

AUFBAU UND ENTSTEHUNG DES AKTIVEN BLOCKGLETSCHERS IM SULZKAR, WESTLICHE STUBAIER ALPEN (TIROL)

Karl Krainer¹ & Wolfram Mostler¹

mit 16 Abbildungen

¹ Karl Krainer und Wolfram Mostler, Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck, Austria. E-mail: Karl.Krainer@uibk.ac.at, Wolfram.Mostler@uibk.ac.at

Zusammenfassung

Der Sulzkar-Blockgletscher ist einer der größeren aktiven Blockgletscher im Einzugsgebiet des Sulztales in den westlichen Stubai Alpen. Er besitzt eine steile, unbewachsene Stirn und eine ausgeprägte Oberflächenmorphologie, geprägt durch longitudinale und transversale Rücken und Vertiefungen. Die bis zu mehrere Meter mächtige, grobkörnige Schuttlage besteht aus Glimmerschiefer-, Amphibolit- und Gneisblöcken, die Korngröße schwankt auf engem Raum ziemlich stark. Der Sulzkar-Blockgletscher überfährt einen älteren fossilen Blockgletscher. Seine Schmelzwässer fließen fast zur Gänze unterirdisch im Schutt des fossilen Blockgletschers ab.

In den Sommermonaten nimmt die Temperatur in der Schuttlage mit zunehmender Tiefe stark ab, in 120 cm Tiefe treten keine Tagesschwankungen mehr auf. Die Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) bewegen sich am Blockgletscher meist zwischen

-3 und -5°C, während sie neben dem Blockgletscher nie unter -1,6°C sinken.

Aufgrund der in der Wurzelzone ausgebildeten leichten Depression und des Gletschereises, das den Rest eines ehemaligen Kargletschers darstellt und im Bereich der Wurzelzone unter die Schuttlage des Blockgletschers hineinzieht, wird die Entstehung des Sulzkar-Blockgletscher nicht auf Permafrostprozesse zurückgeführt. Dieser Blockgletscher hat sich vielmehr aus der stark schuttbedeckten Zunge eines ehemaligen Kargletschers im Zuge einer Rückzugsphase entwickelt.

Abstract

The Sulzkar rock glacier is one of the bigger active rock glaciers present in the catchment area of the Sulztales in the western Stubai Alps (Tyrol, Austria). The front of this active rock glacier is very steep and bare of vegetation. The surface morphology is characterized by longitudinal and transverse ridges and furrows. The debris layer is up to several meters thick and composed of debris derived from micaschists, amphibolites and gneisses. The debris layer is coarse-grained at the surface, the grain size varies considerably from place to place. The Sulzkar rock glacier overrides an older fossil rock glacier. The meltwater runs off the active rock glacier as groundwater flow within the debris of the fossil rock glacier.

Within the debris layer, temperature decreases rapidly with increasing depth during summer. Diurnal temperature variations are absent in a depth of 120 cm.

On the rock glacier temperatures at the base of the winter snow cover are mostly between -3 and -5°C, beside the rock glacier temperatures never decreased below -1,6°C. Due to the presence of a depression and glacier ice in the rooting zone, which represents the remnants of a former cirque glacier and continues under the debris cover of the rock glacier, we interpret the Sulzkar rock glacier not as a permafrost phenomenon, but as a rock glacier that developed from the debris-covered tongue of a former cirque glacier during a phase of glacier retreat.

1. Einleitung

Blockgletscher zählen in den Zentralalpen, insbesondere in den aus Altkristallingesteinen aufgebauten Gebirgsgruppen, zu den häufigsten morphologischen Erscheinungsformen. Auch in den Ötztaler und Stubaier Alpen sind fossile inaktive und aktive Blockgletscher weit verbreitet. Aktive Blockgletscher sind definiert als lappen- bis zungenförmige Körper aus gefrorenem Lockermaterial, Eislinsen und größeren Eiskörpern, überlagert von einem ungefrorenem Schuttmantel (zusammenfassende Darstellungen in Giardino et al., 1987; Haeberli, 1985; Barsch, 1996). Aktive Blockgletscher bewegen sich langsam hangabwärts.

Im Gegensatz zu den Eisgletschern, deren Verhalten seit über hundert Jahren im Detail beobachtet und dokumentiert wird, ist das Verhalten von aktiven Blockgletschern nach wie vor wenig bekannt. Vor allem in den Ostalpen wurden bisher nur wenige Blockgletscher näher untersucht, obwohl die Blockgletscherforschung in den Ötztaler Alpen schon sehr früh einsetzte (Finsterwalder, 1928; Pillewizer, 1957; Vietoris, 1958, 1973; Gerhold, 1967, 1969; Haeberli & Patzelt, 1982). Allerdings hat in den letzten Jahren das wissenschaftliche Interesse an aktiven Blockgletschern stark zugenommen, vor allem im Zusammenhang mit der globalen Klimaänderung, die seit Beginn der Neunzigerjahre auch in den Alpen zu einer deutlichen Erwärmung und damit zu einem verstärkten Abschmelzen der Eisgletscher geführt hat. Auch in den aktiven Blockgletschern sind bedeutende Wassermassen gespeichert. Es ist jedoch nicht bekannt, wie viel Eis in den aktiven Blockgletschern enthalten ist, auch nicht, wie aktive Blockgletscher auf die gegenwärtige Klimaänderung reagieren.

Die Entstehung von Blockgletschern war lange heftig umstritten. Sie wurden einerseits als reine Permafrosterscheinungen betrachtet (Haeberli, 1985, 1990; Barsch, 1987 a, b, 1992, 1996), auch eine Entstehung aus zurückschmelzenden, schuttbedeckten Kargletschern wurde diskutiert (Outcalt & Benedict, 1965; White, 1971, 1976; Potter, 1972; Johnson, 1980; Johnson & Lacasse, 1988; Humlum, 1996; Whalley et al., 1994; Whalley & Palmer, 1998). Die Entstehung aus Kargletschern konnte inzwischen an mehreren Beispielen dokumentiert werden (siehe Ackert, 1998; Clark et al., 1994, 1996; Shroder et al., 2000), auch in den Ostalpen (Krainer & Mostler, 2000, 2001; Krainer et al., 2003; Berger et al., 2004).

In der vorliegenden Arbeit werden Daten zu Morphologie, Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, thermischem Verhalten der Schuttlagen, Hydrologie und Dynamik des aktiven Blockgletschers im Sulzkar (westliche Stubaier Alpen) präsentiert und dessen Entstehung diskutiert.

2. Lage

Der Sulzkar-Blockgletscher ist einer der größeren von ungefähr 20 aktiven Blockgletschern im Einzugsgebiet des Sulztales in den westlichen Stubaier Alpen (Tirol).

Der Blockgletscher liegt im Sulzkar, 4 km SSE von Gries im Sulzthal. Das Sulzkar ist ein knapp 2.5 km langes, glazial überprägtes, nach Nordosten ausgerichtetes Seitental, das in Form eines Hängetales in das Sulzthal mündet (Abb. 1, 2).

3. Geologische Übersicht

Der Festgesteinsuntergrund im Bereich des Sulzkares ist aus metamorphen Gesteinen des Ötztaler-Stubaier Altkristallinkomplexes aufgebaut. Es sind dies polymetamorphe, quarz- und feldspatreiche Metasedimente (verschiedene Typen von Paragneisen und Glimmerschiefern) sowie zwischengeschaltete saure bis intermediäre Orthogneise, Amphibolite, Eklogite und Metakarbonate (siehe Frank et al., 1987; Hoinkes & Thöni, 1993).

Die das Sulzkar umrahmenden schroffen Felsgrate sind aus folgenden Gesteinen aufgebaut: Im vorderen (nördlichen) Abschnitt des Sulzkares stehen auf beiden Talseiten Biotit-Plagioklasgneise an. Nach Süden folgen auf der westlichen Talseite (südlich der Bachleiten Spitze) zunächst Bänderamphibolite und Eklogite, anschließend Amphibolite (Bereich Schwarzwanter). Der südwestliche Karschluß (zwischen Gamezwart und Sulzkarscharte) besteht aus Paragneisen. Die Nordwände des Tonigenkogels sowie der Grat, der vom Tonigenkogel nach Nordosten zieht und die östliche Talbegrenzung bildet, ist aus einer Wechsellagerung von Amphiboliten und Glimmerschiefern aufgebaut. Nach Norden folgen Biotit-Plagioklasgneise (siehe Abb. 2).

Bänderamphibolite, Eklogite und Amphibolite streichen NW-SE (meist zwischen 140 und 170°) und fallen steil (70–85°) nach NE ein. Ähnliche Lageverhältnisse zeigen die Biotit-Plagioklas-

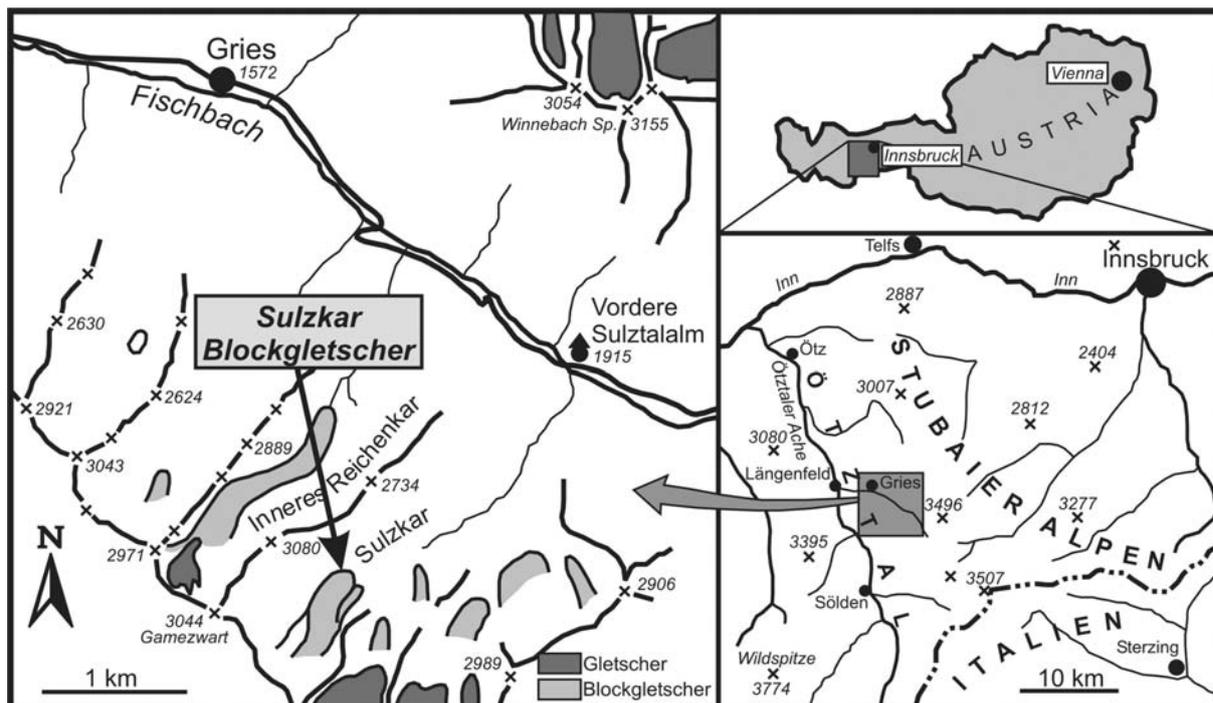


Abb. 1: Geographische Übersichtskarte zur Lage des Sulzkar-Blockgletschers in den westlichen Stubaier Alpen (Tirol).

Gneise (160/80E) sowie der Amphibolit-Glimmerschieferkomplex (Streichrichtung 100–140°, Einfallen 40–75° nach NE). Alle Gesteine sind durch die zahlreichen Störungen stark zerlegt, am stärksten die Paragneise zwischen Gamezwart und Sulzarscharte. Vor allem die Gratbereiche sind durch die zusätzlich wirksame Frostverwitterung durchwegs stark aufgelockert. Entsprechend groß ist der Schuttanfall.

4. Der Sulzkar-Blockgletscher

4.1 Morphologie

Der Sulzkar Blockgletscher ist ein aktiver, zungenförmiger Blockgletscher mit einer typischen Morphologie (Abb. 2–5). Er entspringt in einem Kar, das früher von einem kleinen Kargletscher eingenommen wurde (auf älteren Karten noch verzeichnet). Dieser Kargletscher ist inzwischen bis auf ein kleines Eis-/Firnfeld abgeschmolzen. Allerdings befindet sich im Bereich der Depression unter einer geringmächtigen Schuttbedeckung massives Gletschereis.

Die höchsten Erhebungen im Einzugsgebiet sind die Kote 3080 m, Schwarzwanter (3073 m), Gamez-

wart (3044 m) und Tonigenkogel (3013 m). Die Grathöhe bewegt sich zwischen 2730 und 3080 m.

Der höchste Punkt des Blockgletschers liegt auf ca. 2720 m, die aktive Zunge auf 2540 m. Die Zunge weist eine steile Stirn mit einer Neigung von 40–41° auf und ist frisch (in Bewegung). Im Bereich der Stirn ist der Blockgletscher ca. 25–30 m mächtig. Es sind zwei Zungen ausgebildet: eine westliche Hauptzunge und eine kleinere, östliche Zunge.

Die Oberfläche des Blockgletschers weist eine ausgeprägte Morphologie aus longitudinalen Rücken und Vertiefungen im mittleren und oberen Abschnitt, sowie transversale Loben im unteren Abschnitt auf (Abb. 3, 4).

Die Länge des Blockgletschers beträgt 750 m, die maximale Breite 260 m.

Das Einzugsgebiet des Blockgletschers umfasst 81.5 ha, davon entfallen auf den Blockgletscher 14.8 ha (18%), auf das Einzugsgebiet der Hangschuttfläche, die den Blockgletscher beliefert, 10.9 ha (13%), auf die Toteislandschaft 2.9 ha (4%), auf die Festgesteinsflächen 40.1 ha (49%), sowie auf die sonstigen Hangschuttflächen 23.7 ha (29%).

Die Neigung der Oberfläche des Blockgletschers ist relativ gering, sie beträgt ca. 10°. Die Gratbereiche im Einzugsgebiet überragen den Blockgletscher

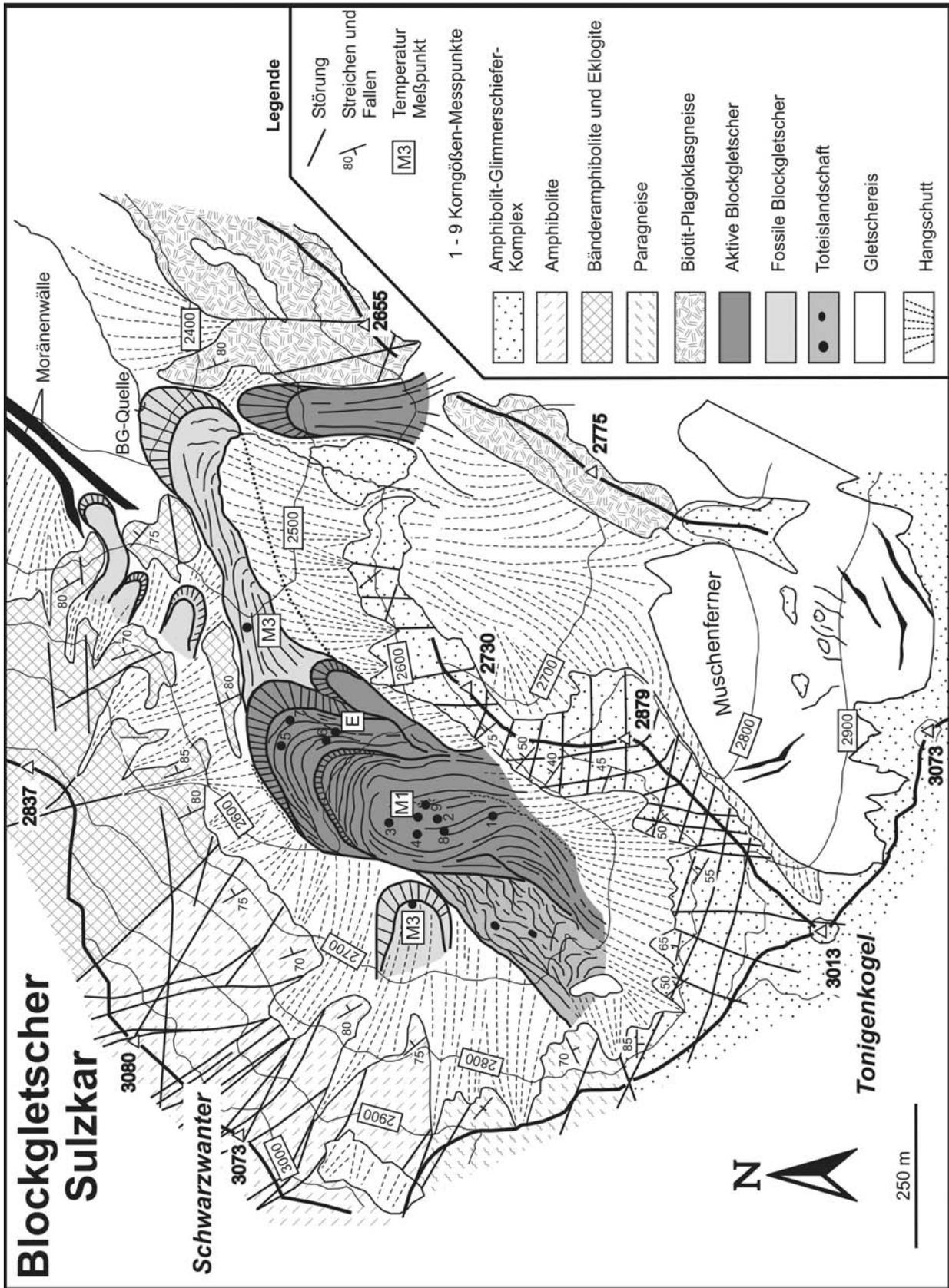


Abb. 2: Geologisch-morphologische Karte des hinteren Sulzkares mit dem Sulzkar-Blockgletscher in den westlichen Stubai Alpen (siehe Abb.1).

um 200–300 m im Osten, Südosten und Süden, und um 400–500 m im Westen.

Am Fuß der Felswand konnte an 2 Stellen unter einer dünnen Schuttdecke massives Eis (Reste des Kargletschers) festgestellt werden. Dieses Eis zieht offensichtlich unter die Schuttdecke des Blockgletschers hinein.

Der aktive Blockgletscher wird aus der Nordwand des Tonigenkogels mit Schutt beliefert. Der Schutt gelangt durch Steinschlag, Felssturz und mit Lawinen auf den Blockgletscher.

Im Zungenbereich ist am Blockgletscher ein aktiver Lobus mit einer rund 10 m hohen Stirn ausgeprägt. Am Fuß dieses steilen Lobus entspringt im Schutt eine Quelle. Im Sommer wird das Wasser durch darunter liegendes Eis zu einem kleinen Tümpel rückgestaut, fließt von dieser Quelle etwa 10 m zwischen den Blöcken am Eis dahin und verschwindet schließlich im Schutt (Abb. 6).

In der Depression im Kar fließen ebenfalls Schmelzwässer ca. 100 m an der Grenze aktiver Blockgletscher – Hangschutt in ca. 50 cm Tiefe zwischen den Blöcken an der Eisoberfläche. Dieses Schmelzwassergerinne läßt sich dann noch entlang einer Vertiefung zwischen zwei longitudinalen Rücken etwa 50 m in den Blockgletscher hinein verfolgen. Die Temperatur des Schmelzwassers beträgt 0.1°C.

Auch unmittelbar östlich der Meßstelle M 1 fließt Schmelzwasser in 1–1.5 m Tiefe im Blockwerk an der Permafrostoberfläche dahin.

Der Blockgletscher ist nach N bis NNE ausgerichtet. Er überfährt einen fossilen Blockgletscher, dessen Zunge in 2.380 m liegt. Der fossile Blockgletscher ist stark von Vegetation bewachsen und zeigt stellenweise eine typische Toteislandschaft als Folge des Abschmelzens von massivem Eis. Auf der SE-Seite wird der fossile Blockgletscher randlich von Hangschutt überdeckt.

An der Stirn des fossilen Blockgletschers entspringt eine Blockgletscherquelle, die sowohl vom aktiven Blockgletscher als auch von den Schmelzwässern des Muschenferners gespeist wird.

Südlich der Zunge des fossilen Blockgletschers hat sich aus dem Hangschutt ein kleiner Blockgletscher entwickelt. Auch im Vorfeld des Muschenferners befindet sich ein kleinerer, aktiver Blockgletscher. Kleine fossile Blockgletscher befinden sich westlich der Zunge des fossilen Blockgletschers und westlich des aktiven Blockgletschers (siehe Karte).

Interessant ist die vom aktiven Blockgletscher durch einen randlichen Wall scharf abgetrennte



Abb. 3: Der Sulzkar-Blockgletscher bei leichter Schneebedeckung mit deutlich erkennbarer Oberflächenmorphologie. Blickrichtung nach Süden, Aufnahme vom 21.9.1998.

Toteislandschaft westlich dessen oberen Abschnittes (Abb. 2). Diese Toteislandschaft zeigt eine außergewöhnlich unruhige Topographie mit Höhenunterschieden bis zu über 10 m, gebildet durch längliche Rücken mit teils gebogenem Verlauf, sowie rundlichen Einsinktrichtern, die teils mit Schmelzwasser gefüllt sind. Bei dieser Toteislandschaft handelt es sich offensichtlich um den Rest eines älteren, inaktiven Blockgletschers oder um den schuttbedeckten Rest eines ehemaligen Kargletschers.

4.2 Zusammensetzung und textuelle Merkmale

Der Sulzkar-Blockgletscher bezieht seinen Schutt ausschließlich aus dem Glimmerschiefer-Amphibolitkomplex der Nord- und Nordostwand des Tonigenkogels.

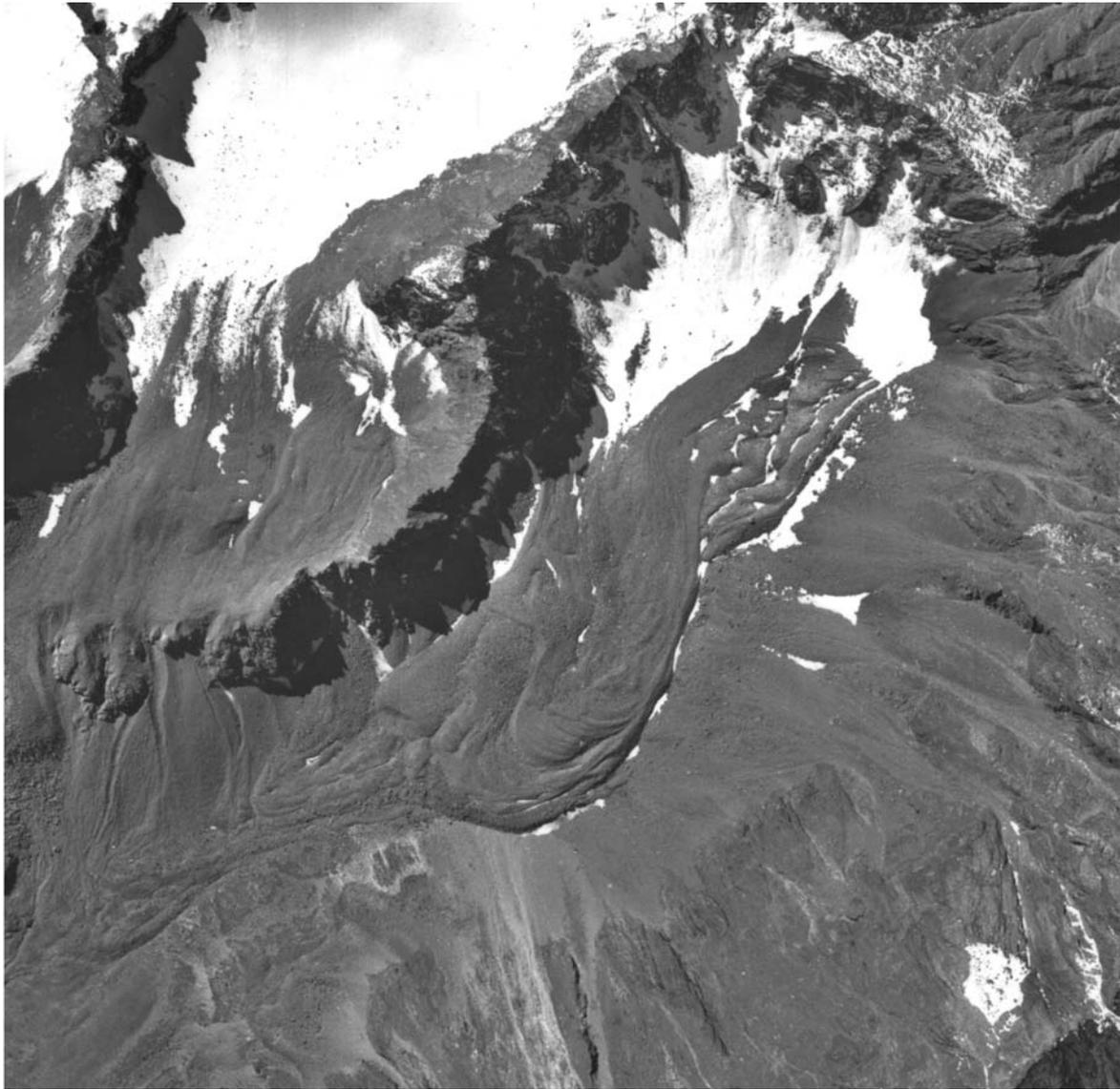


Abb. 4: Der Sulzkar-Blockgletscher im Luftbild (Luftbild Nr. 9382, Befliegung 1954) mit ausgeprägten Rücken (Loben) und rinnenartigen Vertiefungen auf der Oberfläche. Deutlich erkennbar ist auch die Toteislandschaft im westlichen Teil der Wurzelzone. © BEV – 2004, vervielfältigt mit Genehmigung des BEV – Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien, Zl. EB 2004/00033.

Große Schutthalden ziehen auch vom Fuß der westlichen Steilwände herab, diese beliefern den Blockgletscher jedoch nicht.

Die Korngrößenverteilung wurde an insgesamt 9 Stellen am Blockgletscher ermittelt, an jeder Messstelle wurde auf einer Fläche von ca. 5 x 5 m der längste Durchmesser der an der Oberfläche liegenden Gerölle gemessen. Außerdem wurde an der Blockgletscherstirn eine matrixreiche Probe für eine Siebanalyse entnommen.

Der Schuttmantel des Blockgletschers zeigt an mehreren Stellen einen deutlichen Lagenbau, bestehend aus einer bis zu ca. 1 m mächtigen grobkörnigen,

matrixarmen bis matrixfreien Lage und einer etwas feinkörnigeren, aber sehr matrixreichen Lage darunter.

Die Korngrößenverteilung an der Oberfläche des Blockgletschers ist sehr unterschiedlich; neben überwiegend fein- und mittelkörnigen gibt es auch sehr grobkörnige Bereiche.

In den feinkörnigen Bereichen bewegen sich die Korngrößen zum überwiegenden Teil zwischen 1 und 30 cm (durchschnittliche Korngröße der Messstellen KG 1 = 15,5 cm, KG 4 = 19,1 cm und KG 5 = 28,5 cm), in den mittelkörnigen Bereichen zwischen 10 und 50 cm (KG 2 = 41,3 cm, KG 7 = 26,2 cm und



Abb. 5: Blick auf den Zungenbereich des Sulzkar-Blockgletschers mit der steilen, aktiven Stirn.

KG 9 = 40,9 cm), und in den grobkörnigen Bereichen zwischen 20 und 70 cm (Messstellen KG 3 = 68,7 cm, KG 6 = 57,5 cm und KG 8 = 96 cm). In den fein- und mittelkörnigen Bereichen sind Gerölle bis zu 1 m nur untergeordnet anzutreffen, Gerölle über 1 m sind sehr selten. In den grobkörnigen Bereichen wurden Blöcke mit einem Durchmesser bis zu 5 m gemessen (Abb. 7 und 8).

Die Siebanalyse an der matrixreichen Probe ergab eine Korngrößenverteilung ähnlich wie bei Grundmoränen mit einem hohen Feinanteil und einer sehr schlechten Sortierung (Abb. 9). Die Summenkurve zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie jene von Proben aktiver Blockgletscher im benachbarten Reichenkar, Schrankar und Rosskar sowie bei Barsch (1996) und Giardino & Vick (1987).

4.3 Temperaturverhalten in der aktiven Lage

Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens in der aktiven Lage wurden am Blockgletscher in ca. 2650 m SH in verschiedenen Tiefen der aktiven Lage (50 und 120 cm) 2 Temperatursonden installiert (Messstelle M1 in Abb. 2). Die Messungen erfolgten im Abstand von 2 Stunden. Die Meßdaten wurden mit den Wetterdaten der Station Obergurgl verglichen. Dieser Vergleich zeigt, dass das Temperaturverhalten der aktiven Lage, vor allem im oberflächenna-



Abb. 6: In der Senke im Vordergrund staut sich das Schmelzwasser im Sommer zu einem kleinen Tümpel. Unter dem Schmelzwasser befindet sich Eis. Diese Stelle liegt im Zungenbereich (E in Abb. 2).

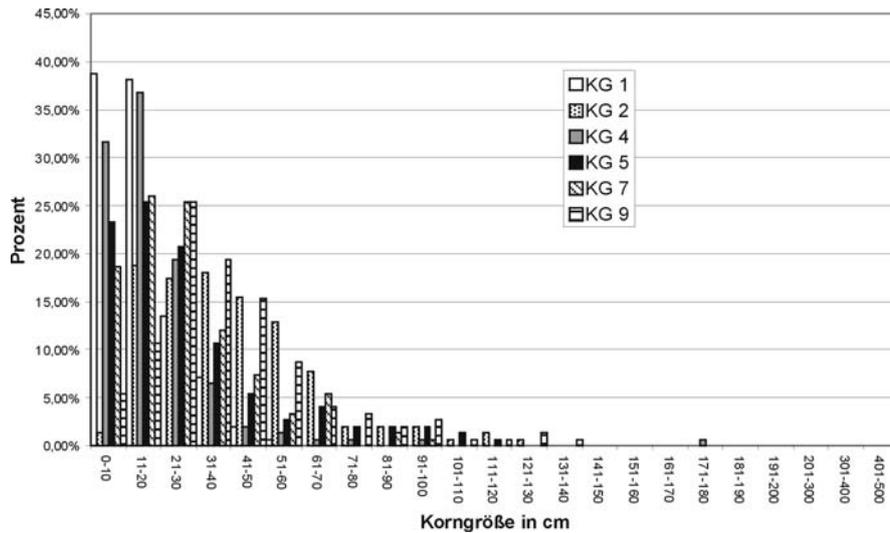


Abb. 7: Die Korngrößenverteilung an der Oberfläche der ungefrorenen Schuttlage im Bereich von drei feinkörnigen (KG 1, 4, 5) und drei mittelkörnigen Bereichen (KG 2, 7, 9). Die Lage der Messstellen ist aus Abb. 2 ersichtlich.

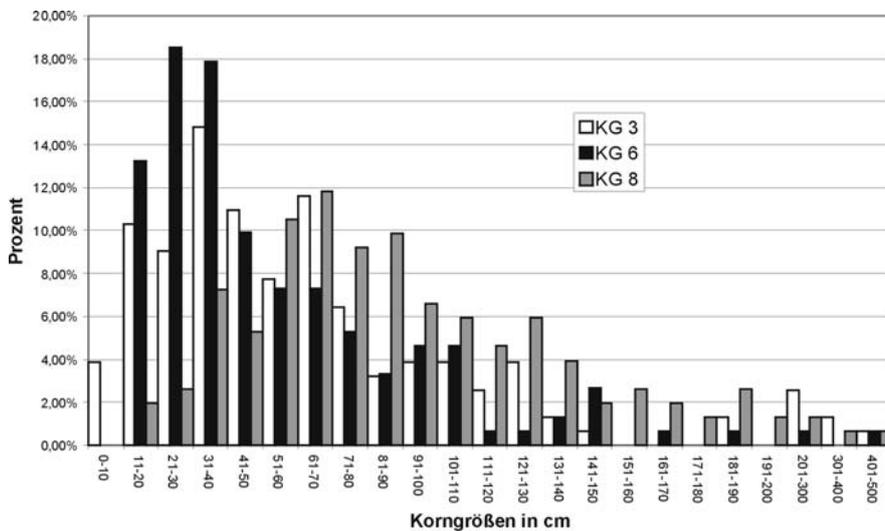


Abb. 8: Die Korngrößenverteilung an der Oberfläche der ungefrorenen Schuttlage an drei grobkörnigen Messstellen (KG 3, 6 und 8, siehe Abb. 2).

hen Abschnitt (bis 1 m), stark vom Witterungsablauf kontrolliert wird. In diesem Abschnitt treten deutliche saisonale und tägliche Temperaturschwankungen auf.

Im Folgenden wird die Meßperiode vom 2. Juli 1997 bis 29. Oktober 1997 näher betrachtet.

Die Monate Juli und August waren relativ niederschlagsreich, markantere Schlechtwettereinbrüche waren an folgenden Tagen zu verzeichnen:

5.–7. Juli (22.3 mm Niederschlag am 5.7. in Obergurgl)

17.–20. Juli (14.7 mm am 17.7.)

1. August (3.7 mm)

28.–30. August (14.2 mm am 28.8.)

13.–15. September (9.6 mm am 13.9.)

Starker Schneefall Mitte Oktober führte zum Aufbau einer bis zu 50 cm dicken Schneedecke

(Niederschlag am 10.10. 16.5 mm und am 11.10. 17.8 mm, hauptsächlich in Form von Schnee).

In der aktiven Lage wurden in 50 cm Tiefe die höchsten Temperaturen (10.5°C) im August erreicht. In diesem Monat sind auch die Tagesschwankungen am größten (bis zu 4.3°C).

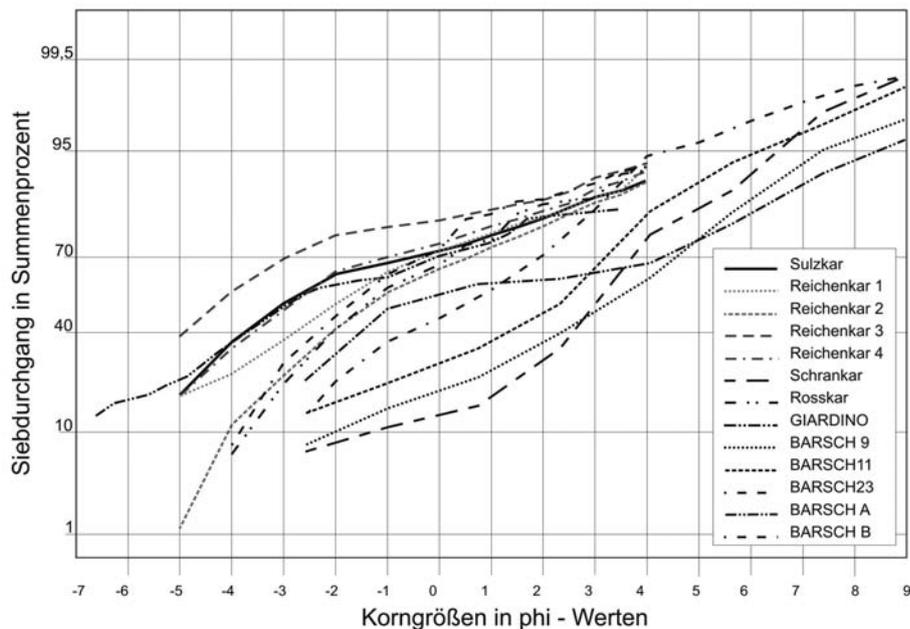


Abb. 9: Kornsummenkurven einer Probe von der Stirn des Sulzkar-Blockgletschers und einiger anderer aktiver Blockgletscher. Alle Summenkurven zeigen einen ähnlichen, flachen Verlauf, der auf eine sehr schlechte Sortierung hinweist (wie bei Grundmoränen).

Mit zunehmender Tiefe nahm die Temperatur ab, saisonale und tägliche Temperaturschwankungen wurden zunehmend gedämpft.

Tägliche Temperaturschwankungen (Tageszyklen) waren am deutlichsten und stärksten bei Schönwetterlagen ausgeprägt, wobei die Temperaturmaxima dieser Tageszyklen gegen Mitternacht und die Temperaturminima am späten Vormittag auftraten.

In 120 cm Tiefe waren dagegen Tageszyklen im Temperaturgang nicht mehr erkennbar. Dies hatte zur Folge, dass während Schönwetterlagen auch der Temperaturgradient täglichen Schwankungen unterworfen war, wobei der Gradient gegen Mitternacht am höchsten und am späten Vormittag am geringsten war.

Die Temperaturgradienten (zwischen 50 und 120 cm) waren im Zeitraum Juli bis September relativ hoch und gingen im Oktober stark zurück.

Schlechtwettereinbrüche zeichneten sich auch im Temperaturverlauf der aktiven Lage deutlich ab. Als Beispiel wird die Periode vom 17.7. bis 26.7.1997 mit dem markanten Schlechtwettereinbruch am 17./18.7. angeführt (Abb. 10). Bezüglich des Temperaturverlaufes wurde an der Station Obergurgl das tiefste Tagesmittel am 19.7. registriert, danach stieg die Temperatur wieder an.

In der aktiven Lage in 50 cm Tiefe ist die Temperatur vom 17.7. um 22 Uhr (6.8°C) bis 22.7 um 12 Uhr

(0.3°C), also über einen Zeitraum von 5 Tagen, kontinuierlich gesunken. In diesem Zeitraum sind keine Tagesschwankungen aufgetreten. Dies bedeutet, dass in 50 cm Tiefe das Temperaturminimum erst 3 Tage nach dem Temperaturminimum an der Oberfläche (Station Obergurgl) erreicht wurde. Am 22.7. wurde in Obergurgl bereits wieder ein Tagesmittel von fast 13°C erreicht.

In 50 cm Tiefe erfolgte nach dem 22.7. ein rascher Temperaturanstieg, wobei in den nachfolgenden Tagen (Schönwetter) deutliche Tagesschwankungen aufgetreten sind. Bei Schönwetter betrug die tägliche Temperaturschwankung in den Monaten Juli bis September meist 2–3°C, im Oktober dagegen nur mehr 1–2°C.

In 120 cm Tiefe ging die Temperatur vom 18.7. bis 23.7. ebenfalls kontinuierlich zurück, das Temperaturminimum wurde am 23.7. um 5 Uhr erreicht, also ca. 7 Stunden später als in 50 cm Tiefe (Abb. 10).

Diese Zeitverzögerung der Temperaturminima zwischen Oberfläche und 50 cm Tiefe von 3 Tagen zeigt, dass die kühlen Luftmassen des Schlechtwettereinbruches nur sehr langsam von der Oberfläche in die aktive Lage eindringen und die wärmere Luft verdrängen. Dieser Prozess führte dazu, dass am 21./22.7. die Temperatur in der aktiven Lage zwischen 50 und 120 cm ausgeglichen war (Temperaturgradient fast 0).

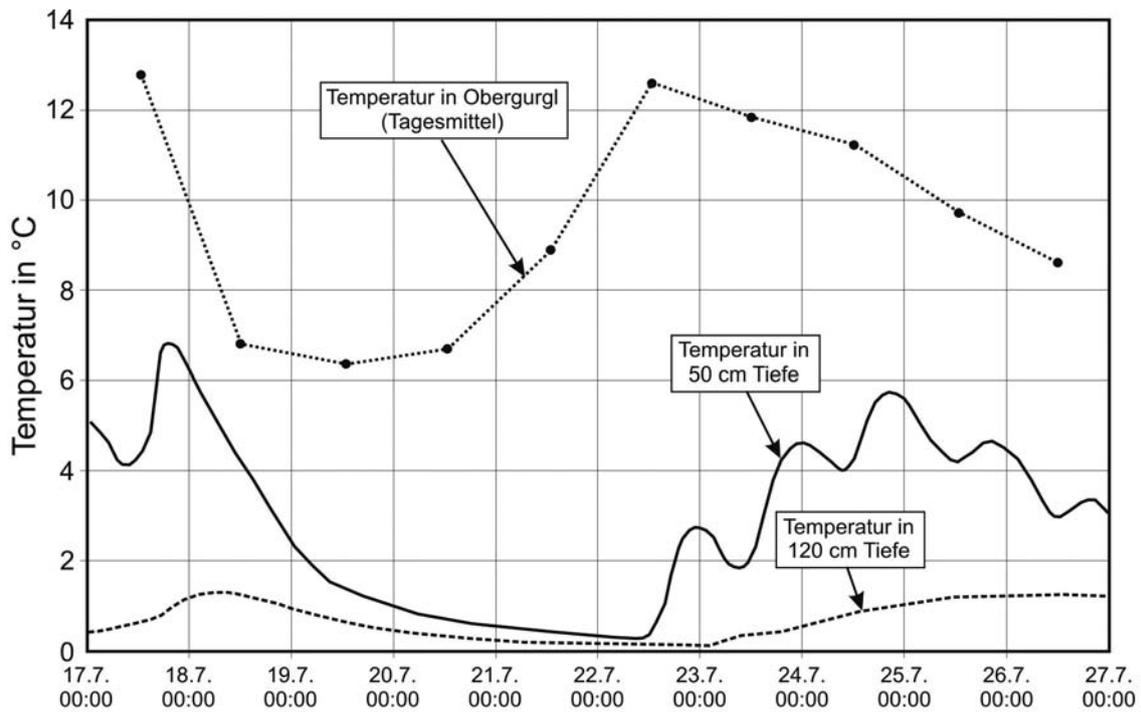


Abb. 10: Temperaturverlauf in der Schuttlage in 50 cm und 120 cm Tiefe (Messstelle M1 in Abb. 2) im Zeitraum 17.7. bis 27.7.1997. Der Schlechtwettereinbruch am 18.7. wirkt sich in 50 cm Tiefe sehr deutlich, allerdings zeitverzögert, in 120 cm Tiefe weniger deutlich aus.

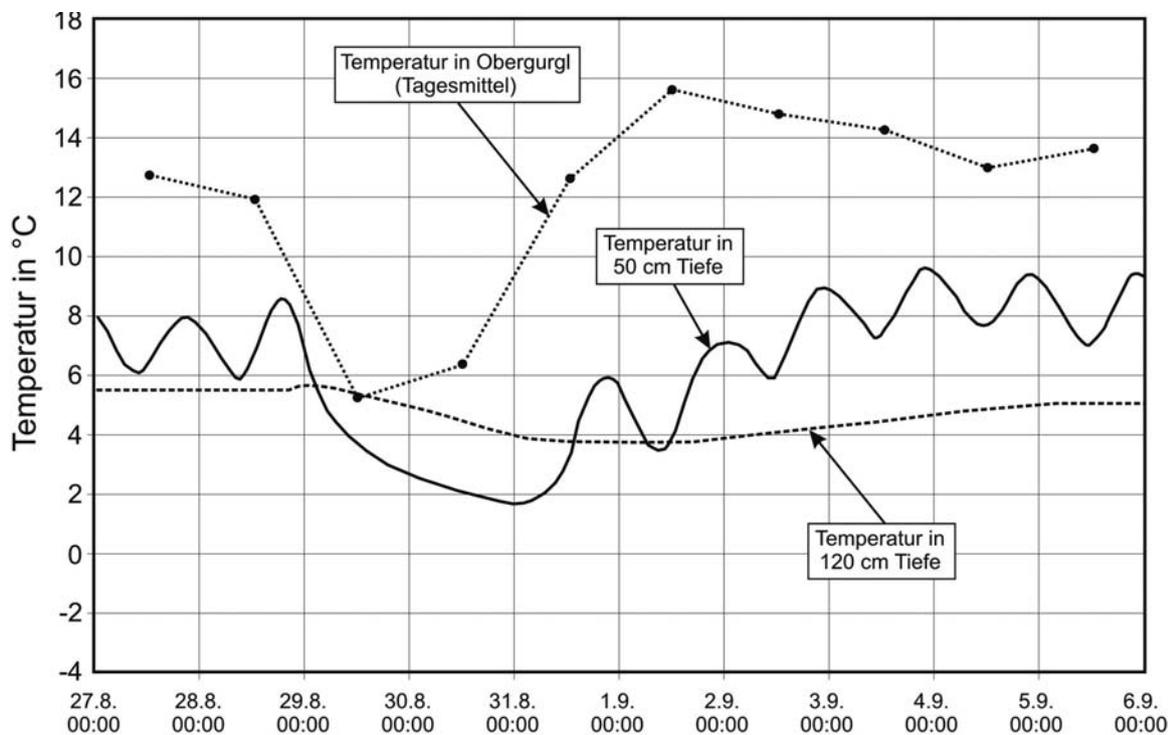


Abb. 11: Temperaturverlauf in der Schuttlage in 50 cm und 120 cm Tiefe (Messstelle M1 in Abb. 2) im Zeitraum 27.8. bis 6.9.1997. mit deutlichen Tagesschwankungen in 50 cm, keinen Tagesschwankungen in 120 cm Tiefe. Der Schlechtwettereinbruch vom 28./29.8. wirkt sich in 50 cm Tiefe deutlich aus.

Im Zeitraum 27.8.–5.9.1997 (Abb. 11) wurde ein markanter Schlechtwettereinbruch am 28./29. August (Tagesmittel-Minimum in Obergurgl am 29.8.) verzeichnet.

In der aktiven Lage waren bis 28.8. deutliche Tagesschwankungen zu beobachten, am 28.8. wurde das T_{\max} um 20.00 Uhr erreicht. Danach ging die Temperatur bis 30.8. gegen 22.00 Uhr kontinuierlich zurück (Temperaturverzögerung von etwas mehr als 1 Tag).

Am 31.8. stieg die Temperatur wieder rasch an, und ab diesem Zeitpunkt waren auch wieder deutliche Tageszyklen im Temperaturgang zu beobachten (T_{\max} gegen Mitternacht und T_{\min} am späten Vormittag).

Dieser Schlechtwettereinbruch hatte also eine wesentlich geringere Zeitverzögerung zur Folge als jener am 17./18.7.

In 120 cm Tiefe war ein kontinuierlicher Temperaturabfall vom 28.8. um 24 Uhr bis 31.8. um 2 Uhr zu beobachten, anschließend blieb die Temperatur auf konstant niedrigem Niveau bis 1.9. um 24 Uhr (2 Tage), erst ab 2.9. erfolgte ein allmählicher leichter Temperaturanstieg. Dieser Temperaturanstieg erfolgte also erst 2 Tage später als in 50 cm Tiefe.

Der Schlechtwettereinbruch hatte für den Zeitraum vom 29.8. um 4 Uhr bis 31.8. um 14 Uhr (über 2 Tage) einen negativen Temperaturgradienten zur Folge, d.h. in diesem Zeitabschnitt war die Temperatur in 50 cm Tiefe um bis zu über 2°C niedriger als in 120 cm Tiefe (Temperaturinversion in der aktiven Lage). Auslösend für diese Temperaturinversion war offensichtlich eine stärkere Abkühlung als am 17./18.7. Die kältere Luft ist auch schneller in die aktive Lage eingedrungen. Je stärker die Abkühlung, umso rascher dringt die kühle Luft in die aktive Lage ein und umso negativer ist der Temperaturgradient in der aktiven Lage. Inwieweit die Windaktivität das Eindringen der kühlen Luft fördert, ist nicht bekannt (siehe Humlum, 1997). Möglicherweise spielt hier auch das einsickernde kühle Niederschlagswasser eine gewisse Rolle.

Negative Temperaturgradienten verursachten auch die Schlechtwettereinbrüche am 5.7., 1.8., 13.9. und 10.10.

Ähnliche Beobachtungen im Temperaturverlauf in der Schuttlage in Abhängigkeit vom Wettergeschehen wurden auch in den darauf folgenden zwei Jahren gemacht.

4.4 Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS)

Die Ermittlung der Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS = Bottom Temperature of Winter Snowcover) ist die einfachste Methode, das Vorhandensein von Eis im Untergrund nachzuweisen (Haeberli, 1973). Erreicht die Schneedecke eine Mächtigkeit von ca. 1 m, so wirkt sie als Isolierschicht und die Temperatur an der Basis der Schneedecke wird im Wesentlichen vom Temperaturverhalten des Untergrundes und kaum von der Temperatur der atmosphärischen Luft beeinflusst.

Am Sulzkar-Blockgletscher wurden BTS-Messungen am und neben dem Blockgletscher in den Wintermonaten 1997/98 (M 1 und M 2) und 1998/99 (M1 und M 3) durchgeführt, nur am Blockgletscher auch im Winter 1999/2000 (M 1).

Die Temperatursonden (Optic Stow Away Temperature Logger; Onset Computer Corporations, USA) waren jeweils von Ende Oktober bis Ende Mai installiert, das Messintervall betrug 2 Stunden (Genauigkeit $\pm 0,2^\circ\text{C}$).

BTS im Winter 1997/98 (Abb. 12)

Bis 20. Dezember war der Temperaturverlauf noch durch deutliche Schwankungen charakterisiert, insbesondere am Blockgletscher. Bis 22. Jänner sind die Temperaturen am und neben dem Blockgletscher leicht, aber kontinuierlich gesunken, Schwankungen waren nicht zu beobachten. Auch der starke Föhn-einbruch um den 12. Jänner wirkte sich nicht aus. Bis 22. Jänner sank die Temperatur am Blockgletscher auf $-1,6^\circ\text{C}$ und neben dem Blockgletscher auf $-0,8^\circ\text{C}$. Vom 22. Jänner bis 8. Februar war ein starker Temperaturabfall zu beobachten, am Blockgletscher auf $-3,8^\circ\text{C}$ und neben dem Blockgletscher auf $-1,6^\circ\text{C}$. In den Monaten Februar, März und April waren die BTS-Temperaturen am Blockgletscher um $2\text{--}3^\circ\text{C}$ niedriger als neben dem Blockgletscher. Die tiefsten BTS-Werte wurden am Blockgletscher mit $-4,4^\circ\text{C}$ erst am 28. März gemessen, neben dem Blockgletscher mit $-1,6^\circ\text{C}$ bereits am 10. Februar.

Im Februar und März war der Temperaturverlauf der BTS am Blockgletscher auch durch deutliche Schwankungen von $> 1^\circ\text{C}$ geprägt (T_{\min} $-4,4^\circ\text{C}$ am 28.3 und T_{\max} -3°C am 11.3.).

Ein Vergleich mit dem Temperaturverlauf (Tagesmittel) der Station Obergurgl zeigt, dass sich die

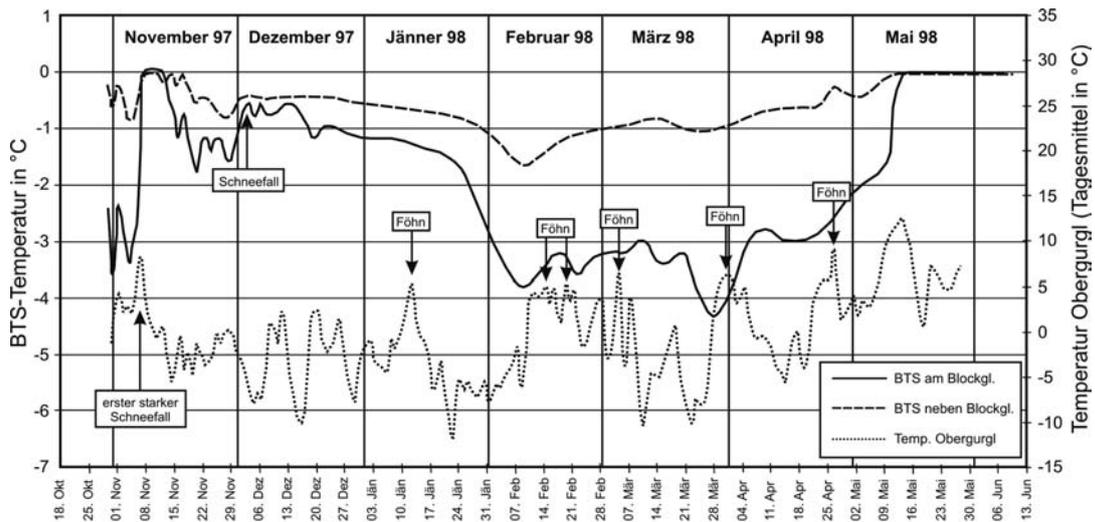


Abb. 12: Temperaturverlauf an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) am Blockgletscher (Messstelle M1 in Abb. 2) und neben dem Blockgletscher (Messstelle M2 in Abb. 2) sowie der Station Obergurgl im Winter 1997/98.

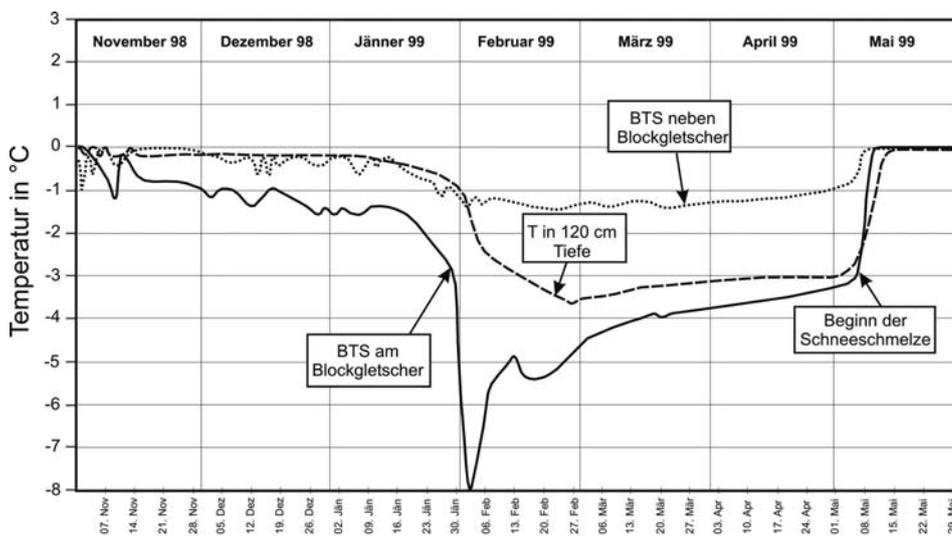


Abb. 13: Temperaturverlauf an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) am Blockgletscher (Messstelle M1 in Abb. 2) und neben dem Blockgletscher (Messstelle M3 in Abb. 2) im Winter 1998/99.

Föhneinbrüche offensichtlich auch an der Basis der winterlichen Schneedecke auswirkten, allerdings mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung von mehreren Tagen. Auch markante Temperaturminima wirkten sich verzögert auf die BTS aus. Der rasche Temperaturanstieg vom 7. Mai (-2°C) bis 14. Mai (0°C) markiert das Einsetzen der Schneeschmelze (Abb. 12).

BTS im Winter 1998/99 (Abb. 13)

Bis Ende Jänner sind die Temperaturen kontinuierlich gesunken, ein markanter Temperaturabfall erfolgte von Ende Jänner (-3°C am BG) bis Anfang Februar (-8°C am BG). Anschließend stieg die Temperatur bis Mitte Februar wieder auf -5°C, dann erfolgte ein langsamer Anstieg auf -3°C bis Anfang Mai.

BTS-Temperatur neben dem Blockgletscher zeigt dagegen nur geringe Schwankungen, sank bis Ende Jänner auf knapp unter -1°C , bleibt relativ konstant bei diesem Wert bis Mitte April.

In 120 cm Tiefe wurde das Temperaturminimum erst Ende Februar erreicht. Die Temperatur in 120 cm Tiefe ist während des gesamten Winters um $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ höher als an der Basis der winterlichen Schneedecke (Abb. 13).

Temperaturprofil im Winter 1999/2000 (Abb. 14)

Der Temperaturrückgang an der Basis der Schneedecke, in 50 und 120 cm Tiefe, setzt Ende November ein. Das Temperaturminimum wurde an der Basis der Schneedecke mit $-7,8^{\circ}\text{C}$ und in 50 cm Tiefe mit $-5,8^{\circ}\text{C}$ bereits um den 20. Jänner erreicht. In 120 cm Tiefe wurde die tiefste Temperatur mit $-4,3^{\circ}\text{C}$ erst Mitte Februar erreicht. In der zweiten Jänner- und ersten Februarhälfte wurden an der Basis der Schneedecke und in 50 cm Tiefe deutliche Temperaturschwankungen von $> 1^{\circ}\text{C}$ aufgezeichnet.

Vom 20. Februar bis Ende April stieg dann die Temperatur in allen drei Tiefen langsam auf -3°C . Der

rasche Temperaturanstieg auf 0°C innerhalb weniger Tage Anfang Mai markiert das Einsetzen der Schneeschmelze (siehe Abb. 14).

4.5 Hydrogeologische Daten

Nur bei hohen Abflussraten (intensive Schneeschmelze, Regenfälle) entspringt am Fuße der südlichen Stirn des aktiven Blockgletschers eine Quelle, an der jedoch nur ein geringer Teil des Gesamtabflusses als kleiner Bach ungefähr 50 m in einer Mulde entlang fließt und dann in einem Toteisloch am fossilen Blockgletscher versickert. Am 20. August 1998 schüttete die Quelle 20 L/s^{-1} , die Wassertemperatur betrug $0,6^{\circ}\text{C}$.

Der Großteil des Wassers vom aktiven Blockgletscher fließt unterirdisch im Blockwerk des fossilen Blockgletschers ab und entspringt erst an der großen Blockgletscherquelle am Fuße der Stirn des fossilen Blockgletschers ca. 400 m unterhalb der Stirn des aktiven Blockgletschers. An dieser Quelle treten auch die Schmelzwässer des Muschenferners zutage. Der Gletscherbach des Muschenferners fließt über eine Steilstufe auf die Zunge des fossilen Blockgletschers,

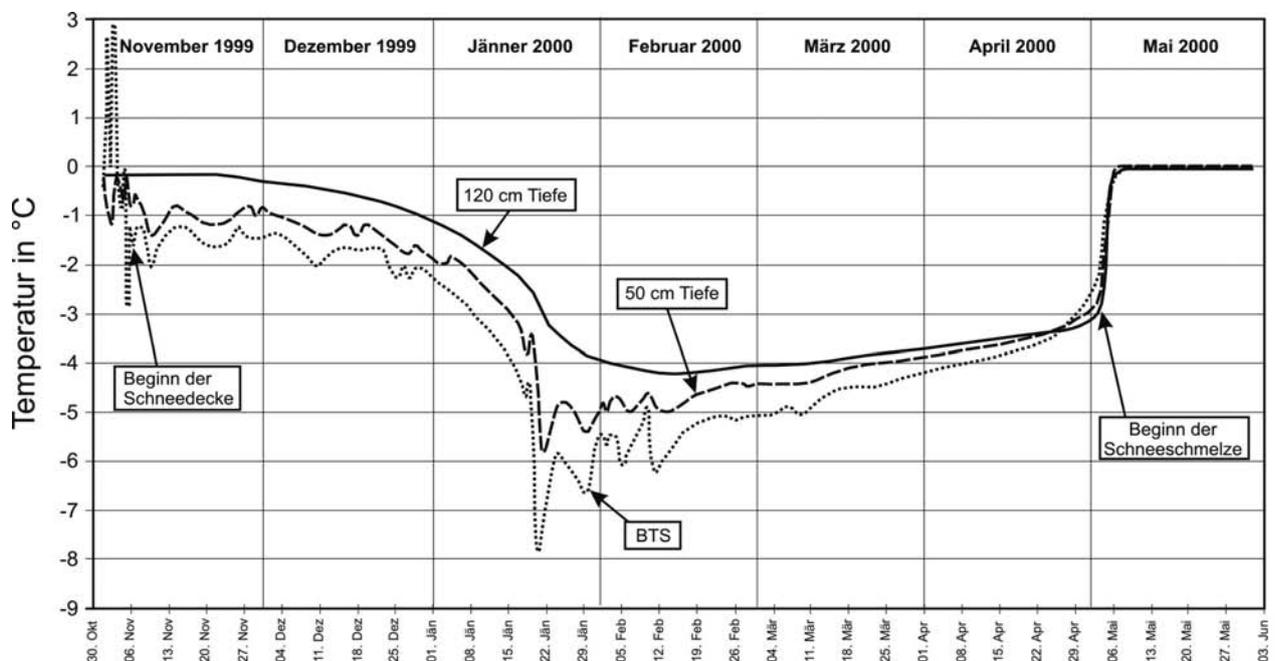


Abb.14: Temperaturverlauf an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) sowie in der Schuttlage in 50 cm und 120 cm Tiefe am Blockgletscher (Messstelle M1 in Abb. 2) im Winter 1999/2000. In 120 cm Tiefe sind die Temperaturen den gesamten Winter hindurch immer am höchsten, an der Basis der Schneedecke dagegen immer am tiefsten.

wo er ca. 140 m oberhalb der Quelle komplett versickert und dann zusammen mit dem Abfluss des Blockgletschers an der Quelle wieder austritt. Ein Farbtracerversuch mit Uranin hat ergeben, dass das Gletscherwasser diese Strecke von 140 m in 40 min durchfließt, was einer Fließgeschwindigkeit von 3,5 m/min entspricht. Die Quelle weist in den Sommermonaten eine deutlich niedrigere Temperatur auf als der Gletscherbach kurz vor dem Versickern (1,9°C Quelltemperatur gegenüber 3°C Gletscherbach am 20.8.99).

Da das Abflussverhalten der Quelle sowohl vom aktiven Blockgletscher als auch vom Muschenferner beeinflusst wird, wurde auf die Installation einer Dauerpegelmessstelle verzichtet.

Die Abflussmengen lagen im Juni, Juli und August 1997 sowie im August 1998 zwischen 104 und 250 L/s⁻¹ (Einzelmessungen nach der Salzverdünnungsmethode). Kurzfristig, insbesondere nach starken Regenfällen, waren die Abflüsse sicher um einiges höher.

Die elektrische Leitfähigkeit schwankte zwischen 63 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Juni und 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im November. Die Wassertemperatur der Blockgletscherquelle bewegte sich in den Sommermonaten zwischen 1,1°C (Juni) und 2,1°C (August) und war somit etwas höher als bei Quellen aktiver Blockgletscher (siehe Abb. 15).

Im Bereich der Zunge des aktiven Blockgletschers, ca. 50 m oberhalb der Stirn, sammelt sich in den

Sommermonaten in einer kleinen Mulde am Fuß eines markanten Lobus das Schmelzwasser, das durch Eis, das zwischen den Gesteinsblöcken unter dem Wasser zum Vorschein kommt, rückgestaut wird. Die Wassertemperatur lag in den Sommermonaten nur knapp über dem Gefrierpunkt (0,1°C im Juni und Juli, max. 0,4–0,5 °C im August), die elektrische Leitfähigkeit betrug 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Abb. 6).

Im oberen Teil des Blockgletschers, ca. 100 bis 150 m südlich der Messstelle M1, sowie ca. 30 m östlich dieser Messstelle, fließt in den Sommermonaten entlang einer Mulde am Blockgletscher in einer Tiefe von 0,5–1,5 m, an der Basis der ungefrorenen Schuttlage, Schmelzwasser. Im Wurzelbereich war zu erkennen, dass sich das Schmelzwasser kanalartig in das Eis des Blockgletschers eingeschnitten hat.

Die bis zu über 10 m tiefen kreisrunden bis ovalen trichterförmigen Depressionen im Bereich der Toteislandschaft waren im August 1998 stellenweise mit Wasser gefüllt, in den Sommermonaten des Jahres 1999 waren sie dagegen ständig mit Schnee gefüllt.

Die Entstehung dieser Depressionen wird mit dem Einsinken des Schuttmaterials als Folge des Abschmelzens des darunter liegenden (Gletscher)eises erklärt.

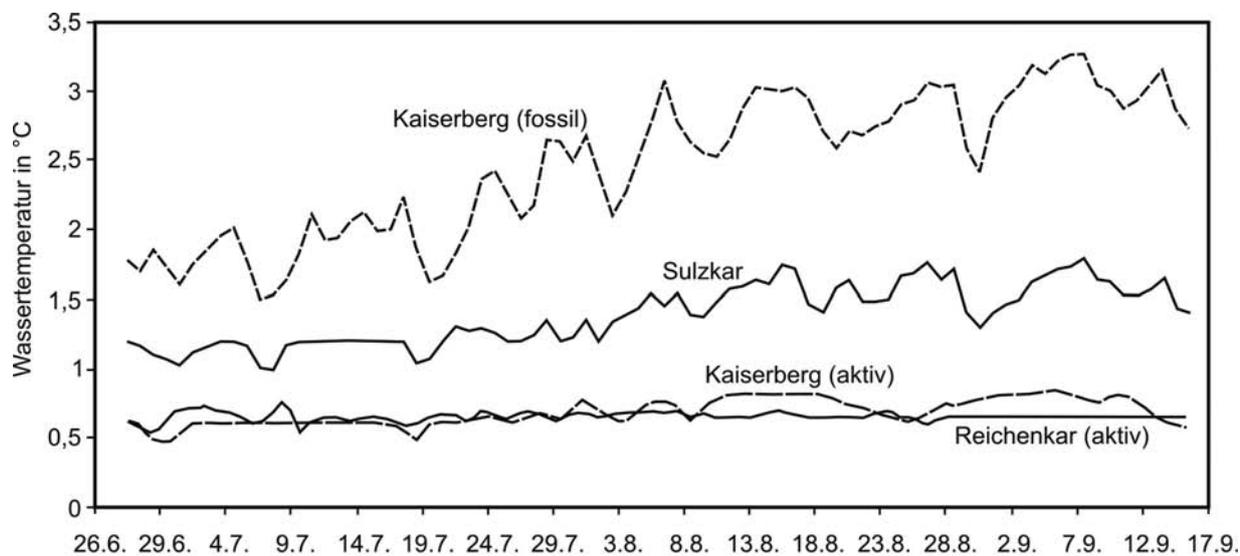


Abb. 15: Wassertemperaturen einiger Blockgletscherquellen von Ende Juni bis Mitte August 1997. Die Wassertemperaturen der Quellen aktiver Blockgletscher (Kaiserberg, Reichenkar) liegen den ganzen Sommer konstant < 1°C. Dagegen ist die Temperatur an der Quelle, die an der Stirn des fossilen Blockgletschers im Sulzkar entspringt, deutlich höher (bewegt sich zwischen 1 und 2°C), noch höhere Temperaturen zeigt die Quelle eines fossilen Blockgletschers im Kaiserbergtal. Die Schwankungen sind auf den Witterungsablauf zurückzuführen.

4.6 Bewegungsraten

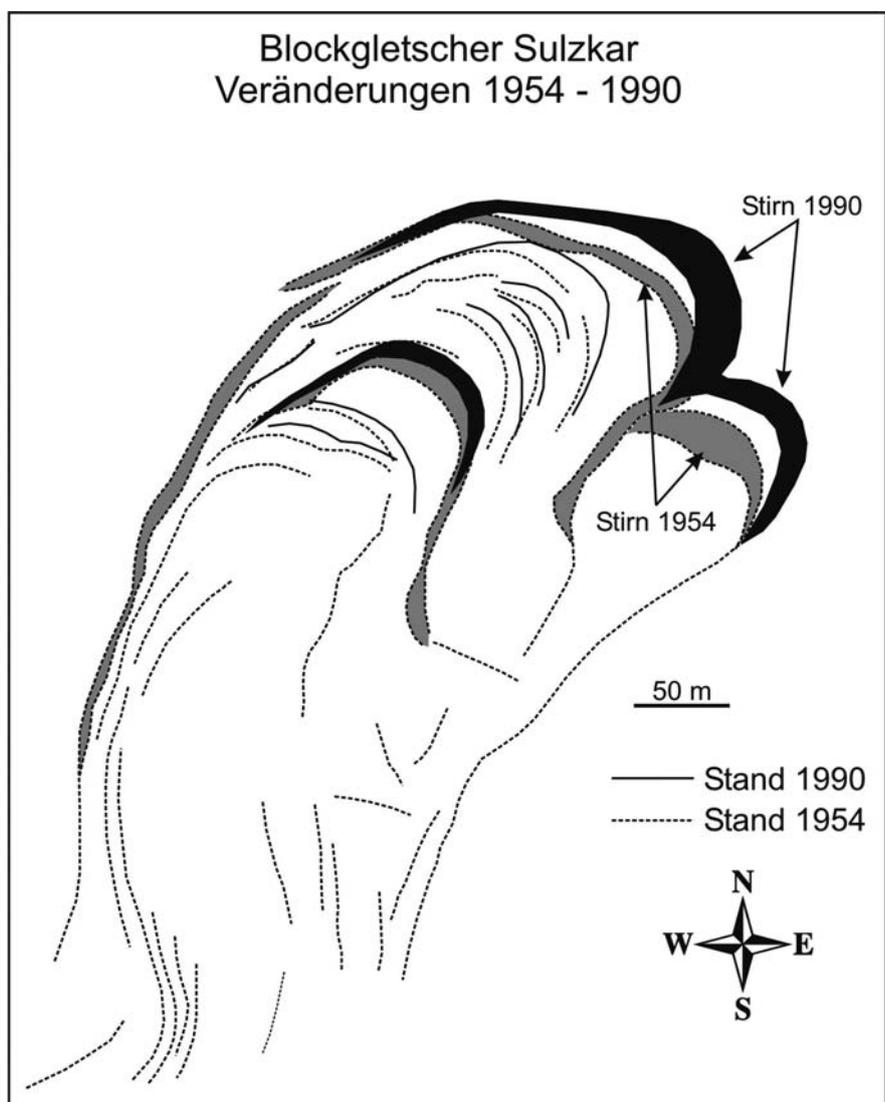
Die steile Stirn des aktiven Blockgletschers besteht aus frischem, unverwittertem Blockwerk mit einem hohen Feinanteil. Die steile Böschung der Stirn zeigt auch keinerlei Bewuchs. Luftbildvergleiche der Jahre 1954 und 1990 zeigten eine deutliche Veränderung der Stirn, die in diesem Zeitraum von 36 Jahren um bis zu 30 m vorgestoßen ist. Dies ergibt für diesen Zeitraum eine jährliche Bewegungsrate von 0,83 m (Abb. 16). In diesem Zeitraum hat die Zunge auch stark an Mächtigkeit zugenommen.

1954 war die Zunge im Stirnbereich von einem markanten Moränenwall begrenzt. Die Blockgletscherzunge hat den Moränenwall seitlich leicht verdrängt. Die Zunge zeigte keine steile Stirn.

1990 ist der Moränenwall durch den Vorstoß in die Zunge integriert bzw. von der Zunge überfahren, die Zunge hat an Mächtigkeit stark zugenommen und eine steile Stirn entwickelt.

Der benachbarte Reichenkar-Blockgletscher ist im selben Zeitraum um ca. 23 m vorgestoßen, was einer jährlichen Bewegungsrate von 0,64 m entspricht (Krainer & Mostler, 2000a, b). Seit 1996 sind die jährlichen Bewegungsraten beim Reichenkar-Blockgletscher jedoch deutlich höher und liegen an der Stirn bei über 2 m/Jahr (Krainer & Mostler, 2000 a, b, Chesi et al., 2003). Vermutlich haben auch beim Sulzkar-Blockgletscher die Bewegungsraten in den letzten Jahren zugenommen. Der aktive Blockgletscher überfährt einen fossilen, bereits stark bewachsenen Blockgletscher.

fläche des Sulzkar-Blockgletschers, die sehr steile und frische Stirn und fehlende Vegetation sind typische Merkmale aktiver Blockgletscher. Auch die Korngrößenverteilung des Schuttmantels ist ähnlich wie bei den aktiven Blockgletschern im benachbarten Reichenkar (Krainer & Mostler, 2000 a, b) und Rosskar (Figl, 2004), oder in der Schobergruppe (Krainer & Mostler, 2001), und Ölgrube/Kaunertal (Berger et al., 2004). Unterschiede der Korngrößenzusammensetzung sind vor allem auf Unterschiede in den Gesteinen des Einzugsgebietes, sowie auf den unterschiedlichen tektonischen Zerlegungsgrad der Gesteine zurückzuführen. Blockgletscher mit überwiegend Glimmerschiefern im Einzugsgebiet (Göbnitztal/Schobergruppe) weisen kleinere Korngrößen



5. Diskussion

Die ausgeprägten transversalen und longitudinalen Rücken und Vertiefungen an der Ober-

Abb.16: Die Veränderungen im Zungenbereich des Sulzkar-Blockgletschers aufgrund von Vergleichen der Luftbilder aus den Jahren 1954 (grau) und 1990 (schwarz). Zwischen 1954 und 1990 hat sich die Zunge um bis zu 30 m vorgewegt.

auf als Blockgletscher mit Gneisen oder Amphiboliten (Reichenkar). (Krainer & Mostler, 2001). Nach Barsch (1996) liegen die Korngrößen der Gerölle an der Blockgletscheroberfläche meist zwischen 0,6 und 1 m, nach Giardino & Vick (1987) zwischen 0,5 und 1,5 m, nach Wahrhaftig & Cox zwischen 0,3 und 1,5 m, bei phyllitischen Gesteinen zwischen 5 und 10 cm. Die meisten Gerölle an der Oberfläche von aktiven Blockgletschern des High Plateau in Colorado (USA) liegen nach Shroder (1987) im Bereich zwischen -7 und -9 Phi (128–512 mm).

Das Temperaturverhalten der Schuttlage wird vor allem vom Wettergeschehen gesteuert, aber auch von den textuellen Parametern und der Mächtigkeit der Schuttlage, vom darunter liegenden Eiskörper sowie von der Dauer der Schneebedeckung beeinflusst.

In den Sommermonaten, nach dem Abschmelzen der Schneedecke, sind in den obersten 100 cm der Schuttlage deutliche, vom Wetterablauf geprägte saisonale Temperaturschwankungen zu beobachten. An Schönwettertagen treten auch deutliche Tagesschwankungen im Temperaturgang auf. Typisch ist auch die rasche Temperaturabnahme mit zunehmender Tiefe, in 120 cm waren Tagesschwankungen nicht mehr erkennbar. Ein ähnliches Temperaturverhalten wurde auch an aktiven Blockgletschern im Gößnitztal (Krainer & Mostler, 2001), im Reichenkar (Krainer & Mostler, 2000a, b) sowie in der Ölgrube/Kaunertal (Berger et al., 2004) festgestellt.

Am Blockgletscher waren die Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) um mindestens 2 – 3°C tiefer als neben dem Blockgletscher. Nach Barsch (1996) liegen die Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke auf aktiven Blockgletschern meist zwischen -3 und -5°C (siehe auch Haerberli, 1973, 1985; Goodrich, 1983; Keller & Gubler, 1993; Lieb, 1996).

Im Gegensatz zu den aktiven Blockgletschern, auf denen die BTS auch deutlich unter -5°C sinken kann, liegt die BTS außerhalb aktiver Blockgletscher konstant knapp unter dem Gefrierpunkt und sinkt nur ganz selten unter $-1,5^{\circ}\text{C}$.

Die BTS-Messungen haben auch gezeigt, dass die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke von Jänner bis April zwar auf einem tiefen Niveau, aber nicht konstant bleibt, wie von Haerberli (1985) berichtet. Markante Warmlufteinbrüche (Föhnwetterlagen) sowie starke Kaltlufteinbrüche wirken sich mit einer deutlichen Verzögerung von bis zu mehreren Tagen auch auf die BTS mit Tempera-

turschwankungen von $> 1^{\circ}\text{C}$ aus. Dies ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass der Schnee aufgrund von Windverfrachtungen nicht gleichmäßig am Blockgletscher verteilt ist, sondern sich verstärkt in den Mulden sammelt, während die Rücken stellenweise schneefrei bleiben. An diesen Stellen kann auch im Winter die Außenluft langsam in die grobblockige Schuttlage eindringen. Möglicherweise wird der Luftaustausch durch den Wind noch verstärkt (Humlum, 1997).

Ähnliche BTS-Daten wurden auch auf den aktiven Blockgletschern im Gößnitztal (Krainer & Mostler, 2001), im Reichenkar (Krainer & Mostler, 2000a, b) und in der Ölgrube/Kaunertal (Berger et al., 2004) gemessen.

Über das Abflussverhalten des Sulzkar-Blockgletschers können keine Angaben gemacht werden, da der Großteil des Wassers unterirdisch im Schutt des fossilen Blockgletschers abfließt und zusammen mit den Schmelzwässern des Muschenferners an der Blockgletscherquelle am Fuß der Stirn des fossilen Blockgletschers entspringen.

Die Wassertemperaturen an der bei starken Abflüssen zeitweise schüttenden Quelle des aktiven Blockgletschers ergaben mit $0,6^{\circ}\text{C}$ typische Werte, wie sie auch an den Quellen der aktiven Blockgletscher im Gößnitztal, Reichenkar und in der Ölgrube gemessen wurden (Krainer & Mostler, 2000a, b, 2001, 2002).

Eisaufschlüsse an der Basis der Schuttlage am Blockgletscher und die tiefen Wassertemperaturen der Blockgletscherquelle lassen darauf schließen, dass der Blockgletscher bis in den unmittelbaren Stirnbereich einen gefrorenen Kern besitzt, der von einer geringmächtigen Schuttlage ummantelt wird.

Über die derzeitigen Bewegungsraten liegen keine Messungen vor, vermutlich sind aber seit 1990, wie im benachbarten Reichenkar, auch beim Sulzkar-Blockgletscher die jährlichen Bewegungsraten angestiegen.

Die leicht ausgeprägte Depression im Wurzelbereich sowie Aufschlüsse von massivem Gletschereis in der Wurzelzone, das offensichtlich unter den Blockgletscher hineinzieht, deuten darauf hin, dass der Sulzkar-Blockgletscher, ebenso wie der benachbarte Reichenkar-Blockgletscher (Krainer & Mostler, 2000a, b; Krainer et al., 2003), aus der schuttbedeckten Zunge eines ehemaligen Kargletschers entstanden ist. Blockgletscher entwickeln sich dann aus schuttbedeckten Kargletschern, wenn die Schmelzwässer nicht in der Lage sind, den Schutt von der

Zunge des zurückschmelzenden Kargletschers zu entfernen (siehe Shroder et al., 2000). Demnach ist der Sulzkar-Blockgletscher als „ice-cored rock glacier“ sensu Potter, 1972) zu betrachten. Vermutlich handelt es sich beim Eiskern des Blockgletschers um den Rest des Gletschers, der während des letzten Gletscherhochstandes um 1850 (Kleine Eiszeit) das Kar ausgefüllt hat. Dieser Kargletscher, in kleinen Resten auf älteren Karten noch verzeichnet, ist durch die nachfolgende Klimaerwärmung, bis auf den schuttbedeckten Teil, fast völlig abgeschmolzen. Aus dem schuttbedeckten Teil hat sich, ähnlich wie im Reichenkar (Krainer et al., 2002) oder in der Ölgrube/Kaunertal (Berger et al., 2004), ein aktiver Blockgletscher entwickelt.

Klimatische Voraussetzungen für diskontinuierlichen Permafrost werden in den Stubaier Alpen erst in einer Seehöhe oberhalb von 2600 bis 2700 m erreicht. Die Zone des kontinuierlichen Permafrostes liegt in den Alpen nach Haerberli et al. (1999) über 2700 bis 3000 m Seehöhe. Der Sulzkar-Blockgletscher erstreckt sich über eine Seehöhe von 2540 m (Stirn) bis 2720 m (höchster Punkt der Wurzelzone), befindet sich also in einem Höhenbereich, der im unteren Bereich, teilweise bereits unterhalb der Zone des diskontinuierlichen Permafrostes liegt.

Dank

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines vom FWF – Wissenschaftsfonds (Projekt P 15218) geförderten Forschungsprojektes durchgeführt, für die finanzielle Unterstützung danken wir sehr herzlich. Für die Bereitstellung der Klimadaten der Station Obergurgl gilt unser Dank K. Gabl, A. Neururer und C. Schmid von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Regionalstelle für Tirol (Flughafen Innsbruck).

Literatur

- Ackert, R.P. (1998): A rock glacier/debris-covered glacier system at Galena Creek, Absaroka Mountains, Wyoming. – *Geografiska Annaler*, 80 (3–4): 267–276.
- Barsch, D. (1987): The problem of the ice-cored rock glacier. – In: *Rock Glaciers* (Ed. by J.R. Giardino, J.F. Shroder and J.D. Vitek), pp. 45–53. Allen & Unwin, London.
- Barsch, D. (1988): Rockglaciers. – In: *Advances in Periglacial Geomorphology* (Ed. by M.J. Clark), pp. 69–90. Wiley, Chichester.
- Barsch, D. (1992): Permafrost Creep and Rockglaciers. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 3: 175–188.
- Barsch, D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments. – Springer-Verlag, Berlin, 331 pp.
- Berger, J., Krainer, K. & Mostler, W. (2004): Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). – *Quaternary Research* (in press).
- Chesi, G., Geissler, S., Krainer, K., Mostler, W. & 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.
- Clark, D.H., Steig, E.J., Jr., Fitzpatrick, J., Updike, A. & Clark, G.M. (1996): Old ice in rock glaciers may provide long-term climate records. – *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 77: 217, 221–222.
- Clark, D.H., Steig, E.J., Potter, N. & Gillespie, A.R. (1998): Genetic variability of rock glaciers. – *Geografiska Annaler*, 80 A(3–4): 175–182.
- Figl, T. (2004): Quartärgeologie des hinteren Sulztales in den westlichen Stubaier Alpen unter besonderer Berücksichtigung der Blockgletscher. – Unveröff. Diplomarbeit, Naturwiss. Fak. Univ. Innsbruck.
- Finsterwalder, S. (1928): Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 16: 20–41.
- Frank, W., Hoinkes, G., Purtscheller, F. & Thöni, M. (1987): The Austroalpine unit west of the Hohe Tauern: the Ötztal-Stubai complex as an example for the eoalpine metamorphic evolution. – In: Flügel, H.W. & Faupl, P. (eds), *Geodynamics of the Eastern Alps*, 179–255, Deuticke, Vienna.
- Gerhold, N. (1967): Zur Glazialgeologie der westlichen Ötztaler Alpen. – *Veröffentlichungen des Museum Ferdinandeum*, 47: 5–50.
- Gerhold, N. (1969): Zur Glazialgeologie der westlichen Ötztaler Alpen unter besonderer Berücksichtigung des Blockgletscherproblems. – *Veröffentlichungen des Museum Ferdinandeum*, 49: 45–78.
- Giardino, J.R. & Vick, S.G. (1987): Geologic engineering aspects of rock glaciers. – In: *Rock Glaciers* (Ed. by J.R. Giardino, J.F.S. Jr. and J.D. Vitek), pp. 265–287. Allen & Unwin, London.
- Goodrich, L.E. (1982): The influence of snow cover on the ground thermal regime. – *Canadian Geotechnical Journal*, 19: 421–432.

- Haeberli, W. (1973): Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9: 221–227.
- 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.
- Haeberli, W. (1989): Glacier ice-cored rock glaciers in the Yukon Territory, Canada. – *Journal of Glaciology*, 35(120): 294–295.
- Haeberli, W. & Patzelt, G. (1982): Permafrostkartierung im Gebiet der Hochebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 18: 127–150.
- Haeberli, W., Käab, A., Hoelzle, M., Bösch, H., Funk, M., von der Mühl, D., & Keller, F. (1999): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP 31. – vdf Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich, 190 pp.
- Hoinkes, G. & Thöni, M. (1993): Evolution of the Ötztal-Stubai, Scarl-Campo and Ulten basement units. – In: von Raumer, J.F. & Neubauer, F. (eds), *Pre-Mesozoic Geology in the Alps*, 485–494, Springer, Berlin.
- Humlum, O. (1996): Origin of Rock Glaciers: Observations from Mellemfjord, Disko Island, Central West Greenland. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 7: 361–380.
- Humlum, O. (1997): Active Layer Thermal Regime at Three Rock Glaciers in Greenland. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 8: 383–408.
- Johnson, P.G. (1980): Glacier-rock glacier transition in the Southwest Yukon Territory, Canada. – *Arctic and Alpine Research*, 12(2): 195–204.
- Johnson, P.G. & Lacasse, D. (1988): Rock glaciers of the Dalton Range, Kluane Ranges, south-west Yukon Territory, Canada. – *Journal of Glaciology*, 34(118): 327–332.
- Keller, F. & Gubler, H.U. (1993): Interaction between snow cover and high mountain permafrost, Murtél-Corvatsch, Swiss Alps. – 6th International Conference on Permafrost, Vol. 1, pp. 332–337, Beijing.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2000a): Reichenkar, Rock Glacier: a Glacier Derived Debris-Ice System in the Western Stubai Alps, Austria. – *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 267–275.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2000b): Aktive Blockgletscher als Transportsysteme für Schuttmassen im Hochgebirge: Der Reichenkar Blockgletscher in den westlichen Stubai Alpen. – *Geoforum Umhausen* 1: 28–43.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2001): Der aktive Blockgletscher im Hinteren Langtal Kar, Göbnitztal (Schoberggruppe, Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). – *Wiss. Mitt. Nationalpark Hohe Tauern* 6: 139–168.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2002): Hydrology of Active Rock Glaciers: Examples from the Austrian Alps. – *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 34: 142–149.
- Krainer, K., Mostler, W. & Span, N. (2002): 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: 21–34.
- Lieb, G.K. (1996): Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. – *Arb. Inst. Geogr. Univ. Graz*, 33: 9–125.
- Outcalt, S.I. & Benedict, J.B. (1965): Photo interpretation of two types of rock glaciers in the Colorado front range, USA. – *Journal of Glaciology*, 5: 849–856.
- Pillewizer, W. (1957): Untersuchungen an Blockströmen der Ötztaler Alpen. – *Geomorphologische Abhandlungen des Geographischen Institutes der FU Berlin (Otto-Maull-Festschrift)*, 5: 37–50.
- Potter, N. (1972): Ice-Cored Rock Glacier, Galena Creek, Northern Absaroka Mountains, Wyoming. – *Geological Society of America Bulletin*, 83: 3025–3058.
- Potter, N., Steig, E.J., Clark, D.H., Speece, M.A., Clark, G.M. & Updike, A.B. (1998): Galena Creek rock glacier revisited – new observations on an old controversy. – *Geografiska Annaler*, 80A (3–4): 251–265.
- Shroder, J.F. (1987): Rock glaciers and slope failures. High plateaus and La Sal Mountains, Colorado Plateau, Utah, U.S.A. – In: *Rock Glaciers* (Ed. by J.R. Giardino, J.F. Shroder and J.D. Vitek), pp. 151–159. Allen & Unwin, London.
- Shroder, J.F., Bishop, M.P., Copland, L. & Sloan, V.F. (2000): Debris-covered glaciers and rock glaciers in the Nanga Parbat Himalaya, Pakistan. – *Geografiska Annaler* 82A (1): 17–31.
- Vietoris, L. (1958): Der Blockgletscher des Äußeren Hochebenkars. – *Gurgler Berichte* 1: 41–45.
- Vietoris, L. (1972): Über die Blockgletscher des Äußeren Hochebenkars. – *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9: 169–188.
- Vitek, J.D. & Giardino, J.R. (1987): Rock glaciers: a review of the knowledge base. – In: *Rock Glaciers* (Ed. by J.R. Giardino, J.F. Shroder and J.D. Vitek), pp. 1–26. Allen & Unwin, London.
- Wahrhaftig, C. & Cox, A. (1959): Rock glaciers in the Alaska Range. – *Geological Society of America Bulletin*, 70: 383–436.
- Whalley, W.B. (1979): The relationship of glacier ice and rock glacier at Grubengletscher, Kanton Wallis, Switzerland. – *Geografiska Annaler*, 61A(1–2): 49–61.

Whalley, W.B. & Martin, H.E. (1992): Rock glaciers: II models and mechanisms. – *Progress in Physical Geography*, 16(2): 127–86.

White, S.E. (1971): Rock glacier studies in the Colorado

Front Range, 1961 to 1968. – *Arctic and Alpine Research*, 3 (1): 43–64.

White, S.E. (1976): Rock Glaciers and Block Fields, Review and New Data. – *Quaternary Research*, 6: 77–97.