19] *Humlum, O. (1996): Origin of Rock Glaciers: Observations from Mellemfjord, Disko Island, Central West Greenland. Permafrost and Periglacial Processes 7, 361-380.*
- [20] *Johnson, P. G. (1978): Rock glacier types and their drainage systems, Grizzly Creek, Yukon Territory. Canadian Journal of Earth Sciences 15, 1496-1507.*
- [21] *Johnson, P. G. (1980): Glacier-rock glacier transition in the Southwest Yukon Territory, Canada. Arctic and Alpine Research 12, 195-204.*
- [22] *Johnson, P. G., und Lacasse, D. (1988): Rock glaciers of the Dalton Range, Kluane Ranges, south-west Yukon Territory, Canada. Journal of Glaciology 34, 327-332.*
- [23] *Kaufmann, V. (1996): Der Dösener Blockgletscher – Studienkarten und Bewegungsmessungen. Arb. Inst. Geogr. Univ. Graz 33, 141-162.*
- [24] *Krainer, K. und Mostler, W. (2000): Reichenkar Rock Glacier, a glacial derived debris-ice system in the Western Stubaier Alps, Austria. – Permafrost and Periglacial Processes 11, 267-275.*
- [25] *Krainer, K. und Mostler, W. (2000): Aktive Blockgletscher als Transportsysteme für Schuttmassen im Hochgebirge: Der Reichenkar Blockgletscher in den westlichen Stubaier Alpen. – Geoforum Umhausen, Bd. 1, 28-43, Innsbruck.*
- [26] *Krainer, K. und Mostler, W. (2001): Der aktive Blockgletscher im Hinteren Langtal Kar, Gößnitz Tal (Schobergruppe, Nationalpark Hohe Tauern). – Wiss. Mitt. Nationalpark Hohe Tauern, Bd. 6, 139-168.*

- [27] *Krainer, K. und Mostler, W. (2002)*: Hydrology of active rock glaciers: Examples from the Austrian Alps. – Arctic, Antarctic, and Alpine Research 34(2): 142-149, Boulder.
- [28] *Krainer, K., Mostler, W. und Span, N. (2003)*: A glacier-derived, ice-cored rock glacier in the western Stubai Alps (Austria): Evidence from ice exposures and ground penetrating radar investigation. – Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 38, H.1: 21-34, Innsbruck.
- [29] *Krainer, K. und Mostler, W. (2004)*: Aufbau und Entstehung des aktiven Blockgletschers im Sulzkar, westliche Stubai Alpen (Tirol). – Geo.Alp 1:37-55.
- [30] *Lieb, G. K. (1996)*: Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. Arb. Inst. Geogr. Univ. Graz 33, 9-125.
- [31] *Outcalt, S. I., and Benedict, J. B. (1965)*: Photo interpretation of two types of rock glaciers in the Colorado front range, USA. Journal of Glaciology 5, 849-856.
- [32] *Paterson, W. S. B. (1994)*: „The Physics of Glaciers.“ Pergamon, Oxford. Pillewizer, W. (1957). Untersuchungen an Blockströmen der Ötztaler Alpen. Geomorphologische Abhandlungen des Geographischen Institutes der FU Berlin (Otto-Maull-Festschrift) 5, 37-50.
- [33] *Potter, N. (1972)*: Ice-Cored Rock Glacier, Galena Creek, Northern Absaroka Mountains, Wyoming. Geological Society of America Bulletin 83, 3025-3058.
- [34] *Potter, N., Steig, E. J., Clark, D. H., Speece, M. A., Clark, G. M., and Updike, A. B. (1998)*: Galena Creek rock glacier revisited – new observations on an old controversy. Geografiska Annaler 80, 251-265.
- [35] *Sloan, V. F., and Dyke, L. D. (1998)*: Decadal and millennial velocities of rock glaciers, Selwyn Mountains, Canada. Geografiska Annaler 80, 237-249.
- [36] *Vietoris, L. (1958)*: Der Blockgletscher des äußeren Hochebenkars. Gurgler Berichte 1, 41-45.
- [37] *Vietoris, L. (1972)*: Über die Blockgletscher des Äußeren Hochebenkars. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 8, 169-188.
- [38] *Vitek, J. D., and Giardino, J. R. (1987)*: Rock glaciers: a review of the knowledge base. In „Rock Glaciers.“ (J. R. Giardino, J. F. S. Jr., and J. D. Vitek, Eds.), pp. 1-26. Allen & Unwin, London.
- [39] *Voosoghi B. (2000)*: Intrinsic Deformation Analysis of the Earth Surface Based on 3-Dimensional Displacement Fields Derived From Space Geodetic Measurements. Dissertation, Stuttgart.
- [40] *Wahrhaftig, C., and Cox, A. (1959)*: Rock glaciers in the Alaska Range. Geological Society of America Bulletin 70, 383-436.
- [41] *Whalley, W. B., and Azizi, F. (1994)*: Rheological Models of Active Rock Glaciers: Evaluation, Critique and a Possible Test. Permafrost and Periglacial Processes 5, 37-51. Whalley, W. B., and Martin, H. E. (1992). Rock glaciers: II models and mechanisms. Progress in Physical Geography 16, 127-186.
- [42] *Whalley, W. B., Palmer, C., Hamilton, S., and Gordon, J. (1994)*: Ice exposures in rock glaciers. Journal of Glaciology 40, 427-429.
- [43] *Whalley, W. B., and Palmer, C. F. (1998)*: A glacial interpretation for the origin and formation of the Marinette Rock Glacier, Alpes Maritimes, France. Geografiska Annaler 80, 221-236.
- [44] *White, S. E. (1971)*: Rock glacier studies in the Colorado Front Range, 1961 to 1968. Arctic and Alpine Research 3, 43-64.
- [45] *White, S. E. (1976)*: Rock Glaciers and Block Fields, Review and New Data. Quaternary Research 6, 77-9.
- [46] *Wälder O., M. Buchroithner (2004)*: A method for sequential thinning of digital raster terrain models. PFG, Heft 3, S. 215-221.
- [47] *Wälder O., M. Buchroithner (2005)*: Statistical relief modelling of geo-relief with locally adaptive sequential wavelet-splines. Erscheint bei „Cartographica“.
- [48] *Wälder O. (2005)*: Frequenzanalyse des Georeliefs auf der Basis von speziellen Wavelet-Splines. Vortrag und Veröffentlichung auf der Internationalen Geodätischen Woche Obergurgl 2005, 20-26.2.2005, 10 S.
- [49] *Wälder O. (2005)*: A method for sequential thinning of digital raster terrain models II: mixed locally adaptive wavelet-splines and anisotropy. Erscheint bei PFG.

Anschrift der Autoren

Dr. Olga Wälder: Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, Mommsenstrasse 13, D-01062 Dresden. Email: Olga.Waelder@mailbox.tu-dresden.de

Ao. Univ.-Prof. Dr. Karl Krainer: Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck. Email: Karl.Krainer@uibk.ac.at

Mag. Wolfram Mostler: Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck. Email: Wolfram.Mostler@uibk.ac.at