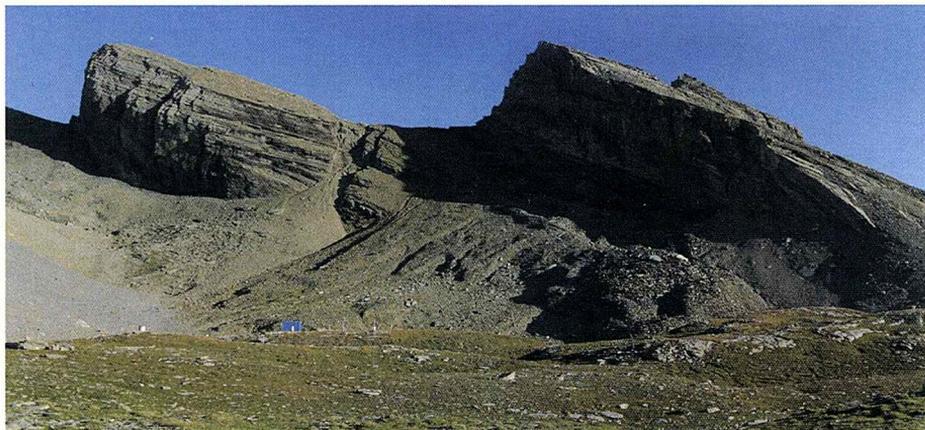


20 Jahre Furggentälti

Permafrostuntersuchungen auf der Gemmi

Bernhard Krummenacher, Dragan Mihajlovic,
Anina Nussbaum, Benno Staub (Hrsg.)



20 Jahre Furggentälti

Permafrostuntersuchungen auf der Gemmi

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Herausgeber:

Dozentinnen und Dozenten des Geographischen Instituts der Universität
Bern

Reihen:

Reihe A African Studies

Reihe B Berichte über Exkursionen, Studienlager und
Seminarveranstaltungen

Reihe E Berichte zu Entwicklung und Umwelt

Reihe G Grundlagenforschung

Reihe P Geographie für die Praxis

Reihe S Geographie für die Schule

Reihe U Skripten für den Unterricht

G 80

Arbeitsgemeinschaft GEOGRAPHICA BERNENSIA

In Zusammenarbeit mit der Geographischen Gesellschaft Bern

Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

Verlag des Geographischen Instituts der Universität Bern

20 Jahre Furggentälti

Permafrostuntersuchungen auf der Gemmi

Bernhard Krummenacher, Dragan Mihajlovic,
Anina Nussbaum, Benno Staub (Hrsg.)

Impressum

Anlässlich des Jubiläums „20 Jahre Bodentemperaturmessungen und Forschungsaktivitäten im Furggentäli“, Gemmi (VS) am 12./13. September 2008 wurden alle bisherigen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und in dieser Publikation veröffentlicht.

Herausgeber: Gruppe für Angewandte Geomorphologie und Naturrisiken
Geografisches Institut der Universität Bern
Hallerstrasse 12
3012 Bern

Autoren: Hans Kienholz, Geografisches Institut der Universität Bern
Bernhard Krummenacher, GEOTEST AG
Dragan Mihajlovic, Photogrammetrie Perrinjaquet AG und
Geografisches Institut der Universität Bern
Anina Nussbaum, Geografisches Institut der Universität Bern
Benno Staub, Geografisches Institut der Universität Bern

Redaktion, Layout: Anina Nussbaum

Umschlag: Alex Hermann

Ausschnitte aus amtlichen und thematischen Karten reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie swisstopo (BA081549)

Druck: Stämpfli Publikationen AG, Bern

Zitiervorschlag: Krummenacher, B.; Mihajlovic, D.; Nussbaum, A.; Staub, B. (Hrsg.), 2008: 20 Jahre Furggentäli – Permafrostuntersuchungen auf der Gemmi. Geographica Bernensia, Bern

Titelbild: Panoramabild des Furggentäli. (Foto: Benno Staub)

Vorwort

Mit photogrammetrischen Untersuchungen zu Blockgletscher-Bewegungen und Massenbilanzen im Weissmies- und Aletschgebiet haben Bruno Messerli und Max Zurbuchen Ende der 1960er Jahre Forschungsarbeiten über periglaziale Phänomene und Prozesse am Geographischen Institut der Universität Bern initiiert. 1964 hat Klaus Aerni anlässlich seiner Arbeiten zur Passgeschichte die Alte Gemmi be- gangen. Im Furggentälti markierte er mit Messmarken eine Blockgletscherfront und hat damit das Feld für Beobachtungen zu periglazialen Prozessen vorbereitet. 1983 fand unter der Leitung von Hans Kienholz das erste geomorphologische Gelände- praktikum im Furggentälti statt. Im Kreis von initiativen Studenten entwickelte sich in den Folgejahren der Wunsch zum Aufbau eines institutseigenen Testgebietes im Periglazialbereich.

Im Herbst 1988 wurde von Bernhard Krummenacher mit der Installation der ersten Messstation für Boden- und Lufttemperaturen der Grundstein für die Instrumen- tierung des Versuchsfeldes gelegt. Im Anschluss wurde das Testgebiet unter seiner Leitung mit weiteren Versuchs- und Messanlagen laufend ausgebaut. Seit 1998 leitet Dragan Mihajlovic die Arbeiten im Untersuchungsgebiet.

Mit der festen Verankerung der Vermessung und Fotogrammetrie im Ausbildungs- konzept am Geographischen Institut hatte der Nachfolger von Max Zurbuchen, Klaus Budmiger, im Furggentälti ein ideales Forschungs- und Anwendungsfeld zur Verfügung. Hier konnte auch die begonnene Tradition der photogrammetrischen Untersuchung von Blockgletschern und weiteren periglazialen Bewegungsformen wieder aufgenommen werden.

Der Aufbau der Messinstallationen und die Konstruktion spezieller Apparaturen im Furggentälti hat viel Pionierarbeit erfordert. Tätigkeiten im Hochgebirge stellen nicht nur hohe Anforderungen an technische Installationen; auch von den Forscherinnen und Forschern wird ein besonderer Einsatz verlangt. Periglaziale Prozesse laufen meist nur sehr langsam ab, und die Reaktion auf Klimaänderungen erfolgt im Allgemeinen verzögert. Deshalb erfordert Periglazialforschung auch ein hohes Mass an Geduld. Die Arbeit und die Geduld haben sich ausgezahlt: Das Furggentälti stellt in PERMOS (Permafrost Monitoring Switzerland) mit 14 Jahren die längste Messreihe für Temperaturen der Bodenoberfläche und der Basis- temperatur der Schneedecke dar.

Die Zusammenarbeit mit dem Systematisch-Geobotanischen Institut der Universität Bern erfolgte während mehrerer Jahre in vielfältiger Weise. Daraus entstanden kombinierte Arbeiten zur Vegetation und Geomorphologie.

Das Versuchsfeld im Furggentälti hat die Arbeiten in der Gruppe für Angewandte Geomorphologie und Naturrisiken in den letzten 20 Jahren nachhaltig geprägt. Durch die kontinuierliche Forschungstätigkeit konnten mehrere Generationen von Studierenden interessante Arbeiten durchführen und dabei wesentlich zu den

Forschungsergebnissen beitragen. Die Gründung des Fördervereins „Pro-Gemmi“ am 28. November 2003 schuf eine weitere Voraussetzung für den nachhaltigen Betrieb des Forschungs- und Versuchsfeldes Furggentälti. Der Förderverein unterstützt Forschungsarbeiten, Installationen und Publikationen und unterstützt die AGNAT am Geographischen Institut der Universität Bern in der Erhaltung und Weiterführung der einmaligen Messreihen.

Im Jahr 2008 laufen seit 20 Jahren kontinuierlich Arbeiten im Furggentälti. Diese Leistung wollen wir gemeinsam mit allen Kolleginnen und Kollegen feiern, die zu dieser Erfolgsgeschichte beigetragen haben. Die vorliegende Jubiläumsschrift gibt einen Überblick über die geleisteten Arbeiten.

Seit 1988 haben im Furggentälti viele Personen sei es im Rahmen von Dissertationen, Diplomarbeiten, Seminararbeiten oder Praktika ihre Spuren hinterlassen. Es sind dies:

Reto Affentranger, Beat Aliesch, Bernhard Blank, Klaus Budmiger, Andreas Catillaz, Adrian Chuck, Martin Daetwyler, Patricia von Deschwanden, Stefan Eggenberg, Esther Herzer, Markus Imhof, Cornelia Inauen, Ladina Jörger, Isabelle Kunz, Dorothea Kölbing, Philipp Leibundgut, Alex Leuenberger, Dragan Mihajlovic, Anina Nussbaum, Mirjam Pfister, Michael Reist, Corina Riedi, Severin Schwab, Benno Staub, Beat Tschanz, Corinne Vonlanthen, Pieter Zeilstra, Klaus Zimmermann.

Hinter diesen Personen standen immer auch Freunde, Freundinnen, Ehefrauen, Ehemänner und Kinder, sowie Helfer und Betreuer, welchen hiermit herzlich gedankt wird. Aber auch folgende Institutionen und Firmen trugen mit ihrer Unterstützung wesentlich zum Erfolg bei:

- Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf
- Lotteriefonds des Kantons Bern
- UniBern Forschungsstiftung
- Luftseilbahn Leukerbad-Gemmipass
- Hotel Wildstrubel Gemmipass bis 1994 Familie Loretan
- Hotel Wildstrubel Gemmipass ab 1995 Wolfgang Loretan
- Photogrammetrie Perrinjaquet AG, Gümliigen
- FLOTRON AG, Meiringen
- Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Bern
- Institut für Archäologie der Universität Bern
- Theodor Kocher Institut
- GEOTEST AG, Zollikofen
- Bundesamt für Militärflugwesen, Herr Lanz
- Heliswiss AG Bern, Hans Grether
- Air Glaciers, Gampel
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
- Geographisches Institut der Universität Zürich
- Institut für Geophysik der ETH Zürich
- Geografisches Institut der Universität Fribourg

- Alpengenossenschaft Gemmi
- PERMOS

Es freut uns, diese Jubiläumsschrift im Rahmen der Feierlichkeiten am 12. und 13. September 2008 auf der Gemmi vorlegen zu dürfen und danken allen Beteiligten Forscherinnen und Forschern für den Einsatz im Furggentälti.

Hans Kienholz und Bernhard Krummenacher

Inhalt

Vorwort	5
Glossar	11
1 Einleitung	15
1.1 <i>Forschungsfragen und Ziele</i>	15
1.2 <i>Das Untersuchungsgebiet</i>	16
1.2.1 <i>Geomorphologie</i>	16
1.2.2 <i>Geologie und Tektonik</i>	17
1.2.3 <i>Klima</i>	18
1.2.4 <i>Historischer Saumpfad</i>	18
2 Aufbau des Untersuchungsgebiets	19
2.1 <i>Delta-Logger</i>	19
2.2 <i>Vermessungsnetz und Photogrammetrie</i>	22
2.3 <i>Schrägbildkamera</i>	27
2.4 <i>Universal Temperatur Logger (UTL)</i>	30
2.5 <i>Container</i>	35
2.6 <i>Meteostationen</i>	39
3 Ergebnisse der Untersuchungen	43
3.1 <i>Permafrostverbreitung</i>	43
3.2 <i>Dynamik der Schneedecke</i>	46
3.3 <i>Botanik</i>	52
3.4 <i>Geophysikalische Untersuchungen</i>	55
3.5 <i>Bewegungsdynamik des Blockgletschers</i>	59
3.6 <i>Messung und Modellierung der Globalstrahlung im Untersuchungs-</i> <i>gebiet</i>	75
3.7 <i>Dynamik der Bodenoberflächentemperatur</i>	83
4 Diskussion	91
4.1 <i>Markante Veränderungen in kurzem Zeitraum</i>	91

4.2	<i>Hohe Bewegungsgeschwindigkeit und Prozessdynamik als Konsequenz von warmen Eistemperaturen</i>	92
4.3	<i>Andere Faktoren und Mechanismen</i>	94
4.4	<i>Auswirkungen des Klimawandels</i>	95
5	Ausblick	99
	Literatur	101
	Anhang	107
	<i>Geologische Karte Gemmi</i>	<i>108</i>
	<i>Tektonische Karte Gemmi</i>	<i>109</i>
	<i>Übersichtskarte</i>	<i>110</i>
	<i>Temperaturkurven Deltalogger 1988 - 2008</i>	<i>111</i>
	<i>Kriechbewegungen zwischen 1990 und 2005</i>	<i>112</i>
	<i>Scherbewegung zwischen 1990 und 2005</i>	<i>113</i>

Glossar

Im Folgenden werden einige spezifische periglaziale Begriffe erklärt, welche in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Die Zusammenstellung ist verändertert der Arbeit von Krummenacher et al. (1998) entnommen.

Aktiver Blockgletscher: Geomorphologische Form talwärts kriechenden Permafrostes, meist mit steilen Rändern und internen Fliessstrukturen. Die Stirn ist vegetationsfrei.

Aktiver Permafrost: Im aktiven Permafrost gefriert die Auftauschicht jedes Jahr vollständig durch.

Auftauschicht: (Active layer) Oberflächenschicht in Permafrostgebieten, welche im Sommer auftaut und im Winter gefriert.

Blockgletscher: Gletscherförmige Schutt- und Blockakkumulation im Permafrost. Unter der Schwerkraft bewegt sich die Masse hangabwärts. Man unterscheidet zwischen aktiven, inaktiven und reliktschen Formen. Aktive Blockgletscher sind in Bewegung, während inaktive zum Stillstand gekommen sind. Reliktische Blockgletscher enthalten kein Eis mehr, und sie zeigen deutliche Zerfallsstrukturen und sind oft mit Vegetation bedeckt.

Boden-Wärmefluss: Wärmeenergie, die durch Wärmeleitung entweder von der wärmeren Bodenoberfläche in die kältere Tiefe fließt oder umgekehrt. Der Boden-Wärmefluss hängt von der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und vom Temperaturgradienten im Boden ab.

BTS: Die **B**asis**T**emperatur der hochwinterlichen Schneedecke wird zur Kartierung der Permafrostverbreitung vor allem in den Alpen verwendet. Die Methode basiert auf dem Prinzip, dass die mindestens 0.8 bis 1.0 m mächtige Schneedecke den Boden gegen die kurzfristigen Schwankungen der Temperatur und der Strahlung isoliert. Die Messungen müssen vor dem Einsetzen der Schneeschmelze vorgenommen werden. Am Boden stellt sich dann eine praktisch konstante Temperatur ein, welche in permafrostfreien Gebieten höher als -2 C° ist. Im Permafrost liegt die Temperatur dagegen unter -3 C° , Werte dazwischen werden dem Übergangsbereich zugeordnet.

BOT: Die **B**oden**O**berflächen**T**emperatur (auch GST) wird mit automatischen Messgeräten (Datalogger) beispielsweise UTL1 (www.utl.ch) registriert. Im Gegensatz zur BTS-Messung wird die BOT nicht nur im Spätwinter gemessen, sondern die Bodenoberflächentemperatur wird kontinuierlich im Jahresverlauf registriert. Dabei können beispielsweise die verschiedenen thermischen Effekte bei den unterschiedlichen Einschneitern terminen verfolgt und analysiert werden.

Diskontinuierlicher oder fleckenhafter Permafrost: Gebiete mit Permafrost wechseln sich mit permafrostfreien Zonen ab.

Eisübersättigter Permafrost: Der Eisgehalt ist grösser als das Porenvolumen der Formation in ungefrorenem Zustand. Es gibt also zusammenhängende Eisgebilde, im Besonderen auch Eislinen.

- Epigenetischer Permafrost:** Der Permafrost bildete sich in einer Formation, welche vorher entstanden ist. Dies geschieht z.B. bei kälter werdenden Klimabedingungen.
- Firn:** vorjähriger Schnee, meist auf Gletschern. Durch das Schmelzen und Wieder-gefrieren stark umgewandelt und verdichtet.
- Firnlinie:** Höchste Lage der temporären Schneegrenze am Ende des Haushaltjahres auf einem Gletscher. Die Firnlinie liegt tiefer als die Schneegrenze im unvergletscherten Gebiet. Sie liegt i. Allg. nahe der Gleichgewichtslinie. In den Berner Alpen liegt die Firnlinie bei ca. 2950 m ü. M., in den Walliser Alpen hingegen auf 3200 m ü. M.
- Frostkriechen:** Ist eine Hangabwärtsbewegung von Bodensubstrat bei Frostwechselzyklen (Kammeisbildung). Meistens ist Frostkriechen mit Gelifluktion verbunden und wird im allgemeinen in die Messungen mit einbezogen, weil beide Prozesse mit einer einzigen Messung kaum differenziert werden können (Washburn, 1979).
- Gesättigter Permafrost:** Der Porenraum des Gesteinskörpers ist mit Eis gefüllt.
- Gelifluktion:** Washburn, 1979 betrachtet Solifluktion nur als Sammelbegriff für jede Form des Bodenfließens. Solifluktion in Abhängigkeit von gefrorenem Boden bezeichnet er als Gelifluktion. Der Begriff geht in dieser Form zurück auf Baulig, 1956; zitiert aus Washburn, 1979.
- Gletscher:** Schnee, Firn- und Eismassen, die von einem Nährgebiet mit einem Überschuss an Massenzufuhr (Akkumulationsgebiet) zu einem Zehrgebiet mit vorwiegendem Massenverlust (Ablationsgebiet) fließen. Im Gegensatz zum Permafrost sind Gletscher nicht nur von der Temperatur sondern auch vom Niederschlag abhängig.
- Gleichgewichtslinie:** Bereich der Gletscher, in dem sich während eines Jahreszyklus Akkumulation und Ablation die Waage halten (Trennlinie zwischen Nährgebiet und Zehrgebiet). Die Massenbilanz ist hier ausgeglichen.
- Gradtag:** Arithmetisches Tagesmittel einer Temperaturmessreihe tageweise aufsummiert über eine bestimmte Zeit. Gradtage umfassen sowohl positive als auch negative Temperaturen, weshalb deren Summe ebenfalls positive oder negative Werte annehmen kann
- Inaktiver Blockgletscher:** Blockgletscher der zum Stillstand gekommen ist, aber trotzdem noch Permafrost aufweisen kann. An der Blockgletscherstirn bildet sich aufgrund der reduzierten Bewegung oft Vegetation.
- Inaktiver Permafrost:** Ist der Permafrost inaktiv, gefriert die Auftauschicht im Winter nur teilweise, und es bleibt eine ungefrorene Zone (Talík) übrig.
- Klima:** Der aus langjährigen Beobachtungen ermittelte durchschnittliche Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder in einem Gebiet sowie die Verteilung der typischen meteorologischen Mittel- und Extremwerte.
- Kontinuierlicher Permafrost:** Ausser unter Gewässern und Gletschern tritt Permafrost flächendeckend auf.
- Latente Wärme:** Wärmemenge, die bei jeder Phasenumwandlung insbesondere bei der Änderung des Aggregatzustandes eines gasförmigen, flüssigen oder festen Körpers verbraucht bzw. freigesetzt wird.

MAAT: Mean Annual Air Temperatur, mittlere Jahreslufttemperatur

Periglazial: ("um das Glaziale herum") Die Periglazial-Geomorphologie befasst sich mit Prozessen und Formen, welche vor allem in den unvergletscherten, meist baumlosen Gebieten der arktischen und subarktischen sowie den Hochgebirgen zu beobachten sind. Die Prozesse und Formen des Periglazials stehen in enger Beziehung zum Permafrost.

Permafrost: Abgeleitet von **permanent Frost** (Dauerfrost). Als Permafrost bezeichnet man Lithosphärenmaterial, das während der Dauer von mindestens einem Jahr Temperaturen unter 0°C aufweist.

Perennierender Schneefleck: Schnee, welcher ganzjährig kaum wegschmilzt. Meist bilden sich perennierende Schneeflecken in Mulden in Lawinenablagezonen. Sie können als Hinweis auf Permafrostvorkommen interpretiert werden.

Permafrostbasis: Untergrenze des Permafrostes im Lithosphärenmaterial. Oberhalb der Permafrostbasis ist die Temperatur immer kälter als 0° C, darunter liegt sie über 0° C.

Permafrostspiegel: Untergrenze der Auftauschicht. Zwischen dem Permafrostspiegel und der Permafrostbasis ist die Temperatur dauernd unter 0° C.

Ponor: Ein Schluckloch oder Schwinde im Karst, in der das Wasser in unterirdischen Karsthohlräumen verschwindet.

Reliktischer Blockgletscher: Blockgletscher ohne Permafrost, d.h. das Eis ist ausgeschmolzen, und es bleibt ein kollabiertes Gebilde übrig.

Reliktischer (fossiler) Permafrost: Permafrost aus der Vorzeit (z.B. Eiszeit), der noch existiert, aber langsam schmilzt.

Solifluktion: Form des Bodenfließens unter den Bedingungen des Periglazials bzw. des Permafrostes.

Sporadischer Permafrost: Vereinzelt, lokal auf kleinen Flächen auftretende Permafrostverbreitung.

Strukturböden: Auf auffällig strukturierten Böden sind die Steine z.B. in regelmässigen Formen angeordnet (Ringe, Sechsecke). Es treten auch Eiskeile und Eiskeilnetze auf.

Syngenetischer Permafrost: Der Permafrost entsteht mehr oder weniger gleichzeitig mit der Bildung des Lockermaterialkörpers.

Thermokarst: Prozess, durch welchen die Topographie infolge aufgetautem, eisübersättigtem Permafrost einsinkt. Bildet sich in der Geländeform ein See, spricht man von einem Thermokarstsee.

Winter Equilibrium Temperature (WEQT): „Winterliche Gleichgewichtstemperatur“ der Bodenoberfläche unter der Schneedecke. Rahmenbedingungen: Mächtige Schneedecke, welche die atmosphärischen Einflüsse gänzlich vom System Bodenoberfläche-Permafrostkörper abkoppelt. Die WEQT kann als Temperatur pro Periode ausgedrückt werden.

ZAA: Zero Annual Amplitude. Tiefe, in welcher praktisch keine jahreszeitlichen Temperaturschwankungen auftreten d.h. in welcher sie geringer als 0.1° C sind. Je nach Amplitude an der Oberfläche und Temperaturleitfähigkeit der Formation liegt die ZAA in einer Tiefe von 10 bis 20 m.

Zero curtain: Zeitperiode, während der die Temperatur am Schmelzpunkt bleibt. Der 'zero curtain' tritt insbesondere in der feuchten Auftauschicht im Frühling und im Herbst auf.

1 Einleitung

1.1 Forschungsfragen und Ziele

Die meisten periglazialen Prozesse laufen sehr langsam ab. Damit man die verschiedenen Teilprozesse analysieren und verstehen kann, müssen sie mit geeigneten Methoden und Instrumenten erfasst werden. Dabei spielt die Dauer der Beobachtungszeit die entscheidende Rolle. In diesem Forschungsbereich gilt die alte Regel wonach eine Messung gleich keine Messung ist ganz besonders. Die Witterungs- und Schneebedeckungsbedingungen können von einem zum andern Jahr derart stark schwanken, dass für das Studium jedes Teilprozesses immer mehrere Jahre eingeplant werden müssen.

Die Entwicklung von Monitoringmethoden stand und steht deshalb immer im Vordergrund der Aktivitäten. Wobei aber die Auswertung und Interpretation der gemessenen Daten nicht vernachlässigt werden darf. So konnten einige wichtige Erkenntnisse wie beispielsweise die Entwicklung und der Langzeittest eines Miniatur Temperaturloggers UTL, die Bestimmung der „aktiven Tage“ bei der Solifluktion, oder der Einfluss der Schneedecke auf die BTS-Werte usw. gewonnen werden. Mit den nun zur Verfügung stehenden langen Messreihen (Boden- und Lufttemperaturen über 20 Jahre), können in Zukunft vermehrt auch umfangreiche Analysen der Datenreihen vorgenommen werden.

Vor 20 Jahren, als die verschiedenen Formen und Prozesse erstmals über ein bis zwei Jahre rein qualitativ beobachtet wurden, waren die Periglazialforscher der AGNAT der Meinung, dass die einsetzende Klimaerwärmung die Prozesse sehr stark beeinflussen würde. Die Messungen zeigen nun aber, dass dies nicht generell gilt und dass die Monitoringmethoden weiter entwickelt und angepasst werden müssen.

Mit den Beobachtungen im Furggentälti wurde auch das nun in der Schweiz etablierte PERMOS (Permafrost Monitoring Switzerland) massgebend mitentwickelt. Damit das Testgebiet Furggentälti auch in den kommenden 20 Jahren zu den zentralen PERMOS – Standorten zählen kann, wird es wichtig sein, dass wir im Bereich des Blockgletschers eine Bohrung erstellen und instrumentieren können. Dabei könnte eine Methode entwickelt werden, die es erlaubt, ein Bohrloch so zu instrumentieren, dass es auch unter schnellen Deformationen möglichst lange gute Messdaten liefert.

Eine Frage die uns schon lange beschäftigt ist die, wie man mit künstlichen Mitteln den Permafrost im Untergrund durch geeignete Methoden z.B. durch abdecken erhalten oder sogar wiederinitieren könnte.

Die Forschungs- und Entwicklungsziele werden in diesem sehr interessanten Tälchen am Rande der Berner Alpen auch in Zukunft nicht ausgehen und vielleicht gelingt es uns ja noch den Stopp des Blockgletschers in der Ebene, wie vor 20 Jahren salopp mit ein paar Jahren prognostiziert, zu dokumentieren und zu erklären.

1.2 Das Untersuchungsgebiet

Das Furggentältli befindet sich ca. 1.5 km nordöstlich der Gemmipasshöhe in den westlichen Berner Alpen zwischen Kandersteg und Leukerbad und ist ein Seitental des SSW-NNE verlaufenden Isoklinal-Hochtals, das sich von der Gemmi über den Schwarnbach bis zur Spittelmatte erstreckt. Das Furggentältli wird im Westen durch einen glazial überprägten Felsriegel, im Norden durch das Rinderhorn und im Süden durch die Plattenhörner begrenzt. Im Westen öffnet sich das Hängetal etwa 200 Höhenmeter oberhalb des Daubensees.

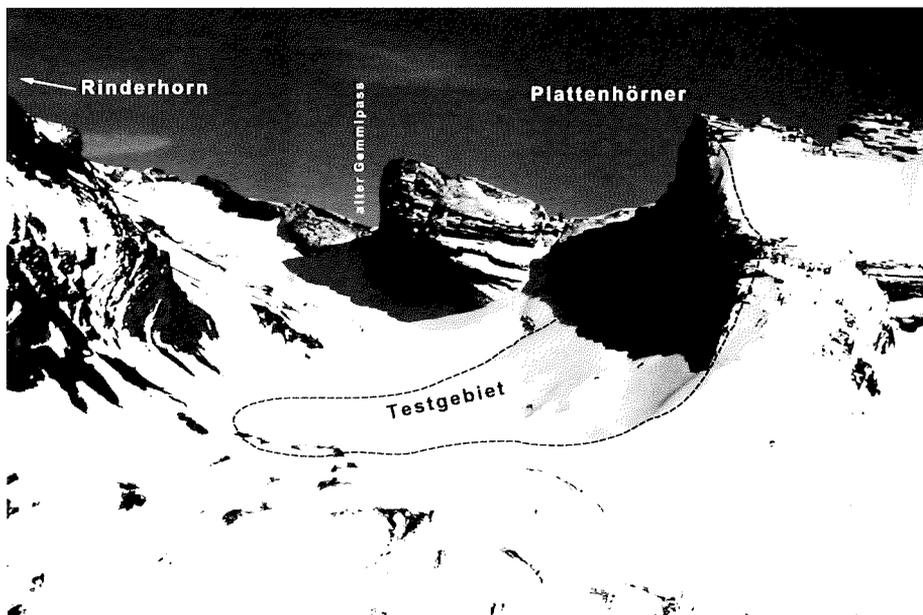


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet von Westen her gesehen. (Flugaufnahme, 10. April 1997, B. Krummenacher)

1.2.1 Geomorphologie

Das abgeschlossene Hängetal weist auf kleinem Raum eine grosse geomorphologische Vielfalt auf. Eine kleine Karschwelle mit glazial überprägten Felsformen, so genannten Roches Moutonées, zeugt von Gletscherpräsenz im Furggentältli in den grossen Eiszeiten. Aufgrund des kleinen Einzugsgebiets des Furggentältis bildete sich während der kleinen Eiszeit vermutlich bloss ein kleines Firnfeld anstelle eines eigentlichen Lokalgletschers. Wodurch die vorzufindenden Formen in jüngerer Zeit nicht mehr glazial überprägt wurden.

Die südexponierte Talseite, am Südfuss des Rinderhornes, ist von ausgedehnten Frostschuttfächern und gravitativen Prozessen geprägt. Auf der gegenüberliegenden,

nordexponierten Talseite am Nordfuss der Plattenhörner fehlt die direkte Sonnenbestrahlung weitgehend, so dass die Schutthalden teilweise mit Permafrost durchsetzt sind. Dadurch entstanden verschiedene Frostschuttloben und Blockgletscher in unterschiedlichen Grössen.

Auf Teilen der Karschwelle wie auch des Talbodens sind Frostmusterböden wie auch aktive Solifluktionszungen zu finden. Der übrige Talboden ist vorwiegend durch Karsterscheinungen und Dolinen geprägt.

Schwerpunkt der Forschung bildet der Grösste am Taleingang liegende Blockgletscher sowie eine grössere Solifluktionslobe auf der östlichen Seite der Karschwelle (vgl. Übersichtskarte auf Seite 110). (nach Kuhn, 2000)



Abbildung 2: Der grösste Blockgletscher am Taleingang des Furggentäli bildet der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten. (Foto: B. Staub)



Abbildung 3: Wanderblock am Rande des Untersuchungsgebiets. (Foto: B. Krummenacher)

1.2.2 Geologie und Tektonik

Das Untersuchungsgebiet befindet sich innerhalb der helvetisch-parautochthonen Doldenhorndecke. Die nordwestlich der Kulmination des Aarmassivs nach Nordwesten abtauchende Deckenfront ist stark verfaultet und umfasst Sedimente vom unteren Dogger bis zum Tertiär, deren Schichten um ca. 30° nach Nordwesten abfallen (Gfeller, 1989). Die Südwand der Plattenhörner und deren talwärtige Fortsetzung – der Steilabbruch nach Leukerbad – sind durchzogen von sowohl im Kartenbild als auch im Gelände sehr auffälligen NW-SE-streichenden Brüchen mit nur geringem Versatz (Imhof, 1992).

Die verschiedenen Schichten der helvetischen Decke wurden durch die sich vorschubenden penninischen Decken während der alpinen Orogenese gefaltet und übereinander geschoben. Deshalb stehen die tektonisch über der Doldenhorndecke abgelagerten helvetischen Decken westlich des Daubensees an und bilden markante Felsstufen. Östlich des Daubensees und somit auch im Untersuchungsgebiet fehlen hingegen die höheren Decken (Wildhorn- und Gellihorndecke). Dies wird mit der Rawildepression erklärt. Die Rawildepression ist auch die Ursache für das Abtauchen sämtlicher Schichten der helvetischen Decken im Bereich der Gemmi nach

Nordwesten, was die charakteristische Bergform wesentlich beeinflusst. So zeigen beispielsweise Rinderhorn und Altels gleichmässig geneigte, glatte nach Nordwesten abfallende Bergflanken und eine raue und steile Süd- bis Ostwand.

Auf Seite 108 und 109 sind eine geologische sowie eine tektonische Karte des Untersuchungsgebietes zu finden.

Infolge der aufgeschlossenen Kalkschichten im Furggentäli zeigt sich eine typische Karstlandschaft. Das Gebiet ist von zahlreichen Höhlen, Gängen und Mulden durchzogen. Dies wird auch dadurch belegt, dass kein Oberflächenabfluss aus dem Furggentäli in den ebenfalls unterirdisch abfliessenden Daubensee gelangt.

1.2.3 Klima

Zwischen dem niederschlagsreichen Alpennordrand und den inneralpinen Trockentälern gelegen, befindet sich das Furggentäli im Gebirgsklima mit tendenziell hohen Jahresniederschlägen von 1800 bis 2500 mm. Da das Tal durch die Plattenhörner von Süden und das Rinderhorn von Norden gegen die orographischen Niederschläge abgeschirmt wird, gelangt primär durch die westliche Talöffnung Feuchtigkeit ins Furggentäli.

Das Furggentäli befindet sich in der oberen alpinen Höhenstufe und reicht bis in den nivalen Bereich. Die Temperaturen schwanken im Jahresmittel um 0° C. Im Schatten der Plattenhörner misst die mittlere Lufttemperatur -0.7° C und auf der etwas sonnenreicheren Karschwelle 0.3° C. Dabei ist die Variabilität während des Winterhalbjahres grösser als diejenige der Sommermonate. Die tiefen Temperaturen manifestieren sich in vielen Eis- und Frostwechsellagen und sind unter anderem auf die geringe Sonneneinstrahlung, respektive den grossen Schattenwurf der Plattenhörner zurückzuführen. Diese klimatischen Faktoren resultieren in einer kurzen Vegetationsdauer von 2 bis 3 Monaten. Im Talboden und auf der Karschwelle gedeiht im Juli eine wunderschöne Alpflora, im steileren Gelände verhindern die Bewegungsraten und die Schutzzufuhr grösstenteils das Entstehen einer durchgehenden Vegetationsdecke.

1.2.4 Historischer Saumpfad

Schon seit alter Zeit diente die Gemmi als Verbindungspass zwischen den Nord- und Südalpen. Bevor die steile Daubenwand mit einem Weg passierbar gemacht wurde, führte die Passroute vom Daubensee aus in östlicher Richtung durch das Furggentäli, über die alte Gemmi und auf der anderen Seite auf die Clavinentalp und der Dala entlang nach Leukerbad. Heute sind die historischen Wegspuren im Furggentäli nur noch bruchstückhaft erkennbar. (Nach Jeanneret, 2006)

2 Aufbau des Untersuchungsgebiets

Im Herbst 1988 wurde mit dem Deltalogger die erste Messeinrichtung im Furggentälti in Betrieb genommen. Seither wurden zahlreiche weitere Installationen eingerichtet. Dieses Kapitel stellt die verschiedenen Einrichtungen und Arbeiten vor. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Zeiträume der getätigten Messungen und Arbeiten.

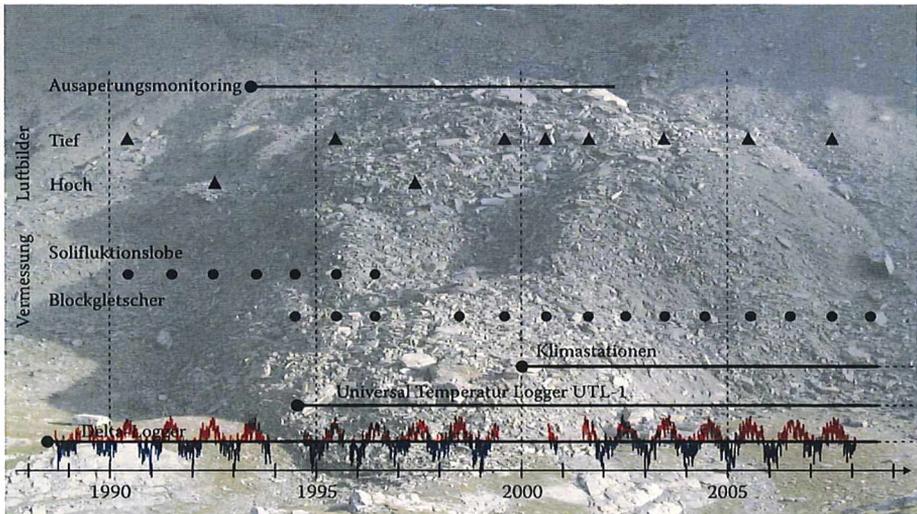


Abbildung 4: Im Furggentälti ausgeführten Arbeiten und Messungen, sowie der Verlauf der Lufttemperatur 1.5 m über Boden mit dem Deltalogger registriert.

2.1 Delta-Logger

Zu Beginn des Monitorings im Furggentälti im Jahr 1988 galt es, die für periglaziale Prozesse wichtigsten Parameter zu messen und eine Messreihe aufzubauen.

Da für unsere Fragestellungen primär die Parameter Boden- und Lufttemperaturen, sowie Strahlung und Niederschlag in Form von Schnee von besonderem Interesse sind, wurde bei der lokalen Datenerfassung auf diese Messgrößen besonderer Wert gelegt. Als erstes wurde eine Messstation für Boden- und Lufttemperaturen erstellt.

Messungen von Temperaturen in periglazialen Untersuchungsgebieten im Bodenprofil und in verschiedenen Positionen über der Bodenoberfläche waren in den Alpen bis 1988 selten über längere Zeit durchgeführt worden. Besonders im Zusammenhang mit solifluidalen Prozessen lagen nur wenige Daten vor.

Freund (1972) führte als Erster länger andauernde Messungen auf der Lenzerheide (1470 m ü. M.) und auf dem Parpaner Rothorn (2810 m ü. M.) durch. Mathys (1973) untersuchte Gesteinsoberflächen- und Felstemperaturen am Jungfrauostgrat auf

3700 m ü. M. Er setzte dabei 6-Kanal Messgeräte der PTT ein. Als Messsonden dienten Thermolemente aus NiCr-Ni Legierungen, die über einen Thermostat (50°C) als Bezugstemperatur gekoppelt waren.

Umfangreiche Temperaturmessungen im Periglazialbereich wurden Ende der siebziger Jahre durch Gamper (1981) im Schweizerischen Nationalpark vorgenommen. Für Messungen am Munt Chavagl (2400 m ü. M) verwendete er einen 12-Kanal „Delta Logger DL-1“ mit 11 Messwertgebern für Boden- und Lufttemperaturen. Da sich dieses Messverfahren bewährt hatte, wurde im Furggentälti eine analoge Anlage installiert.

Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Messstation im Furggentälti und die Lage der Thermistoren (vgl. Abbildung 6). Für die Temperaturmessungen wurden Widerstandsthermometer des Typs ST1 (Delta-T-Logger-Devices LTD Cambridge, UK) mit folgenden Spezifikationen verwendet: 2kOhm bei 25°C, Genauigkeit $\pm 0.2^\circ\text{C}$ bei -20 bis $+ 80^\circ\text{C}$, Drift $\pm 0.02^\circ\text{C}$ in 8 Jahren. Mit dieser Genauigkeit kann davon ausgegangen werden, dass die Messungen auch noch heute nach 20 Jahren Betriebsdauer einwandfrei sind. Es hat sich also gelohnt, hier relativ teure Thermistoren einzusetzen.

Im Frühjahr 1993 wurde am selben Logger ein Pyranometer des Typs GL 2810 (Delta-T-Logger-Devices LTD Cambridge, UK) installiert. Leider gab es immer wieder grosse Datenausfälle, so dass keine vollständige Messreihe der Strahlung an diesem Standort existiert.

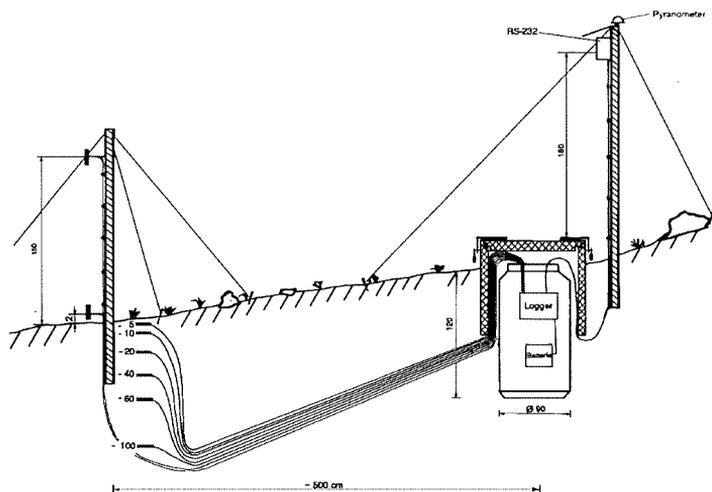


Abbildung 5: Aufbau der Temperaturmessstation (unmassstäblich). Rund 5 m entfernt vom Fass mit Logger und Batterie, in unmittelbarer Nähe der Solifluktion, sind die Thermistoren installiert. Die Thermistoren über dem Boden sind mit einem Strahlungsschutz versehen. Damit kein Sickerwasser von der Oberfläche direkt zu den Sensoren fließen kann und die Messungen dadurch beeinflussen würde, verlaufen die Verbindungskabel zuerst seitwärts nach unten.



Abbildung 6: Installation eines Thermistors.

Pro Thermistor wird im Zweistundenintervall ein Temperaturwert aufgezeichnet, der sich aus dem Mittel von vier 30-Minuten-Werten bildet. Die Kapazität des Loggers reicht bei diesem Aufzeichnungsrhythmus etwa acht Monate. Im Allgemeinen werden die Daten seit 20 Jahren vierteljährlich ausgelesen. Die gesamte Datenreihe ist als Graphik auf Seite 111 dargestellt. Die Messreihe für das Jahr 2007 ist in Abbildung 7 zu sehen.

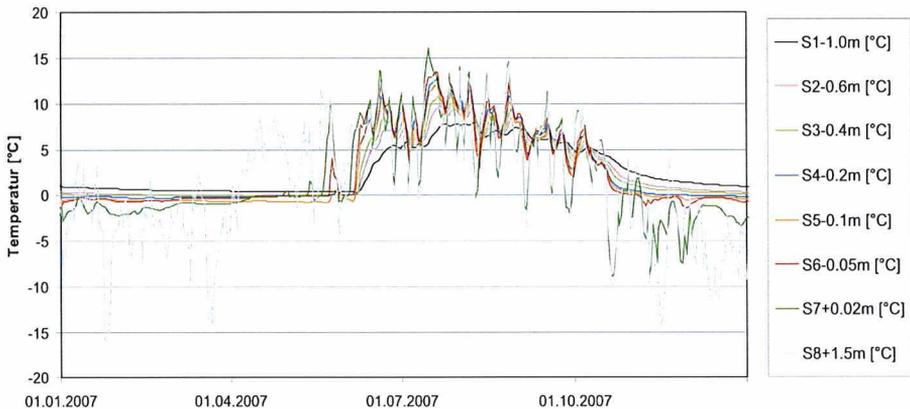


Abbildung 7: Deltaloggermessreihe für das Jahr 2007.

Zusammenfassung und Bewertung des Temperaturverlaufs im Furggentälti 1988 – 1996:

- Die Jahresdurchschnittstemperaturen (1990 - 1993) der Luft schwanken zwischen 0.1°C und 0.9°C. Die jährlichen Bodentemperaturen (1990 - 1993) bewegen sich zwischen 1.0°C und 2.2°C. (Winterfrostboden).
- Eine Tendenz einer generellen Zu- oder Abnahme der Temperaturen ist nicht erkennbar.
- Beim Jahresgang der Bodentemperaturen lässt sich ein Sommertyp (Mai / Juni bis Oktober / November) und ein Wintertyp (Oktober / November bis Mai / Juni) unterscheiden (analog zu Freund, 1972).
- Die Bodentemperaturen zeigen viel geringere Amplituden als die Lufttemperaturen. Ein Tagesgang lässt sich bis in 40 cm teils bis in 60 cm Tiefe feststellen.
- Der Isoliereffekt der Schneedecke ist äusserst ausgeprägt. Von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der winterlichen Bodentemperaturen sind die ersten Schneefälle des Winters (Zeitpunkt des Einschneiens, vgl. auch Veit, et al., 1995: 120).
- Der Boden taut immer erst nach Beginn der Ausaperung auf.
- Frostwechseltage im Boden (5 cm Tiefe) treten sehr selten auf. Wie zusätzliche Messungen mit dem UTL1 Logger Nr. 13 zeigen, kommen im Herbst in 1 cm Bodentiefe bedeutend mehr Forstwechseltage vor als in 5 cm Tiefe.
- Die Zahl der Eistage im Boden variiert von Jahr zu Jahr. Ihre maximale Anzahl erreichen die Eistage in 5 cm Bodentiefe. In einem Meter Tiefe schwankt die Anzahl der Eistage bisher (1989 - 1996) zwischen 0 und 181 Tagen.

2.2 Vermessungsnetz und Photogrammetrie

Bei der Ausarbeitung eines Vermessungskonzeptes für die Erfassung von Bewegungen im Periglazialbereich sind die räumlichen Dimensionen des Untersuchungsobjektes einerseits und die zu erwartenden Verschiebungen andererseits von zentraler Bedeutung. Bei Solifluktionsbewegungen sind jährliche Verschiebungsbeträge im mm- bis cm-Bereich zu erwarten.

Eine genaue Erfassung der absoluten Verschiebungsbeträge in diesen Grössenordnungen bei einer Messfeldgrösse von ca. 30 x 60m verlangt eine Präzisionsvermessung auf der Basis stabiler Fixpunkte.

Da im Testgebiet Bewegungen im Mikrobereich zu erwarten waren, war klar, dass sich die Methode der Kleintriangulation am besten eignete. Dazu musste ein Messnetz mit Festpunkten eingerichtet werden.

Das Messnetz setzt sich, wie die meisten Verschiebungs- und Deformationsnetze, aus folgenden Elementen zusammen:

Fernziele: Die Fernziele wurden in Form von Metallplatten mit Fadenkreuz an den Felswänden des Rinderhorns bzw. der Plattenhörner installiert. Als weiteres Fernziel

das zum Einrichten des Messnetzes verwendet wurde, diente der Triangulationspunkt x 2470 m ü. M., 2. Ordnung der Landesvermessung.

Fixpunkte: Als Fixpunkte des Netzes wurden auf anstehendem Fels betonierete Säulen verschraubt (vgl. Abbildung 8), die zusätzlich mit einem Eternitrohr umgeben sind, um so einen besseren Witterungs- und beim Messen einen Strahlungsschutz zu gewährleisten.

Zielpunkte: Auf der Solifluktionszunge wurden als Zielpunkte in 20 grössere Steine Messmarken gebohrt und eingeleimt. Die Konstruktion wurde mit drehbaren Messingbolzen erstellt, die um ihre Längsachse gedreht und so von jedem Fixpunkt aus eingemessen werden können (vgl. Abbildung 9). Die Fixpunkte wurden vor der Nullmessung ins Schweizerische Koordinatensystem integriert.

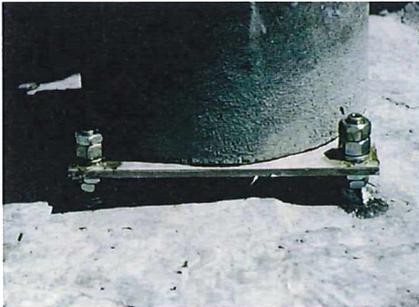


Abbildung 8: Fixierung der Betonpfeiler auf anstehendem Fels mit Leimanker M16. (Foto: B. Krummenacher)



Abbildung 9: Zielpunkt auf der Solifluktionszunge, die Messingmarke ist um 360° drehbar. (Foto: B. Krummenacher)



Abbildung 10: Sekundentheodolit Kern E2 montiert auf Fixpunkt 101. (Foto: B. Krummenacher)



Abbildung 11: Zielmarke montiert auf Fixpunkt. (Foto: B. Krummenacher)

Durch die Erfassung aller Winkelmessungen mit einem Sekundentheodolit Kern E2 in beiden Lagen des Messgerätes einerseits und durch die Wiederholung der Satzmessungen von jedem Fixpunkt aus andererseits stehen die Daten für die Fehlerrechnung zur Verfügung. Diese Daten werden direkt im Gelände auf dem Taschenrechner „Sharp PC 1600“ analysiert. Mit einem von Klaus Budmiger entwickelten Programm zur Deformationsvermessung können die Kennwerte für den Gütetest berechnet werden. Basierend auf diesem Präzisionsmessnetz konnten die Verschiebungen der Steine in der Solifluktionszunge sehr genau bestimmt werden. Zusammenfassend können folgende Schlüsse gezogen werden:

Die um 8° geneigte Solifluktionszunge wurde von 1990 bis 1996 mit Hilfe des Präzisionsvermessungsnetzes bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Veränderungen analysiert. Korrelationen zwischen den Fliessbewegungen und dem Temperaturverlauf im Boden und in der Luft konnten nachgewiesen werden.

In diesem Zeitraum zeigten die solifluidalen Bewegungen einen durchschnittlichen Betrag von 5,8 mm (vgl. Abbildung 12). Die Verschiebungen der 20 Messmarken, die im Präzisionsmessnetz mit Fehlerellipsen von unter 1 mm (Halbachsen der Ellipsen) gemessen werden konnten, weisen eine grosse Variabilität auf. Die Bewegungen finden nur an wenigen Tagen zur Zeit der Ausaperung statt und sind spätestens eineinhalb Monate nach dem Ausapern abgeschlossen. Die jährlichen Schwankungen werden durch die "Schneegeschichte" bestimmt. Der Zeitpunkt des Einschneiens, die Mächtigkeit der Schneedecke, sowie der Zeitraum und die Geschwindigkeit des Ausaperns sind die steuernden Faktoren. Dass diese Faktoren mit dem Temperaturgang gekoppelt sind, ist evident. Die Anzahl der Eistage in 1 m Bodentiefe korreliert mit der jährlichen Verschiebungsrate signifikant. Die Anzahl der Eistage schwankte dabei von 1990-1996 zwischen 0 und 181 Tagen pro Jahr.

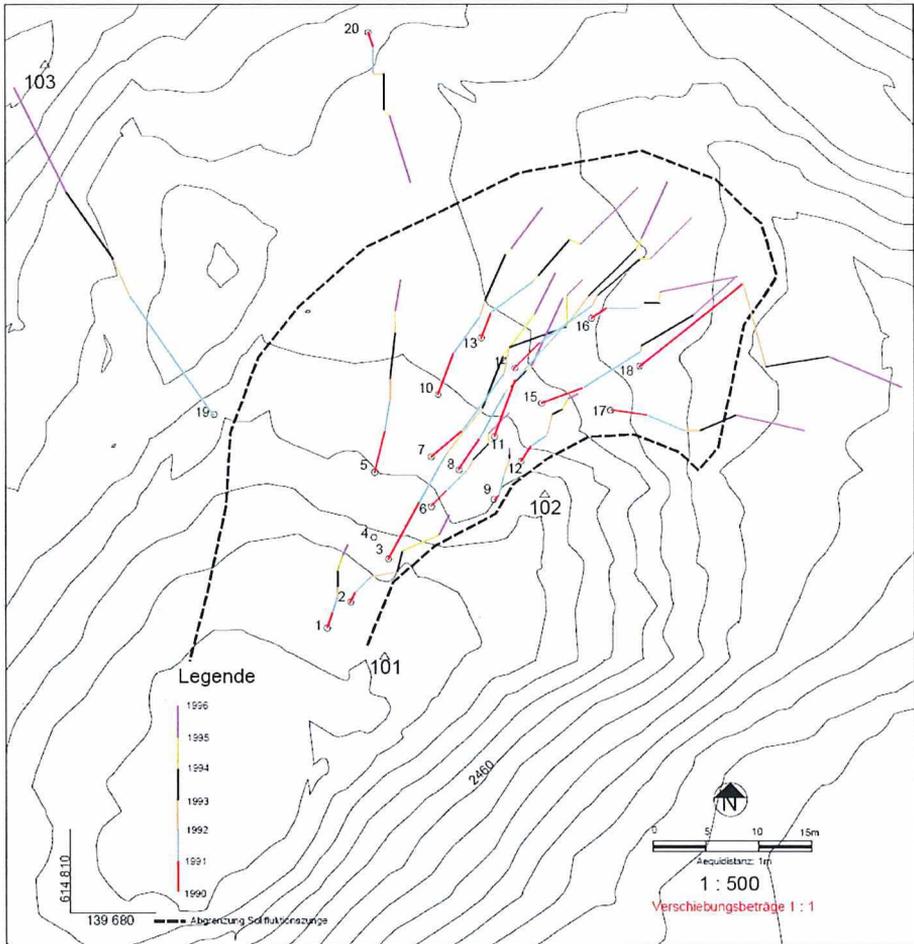


Abbildung 12: Jährliche Verschiebungsbeträge der 20 markierten Punkte 1990-1996, horizontale Komponente. (Blank, 1997)

Photogrammetrie:

Das Hauptziel der ersten photogrammetrischen Arbeiten bestand darin, Informationen zum Massenhaushalt des Blockgletschers zu erhalten. Dabei kamen zwei Strategien zur Anwendung:

- Vermessung über grössere Zeiträume mit kleinmasstäbigen Luftbildern.
- Präzise Luftbildvermessung mit kleinem Zeitunterschied mit speziell für diesen Zweck erstellten Luftaufnahmen.

Alle photogrammetrischen Messungen wurden auf dem analytischen Auswertegerät LEICA - DSR14 der Firma PERRINJAQUET ausgeführt. Dieses Präzisionsgerät,

gekoppelt mit modernen Berechnungs- und Auswerteprogrammen erlaubt ein effizientes und flexibles Kartieren und Messen im Raum.

Um Auskunft über die räumlichen Veränderungen des Blockgletschers über grössere Zeiträume zu erhalten, eignen sich die Luftbilder des Bundesamtes für Landestopographie (L+T, heute swisstopo), da regelmässig neue Luftbilder geflogen werden.

Die Untersuchungen beruhen auf den verfügbaren Stereomodellen der Jahre 1960, 1974, 1985 und 1992.

Damit die Stereobilder überhaupt ausgewertet werden konnten, mussten vor dem Bildflug im Herbst 1990 im unbewegten Gelände Passpunkte signalisiert werden. Die weissen Quadrate von ca. 20 cm Seitenlänge bilden seither das Referenzsystem, auf welches sich die Messungen beziehen (vgl. Abbildung 13). Ausgehend von den Fixpunkten zur Vermessung der Solifluktionszunge wurden die Koordinaten der Punkte mit dem elektronischen Tachymeter E2 bestimmt. Die Passpunktgenauigkeit liegt bei +/- 2 cm in Lage und Höhe.



Abbildung 13: Erstellung eines Passpunktes, das Zentrum dieser Fläche wird tachymetrisch vermessen. (Foto: B. Krummenacher)

Aus den verschiedenen Luftbildern wurden in der Folge digitale Geländemodelle erstellt, die im Direktvergleichsverfahren ausgewertet werden konnten. Dabei konnten für die verschiedenen Zeitabschnitte die Bewegungen des Blockgletschers und die Volumenveränderungen bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.5 zusammengestellt.

2.3 Schrägbildkamera

Im Frühling 1993 wurde am Südhang des Rinderhorns eine Fotokamera installiert, welche auf den Blockgletscher im vorderen Teil des Tales fokussierte. Ziel der Installation war es, einerseits die Entwicklung der Vegetationsbedeckung auf der Solifluktionszunge zu erfassen (von Deschwanden, 1995) und andererseits die Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet mit einer möglichst hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung fotografisch festzuhalten und anschliessend zu quantifizieren.

Die Kamera

Als Aufnahmesystem wurde eine damals handelsübliche Kleinbild-Spiegelreflexkamera vom Typ Nikon F90 gewählt, welche mit einer Multifunktionsrückwand (Nikon MF-26) für automatische Intervall-Aufnahmen ausgestattet war und mit Kodachrome-Diafilm im Kleinbildformat beladen wurde. Bei der Wahl der Ausrüstung standen das selbständige Funktionieren, der niedrige Stromverbrauch und der vergleichsweise günstige Preis im Vordergrund.

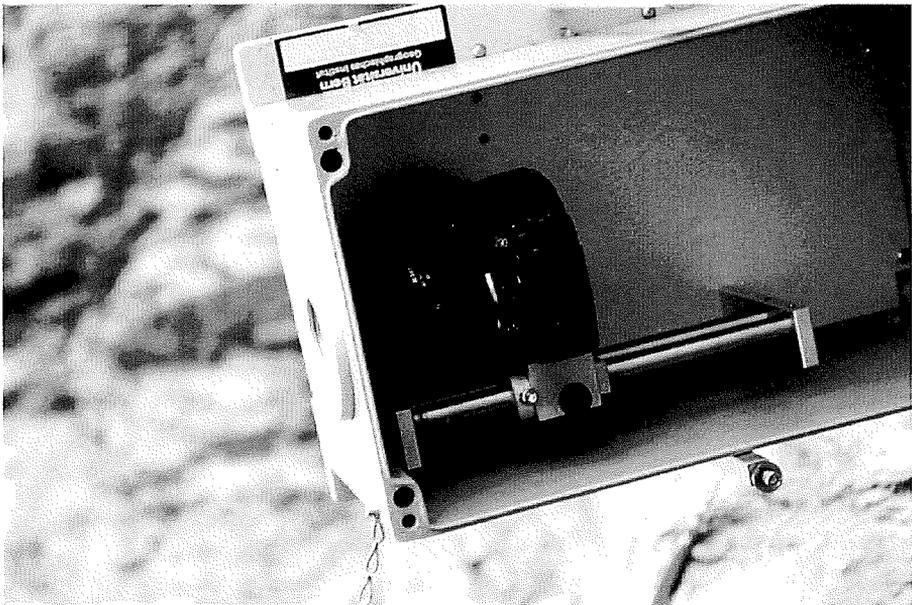


Abbildung 14: Die Nikon F90 im wetterfesten Gehäuse angefertigt durch die Werkstatt des Theodor Kocher Instituts der Universität Bern. (Foto: D. Mihajlovic)

1993 gab es noch kaum digitale Fotokameras, geschweige denn solche mit ausreichender Bildqualität. Die erste „professionelle“ Digitalkamera (Nikon E2N) kam erst drei Jahre später auf den Markt, mit einer Auflösung von 1.3 Megapixel, einem

Die Bildserie

Vom Juni 1993 an fotografierte die Kamera hauptsächlich während der Zeit des Aperwerdens das Untersuchungsgebiet um den Blockgletscher im Tages- oder Zweitagesrhythmus. Bis 2002 kamen so fast 2000 Aufnahmen zu Stande, welche das Untersuchungsgebiet mit unterschiedlichen Schneebedeckungen zeigen.

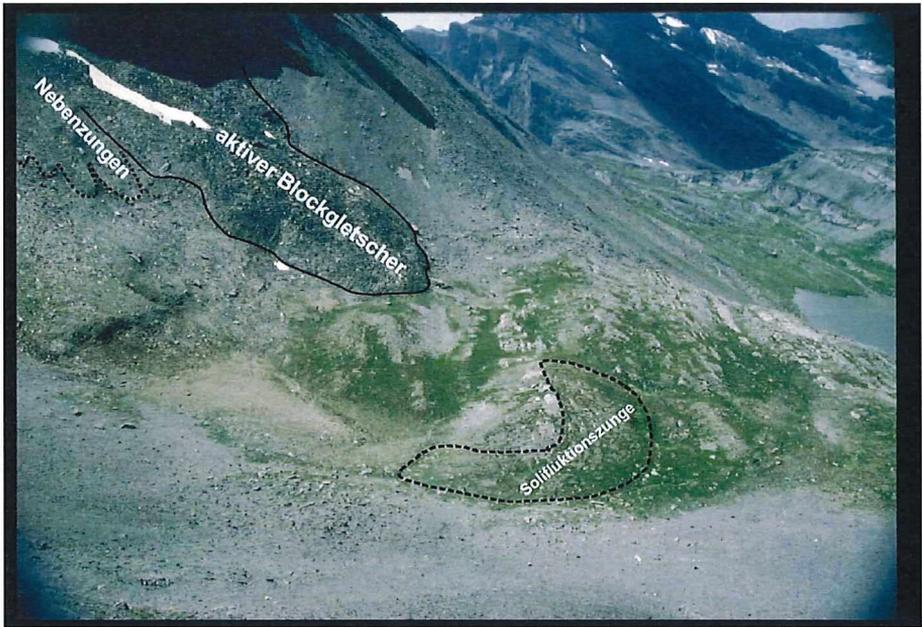


Abbildung 16: Aufnahme der automatischen Kamera vom 22. 8. 1993, mit Blockgletschern und Solifluktionsszunge.

Für die Auswertung wurden von den Bildern digitale Orthofotos erstellt, bei welchen das Bild mit Hilfe eines Geländemodells in die Kartenprojektion entzerrt wurde. Auf diesen Bildern wurde anschliessend mittels Bilderverarbeitung die Schneebedeckung quantifiziert, die verschiedenen Zustände im GIS zu Karten zusammengefasst und z.B. für die Modellierung der kurzwelligen Nettostrahlung verwendet (siehe Kapitel 3.2).

Dank den Schrägbildaufnahmen wurden im Untersuchungsgebiet auch verschiedene Phänomene beobachtet, die sonst unentdeckt geblieben wären: So hat die Kamera in einigen Jahren einen See fotografiert, welcher sich während der Schneeschmelze auf der Schneedecke im tiefsten Teil der Karmulde bildet, wenn der dortige Ponor zugefroren ist. (Abbildung 17)

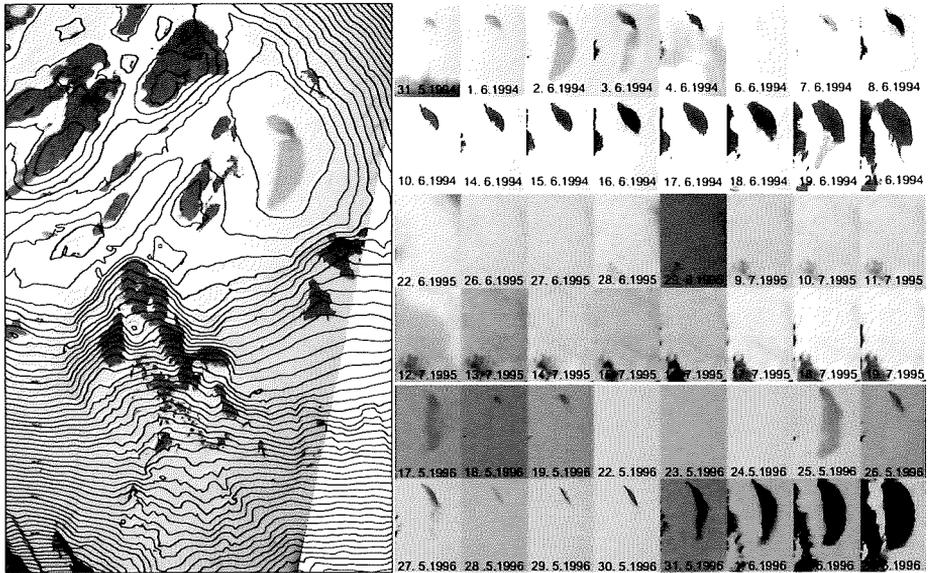


Abbildung 17: Bildung eines Schmelzwassersees im Talboden des Furggentäli. Die Orthofoto im Bild links zeigt die Lage und Ausdehnung des Sees am 2. Juni 1994. Rechts die Entwicklung des Sees und die Beeinflussung der Ausaperung in den Jahren 1994, 1995 und 1996.

2.4 Universal Temperatur Logger (UTL)

In den Jahren 1987 bis 1995 wurden im Furggentäli regelmässig BTS-Messungen durchgeführt. Dazu konnten die zu mehreren Metern zusammensetzbaren Messsonden der VAW der ETH Zürich gratis ausgeliehen werden. Bei dieser Methode werden Sonden durch die Schneedecke bis auf die Bodenoberfläche gerammt. Der in der Sondenspitze eingeleimte Thermistor registriert nach einer kurzen Angleichzeit die Temperatur an der Schneebasis. Die Methode hat den Vorteil, dass einerseits das Gelände begangen werden muss und dadurch die Schneeverhältnisse vor Ort analysiert werden können und andererseits können mit wenigen Sonden innerhalb eines Tages viele Punkte gemessen werden.

Die Nachteile dieser Methode wurden bei den Messungen zwischen 1987 und 1995 offensichtlich. So mussten wegen Lawinengefahr die Messkampagnen mehrmals verschoben werden und wenn dann endlich die Verhältnisse das Begehen der steilen Hangpartien ermöglichte, war oft die Schneedecke durch Regen durchfeuchtet und die stabile Basistemperatur war bereits verändert. Dazu kam, dass die Helferequipe meist kurzfristig zusammengestellt werden musste und das gestaltete sich oft als sehr mühsam, obwohl am Ende des Tages eine rassistige Pulverschneeabfahrt bevorstand.

Die oben beschriebenen Probleme sind allen Anwendern der BTS-Methode bekannt. In vielen Diskussionen in Fachkreisen wurde die Idee der kontinuierlichen Messung der BTS schon diskutiert. Punktuell wurden bereits kontinuierliche Messungen der Bodenoberflächentemperaturen bei Klimastationen durchgeführt. Um aber in einem grösseren Gebiet an mehreren Stellen die BTS kontinuierlich messen zu können, müssten auf diese Weise eine entsprechende Anzahl Messstationen errichtet werden. Eine Verkabelung der Messstellen zu einem zentralen Datalogger ist theoretisch möglich, doch beispielsweise auf einem Blockgletscher mit grobblockigem Material ist diese Lösung unrealistisch, da die Verbindungskabel durch das Verschieben der Blöcke zerstört würden.

Diese Umstände veranlassten Bernhard Krummenacher 1990, mit Hilfe von Jürg Schenk und der Werkstatt des Theodor Kocher Instituts der Universität Bern, einen automatischen Datenlogger zu entwickeln.

Die Anforderungen an solche Messgeräte sind sehr hoch, da sie für unsere Zwecke im Allgemeinen im Hochgebirge zum Einsatz kommen. Stark wechselnde hohe und tiefe Temperaturen und Feuchtigkeitsverhältnisse einerseits und die teilweise mechanische Beanspruchung der Loggergehäuse im grobblockigen, kriechenden Schutt der Blockgletscher andererseits setzten die Massstäbe.

Die konfektionierten Datenlogger, welche die autonome Erfassung von Temperaturwerten über lange Zeiträume (≥ 1 Jahr) ermöglichen, stammen aus dem Transportgewerbe und erfüllen die oben aufgeführten Anforderungen nur teilweise.

Robuste Ausführungen waren 1990 zwar auf dem Markt erhältlich, die Stückpreise waren jedoch sehr hoch ($> \text{Fr. } 500.-$). Es galt also einen Datenlogger zu entwickeln, der speziell für Messungen im Hochgebirge und im Periglazialbereich eingesetzt werden konnte und zudem günstig im Preis war.

Da der neue Datenlogger universell einsetzbar sein sollte und die Absicht bestand, diesen Logger auch zu verkaufen, sollte der Name so gewählt werden, dass er kurz, prägnant und in allen Sprachen anwendbar ist. Bernhard Krummenacher kreierte den Namen „UTL“ für Universal Temperatur Logger. Die erste Serie wurde somit mit UTL1 bezeichnet. Diese Bezeichnung sollte Bestand haben, es konnten bis dato mehrere hundert UTL1 in fast allen Kontinenten und 20 Ländern verkauft werden. Mit dem Erlös aus dem Verkauf der UTL1 konnte 1997 der Container auf der Gemmi angeschafft und installiert werden.

In der Folge wurde der UTL nicht nur im Bereich des Periglazial eingesetzt, sondern auch in andern Bereichen wie der Bodenkunde, Bauwesen, Grundwasserüberwachung, usw. In kleinen Stückzahlen wurde auch der UTL 2 Logger entwickelt, der mit einem externen Thermistor ausgerüstet war, um Messungen in Felsritzen, kleinen Löchern in Beton, usw. durchführen zu können. Diese Produktion wurde aber wieder eingestellt, da zu kleine Mengen verkauft werden konnten.

Im Jahr 2002 wurde wegen Problemen beim Finden von geeigneten Betreuungspersonen am GIUB das immer aufwändiger werdende „Loggergeschäft“ an die GEOTEST AG übergeben, denn dort war inzwischen auch der langjährige Betreuer der UTL, Severin Schwab als Mitarbeiter angestellt.

Technische Informationen zum UTL1

Da die konfektionierten Geräte die oben erwähnten Anforderungen nicht erfüllen, wurden die Konstruktion und der Bau eigener Geräte an die Hand genommen. Diese Geräte sollten allen Anforderungen für einen Hochgebirgseinsatz genügen, und sie sollten preisgünstig sein, damit eine grosse Stückzahl eingesetzt werden kann. Der hier vorgestellte Mini - Temperatur - Datalogger basiert auf dem „ONSET HTC08 Datalogger“ (USA) und weist einen für die vorliegende Fragestellung speziell programmierten Temperaturbereich auf, da die handelsüblichen Geräte einen viel grösseren Temperaturbereich abdecken und dadurch mit 8-Bit eine sehr grobe Auflösung (ca. 0,5°C) haben. Auch die Thermistorführung wurde den technischen Gegebenheiten der eigenen Gehäusekonstruktion angepasst. Dieses neue Messgerät wird kurz UTL1 (Universal Temperatur Logger Typ 1) genannt.

Technische Daten zum UTL 1 - Data Logger (Version 2.0)

Print:	ONSET/Hobo HTC08 (Entwicklung und Vertrieb USA)
Grösse:	40 x 28 x 12 mm
Anzahl Messungen:	7944
maximale Messdauer:	1588 Tage
Messbereich:	-30 bis + 40°C
Messgenauigkeit:	± 0.1 °C im Messbereich
Auflösung (8 Bit):	0.27°C
maximale Messdauer:	2 Jahre
Stromversorgung:	Lithium-Zelle 3,6 V, reicht für 2 Jahre
Messwertgeber:	Thermistor TMC-1T
Datenübertragung:	RS – 232 C
Gehäuse:	Eigenbau (Firma Locher AG Walkringen)
Zylinder:	Delrin
Schraubverschluss,	
Messspitze:	Alu (eloxiert)
Eigenschaften:	wasserdicht und mechanisch beanspruchbar
Software:	LogBook, Version 2.04 / Jan.1996 für Win95, Win NT und Mac

Zur Konstruktion

Der aus dem zähen Kunststoff DELRIN gefertigte Gehäusezylinder weist eine grosse Druckfestigkeit auf. Die Messspitze sowie der Abschlussdeckel sind aus Aluminium (eloxiert) gefertigt und sind mit Dichtungsringen versehen. Diese Konstruktion garantiert eine sehr gute Abdichtung. Die Öse am Abschlussdeckel ermöglicht die Fixierung des Loggers. Bei Messungen in wassergefüllten Bohrlöchern hat sich diese Konstruktion bestens bewährt. Diese zylindrische Form mit 39 mm Durchmesser kann auch in Piezometerrohre eingeführt werden (vgl. Abbildung 18).

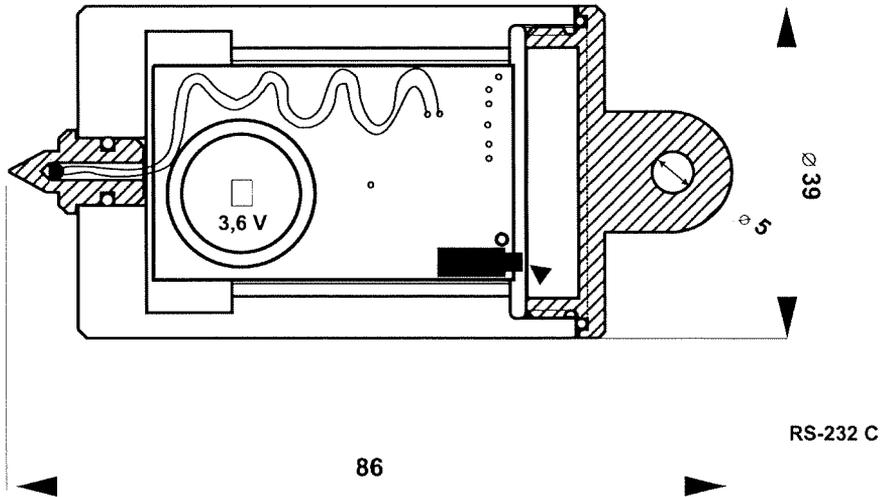


Abbildung 18: Konstruktionszeichnung des UTL1 ® (B. Krummenacher, GIUB,) Masse in [mm].

Ausgewählte Beispiele der BOT- und BTS-Messungen

Abbildung 20 zeigt die Ganglinien der registrierten Boden-Oberflächen-Temperaturen an drei ausgewählten Standorten (vgl. Abbildung 19) einerseits auf dem Blockgletscher (Logger Nr. 2 und Nr. 4) und andererseits im permafrostfreien Gelände vor dem Blockgletscher (Logger Nr. 13).

Analyse und Diskussion der Ganglinien (vgl. Abbildung 20):

Die absinkenden Temperaturen im Herbst 1994 sind gut erkennbar. Auf eine kurze Phase mit kalten Temperaturen (Schneefall) Anfang Oktober folgt ein wärmerer Abschnitt Mitte Oktober, bevor der Winter bereits Ende Oktober Einzug hält.

Die allgemein höheren Temperaturen des Messstandortes Nr. 13 (vgl. Abbildung 19) im Oktober sind auf zwei Effekte zurückzuführen:

Der Standort Nr. 13 ist durch die umliegenden Gebirgsketten wesentlich weniger stark abgeschattet als der Bereich des Blockgletschers. Diese Tatsache konnte durch Strahlungsmodellierungen bestätigt werden.

Das Substrat, in das der Logger Nr. 13 eingebettet ist, ist im Gegensatz zum Blockgletschersubstrat sehr feinkörnig. Dadurch wird ein optimaler Kontakt mit der Oberfläche gewährleistet. Durch die dunkle Farbe des Lockermaterials kann aufgrund der tiefen Albedo sehr viel Energie im Boden gespeichert werden.

Ab Mitte Oktober weist in diesem Beispiel das ganze Untersuchungsgebiet eine geschlossene Schneedecke auf. Bei Messpunkt Nr. 13, einer flachen Geländepartie, bildet sich schnell eine Schneedecke, die das Eindringen atmosphärischer Temperaturschwankungen sehr stark reduziert. Die Temperatur pendelt sich dabei auf wenigen Zehntelsgraden unter dem Gefrierpunkt ein. Markante langandauernde tiefe

Temperaturen (-15 bis -23°C) von Anfang bis Mitte Januar 1995 bewirkten eine Erniedrigung der BTS nach einigen Tagen. Dieser Effekt konnte auch in anderen Gegenden des Alpenraumes beobachtet werden.

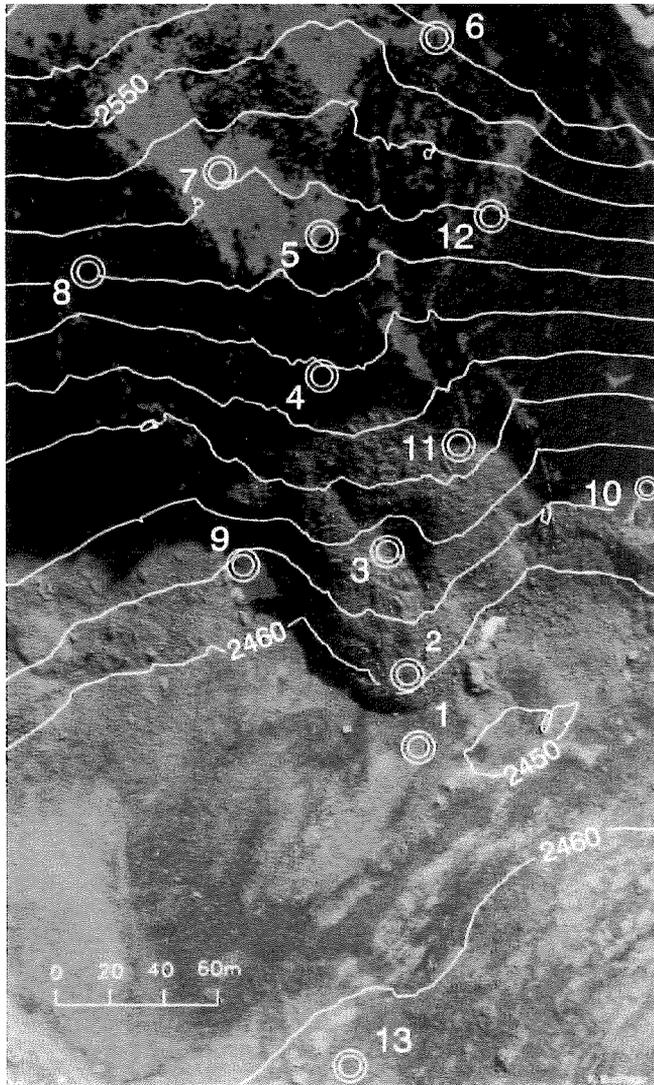


Abbildung 19: Standorte der ULTI Messgeräte im Testgebiet Furggentälti, Abbildungsbasis: Orthofoto

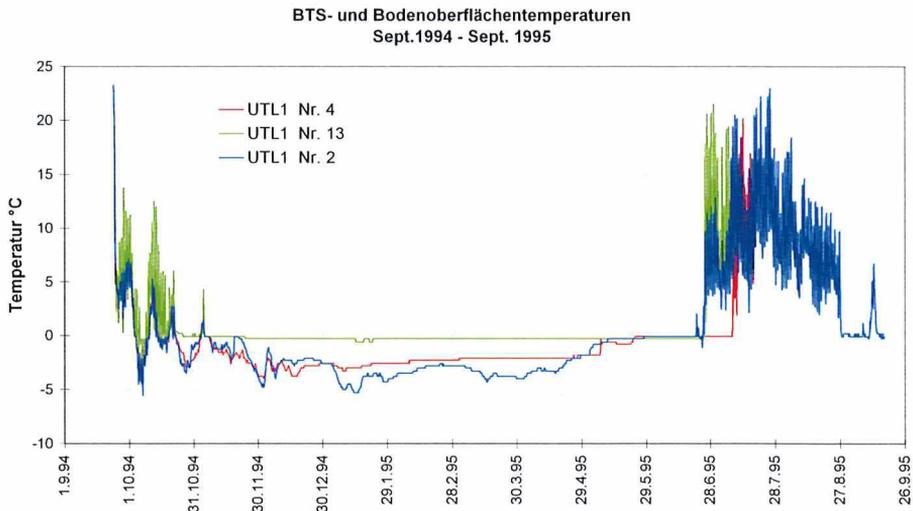


Abbildung 20: BOT- bzw. BTS-Messungen mit UTL1-Loggern an 3 ausgewählten Standorten auf dem Blockgletscher und im Blockgletscher-Vorfeld, im Zeitraum von Sept. 1994 bis Sept. 1995.

Weiterentwicklung:

Dank dem sehr soliden Gehäuse und der zuverlässigen Hard- und Software des UTL1 und UTL2 konnte das Gerät bis heute gut eingesetzt und weltweit verkauft werden. Die Entwicklung von Miniaturloggern auf dem Markt ist rasant vorangetrieben worden. Da die Produktion des HOBO-ONSET-Loggers in den USA eingestellt wird und das Nachfolgemodell nicht mehr den Ansprüchen auf Einfachheit und Kostengünstigkeit entspricht, mussten nach einem neuen Produkt Ausschau gehalten werden.

Das SLF in Davos hatte in den letzten Jahren einen eigenen Logger entwickelt. In einer Arbeitsgemeinschaft entwickelten GEOTEST AG und SLF Anfang 2008 einen neuen Logger mit den ausgezeichneten Eigenschaften des Gehäuses des UTL1 und einer neuen 12 Bit Architektur des neuen SLF Loggers. Dieses Produkt wird im Sommer 2008 in einer ersten Serie als UTL3 auf den Markt gehen (siehe www.utl.ch).

2.5 Container

Als im Oktober 1988 mit dem Bau der Boden- und Lufttemperaturstation begonnen wurde, musste zur Unterbringung des Materials ein Hauszelt aufgebaut werden. Im gleichen Zeitraum begannen Stefan Eggenberg, Niklaus Zimmermann und Patrizia von Deschwanden mit den botanischen Erhebungen im Gemmigebiet. Unter anderem wurde 1992 auf der Solifluktionsszunge eine botanische Feinkartierung durchgeführt, zu deren periodischen Weiterführung musste das gesamte Gebiet der Solifluktion umzäunt werden (vgl. Abbildung 21). Anfänglich wurde das Werkzeug und

sonstiges Material, das für die Aufnahmen von Bewegungen und Vegetation erforderlich war unter grossen Steinblöcken gelagert. Im Jahr 1993 konnte bei einem Helikopterflug durch die Armee eine vom Systematisch-geobotanischen Institut der Universität Bern erstellte Kiste aus Lärchenholz ins Furggentältli gebracht werden. (vgl. Abbildung 22)



*Abbildung 21: Bau der Umzäunung mit Bauzelt neben der Solifluktionszunge
(Foto: B. Krummenacher)*

Diese Kiste diente während mehr als 10 Jahren zum Verstauen des immer umfangreicher werdenden Materials. Beim Auslesen von Messdaten aus dem Deltalogger oder beim Auswechseln des Films bei der automatischen Kamera an der Rinderhornflanke in den Wintermonaten wären die Betreuer der Anlage oft sehr froh gewesen, wenn zwischendurch mal die Finger hätten gewärmt werden können, abgesehen vom Zubereiten eines heissen Tees oder Kaffees. Auch kam es vor, dass beim Notebook das zum Auslesen der Daten ins Furggentältli gebracht werden musste, wegen den sehr tiefen Temperaturen die Batterie ihren Dienst versagte und so die ganze Auslesekampagne bei wärmerem Wetter wiederholt werden musste.



Abbildung 22: Holzkiste für Materiallagerung (Foto: B. Krummenacher)

Oft wurde so von einem warmen Unterstand geträumt, an die Realisierung dieses Traums glaubte jedoch niemand.

Dank den guten Ergebnissen aus dem Verkauf der Datenlogger UTL1 und UTL2 konnte im Herbst 1997 ein Baucontainer gekauft und mit dem Grosshelikopter X-Max vom Ueschenental aus ins Furgentähti geflogen werden (vgl. Abbildung 23).

Damit der Container auf einer ebenen Stelle platziert werden konnte, musste eine Plattform gebaut werden. Dank der Hilfe einer Gruppe von Studierenden der Universität Bonn unter der Leitung von Prof. Matthias Winiger, konnte die Plattform an einem Tag erstellt werden. Als Fuss für den Container mussten zwei massive Holzbalken auf den Boden gelegt werden. Diese Holzbalken konnten Dank der Hilfe des Heliswiss Piloten Hans Grether bei einem Überflug von Bern ins Wallis ebenfalls vom Ueschenental aus ins Furgentähti gebracht werden.

Seit über 10 Jahren dient nun der Container als Materiallager, Unterkunft und Obdach bei den vielen Exkursionen, die oft auch bei schlechtem Wetter durchgeführt werden mussten.

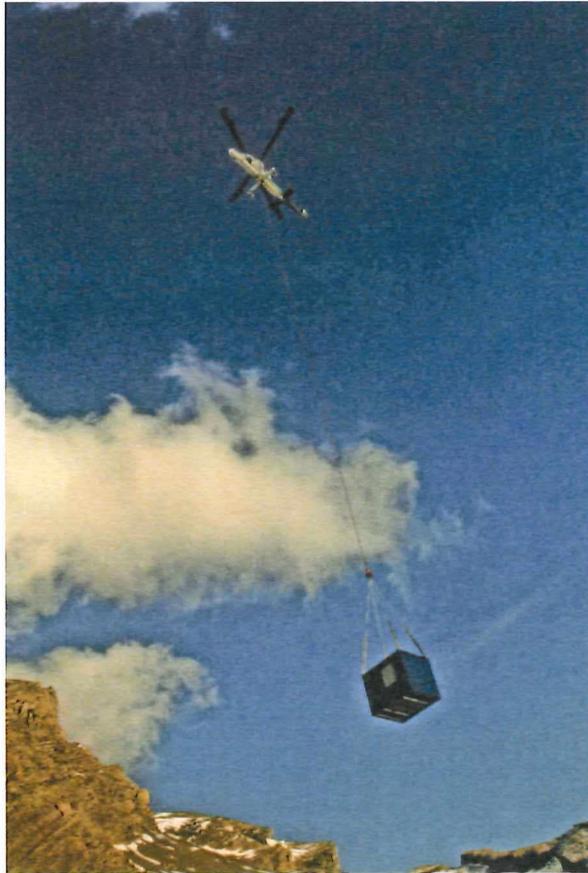


Abbildung 23: Transport des Containers mit dem Helikopter ins Furggentäli. (Foto: B. Krummenacher)

Ein aussergewöhnliches Ereignis gab es im Jahr 2008. Obwohl der Container an allen vier Ecken mit Stahlseilen verankert war, wurde der Container bei einem aussergewöhnlichen Föhnsturm aus der Verankerung gehoben und verschoben (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: verschobener Container

2.6 Meteostationen

Lange lag der Schwerpunkt der Untersuchungen im Furggentäli vorwiegend auf dem Messen der Bodentemperaturen mittels Datalogger und UTL-1, der terrestrischen Vermessung sowie der photogrammetrischen Analyse der Bewegungen des Blockgletschers. Im Rahmen der Diplomarbeit von Severin Schwab (2001) sollten Untersuchungen zur Lokalklimatologie im Tal sowie zum Einfluss der Strahlung auf die Permafrostverbreitung durchgeführt werden. Dazu wurden drei Klimamessstationen konzipiert und aufgebaut, welche nun seither Messwerte verschiedener Klimaparameter liefern.

Die Konstruktion der Klimastationen war vor einige Probleme gestellt: Das Furggentäli ist geprägt durch ein raues hochalpines Klima, und der Untergrund ist in Bewegung, wodurch die Stationen in Schiefelage geraten können. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Konstruktion entwickelt, welche aus stabilem Aluminium mit drei massiven Teleskopstandbeinen gebaut wurden. Dank den ausziehbaren Beinen lassen sich Schieflagen wegen Bewegung des Untergrundes einfach ausgleichen. Die Messgeräte wurden an einem waagrechten Ausleger montiert und sollten um Verfälschungen der Messresultate zu vermeiden regelmässig auf ihre waagrechte Lage kontrolliert und falls nötig korrigiert werden. Ausserdem musste bei der Standortwahl darauf geachtet werden, dass der Schneedruck nicht zu gross ist, und die Messgeräte nicht vom Schnee bedeckt werden.

Um die Lokalklimatologie im Furggentälti abzudecken, wurden je eine Messstation im flachen Gebiet nahe der Solifluktionslobe, auf dem Blockgletscher sowie an der Felswand errichtet.

Meteostation 1: Diese Station befindet sich im Blockgletschervorfeld nahe der untersuchten Solifluktionslobe und dem Deltalogger. Der Standort ist aufgrund der geringen Horizontüberhöhung durch die Plattenhörner und das Rinderhorn interessant gelegen und weist den grössten Anteil an Direktstrahlung im Untersuchungsgebiet auf.

Seit dem 26. Oktober 1999 werden die folgenden Parameter gemessen: ventilierte Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, kurzwellige solare Einstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Die Messwerte werden halbstündlich gespeichert und täglich mittels GSM abgerufen.



Abbildung 25: Meteostation 2 auf dem Felsblock in der Blockgletschermittle. (Foto: A. Nussbaum)

Meteostation 2: Um das Lokalklima auf dem Blockgletscher zu beobachten, wurde eine Station (Abbildung 25) auf dem Blockgletscher aufgestellt. Da sich der Untergrund stark bewegt und zudem stellenweise mit bis zu 8 m Schnee gerechnet werden muss (Kunz, 2000), wurde die Station auf einem grossen Block in der Blockgletschermittle aufgebaut. Dadurch sollte die Station nicht von Schnee bedeckt werden.

Nachteile sind die dadurch um 2.5 m höhere Lage gegenüber der Blockgletscheroberfläche und der instabile Untergrund. Denn der Felsblock unterliegt einer ausgeprägten Vorwärtsdrift und kippt zudem nach vorne. Dadurch musste die Konstruktion gut verankert und eine Möglichkeit zum Ausgleich der Kippbewegung durch ausziehbare Beine konzipiert werden. (vgl. Abbildung 26)

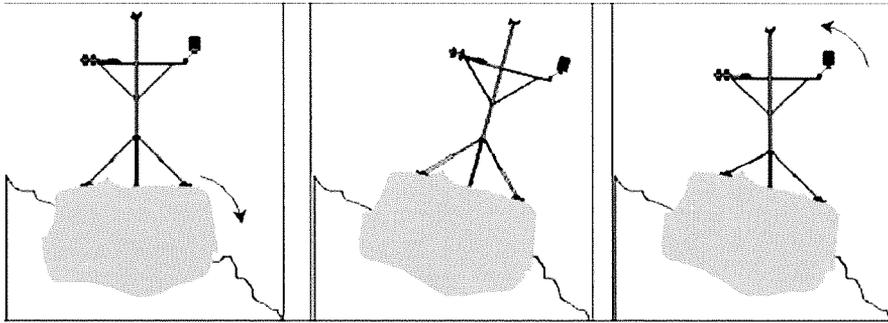


Abbildung 26: Verschiebungsprobleme einer Meteostation in periglazialen Untergrund und deren Korrektur. Kippbewegungen des Felsblocks können durch Veränderungen der Beinlänge ausgeglichen werden. (Schwab, 2001)

Meteostation 2 zeichnet die gleichen Parameter auf wie Station 1 und zusätzlich alle Komponenten der Strahlungsbilanz ($K\uparrow$, $K\downarrow$, $L\uparrow$, $L\downarrow$, Q^*). Sie ist seit dem 19. Januar 2000 in Betrieb.

Meteostation 3: Diese Station wurde an der nordexponierten Felswand der Plattenhörner installiert und deckt somit den strahlungsärmsten Bereich ab. Der Standort ca. 8 m über dem Fuss der Felswand wird nur selten direkt von der Sonne angestrahlt. Die Installation der Station war aufgrund des schwierigen Zugangs durch die Wand sowie der ständigen Gefahr von Steinschlag und Lawinen aufwändig und gefährlich. Deshalb konnte die Station erst am 17. August 2000 in Betrieb genommen werden. Wegen der ständigen Gefahr, dass die Messeinrichtungen durch Steinschlag und Lawinen zerstört werden könnten, wurde an dieser Stelle einzig die kurzweilige einfallende Strahlung mit zwei Pyranometern gemessen. Infolge verschiedenartiger Probleme sind von dieser Station keine Messdaten vorhanden

3 Ergebnisse der Untersuchungen

Während 20 Jahren wurden im Furggentälti Untersuchungen und Messungen durchgeführt und im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten ausgewertet. Im Folgenden werden nun einzelne Themen aufgegriffen und kurz dargestellt. Für weiterführende Ausführungen sei auf die zahlreichen verfassten Arbeiten verwiesen.

3.1 Permafrostverbreitung

Um einen Überblick über die Verteilung von Permafrost im Furggentälti zu erhalten, wurden verschiedene Methoden angewandt. Imhof (1992), Leuenberger (1994), Krummenacher (1998) und Schwab (2001) haben die Resultate ausgewertet und dargestellt.

Folgende Methoden wurden zur Permafrostdetektion verwendet:

BTS (Basis Temperatur der winterlichen Schneedecke): Durch die Isolationswirkung der winterlichen Schneedecke, besonders ab einer Mächtigkeit von 80 cm, werden die atmosphärischen Einflüsse auf den Untergrund stark gedämpft. Dadurch bildet sich an der Basis der Schneedecke ein thermisches Gleichgewicht. In Bereichen ohne Permafrost pendelt sich diese Temperatur auf 0° bis -2° C ein, Flächen mit Permafrost zeigen signifikant tiefere Werte von unter -3° C an.

Im Furggentälti wurden in den Jahren 1987, 1991, 1992 und 1995 BTS-Messungen durchgeführt. Seit 1994 zeichnen UTL-1-Logger ganzjährig die Bodenoberflächen-temperatur auf (vgl. Kapitel 3.7).

Geoelektrik: Bei dieser geophysikalischen Methode wird mittels künstlich angelegten elektrischen Feldern die Widerstandsverteilung im Boden untersucht. Der spezifische elektrische Widerstand ist eine Materialkonstante und liegt für gefrorenen Blockschutt bei $10 \text{ k}\Omega\text{m}$ und höher. Bei Messkampagnen 1991 und 1992 wurden Widerstandskartierungen durchgeführt um die Verteilung von Permafrost zu untersuchen.

Als weitere Methoden kamen der Sonnenkompass sowie Strahlungsmodelle zum Einsatz.

Abbildung 27 zeigt das Vorkommen von Permafrost im westlichen Bereich und die Absenz in den östlichen und nördlichen Bereichen in der Umgebung des untersuchten Blockgletschers. Da bereits die BTS-Messungen 1987 für die flachen Gebiete und auch die Solifluktionslobe kein Permafrost anzeigten, wurden die Messungen auf dem Blockgletscher intensiviert.

Gemäss den BTS-Messungen befindet sich der Blockgletscher weitgehend in wahrscheinlichem oder möglichem Permafrost, weist allerdings einige interessante permafrostfreie Stellen auf. So zeigen alle Messungen im Bereich der Mulde unsicheres oder nicht vorhandenes Permafrostvorkommen auf. Dies ist interessant, da sich die Mulde in der Blockgletschermitte befindet und hier grosse Verschiebungen gemessen werden. Die Mulde lag ausserdem 1994 in einem Bereich mit hoher Einstrahlung, hat sich aber seither nordwärts verschoben und vergrössert. Was

genau die Ursachen dieser vermutlich permafrostfreien Mulde sind, konnte noch nicht geklärt werden. Eine Möglichkeit ist jedoch das Ausschmelzen des Permafrostes wegen der erhöhten Strahlung.

Westlich des Blockgletschers im angrenzenden Schutthang ist Permafrostvorkommen möglich und wegen der Abschattung durch die Plattenhörner auch plausibel.

Für den Initialbereich des Blockgletschers unterhalb der Felswand der Plattenhörner zeigen die Messungen von 1991 keinen Permafrost an, alle anderen jedoch schon. Somit kann angenommen werden, dass der Initialbereich ebenfalls Permafrost enthält.

Das Permafrostvorkommen im unteren Bereich des Furgentäli beschränkt sich auf die sichtbaren Formen, insbesondere den Blockgletscher.

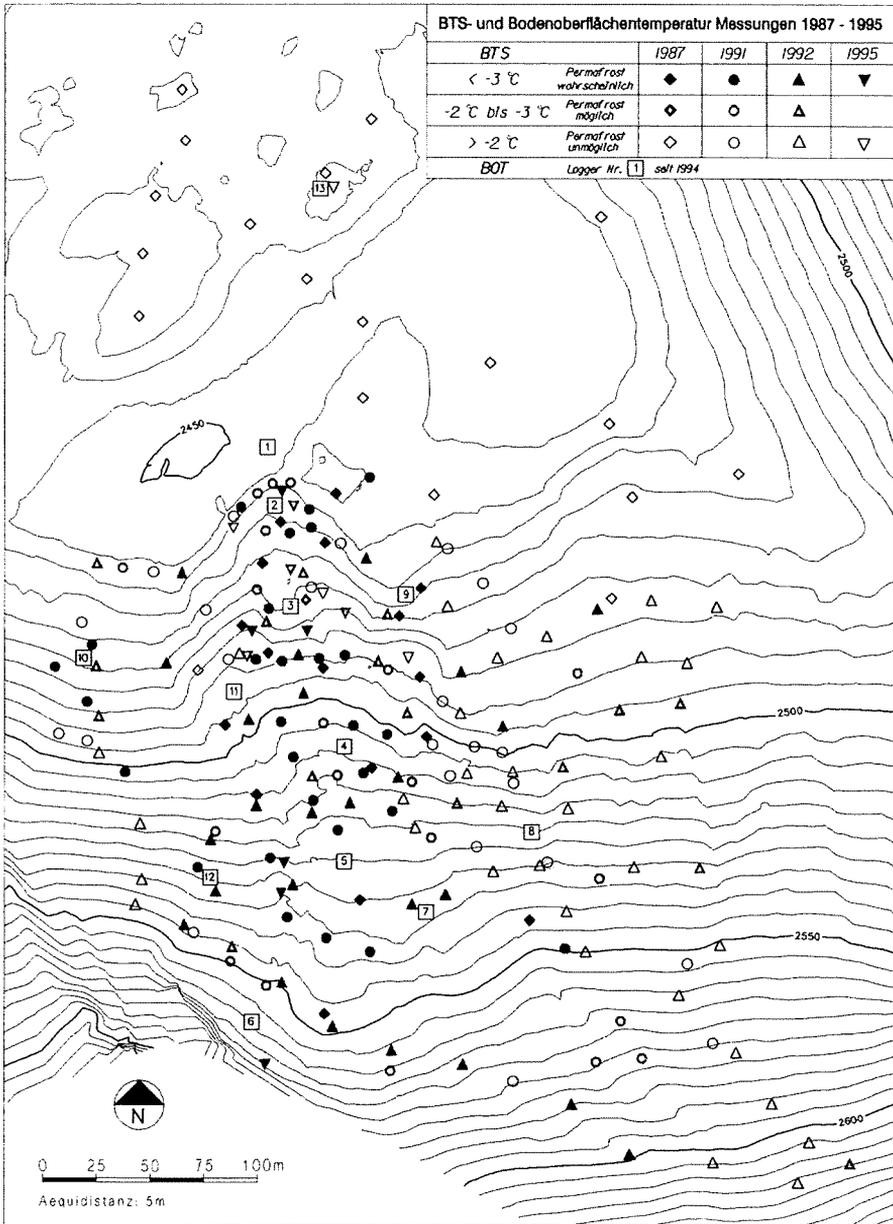


Abbildung 27: Karte der Permafrostverteilung anhand der klassierten BTS Messwerte der Jahre 1987, 1991, 1992 und 1995. (Krummenacher, 1998, verändert).

3.2 Dynamik der Schneedecke

In der Hochgebirgslandschaft des Untersuchungsgebiets hat die Schneedecke eine zentrale ökologische Bedeutung, die Bodenoberfläche im Gelände ist während etwa 2/3 des Jahres mit Schnee bedeckt. Die Schneedecke ist hier ein entscheidender Faktor, der das Vorkommen von Permafrost in dieser Grenzlage im vergleichsweise warmen und feuchten Klima des Tals überhaupt erst ermöglicht.

Der Einfluss der Schneedecke auf den Permafrost erfolgt einerseits über deren Funktion als „Strahlungsschutz“, der den Energie-Input durch die Strahlungsbilanz steuert. Andererseits funktioniert sie als thermisch isolierende Schicht, welche den Energiefluss zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche moduliert.

Das zeitliche Zusammenspiel dieser beiden Funktionen in zyklischer Abfolge der Jahreszeiten dominiert den Verlauf des Netto-Energieflusses an der Grenzschicht der Bodenoberfläche. Der zeitliche Ablauf von Auf- und Abbau der Schneedecke entscheidet somit darüber, wie viel Energie dem Active Layer und dem Permafrost im Jahresverlauf zugeführt oder entzogen wird.

Im Verlauf der Jahre wurden im Furggentälti verschiedene Untersuchungen zur Schneedecke durchgeführt:

- Ab 1996 befasste sich Dragan Mihajlovic mit dem räumlichen und zeitlichen Muster der Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet (Mihajlovic, 1997 und Krummenacher et al., 1998). Diese Untersuchungen stützten sich hauptsächlich auf die Auswertungen der Schrägaufnahmen der im Furggentälti installierten Kamera (vgl. Kapitel 2.3).
- Im Lawinenwinter 1998/1999 dokumentierte Isabelle Kunz den Auf- und Abbau der Schneedecke mittels terrestrischen und photogrammetrischen Vermessungsarbeiten (Kunz, 2000).
- Anhand der Messreihen zur Bodenoberflächentemperatur untersuchten Benno Staub und Dragan Mihajlovic zudem, wie sich der unterschiedliche Verlauf der Schneebedeckung in verschiedenen Jahren auf die Energiebilanz des Active Layers auswirkt, und wie der Permafrost des Blockgletschers darauf reagiert (Mihajlovic et al., 2008; Staub, 2008).

Untersuchung zur räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Schneedecke

Damit die Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet quantitativ betrachtet werden konnte, wurde von den Aufnahmen der installierten Schrägbildkamera (vgl. Kapitel 2.3) digitale Orthofotos erstellt und die Schneebedeckung mittels digitaler Bildverarbeitung kartiert. Ein Vergleich der so erstellten Ausaperungskarten der Jahre 1993 bis 1996 deckte einen fast identischen räumlichen Verlauf der Schneebedeckung in den verschiedenen Jahren auf (vgl. Abbildung 28).

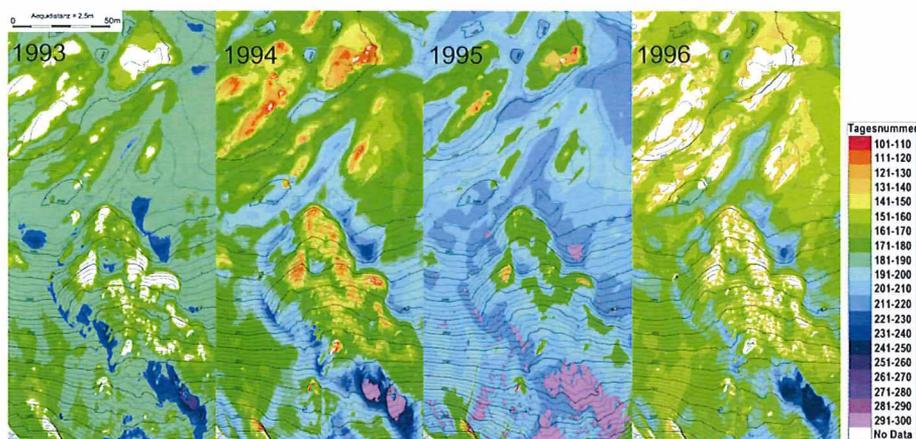


Abbildung 28: Vergleich des Ausaperns in den Jahren 1993 (links) bis 1996 (rechts) in einem 9 ha grossen Testgebiet, welches in der südlichen Hälfte den Blockgletscher enthält. Die Karten zeigen die Tagesnummer, an dem die Bodenoberfläche erstmals nach dem Winter wieder schneefrei ist. Die hellvioletten Flecken zeigen die Grösse der perennierenden Schneeflecken des jeweiligen Jahres. (Mihajlovic, 1997).

Dieses gleichbleibende räumliche Muster wird massgeblich von der Topographie bestimmt, dank der Windverfrachtung erhalten Muldenlagen deutlich mehr Schnee, während dieser an Kuppenlagen abgeblasen wird. Eine einfache Modellierung dieses Musters verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Geländeform und Schneebedeckung. Das Modell verwendet als Datengrundlage lediglich die Krümmung des Geländes, welche an der tatsächlichen Schneebedeckungskarte kalibriert wurde. Nur die Bildung von Wächten auf der Leeseite (Südostseite) von Kuppen sowie die perennierenden Schneeflecken im Bereich des Blockgletschers unterschieden die tatsächliche Schneebedeckungskarte von der Modellierten (vgl. Abbildung 29).

Eine vergleichbare Untersuchung zum Verlauf der Schneebedeckung wurde im Frühling / Sommer 1997 von Markus Imhof und Dragan Mihajlovic durchgeführt. Anstatt der terrestrischen Schrägbilder lieferten hier Luftbilder, welche von der KSL (Koordinationsstelle für Luftbilder, Dübendorf, heute Swisstopo) im Abstand von jeweils mehreren Wochen geflogen wurden, die Datengrundlage für die Kartierung im ganzen Tal (vgl. Kapitel 3.6).

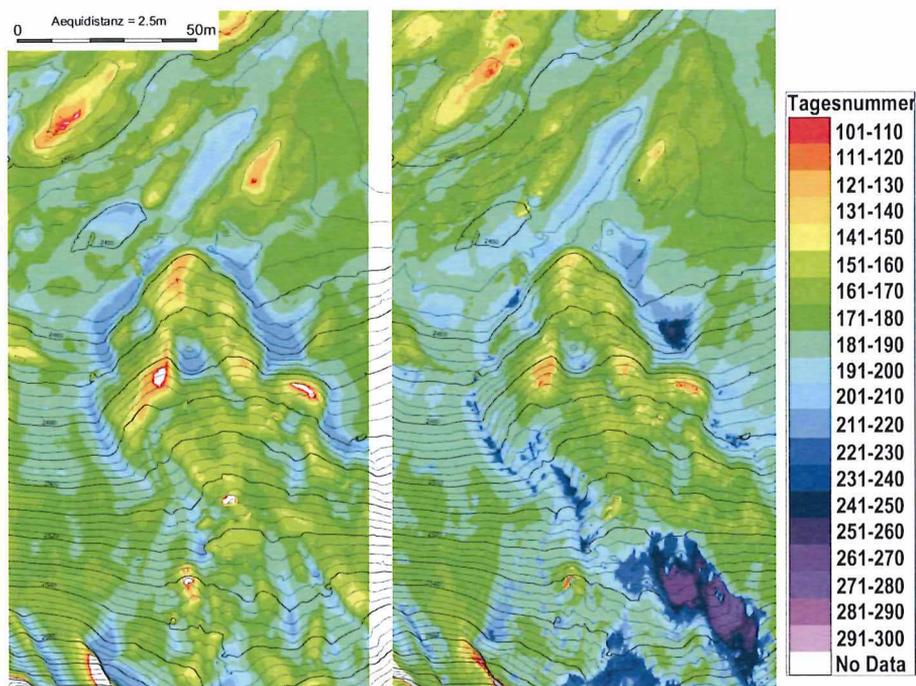


Abbildung 29: durchschnittliches beobachtetes räumliches Muster des Ausaperns im Bereich des Blockgletschers (rechts) und das Modell dazu (links), welches lediglich auf der Topographie des Untersuchungsgebietes basiert (Mihajlovic, 1997).

Diese Untersuchungen bestätigten, dass die aus der Umgebung aufragende Form der Blockgletscher die Schneehöhe verringert und damit im Vergleich mit der Umgebung die Dauer der Schneebedeckung verkürzt. Dadurch ist der Strahlungsinput auf den Blockgletschern deutlich höher als auf der umliegenden (permafrostfreien) Bodenoberfläche!

Im heute verhältnismässig warmen Klima gewinnt damit die extreme Variabilität des zeitlichen Ablaufes der Schneeschmelze an Wichtigkeit: so erfolgte beispielsweise das Ausapern der Bodenoberfläche im Jahr 1995 durchschnittlich einen Monat später als 1996, unterbrochen von wiederholten Schneefällen während der Sommermonate.

Der Einfluss dieser Differenz auf die Energie-Bilanz des Active Layers ist markant: insgesamt wurde wegen des unterschiedlichen Verlaufs von Wetter und Schneeschmelze während des Sommerhalbjahres 1995 nur ungefähr ein Drittel der Einstrahlung auf die Blockgletscheroberfläche verbucht wie in der Vergleichsperiode im Jahr 1996 (vgl. Abbildung 30 und Kapitel 3.6 und 3.7).

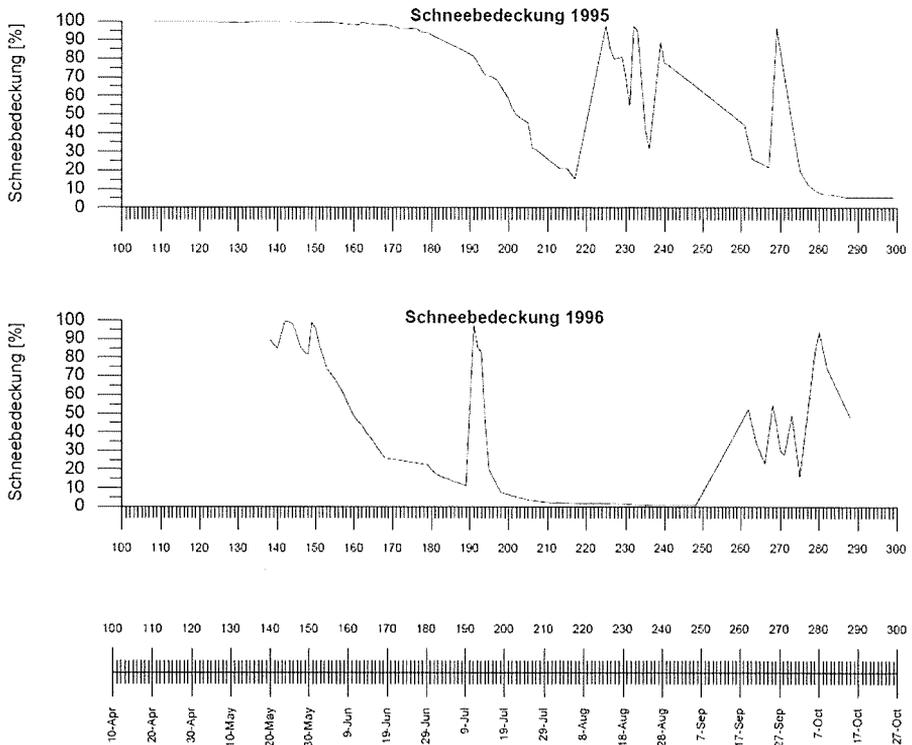


Abbildung 30: Entwicklung der schneebedeckten Fläche des 9 ha grossen Testgebietes während des Sommerhalbjahres (April bis September) der Jahre 1995 und 1996. (Mihajlovic, 1997).

Untersuchungen zur Mächtigkeit der Schneedecke

Im Verlauf der Forschungsarbeiten im Furggentäli wurden wiederholt Untersuchungen zur Mächtigkeit der Schneedecke auf dem Blockgletscher angestellt.

Erstmals erfolgte dies während der BTS-Messkampagnen, welche zwischen 1987 und 1995 mehrmals durchgeführt wurden. Markus Imhof beschreibt 1993, dass die oft nur dünne Schneedecke auf dem Blockgletscher die Durchführbarkeit und die Genauigkeit der Methode beeinträchtigt (Imhof, 1994). Die Kampagnen der verschiedenen Jahre waren zudem lückenhaft und schwer zu vergleichen, mangels guter Verortung der Messpunkte (GPS-Handgeräte waren damals nur schlecht verfügbar und deren Genauigkeit war mangelhaft).

Im Winter 1995/1996 wurden von Dragan Mihajlovic, Bernhard Blank und Markus Imhof an verschiedenen Stellen auf dem Blockgletscher Schneepegel installiert, welche auf den Fotos der im Untersuchungsgebiet installierten Kamera sichtbar waren. Wegen der limitierten Auflösung der Kamera mussten hierfür 0.5 m breite Schaltafeln verwendet werden, welche bis zu 6 m hoch waren. Trotz solider Ab-

spannung hielten die Pegel jedoch dem enormen Schneedruck auf Dauer nicht stand und wurden zwei Jahre später wieder entfernt.

Während dem als Lawinenwinter in die Aufzeichnungen eingegangenen Winter 1998/1999 wurde schliesslich der Verlauf der Mächtigkeit der Schneedecke von Isabelle Kunz mittels terrestrischen und photogrammetrischen Vermessungsarbeiten direkt dokumentiert (Kunz, 2000).

Die wiederholten, teils schwierigen Messkampagnen während des extrem schneereichen Winters bestätigten die Beobachtung aus der Bildsequenz der Schrägbildkamera: Die maximale Schneehöhe im Untersuchungsgebiet wird typischerweise erst im März bis April erreicht, oft nach intensiven Schneefällen, welche das tendenziell feuchte Frühlingswetter in dieser Höhenlage mit sich bringt.

Die Mächtigkeit der Schneedecke wurde aus der Differenz zwischen der terrestrisch vermessenen Oberfläche der Schneedecke zur im Herbst 1999 photogrammetrisch aufgenommenen Oberfläche des Blockgletschers eruiert. Sie betrug im oberen Bereich des Blockgletschers stellenweise über acht Meter!

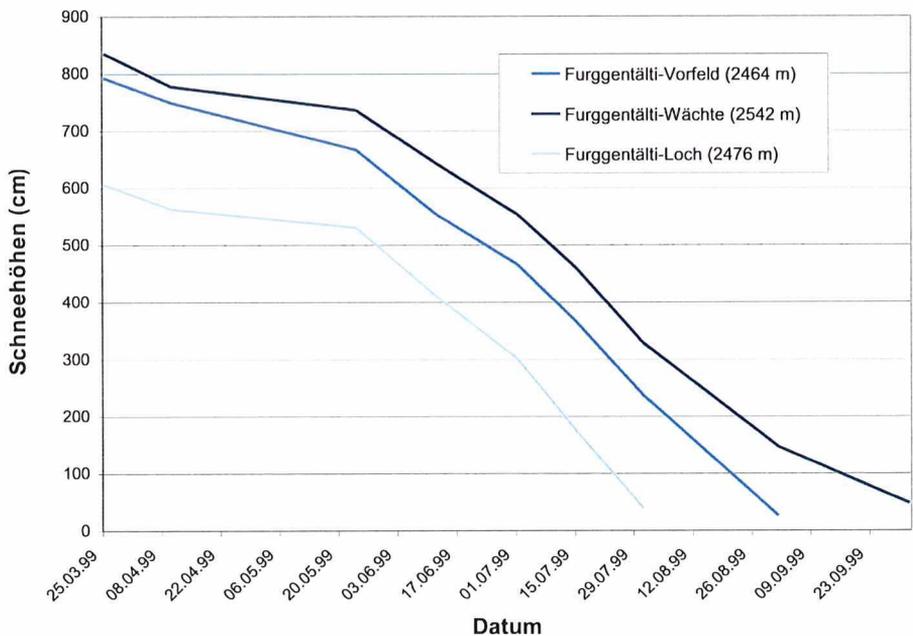


Abbildung 31: Verlauf der Schneehöhe an verschiedenen Stellen auf und vor dem Blockgletscher, während der Schneeschmelze im Frühling/Sommer 1999 (Kunz, 2000).

Eindrücklich sind auch die Zahlen zum ungefähren Gewicht der Schneedecke, welche während des Winters auf dem Blockgletscher lastete. Dorothea Kölbing schätzte, dass diese (je nach angenommener Dichte des Schnees) im Perimeter des Blockgletscher mit einem Gewicht von ca. 20'000 bis 35'000 Tonnen auf den Blockgletscher einwirkte, was der Grössenordnung von zwischen 13-23% (!) der Masse entspricht, welche für das Eigengewicht des Blockgletschers geschätzt wurde (Kölbing, 2001).

Anhand der registrierten Lufttemperatur wurde zudem ein einfaches Gradtag-Modell erstellt, mit welchem sich das Abschmelzen der spätwinterlichen, durchnässten Schneedecke anhand der Lufttemperatur modellieren lässt.

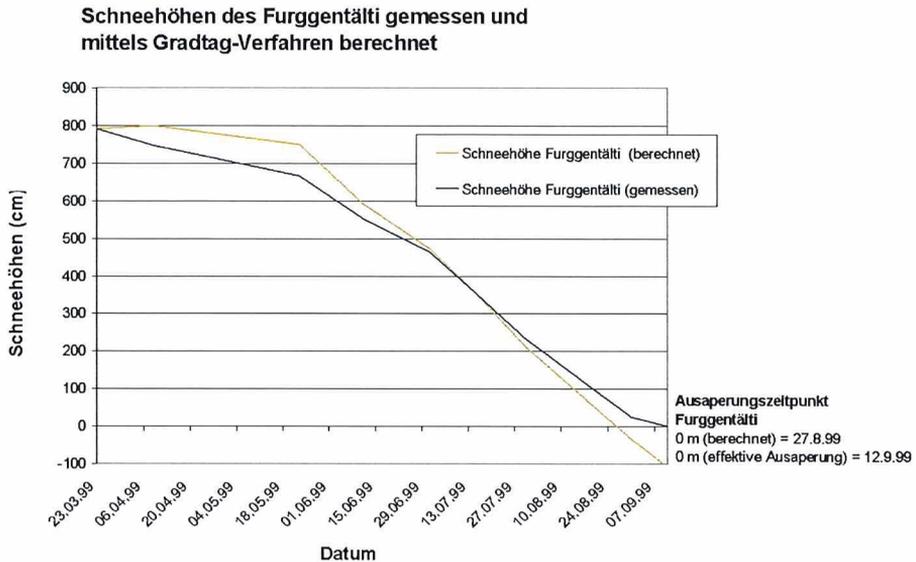


Abbildung 32: gemessene und modellierte Schneehöhe während der Schneeschmelze im Frühling/Sommer 1999 (Kunz, 2000).

Schneedaten aus den Messreihen zur Bodenoberflächentemperatur

Gerade die grosse Variabilität von zeitlichem Verlauf und Intensität der Schneefälle unterstreichen den Wert der Messreihen zur Bodenoberflächentemperatur, welche im Untersuchungsgebiet seit 1994 erfasst werden (vgl. Kapitel 3.7). In den Ganglinien der ganzjährig gemessenen Bodenoberflächentemperaturen zeichnet sich jeweils der Verlauf der Schneebedeckung ab, so dass die wichtigsten Eckdaten zur räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Schneedecke daraus abgeleitet werden können (Staub, 2008, Mihajlovic et al., 2008). Im Gegensatz zur Kartierung der Schneedecke aus den Bildern der Schrägbildkamera und zur terrestrischen Vermessung erweist sich die Methode als weit weniger aufwändig.

Obwohl die absolute Genauigkeit der Aussage durch methodische Unsicherheiten und wegen der Messgenauigkeit der eingesetzten Technik limitiert ist, bietet die Methode gute Einblicke in den Energietausch zwischen Atmosphäre und Active Layer, welcher durch die Messungen als Integral erfasst wird. Die Länge der Messreihe sowie die gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Jahre ermöglicht es, trotz den methodischen Limitierungen zu untersuchen, wie sich der unterschiedliche Verlauf von Wetter und Schneebedeckung in verschiedenen Jahren auf die Energiebilanz des Active Layers auswirken, und wie der Permafrost des Blockgletschers darauf reagiert. (vgl. Kapitel 3.7).

Fazit der Untersuchungen

Insgesamt fiel die nun 20 jährige Forschungstätigkeit im Furggentälti in einen Zeitraum, der von zunehmend schneearmen Wintern geprägt war, besonders in der betroffenen Höhenlage.

Während der Schneemangel in Lagen mit $MAAT \ll 0^\circ \text{C}$ theoretisch zu einer Abkühlung der Bodenoberfläche und damit den Erhalt oder die Neubildung von Permafrost führt, kommt es in der klimatischen Grenzlage, in der sich der Permafrost im Furggentälti befindet, auf den zeitlichen Verlauf der Schneedecke im Jahresgang von Erwärmung und Abkühlung an. Dabei überwiegt je nach Verlauf der Effekt der Schneedecke als (fehlender oder vorhandener) Strahlungsschutz im Frühsommer, oder der Effekt als (fehlende oder vorhandene) Wärmeisolation während des Winters.

Die Ausführungen zur Messreihe der Bodenoberflächentemperatur in Kapitel 3.7 beschreiben, dass im Beobachtungszeitraum zwischen 1994 und 2007 der Verlauf von Wetter und Schneebedeckung nur in zwei Perioden zu einer tieferen winterlichen Gleichgewichtstemperatur geführt hat, was auf den Erhalt resp. auf den Aufbau von Permafrost hinweisen würde. Zudem zeigen die Untersuchungen zur kurzwelligen Netto-Einstrahlung auf die Blockgletscheroberfläche von 1995 und 1996 eindrücklich, wie gross der Einfluss der Schneedecke als Strahlungsschutz sein kann (vgl. Kapitel 3.6)

Diese Beobachtung legen nahe, dass der fehlende Strahlungsschutz während der Zeit des Sonnenhöchststandes als direkte Folge der Schneearmut dem Permafrost im aktuellen Klima im Furggentälti zunehmend Schwierigkeiten bereitet.

3.3 Botanik

Das Furggentälti liegt im Wesentlichen in der oberen alpinen Höhenstufe und reicht bis in den nivalen Bereich. Oberhalb von ca. 2500 m ü. M. kommen kaum noch Blütenpflanzen vor, einerseits begründet durch das Klima und andererseits durch die Topografie und Morphologie (grosse Hangneigung und Schutthalden).

Bedingt durch die Nordlage des Furggentälti beträgt die Vegetationsperiode vielerorts nur knapp zwei Monate, so dass besiedelte Flecken kaum über das Pionierstadium hinauskommen. Der Talboden ist durch ein kleinräumiges Mosaik verschiedener Pflanzengesellschaften charakterisiert, die sich teilweise auf eine Fläche kleiner als

1 km² abwechseln und teilweise ineinander verzahnt sind (vgl. Abbildung 33). Oft lassen sich die Flecken keiner typischen Pflanzengesellschaft zuordnen, sondern bilden Misch- und Übergangsvarianten.



Abbildung 33: Lückige Vegetation als typische Besiedlungsform auf den kargen Rohböden in den Kalkformationen im Gemmigebiet (Eggenberg/Zimmermann, 1989).

Eggenberg und Zimmermann (1989) haben in ihrer Diplomarbeit das Furggentälti hauptsächlich zweier Kategorien zugeordnet, Schneetälchen- und Schuttvegetation.

Schneetälchenvegetation

Schneereiche Mulden, die erst im Juli oder noch später auszuapern beginnen, zeigen gegenüber ihrer Umgebung eine völlig verschiedene Vegetation. Die für solche Gebiete typische Pflanzengesellschaft *Arabidion coeruleae* (Gänsekresse-Schneebodengesellschaft) ist im Furggentälti in verschiedenen Varianten vertreten. Sie wächst auf flachgründigen, sehr skelettreichen Böden auf Kalkschutt und Kalkfels. Der Untergrund ist wasserdurchlässig und trocknet nach dem endgültigen Ausapern relativ rasch aus. Während der Zeit des Austreibens im Juli erhalten aber auch die Besiedler dieser Schneeböden genügend Wasser. Bei fortdauernder Ansammlung von Feinerde, ist auch eine Besiedlung durch das *Salicion herbaceae* (Krautweidengesellschaften) möglich. Folgende Varianten der Schneetälchenvegetation sind im Furggentälti vertreten:

- *Saxifraga androsacea* (Mannsschild-Steinbrech): In schuttig-humosen Mulden und flachen Hängen. Pioniergesellschaft.
- *Salix serpyllifolia*-Gesellschaft (Quendelblättrige Weide): Bezeichnet das Auftreten von mehreren Pionierarten, die nur vorübergehend im Gleichgewicht mit der Umwelt stehen. Wächst auf schuttig-humosen Formen und nur leicht geneigten Hängen. Oberflächenprozesse wie Solifluktion oder Frosthubb begünstigen diese Gesellschaft.



Abbildung 34: *Saxifraga androsacea* (Botanik im Bild)



Abbildung 35: *Thlaspi rotundifolium* (Botanik im Bild)



Abbildung 36: *Arabis alpina* (www.saxifraga.de)

Schuttvegetation

Schuttflächen sind klassische Pionierräume, die sich je nach Prozessstärke und -art, Feinerdegehalt, Höhe über Meer und Exposition stark unterscheiden und eine entsprechende Artenverschiebung aufweisen. Diese Flächen sind zudem meist sehr artenarm und als Rückzugsorte für zahlreiche endemische und seltenere Arten geeignet. Die Vegetation des Furggentäli und insbesondere auch des Blockgletschers lässt sich der Pflanzengesellschaft der *Thlaspietum rotundifolii* (alpine Täschelkraut-Haldengesellschaft) mit der Variante *Saxifraga macropetala* (Steinbrech) zuordnen.

Vertreten wird dieser Vegetationstyp durch folgende Artenkombinationen:

- *Arabis alpina* (Alpen-Gänsekresse)
- *Saxifraga macropetala* (Trauben-Steinbrech)
- *Thlaspi rotundifolium* (Rundblättriges Täschelkraut)
- *Ranunculus glacialis* (Gletscherhahnenfuss)
- *Poa minor* (kleines Rispengras)

Saxifraga macropetala ist dabei die eigentliche Kennart.

Als Spezialfall der Schuttvegetation ist im Furggentäli die Schuttstromvegetation mit der *Crepis terglouensis*-Variante (Tiglav-Pippau) des *Firmetum* (Polsterseggenrasen) vertreten. *Carex firma* (Polstersegge) als Kennart zeigt dabei den Pioniercharakter dieser Gesellschaft an.

3.4 Geophysikalische Untersuchungen

Geophysikalische Methoden ermöglichen Auskunft über den Aufbau des Untergrundes zu erhalten ohne diesen zu zerstören. Dabei werden die unterschiedlichen Eigenschaften von gefrorenem und ungefrorenem Blockschutt sowie Eis für die verschiedenen in der Geophysik verwendeten physikalischen Parameter genutzt.

Im Jahr 2007 wurden am untersten Blockgletscher umfangreiche geophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Das Ziel war Informationen über den Verlauf des Felsuntergrundes und die interne Struktur des Blockgletschers zu erhalten. Dazu wurde die Methoden Georadar und Refraktionsseismik angewandt. Diese basieren auf dem unterschiedlichen Verhalten der elektromagnetischen resp. elastischen Wellen in den verschiedenen Materialien und an den Grenzen zwischen den Materialschichten. Das Georadar sendet elektromagnetische Wellen aus, welche an Schichtgrenzen mit unterschiedlicher Permittivität gebrochen und reflektiert werden. Die reflektierten Wellen werden vom Georadar aufgezeichnet und können anschliessend in sogenannten Radargrammen dargestellt und anschliessend interpretiert

werden. In der Refraktionsseismik wird dem Untergrund mittels Sprengung oder Hammerschlag Energie zugeführt, welche sich als elastische Welle ausbreitet und an Schichtgrenzen refraktiert und reflektiert wird. Die refraktierten Wellen werden als Bewegung der Oberfläche mittels Geophonen registriert. Aufgrund der Laufzeit der Welle zwischen Anregungspunkt und Geophon sowie der Distanz der beiden Punkte kann die seismische Geschwindigkeit des Materials bestimmt werden und dadurch wird eine Zuordnung des Untergrundes zu bestimmten Materialien möglich.

Im Sommer 2008 wurden zudem ergänzende geoelektrische Untersuchungen durchgeführt (Inauen, in Arbeit).

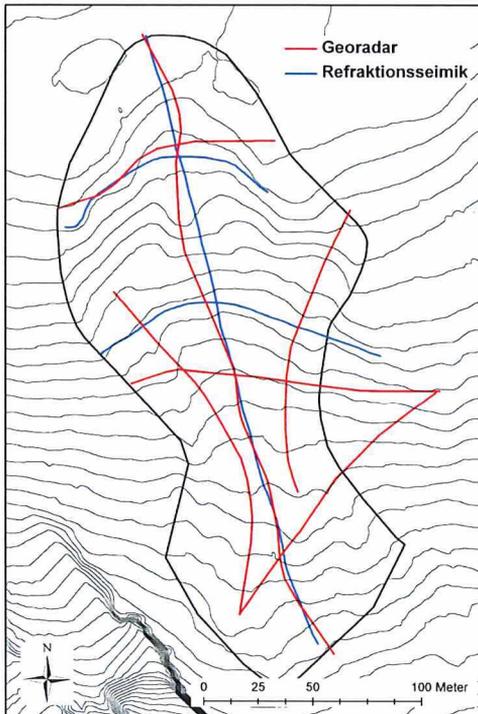


Abbildung 37: Verlauf der geophysikalischen Messprofile im Jahr 2007. (Nussbaum, 2008)

In Abbildung 37 ist der Verlauf der geophysikalischen Messprofile im 2007 zu sehen.

Bei der Auswertung konnten lateral drei verschiedene Schichten gefunden werden, welche im Wesent-

lichen den Active Layer, den Permafrostbereich im Blockgletscher und den Felsuntergrund widerspiegeln. Die Interpretationen von Nussbaum (2008) basieren mehrheitlich auf den refraktionsseismischen Untersuchungen, da diese bessere Resultate lieferten als das Georadar.

Schicht 1: Active Layer

Als oberste Schicht weist der Active Layer eine für Oberflächenmaterial typische seismische Geschwindigkeit von 400 – 700 m/s auf. Das Material ist nur wenig verwittert und zeigt einen grobblockigen Charakter. Im südlichen Bereich des Blockgletschers ist das Oberflächenmaterial feinkörniger, was sich auch in einer schnelleren seismischen Geschwindigkeit abbildet.

Die Mächtigkeit des Active Layers variiert zwischen 0 und 5 m (vgl. Abbildung 38). Im Bereich der Blockgletscherzunge misst sie nur 0 – 3 m. Gegen die Blockgletschermitte hin, d.h. im Bereich der Meteostation, nimmt die Mächtigkeit auf bis 5 m zu. Mit zunehmender Höhe gegen Süden dünnt sich der Active Layer etwas aus. Diese Angaben stimmen gut mit den Resultaten der refraktionsseismischen Testmessungen im Jahr 1988 überein (Krummenacher et al., 1998). Dabei wurde im Zungenbereich eine Mächtigkeit von 2 – 6 m ermittelt.

Die Georadarmessungen mit einer Frequenz von 20 MHz lassen keine Aussagen zur Mächtigkeit und Zusammensetzung des Active Layers zu, da Bereiche weniger als 8 m unter der Oberfläche im Startsignal nicht aufgelöst werden können.

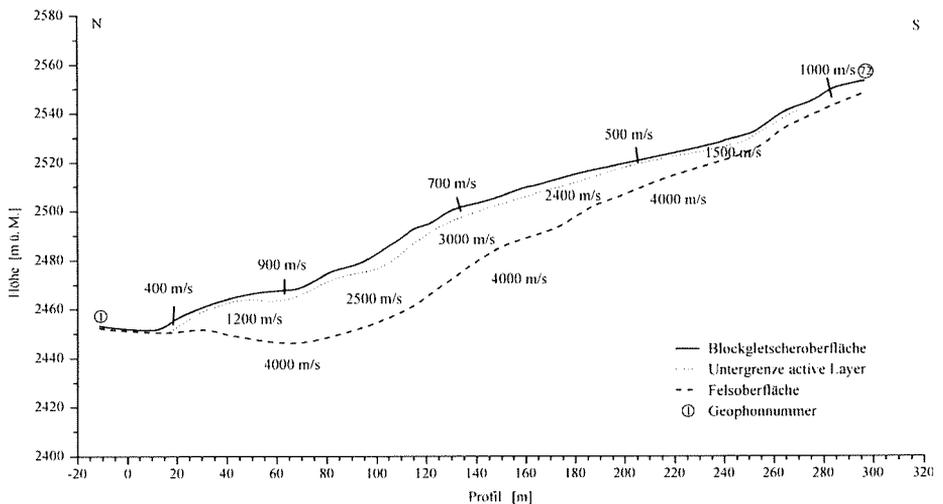


Abbildung 38: Refraktionsseismischen Messprofil entlang der Fließrichtung des Blockgletschers mit den seismischen Geschwindigkeiten nach der Auswertungsmethoden von Hagedoorn. (Nussbaum, 2008)

Schicht 2: Permafrost

Unter dem Active Layer folgt eine in den Seismikresultaten gut erkennbare schnellere Schicht mit Geschwindigkeiten von bis zu 3000 m/s. Die Annahme liegt deshalb nahe, dass es sich um eisverfülltes Lockermaterial handelt, das mit Blöcken unterschiedlicher Grösse durchsetzt ist, welche die Geschwindigkeit herabsetzen. Da die seismische Geschwindigkeit lateral beträchtlich variiert, ist anzunehmen, dass der Eisanteil und die Anzahl Blöcke und deren Grösse ebenfalls stark unterschiedlich sind. Möglich ist auch, dass keine durchgehende eisverfüllte Schicht vorliegt, sondern nur Eislinien oder schuttbedeckte Firnfelder. Der grösste Eisanteil ist auf Grund der hohen seismischen Geschwindigkeit in der Blockgletschermitte zu erwarten. Gegen den Rand wird dieser vermutlich immer geringer. Die Mächtigkeit dieser eis- bzw. wasserhaltigen Schicht beträgt in der Mitte stellenweise bis zu 22 m, nimmt dagegen am Rande bis unter 10 m ab.

Ausserhalb der sich bewegenden Blockgletschermasse ist die seismische Geschwindigkeit dieser zweiten Schicht deutlich tiefer ($v_2 = 700 - 900$ m/s) und deutet auf fehlenden Permafrost hin. Die vorgefundene Zwischenschicht ist vermutlich auf eine andere Lagerung und eventuell auf eine leicht andere Zusammensetzung des Lockermaterials zurückzuführen. Das Fehlen von Permafrost wird auch durch die von Imhof (1992) durchgeführten BTS-Messungen bestätigt, welche zeigen, dass sich das Permafrostvorkommen im Furggentälti auf die sichtbaren Formen beschränkt.

In den Georadardaten ist die oben diskutierte Schicht nicht als solche erkennbar. Allerdings ist das Radarsignal in den erwähnten Tiefen stark absorbiert, und nur wenige bis keine Reflexionen sind sichtbar. Dies kann die Vermutung bestätigen, dass es sich um eisverfülltes Lockermaterial handelt, welches die elektromagnetischen Strahlen stark streut. Da jedoch in den Radargrammen keine reflektierende Untergrenze der eishaltigen Schicht auszumachen ist, kann deren Mächtigkeit nicht abgeschätzt werden. Dadurch ist auch die Berechnung eines Volumens der eishaltigen Schicht nicht möglich.

Im südlichsten Bereich des Blockgletschers, sind in den Seismikdaten nur noch zwei Schichten auszumachen und in den Georadardaten kaum nennenswerte Reflexionen zu sehen. Die Tatsache, dass nur noch zwei Schichten auszumachen sind, und die obliegende Schicht höhere Geschwindigkeiten wiedergibt als die Deckschicht in den restlichen Teilen des Blockgletschers, könnte mit dem feinkörnigeren Material begründet werden. Untersuchungen von Mihajlovic (in Arbeit) und Staub (2008) haben zudem gezeigt, dass sich das Bewegungsmuster und die Bewegungsdynamik von der Dynamik im restlichen Teil des Blockgletschers unterscheiden. Die Kriechgeschwindigkeiten sind kleiner und weisen einen Bewegungsvektor mit Ausrichtung gegen Nordwesten, statt wie auf dem Blockgletscher gegen Norden auf. Mihajlovic (in Arbeit) vermutet deshalb, dass dieser Bereich einem anderen Prozess, nämlich einer rein gravitativen Bewegung, unterliegt und nicht mehr Teil des Blockgletschers ist. Dies wird auch durch die Unterschiede der Seismikresultate gegenüber den restlichen Blockgletscherbereichen unterstützt.

Fels

Der Felsuntergrund besteht mit grosser Wahrscheinlichkeit aus dem gleichen Material wie die Umgebung, nämlich aus Kalkstein (Schrattenkalk, Dogger-Malm-Grenze). Der Felsverlauf (vgl. Abbildung 38) zeigt unterhalb der Blockgletscherzunge einen nahezu horizontalen Verlauf, und beginnt unterhalb der Mulde im Blockgletscher anzusteigen. Er zeigt eine schwach ausgeprägte Gefällsänderung, die auf der Verflachung oberhalb der Meteostation, in einer gleichmässig sanft ansteigenden Ebene ausläuft. Der Fels dieser Ebene ist aufgrund der geophysikalischen Untersuchungen vermutlich nicht kompakt, sondern wie auch die Umgebung durch Karsterscheinungen und Klüfte geprägt.

Blockgletschermächtigkeit

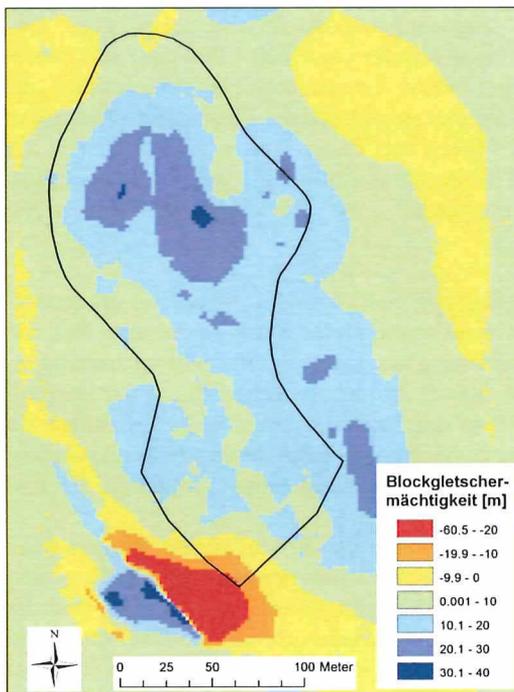


Abbildung 39: Blockgletschermächtigkeit im Jahr 2007. (Nussbaum, 2008)

Aufgrund der mittels geophysikalischen Untersuchungen gemessenen Felstiefen wurde in Nussbaum (2008) ein Höhenmodell des Felsuntergrunds interpoliert und darauf basierend die Mächtigkeit des Blockgletschers bestimmt. Abbildung 39 zeigt das Ergebnis. Die Mächtigkeit ist in der Blockgletschermitte am grössten, dies ist gleichzeitig der Bereich, der am schnellsten kriecht (vgl. Kapitel 3.5). Westlich des Blockgletschers ist der Fels bereits nach einer geringen Distanz aufgeschlossen und die Mächtigkeit gering. Die hohen negativen Werte im südwestlichen Teil sind auf Fehler im Felshöhenmodell zurückzuführen.

Ausserdem konnte das Volumen des Blockgletschers bestimmt werden, welches im Herbst 2007 ca. $340'000 \text{ m}^3$ ($\pm 10\%$) betrug.

Um die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zum Untergrund zu überprüfen und zu bestätigen, sind weitere Untersuchungen mit anderen Methoden nötig. Zur Kalibrierung der bestimmten Tiefen wäre ausserdem ein Bohrloch wünschenswert.

3.5 Bewegungsdynamik des Blockgletschers

Monitoring von periglazialen Prozessen

Die Beobachtung der Prozessdynamik von Blockgletscher und Solifluktionsszunge bilden seit Beginn der Arbeiten im Untersuchungsgebiet eine der wichtigsten Messreihen. Im Zentrum der Untersuchungen steht das Monitoring der Bewegungsdynamik des Grössten der Blockgletscher am Taleingang.

Die Erfassung der Bewegungen erfolgt mittels terrestrischer und photogrammetrischer Vermessung, wobei die Messreihe der Photogrammetrie vom glücklichen Umstand profitiert, dass der grösste Blockgletscher bereits auf Stereo-Luftbildern vom damaligen Bundesamt für Landestopographie von 1960 abgebildet ist. Dies erweitert den Beobachtungszeitraum auf fast drei Jahrzehnte vor Beginn der eigentlichen Messreihe, womit heute eine einzigartige Dokumentation der Bewegungsdynamik des Blockgletschers über fast fünf Jahrzehnte besteht.

Die terrestrische Vermessung im Untersuchungsgebiet befasste sich zuerst hauptsächlich mit einer Solifluktionsszunge, welche sich auf einer leicht nord-westwärts geneigten Fläche auf den Roches moutonnées gebildet hat (Vgl. Übersichtskarte auf Seite 110). Mit einer von Klaus Budmiger und Beat Aliesch konzipierten Messinstallation für Deformationsmessungen, welche sonst typischerweise für die Überwachung von Staumauern verwendet wird, gelang es, die (geli-) solifluidale Bewegung von einzelnen Steinen auf der Solifluktionsszunge im Millimeterbereich zu erfassen (Krummenacher et al., 1998). Bernhard Blank konnte anhand der Messungen zeigen, dass das Ausmass der Bewegungen direkt von der Eindringtiefe des Bodenfrosts im (permafrostfreien) Untergrund der Solifluktionsszungen abhängig ist: je grösser die Eindringtiefe, desto grösser die solifluidale Bewegung während der Phase des Auftauens. Die Tiefe des Bodenfrosts ist ihrerseits vom Verlauf der Lufttemperatur und der Schneedecke abhängig: Je mehr Frosttage im Frühwinter auf eine schneefreie Bodenoberfläche einwirken können, desto mächtiger ist die Eindringtiefe der Gefrierfront. Ebenfalls nachgewiesen wurde das fast gänzliche Ausbleiben der Solifluktionsszunge nach Wintern ohne nennenswerten Bodenrost (Blank, 1997).

Ab 1994 wandte sich die terrestrischen Vermessung auch der Bewegungsdynamik des Blockgletschers zu: Ursprünglich zur Vermessung von Passpunkten für die Photogrammetrie gedacht, wurden die tachymetrische Vermessung der immer gleichen Punkte, welche auf grösseren Blöcken auf der Blockgletscheroberfläche signalisiert wurden, bis heute fortgesetzt.

Die jährlichen terrestrischen Messungen erfassen die Bewegungsdynamik des Blockgletschers mit einer hohen zeitlichen Auflösung, welche durch die fast monatlichen Messungen von Dorothea Kölbing zwischen Herbst 1998 und Herbst 1999 nochmals verdichtet wurde (Kölbing, 2001). Diese Messreihen tragen wesentlich zum Verständnis der Prozessdynamik des kriechenden Permafrosts bei, welche

während der Beobachtungsperiode erheblichen, witterungsbedingten Veränderungen unterworfen war.

Atypische Prozessdynamik als Folge der klimatischen Grenzlage

Bei der Auswertung der terrestrischen Bewegungsmessungen wurde bald klar, dass sich die Dynamik des grössten Blockgletschers im Untersuchungsgebiet deutlich von anderen Blockgletschern in der Literatur unterscheidet (Krummenacher et al., 1998; Mihajlovic et al., 2003; Mihajlovic et al., 2008; Mihajlovic, in Arbeit):

- Der untersuchte Blockgletscher weist mit mehreren Metern pro Jahr ausserordentlich hohe Bewegungsgeschwindigkeiten auf, verglichen mit einigen Zenti- oder Dezimetern pro Jahr anderer Blockgletscher.
- Die Kriechgeschwindigkeit unterliegt von Jahr zu Jahr grösseren Schwankungen.
- Die Bewegungsdynamik des Blockgletschers weist eine markante saisonale Zyklizität auf.
- Die beobachteten Oberflächengeschwindigkeiten folgen in verschiedenen Bereichen des Blockgletschers unterschiedlichen Trends, beschleunigen sich insgesamt und zeigen zugleich lokal Verlangsamungstendenzen.

Dorothea Kölbing stellte während ihren Messungen 1999 als erste den direkten Zusammenhang zwischen der mittleren Lufttemperatur während der schneefreien Phase im Hochsommer und der jährlichen Bewegungsaktivität her. Die Messungen der folgenden Jahre bestätigen den engen Zusammenhang, welcher in Abbildung 40 dargestellt ist. So hat das ausserordentlich warme Wetter während der „Jahrhundert-sommer“ in der Bewegungsdynamik des Blockgletschers deutliche Spuren hinterlassen, wobei die Verschiebungsbeträge vom Spätsommer und Herbst 2003 aus messtechnischen Gründen erst in den Daten von 2004 enthalten sind. Seither waren die Sommer wieder etwas weniger warm und die Bewegungsaktivität hat sich ebenfalls etwas beruhigt.

Die wiederholten terrestrischen Vermessungsarbeiten von Dorothea Kölbing, welche zwischen Herbst 1998 und Herbst 1999 jeweils im Abstand von wenigen Tagen bis Wochen durchgeführt wurden, zeigten zudem eine deutliche saisonale Zyklizität der Bewegungsdynamik des Blockgletschers (vgl. Abbildung 41).

Während die Bewegungsgeschwindigkeit im Verlauf der schneefreien Warmphase im Sommer und Herbst stetig zunimmt, beginnt sie mit dem Beginn der kälteren Phase im Spätherbst, in der die Lufttemperatur vermehrt unter den Gefrierpunkt fällt, wieder zu sinken. Diese Verlangsamung setzt sich während der Kaltphase des Winters trotz der zusätzlichen Auflast der Schneedecke fort, und erreicht vor der Durchnässung der Schneedecke das Geschwindigkeits-Minimum.

Vergleich Kriechgeschwindigkeit - Summe Lufttemperatur

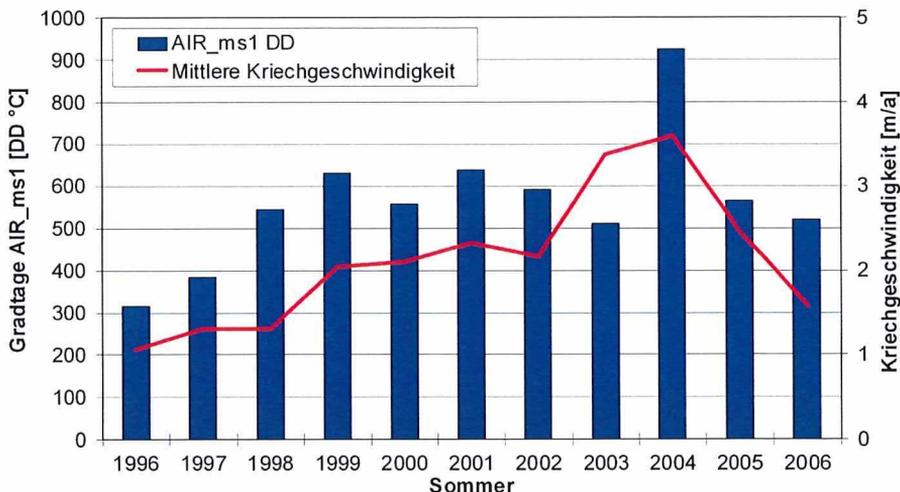


Abbildung 40: Die Bewegungsaktivität des Blockgletschers zeigt einen deutlichen Zusammenhang zur Lufttemperatur (in Gradtagen während der schneefreien Phase im Sommer). Obwohl die Daten zwischen 1995 und 2004 eine markante Beschleunigung zeigen, haben sich die Kriechbewegungen in den letzten Jahren wieder verlangsamt (Staub, 2007).

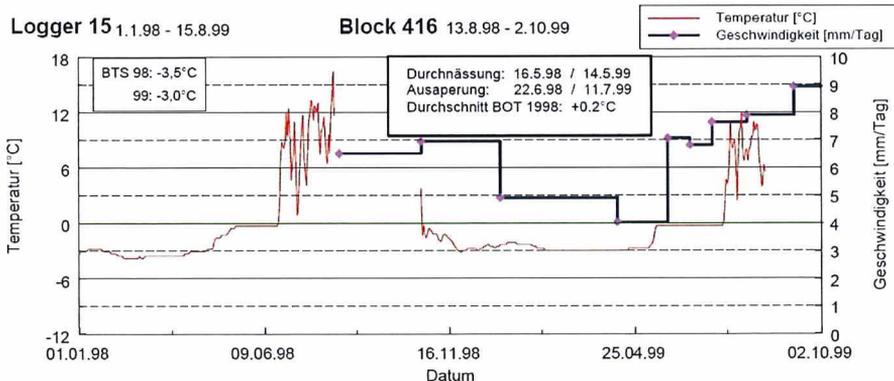


Abbildung 41: Saisonaler Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeit des Blockes Nr. 416 auf der Mitte der Blockgletscheroberfläche zwischen Herbst 1998 und 1999, im Vergleich mit der Entwicklung der Bodenoberflächentemperatur des benachbarten UTL-Datenloggers Nr. 416 (Kölbing, 2001).

Unmittelbar nach der Durchnässung der Schneedecke steigt die Bewegungsgeschwindigkeit des Blockgletschers rapide an. Einsickerndes Schmelzwasser und der damit verbundene Energie-Eintrag in den noch gefrorenen Active Layer führt zu einer raschen Erhöhung der Temperatur im Active Layer, zumindest der obersten Bereiche des eisgesättigten Permafrosts. Dabei nimmt die Plastizität des Poreneises besonders im Bereich zwischen -2.5°C und 0°C überproportional zu (Arenson, 2004), was zum beobachteten Emporschnellen der Bewegungsgeschwindigkeit führt.

Neben diesen jährlichen Schwankungen sind auch die Veränderungen der räumlichen Bewegungsmuster von grossem Interesse: so zeigen die terrestrischen Vermessungsdaten im oberen Teil des Blockgletschers sowie in den seitlichen Randbereichen eine klare Verlangsamungstendenz der Kriechgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 43).

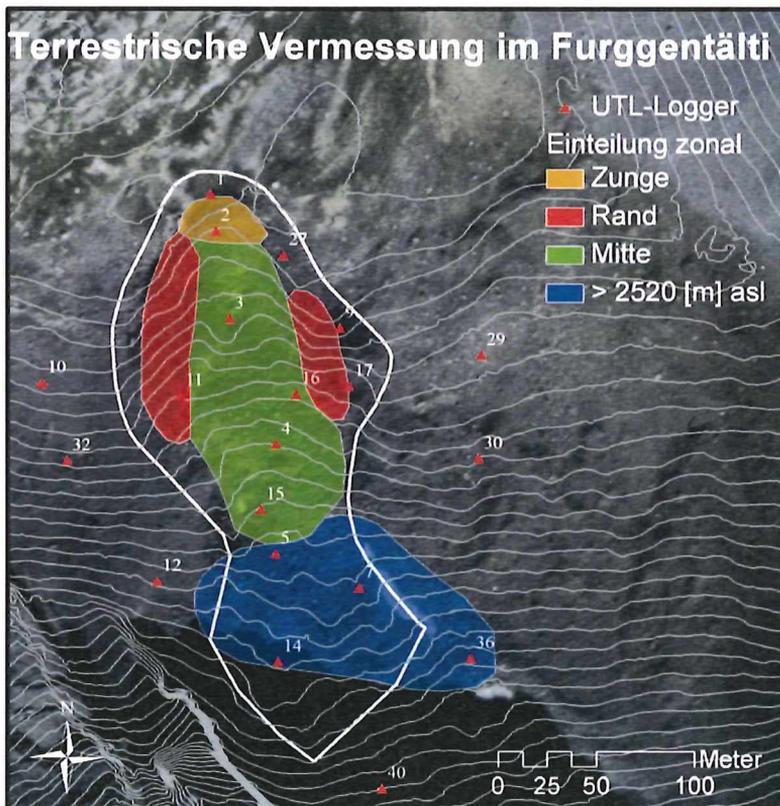


Abbildung 42: Die terrestrischen Vermessungspunkte auf dem Blockgletscher und ihre räumliche Zuordnung in Zonen (vgl. Abbildung 43).

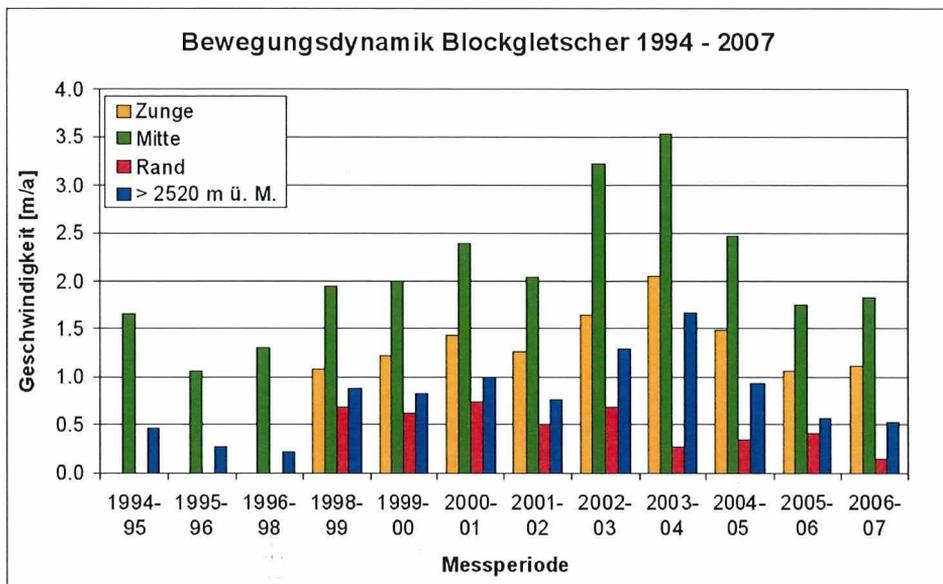


Abbildung 43: Die grössten Kriechgeschwindigkeiten werden in der Mitte des Blockgletschers registriert. Gegen die Stirn und den linken und rechten Rand hin nehmen die Geschwindigkeiten ab. Das „Nährgebiet“ (>2520 m ü. M.) des Blockgletschers bewegt sich deutlich langsamer als die mittleren Bereiche, an der Stirn erfolgt eine Stauchung.

Während die terrestrischen Messungen im Vergleich mit der photogrammetrischen Messreihe eine hohe zeitliche Auflösung zulassen, ermöglicht die Photogrammetrie mit geringem Aufwand räumlich hoch auflösende Daten und liefert deshalb ein detaillierteres Bild der räumlichen Bewegungsmuster und Trends.

Photogrammetrische Untersuchungen der Bewegungsdynamik

Die photogrammetrischen Messungen beruhen auf einem umfangreichen Luftbildarchiv vom Untersuchungsgebiet. Für die Zeit vor 1990 besteht dieses aus kleinmassstäblichen Luftbildern, welche vom Bundesamt für Landestopographie für die Kartennachführung erstellt wurden. Die frühesten Aufnahmen aus dem Sommer 1960 zeigen nur den vorderen (westlichen) Teil des Tales mit dem Blockgletscher in Stereo, wogegen für den östlichen Teil des Tales wegen der fehlenden Stereoabdeckung keine Auswertungen möglich sind. Weitere Luftbilder von 1974, 1980 und 1985 decken dann das gesamte Tal ab, mitsamt den kleineren Blockgletschern im östlichen Teil.

Seit 1990 wurde das Furggentältli wiederholt mit grossmassstäblichen Luftbildern (ca. 1:4 500-5 000) befliegen, welche wesentlich detailliertere Auswertungen mit einer deutlich besseren Höhengenaugigkeit zulassen. 1990 und 1995 wurden die Flüge von der KSL (Koordinationsstelle Luftbilder der V+D in Dübendorf, heute Swisstopo) durchgeführt, im Auftrag der VAW (Versuchsanstalt Wasserbau der

ETHZ). 2000, 2001, 2003, 2005 und 2007 wurden die Flüge von privaten Flugdiensten im Auftrag des Geographischen Instituts der Universität Bern durchgeführt.

Die photogrammetrischen Auswertungen der Luftbilder liefern Daten zu verschiedene Fragestellungen:

- Zeitliche und räumliche Entwicklung der Bewegungsdynamik im Beobachtungszeitraum, z.B. in Form von Geschwindigkeitsfeldern (Velocity Fields), oder der Verfolgung von markanten Blöcken auf der Oberfläche.
- Detektion von Zonen mit Stauch-, Dehn- und Scherbewegungen, welche sich an der Blockgletscheroberfläche manifestieren.
- Detektion von Hebungs- und Setzungseffekten der Blockgletscheroberfläche.
- Bilanzierung des Blockgletschervolumens
- Bilanzierung der Massenverlagerung durch den Blockgletscher

Die Resultate der ersten photogrammetrischen Auswertungen durch Klaus Budmiger (Krummenacher et al., 1998) deckten spektakuläre Veränderungen der Gestalt und der Bewegungsdynamik des Blockgletschers während des Zeitraums von 1960 bis 1995 auf:

- Einerseits belegten die Messungen eine massive, fortschreitende Beschleunigung der jährlichen Vorverlagerung der Blockgletscherfront von ca. 0.3 m/a in der Periode 1960-1974 auf 0.5 m/a in der Periode 1985 - 1992 (Mihajlovic et al., 2003).
- Andererseits erlaubten die Auswertungen das Sichtbarmachen von Zonen, in denen sich die Oberfläche des Blockgletschers stark aufgewölbt oder abgesenkt hat. Tendenziell erfolgte im tiefer gelegenen vorderen Teil des Blockgletschers eine Aufwölbung der Form, während sich die Oberfläche im „Nährgebiet“ im hinteren, höher gelegenen Teil des Blockgletschers stark abgesenkt hat.
- Spezielle Aufmerksamkeit zog eine sich im Laufe der Untersuchungsperiode vergrößernde Muldenform in der Blockgletscheroberfläche, direkt hinter der Stirn des Blockgletschers auf sich. Für die Eintiefung wurden verschiedene mögliche Ursachen vermutet: Thermokarst, verursacht von einem lokalen Strahlungsmaximum, das an dieser Stelle in der Strahlungsmodellierung von Alex Leuenberger (vgl. Kapitel 3.6) angezeigt wurde, oder der Einbruch einer Doline unter zusätzlichen Auflast, die durch den vorrückenden Blockgletscher in diesem Bereich entstanden ist.

Die Fortsetzung des photogrammetrischen Monitorings durch Dragan Mihajlovic bestätigte den Beschleunigungstrend der Kriechgeschwindigkeit des Blockgletschers. Die Ausweitung der photogrammetrischen Auswertungen auf zwei weitere, weiter östlich im Tal gelegene Blockgletscher brachte zutage, dass diese während der Beobachtungsperiode 1960 - 2000 eine ähnliche Beschleunigung aufweisen (Mihajlovic et al., 2003; Mihajlovic, in Arbeit) (vgl. Abbildung 44).

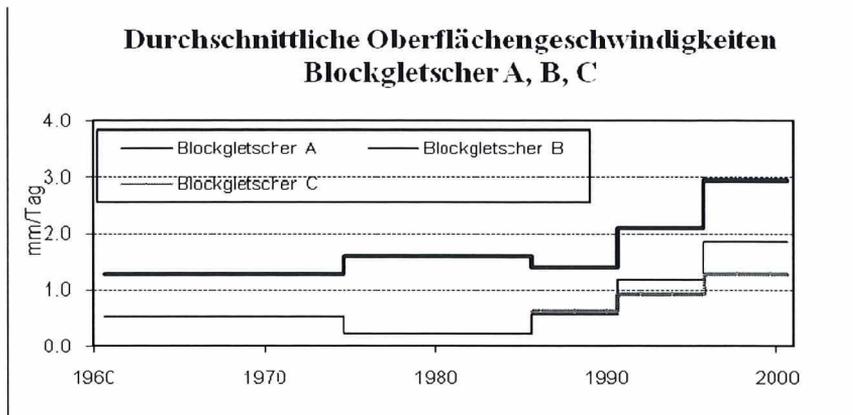


Abbildung 44: Zunehmende Kriechgeschwindigkeiten der drei untersuchten Blockgletscher im Furggentältli (vgl. Übersichtskarte auf Seite 110). (Mihajlovic et al., 2003).

Weitere Untersuchungen zur Prozessdynamik wurden von Andreas Catillaz und Michael Reist (2007), Benno Staub (2008) sowie Adrian Chuck und Philipp Leibundgut (2008) durchgeführt. Die erneute, detaillierte Auswertung der Luftbilder von 1990, 1995, 2000 und 2005 hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Bewegungsmuster des grössten Blockgletschers bestätigen die Fortsetzung der rapiden Beschleunigung.

Die Auswertungen basieren pro Zeitschnitt auf ca. 500 - 700 photogrammetrisch gemessenen Punkten und lösen die Oberflächenbewegung räumlich sehr detailliert auf.

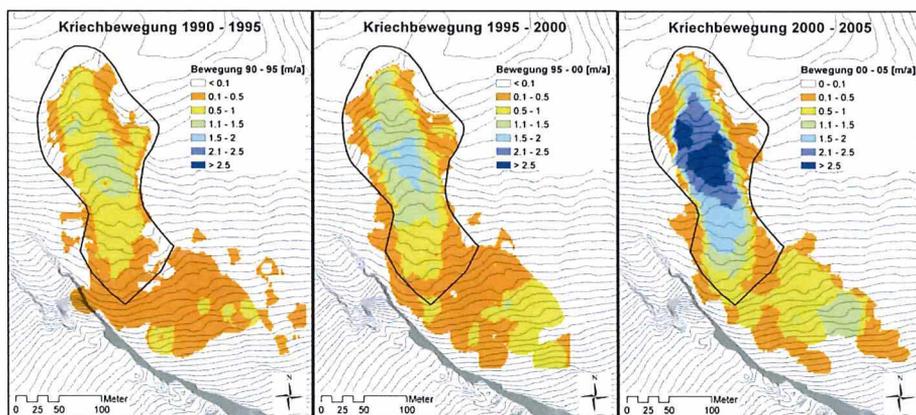


Abbildung 45: Seit 1990 hat die Bewegungsaktivität über vielen Teilen des Blockgletschers deutlich zugenommen, in der Mitte um bis zu 300 %. (Staub, 2008 und Chuck/Leibundgut, 2008, grösseres Format auf Seite. 112)

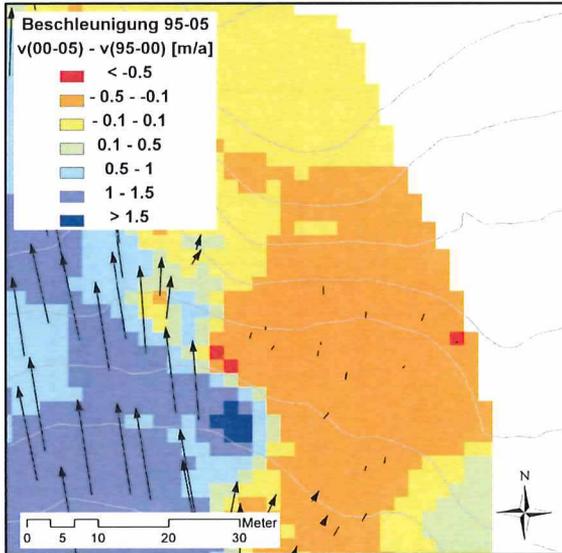


Abbildung 46: Eine kleine Nebenzunge am orographisch rechten Rand bewegt sich entgegen der allgemeinen Beschleunigungstendenzen seit 1990 deutlich langsamer und kam in den letzten Jahren fast ganz zum Stillstand. (Staub, 2008)

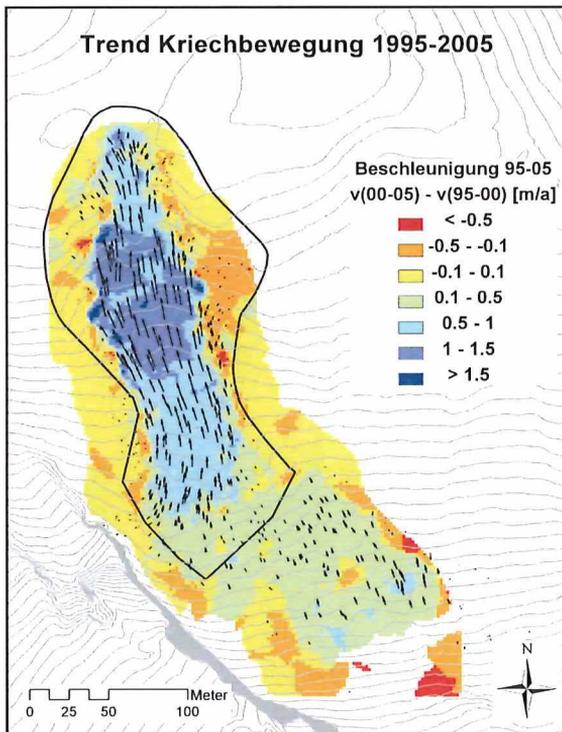


Abbildung 47: Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen 1995 – 2000 im Vergleich mit der Periode 2000 - 2005 über dem Blockgletscher. Grüne Farbtöne zeigen eine Beschleunigung der Kriechgeschwindigkeit, rote eine Verlangsamung. Die dunkelrote Partie nahe der Plattenhörner im „Nährgebiet“ des Blockgletschers ist auf die ungleiche Ausdehnung der photogrammetrischen Auswertungen zurück zu führen. (Staub, 2008)

Am eindrücklichsten ist die Zunahme der Kriechgeschwindigkeit in der Blockgletschermitte.

Gleichzeitig haben einzelne Bereiche, so z.B. eine kleine Nebenzunge am orographisch rechten Rand, zwischen 1990 und 2005 eine Verlangsamung erfahren (vgl. Abbildung 46). Zudem zeigt sich im obersten Teil des Blockgletschers gleich unterhalb der Plattenhörner ein anderes Bewegungsmuster: In diesem Bereich war die Beschleunigung wesentlich geringer als über der Hauptzunge und die Bewegungsrichtung etwas stärker nach Nordwest gerichtet. Abbildung 47 visualisiert die Entwicklungstendenzen zwischen 1995 und 2005 und gibt damit Anhaltspunkte über mögliche Veränderungen der Bewegungsaktivität nach 2005.

Wie bereits die Bewegungskarten (vgl. Abbildung 45) zeigen, kriecht der Blockgletscher nicht überall gleich schnell. An der Oberfläche führt dies zwangsläufig zu Dehnungs- und Stauchungsprozessen, sowie zu Zonen relativer Scherung. Um diese Prozesse sichtbar zu machen, wurden auf der Blockgletscheroberfläche lokale Bewegungsdifferenzen, sowohl in x- als auch in y-Richtung mittels Rasterberechnungen in ArcGIS, ausgeschieden (vgl. Staub, 2008). Die kartographische Darstellung der Ergebnisse gibt Anhaltspunkte zu den Bewegungsverhältnissen und die beim Kriechprozess wirkenden lateralen Kräfte im Blockgletscher.

Mit der massiven Geschwindigkeitszunahme haben zwischen 1990 und 2005 auch die Geschwindigkeitsdifferenzen stark zugenommen. Dies zeigt sich besonders in der Mitte und am Rand des Blockgletschers.

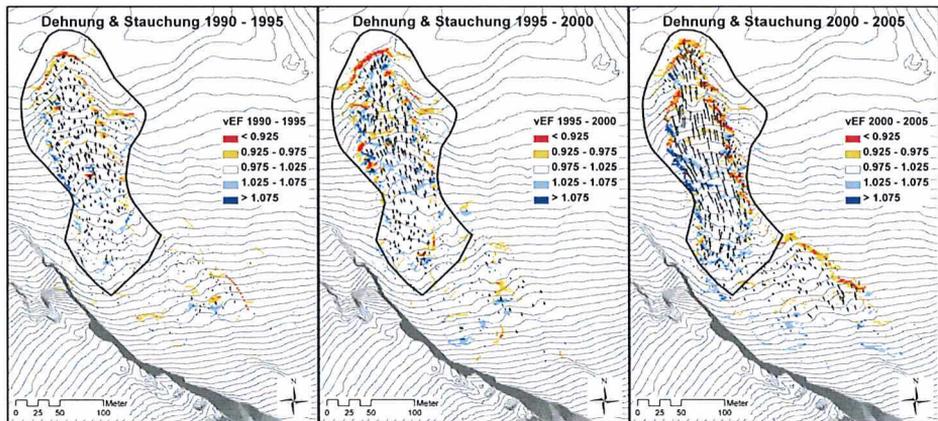


Abbildung 48: Die Karten zeigen Dehnungs- und Stauchungszonen auf dem Blockgletscher im Furgentältli in drei Zeitschritten zwischen 1990 und 2005. Die schwarzen Pfeile repräsentieren die anhand der jeweiligen Luftbilder gemessenen Bewegungsvektoren, die schwarze Linie entspricht der äusseren Grenze des Blockgletschers im Jahre 2005. Auskunft über die relative Vergrößerung (Dehnung) oder Verkleinerung (Stauchung) der betrachteten Einheitsfläche pro Rasterpixel (4 m^2) gibt der Koeffizient vEF . (Staub, 2008 und Chuck/Leibundgut, 2008)

Während im mittleren und oberen Teil des Blockgletschers Zonen mit Dehnungsflüssen sichtbar werden, werden in den vorderen Bereichen aufgrund der kompressiven Fließbewegung immer deutlicher Stauchzonen angezeigt, welche quer zur Bewegungsrichtung verlaufen (vgl. Abbildung 48). Im Feld manifestieren sich diese mit dem Entstehen von zunehmend steilen, neuen Fronten hinter der eigentlichen Blockgletscherstirn.

Interessant ist auch die Darstellung von Scherzonen: Aufgrund der homogenen Bewegungsrichtung des Blockgletschers gibt es innerhalb der schnell kriechenden Bereiche kaum Scherbewegungen, doch treten in den Randbereichen grosse Scherbeträge auf.

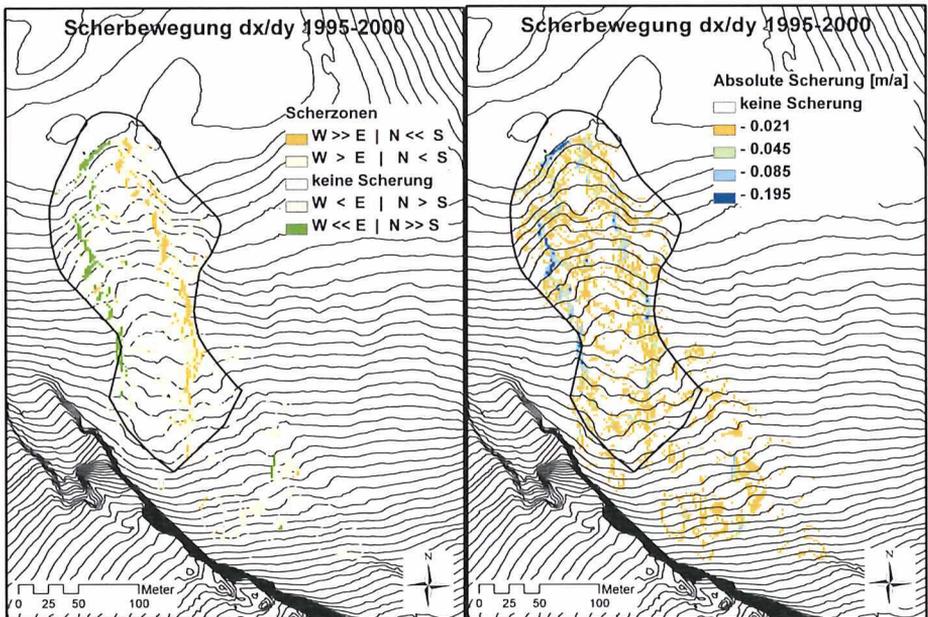


Abbildung 49: Scherbewegungen treten über dem Blockgletscher vorwiegend in y -Richtung auf. Deutliche Scherzonen gibt es an der Zunge und an den Randbereichen, welche an quasi-stationäres Hangschuttmaterial ausserhalb des Blockgletschers angrenzen. Die Scherbeträge können aufgrund ihres Vorzeichens eindeutig einer Bewegungskonstellation zugeordnet werden: Positive Werte (grün) erhält eine Rasterzelle, wenn sich ihre östliche Nachbarzelle schneller bewegt. (Staub, 2008)

Das räumliche Bild der Scherzonen hat sich seit 1990 kaum verändert, aufgrund der grösseren Geschwindigkeitsdifferenzen jedoch stark verdeutlicht. Abbildung 49 zeigt die markanten Scherzonen an der seitlichen Begrenzung des Blockgletschers. Beim Betrachten der Blockgletscherbegrenzung fällt auf, dass die Bereiche grösster Scherung auf dem Blockgletscher liegen und nicht am Blockgletscherrand. Dieses

Verhalten deckt sich mit der beobachteten Verlangsamung der seitlichen Randzonen, speziell im Bereich der langsam zum Stillstand kommenden Nebenzunge am Ostrand des Blockgletschers (vgl. Abbildung 46).

Möglicherweise finden in den Randzonen vorwiegend indirekt durch die grossen Verschiebungen in der Blockgletschermitte verursachte Umwälzungsprozesse statt, die mit einem eigentlichen kryogenen Kriechen wenig gemeinsam haben.

Mögliche Ursachen der erhöhten Bewegungsaktivität

Gemäss Staub (2007) besteht ein Zusammenhang zwischen der Länge der schneefreien Phase im Sommer und der Bewegungsaktivität. Da sich die Expositionszeit der schneefreien Blockgletscheroberfläche an der Atmosphäre durch alle drei Faktoren Wassereintrag, Lufttemperatur und Einstrahlung auf den Energie-Input positiv auswirkt, ist die hohe Korrelation der durchschnittlichen Bodenoberflächentemperatur während der schneefreien Phase mit deren Dauer nicht weiter verwunderlich. (Staub, 2007)

Bemerkenswerte Veränderungen haben in den letzten Jahren auch an der Front des Blockgletschers stattgefunden. Der Blockgletscher rückt immer weiter in den flachen Talboden vor, welcher mit Vegetation bedeckt ist und keinen Permafrost enthält. Seit einigen Jahren schiebt der Blockgletscher mächtige Stauchwülste vor sich her (siehe Abbildung 50), in denen der Bodenhorizont des Vorfeldes inklusive Vegetation zusammengeschieben wird. Dieses Wegschieben ist ein Hinweis darauf, dass die Vorwärtsbewegung der Blockgletscherstirn nicht mehr durch ein förderbandartiges Vorschütten von Material des Active Layers erfolgt, welches die Oberfläche im Vorfeld des Blockgletschers kontinuierlich zudecken würde.



Abbildung 50: Stauchwülste vor der Blockgletscherstirn. (Foto: B. Kruppenacher)

Diese Beobachtung, sowie die zunehmende Verflachung der einst steilen Blockgletscherfront deuten darauf hin, dass die Vorwärtsbewegung zumindest im vorderen Teil des Blockgletschers nicht mehr der typischen, raupenfahrzeugartigen Kriechbewegung entspricht, sondern mehr einer Gleitbewegung gleicht, bei welcher die Blockgletschermasse auf dem Untergrund abzuscheren scheint. Dabei könnte das wasserhaltige Feinmaterial des Oberbodens im Vorfeld oder das in diesem Bereich vermutlich nur noch wenige Meter dicke eishaltige Blockgletschermaterial selber, unter der Auflast der mächtigen Auftauschicht als Gleithorizont dienen.

Diese vermutete Destabilisierung der Front könnte auch mitverantwortlich sein für die massive Beschleunigung der Bewegungsdynamik. Durch die Verminderung der Reibung im unteren Teil des Blockgletschers könnte auch die Blockgletschermasse als Ganzes destabilisiert worden sein, ein entsprechender Gleithorizont vorausgesetzt. Allerdings deutet die bei den anderen beiden Blockgletschern festgestellte synchrone Beschleunigung auf eine starke klimatische Komponente hin.

Und letztlich könnte auch die beobachtete Vertiefung in der Oberfläche hinter der Blockgletscherfront durch ein Abscheren des Stirnbereichs verursacht worden sein.

Volumetrische Untersuchungen

Nach den photogrammetrischen Untersuchungen von Klaus Budmiger (Krummenacher et al., 1998), welche auf erhebliche Höhenänderungen der Blockgletscheroberfläche gestossen waren, wurden die Untersuchungen zur Volumetrie der Blockgletscher von Dragan Mihajlovic fortgesetzt.

Die Differenzen zwischen den Höhenmodellen, welche per Bildkorrelation aus den Luftbildern der verschiedenen Jahrgänge für das ganze Tal angefertigt wurden, bestätigen die markanten Höhenänderungen, die an den Oberflächen der Blockgletscher in der Beobachtungsperiode aufgetreten sind. (Abbildung 51)

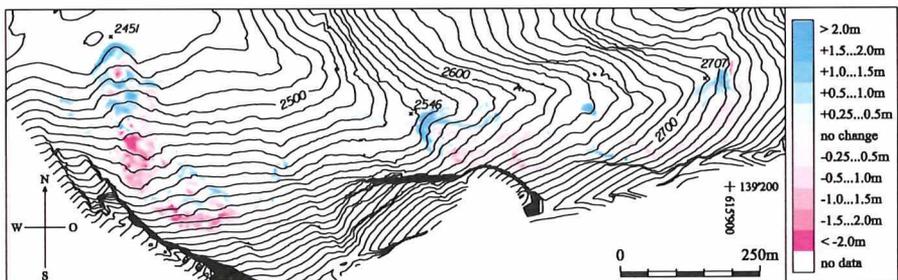


Abbildung 51: Darstellung der aus der Differenz der Höhenmodelle errechneten Höhenänderung der Geländeoberfläche im gesamten Tal, von 1990 bis 2000 ($\Delta Z = Z_{2000} - Z_{1990}$). Rote Bereiche weisen auf ein Volumendefizit, blaue auf einen Volumenüberschuss hin. Die Höhenänderungen betreffen hauptsächlich die Oberfläche der Blockgletscher (Mihajlovic, in Arbeit).

Die Höhenänderungen im Untersuchungsgebiet betreffen dabei hauptsächlich die drei Blockgletscher an der südlichen Talflanke (vgl. Übersichtskarte auf Seite 110). Diese Höhenänderungen sind prozessbedingt, da das Blockgletschermaterial durch die Kriechbewegung aus dem oberen Bereich hangabwärts verlagert und weiter unten im Akkumulationsbereich deponiert wird.

Die markante Absenkung der Oberfläche im Nährgebiet der Blockgletscher bedeutet aber auch, dass der Kriechprozess der Blockgletscher während der letzten Jahrzehnte aus dem Gleichgewicht geraten ist: Im Nährgebiet der Blockgletscher fällt viel weniger neues Blockgletschermaterial an, als durch die eskalierende Prozessdynamik aus diesem Bereich weggeführt wird.

Diese Beobachtung ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Umgebungsbedingungen im Untersuchungsgebiet für die Blockgletscher heute zu warm sind und sich diese in Richtung einer klimabedingten Inaktivierung entwickeln.

Weiterführende Aussagen zur Entwicklung von Blockgletscher und Permafrost wurden von der Bilanzierung der Blockgletschervolumen erwartet. Sollte der Eisanteil aufgrund der festgestellten Erwärmung tatsächlich abschmelzen, so müsste dies mit der Zeit anhand eines fortschreitenden Verlustes an Blockgletschervolumen sichtbar werden.

Die exakte Bilanzierung der Blockgletschervolumen erwies sich allerdings als wesentlich schwieriger als angenommen, und konnte bis heute keinen spektakulären Verlust an Blockgletschervolumen nachweisen, was auch verschiedene messtechnische Gründe hat:

- Hauptgrund ist die limitierte Höhengenaugigkeit, welche die kleinmassstäblichen Luftbilder vor 1990 mit sich bringen. Diese liegt trotz allen Tricks und Nachkalibrierungen im Bereich von ca. ± 0.35 m bis ± 0.45 m (1S), was die Trennschärfe der möglichen Aussage erheblich reduziert. So versinkt beispielsweise der zwischen 1960 und 2000 beim grössten Blockgletscher festgestellte Volumenverlust von -1445 m^3 im Messfehler, da der Verlust auf die ganze Fläche des Blockgletschers verteilt nur einer Absenkung von ca. 4.5 cm entspricht.
- Eine andere Ursache ist die Schwierigkeit, den Prozessraum der Blockgletscher und damit den Perimeter der Volumenbilanzierung klar abzugrenzen, was besonders im Nährgebiet der Blockgletscher problematisch ist.
- Eine weitere Unsicherheit bereitet die prozessbedingte, fortschreitende Vergrößerung der Blockgletscherflächen. Dadurch wird das im Blockgletscher vorhandene Volumen auf eine immer grössere Fläche verteilt, im Fall des grössten Blockgletschers hat die Oberfläche alleine in der Zeit zwischen 1990 und 2000 um fast 3% zugenommen. Da die im Vergleich mit der Umgebung deutlich rauere Oberfläche des Blockgletschers eine wesentliche grössere Höhenunsicherheit mit sich bringt, welche via Fläche auf die Volumenbilanz wirkt, wird dadurch der Vergleich von verschiedenen Zeitschnitten zusätzlich erschwert.

Immerhin wurde beim grössten Blockgletscher im Tal zwischen 1990 und 2000 anhand der grossmassstäblichen Luftbilder ein Volumenverlust festgestellt, welcher leicht über dem Messfehler liegt. (vgl. Abbildung 52)

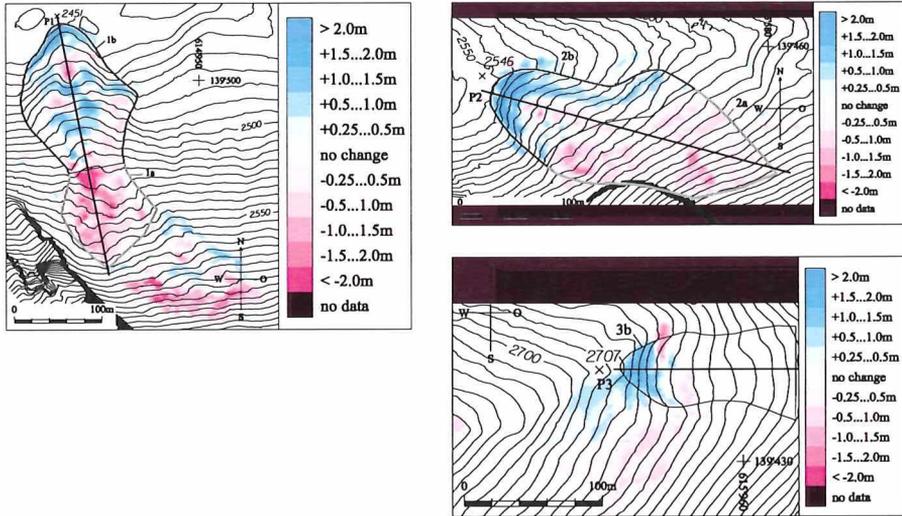


Abbildung 52: Höhenänderung der Geländeoberfläche zwischen 1990 und 2000 im Bereich der drei untersuchten Blockgletscher (Nr. A links, Nr. B rechts oben, Nr. C unten rechts). Die Umrisse bezeichnen die jeweiligen Perimeter: der für die Bilanzierung der Volumendifferenzen (Perimeter a, grau umrandet) und des durch den Kriechprozess verlagerten Volumens (Perimeter b, schwarz umrandet). (Mihajlovic, in Arbeit). Eine Übersicht über die Lokalisation der Blockgletscher ist auf Seite 110 zu finden.

Wesentlich aussagekräftiger sind die volumetrischen Betrachtungen der Massenverlagerung der Blockgletscher. Da dem System im Beobachtungszeitraum kein nennenswertes Volumen zugeführt wurde, lassen sich bei den volumetrischen Untersuchungen Bilanzierungsschwellen anlegen. Dies ist gerade beim grössten Blockgletscher besonders einfach, da hier das Nährgebiet gegenüber dem Akkumulationsgebiet gut abgegrenzt werden kann.

Während die Volumenbilanzierung jeweils den Perimeter des gesamten Prozessraumes betrachtet, wurde für die Analyse der Volumenverlagerung die Bilanz nur für den Perimeter des Akkumulationsraums gerechnet. Diese Bilanzierung zeigt an, welches Volumen während einer Periode zusätzlich in diesen Perimeter transportiert wurde.

Tabelle 1 zeigt die im Perimeter 1a zwischen 1960 und 2000 festgestellten Volumenänderungen.

Volumenbilanzierung 1960-2000	Perimeter 1a
<i>Planimetrische Fläche Perimeter:</i>	3230 m ²
<i>Mittl. Höhenfehler, Worst Case:</i>	± 0.45 m
<i>Volumendefizit:</i>	- 20434 m ³
<i>Volumenüberschuss:</i>	18988 m ³
<i>Differenzvolumen Netto:</i>	-1445 m³
<i>Mittlere Höhenänderung:</i>	-0.045 m

Tabelle 1: Volumenbilanzierung Blockgletscher 1, Perimeter 1a, 1960 bis 2000. Die festgestellten Volumenänderungen liegen im Bereich des Messfehlers.

Die festgestellte mittlere Höhenänderung im Perimeter liegt wesentlich unter dem geschätzten mittleren Höhenfehler der Bilanzierung. Daher liegt die Aussage der Messung innerhalb der Messungenauigkeit und weist somit nicht auf eine signifikante Volumenveränderung hin.

Tabelle 2 zeigt die im Perimeter 1a zwischen 1990 und 2000 festgestellten Volumenänderungen.

Volumenbilanzierung 1990-2000	Perimeter 1a
<i>Planimetrische Fläche Perimeter:</i>	23822 m ²
<i>Mittl. Höhenfehler, Worst Case:</i>	± 0.08 m
<i>Volumendefizit:</i>	-10003 m ³
<i>Volumenüberschuss:</i>	7555 m ³
<i>Differenzvolumen Netto:</i>	- 2447 m³
<i>Mittlere Höhenänderung:</i>	-0.103 m

Tabelle 2: Volumenbilanzierung Blockgletscher 1, Perimeter 1a, 1990 bis 2000. Die wesentlich bessere Höhengenaugkeit der grossmasstäblichen Luftbilder lässt den Schluss zu, dass das Volumen der Blockgletschermasse im Perimeter in diesem Zeitraum leicht abgenommen hat.

Die festgestellte mittlere Höhenänderung im Perimeter liegt hier leicht über dem geschätzten mittleren Höhenfehler der Bilanzierung. Es kann daher angenommen werden, dass das Volumen des Blockgletschers im beobachteten Zeitraum und Perimeter leicht abgenommen hat.

Etwas aussagekräftiger ist die Betrachtung der Volumenverlagerung in den Akkumulationsbereich des Blockgletschers (Tabelle 3)

Massenverlagerung	Perimeter 1b
1960 – 1974:	$177 \text{ m}^3/\text{a} \pm 142 \text{ m}^3/\text{a}$
1974 – 1990:	$431 \text{ m}^3/\text{a} \pm 76 \text{ m}^3/\text{a}$
1990 – 1995:	$561 \text{ m}^3/\text{a} \pm 82 \text{ m}^3/\text{a}$
1995 – 2000:	$378 \text{ m}^3/\text{a} \pm 90 \text{ m}^3/\text{a}$

Tabelle 3: Bilanzierung der Volumenverlagerung durch Blockgletscher 1, Perimeter 1b. Obwohl die Genauigkeit der Geländemodelle von 1960 und 1974 wesentlich schlechter ist als bei den Modellen von 1990 und 2000, wird die Volumenverlagerung wegen dem langen Messintervall plausibel abgebildet.

Das im unteren Bereich von Blockgletscher 1 pro Jahr akkumulierte Volumen hat im Zeitraum von 1960 bis 1995 stark zugenommen. Diese Entwicklung verläuft parallel zur beobachteten Beschleunigung der Bewegungsgeschwindigkeit, vor allem im mittleren Bereich des Blockgletschers. Seither hat das transportierte Volumen tendenziell wieder abgenommen, obwohl die Prozessdynamik zwischen 1995 und 2000 weiter zugelegt hat. Ein analoges Verhalten wurde bei den anderen Blockgletschern festgestellt.

Dies bedeutet, dass die Blockgletscher im Untersuchungsgebiet den Grossteil des zur Verfügung stehenden Materials bereits im Akkumulationsraum deponiert haben, und die Zufuhr an weiterem Volumen aus dem Nährgebiet mangels Neubildung von Blockgletschermaterial bereits rückläufig ist.

Fazit

Das Monitoring der Bewegungsdynamik der Blockgletscher mittels terrestrischer und photogrammetrischer Vermessung hat wesentlich zum Prozessverständnis und zur Klärung der beobachteten atypischen Bewegungsdynamik beigetragen. Durch den Vergleich mit den im Untersuchungsgebiet erhobenen Klimadaten konnte die Koppelung der Prozessdynamik an die thermischen Verhältnisse im Active Layer und im Permafrost nachgewiesen werden, welche ihrerseits vom Zusammenspiel von Wetter und Schneebedeckung im Zyklus der Jahreszeiten gesteuert werden (Mihajlovic et al., 2008, Mihajlovic, in Arbeit).

Sowohl die grossen Kriechgeschwindigkeiten wie auch die hohe Variabilität der Prozessdynamik sind eine Folge davon, dass sich die Temperatur des eisgesättigten Permafrost der Blockgletscher heute mehrheitlich im Bereich zwischen ca. -3°C und 0°C bewegt, in welchem die Plastizität des Poreneises überproportional zunimmt. Dies wird von den gemessenen Wintergleichgewichtstemperaturen bestätigt (vgl. Kapitel 3.1 und 3.7).

Sowohl die photogrammetrischen wie auch die terrestrischen Daten zur Untersuchung der Bewegungsdynamik stützen die Vermutung, dass sich zumindest der grösste, am tiefsten gelegene Blockgletscher am Taleingang erschreckend rasch in

Richtung der klimatischen Inaktivierung bewegt. Die Inaktivierung von Randbereichen des Blockgletschers stützt diese Vermutung.

Bis der Blockgletscher als ganzes inaktiviert sein wird, dürfte es noch eine Weile dauern. Angesichts der allgemeinen Annahme, dass es sich bei Blockgletschern um geomorphologische Formen handelt, die sich sehr langsam und über lange Zeiträume entwickeln, und ein entsprechend hohes Alter vermuten lassen, ist das vergleichsweise rasante Tempo der festgestellten Veränderungen überraschend.

3.6 Messung und Modellierung der Globalstrahlung im Untersuchungsgebiet

Untersuchungen zum Zusammenhang von Strahlung und Permafrost

Das Vorkommen von Permafrost zeugt von einer über längere Zeit anhaltenden negativen Energiebilanz der Bodenoberfläche. Da diese Energiebilanz im Hochgebirge hauptsächlich von der kurz- und langwelligen Strahlungsbilanz dominiert wird, ist Permafrost im Alpenraum häufig an Stellen mit reduzierter kurzwelliger Einstrahlung gebunden. Dies gilt speziell für Höhenlagen, in denen das Jahresmittel der Lufttemperatur nur wenige Grade unter null liegt. So beschränkt sich die Zone des diskontinuierlichen oder sporadisch vorkommenden Permafrosts in tieferen Lagen in der Regel auf Schattenbereiche der Expositionen Nordwest bis Nordost, wo im Jahresverlauf deutlich weniger Energie eingestrahlt wird.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Energiebilanz ist die Schneedecke, welche die kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz der Bodenoberfläche dominiert. Während sie in den Frühlings- und Sommermonaten die kurzwellige Einstrahlung reduziert, kann sie im Frühwinter als wenige Zentimeter dicke Schneesicht bei klarem Himmel die Abstrahlung von langwelliger Wärmestrahlung fördern. Diese als Herbstschnee-Effekt (Keller, 1994) bekannte Eigenschaft kann zu einer zusätzlichen Auskühlung der Bodenoberfläche beitragen.

Bei der Modellierung von Permafrost und dessen Verbreitung wurden meistens Strahlungsmodelle eingesetzt, welche sich hauptsächlich auf der Modellierung der kurzwelligen Einstrahlung abstützen (Hölzle, 1994).

Auch für den Permafrost im Furggental wurde dies schon sehr früh bewerkstelligt: Alex Leuenberger (1994) realisierte 1993 nach der Vorarbeit von Dätwyler & Tschanz (1994) ein Modell, welches für die Oberfläche des Blockgletschers und dessen Umgebung die potentielle kurzwellige Einstrahlung berechnete (vgl. Abbildung 53).

Für die Berechnung wurde mittels einer Kamera mit Fischaugenobjektiv, welches ein 180° Bildfeld aufweist an verschiedenen Standorten im Untersuchungsgebiet die Horizontüberhöhung bestimmt. Die so gewonnene Horizontinformationen dienen zusammen mit Informationen zur Direkt- und Diffusstrahlung als Input-Daten für das Modell, welches 1993 (im beinahe Vor-GIS-Zeitalter) in der Programmier-

sprache PASCAL realisiert wurde. Nachdem erste Rechenversuche auf der damals üblichen Intel 486-Architektur an der zu langsamen Rechengeschwindigkeit scheiterten, gelang anschliessend auf den damals neuen SPARC-Prozessoren von Sun Microsystems der Durchbruch.

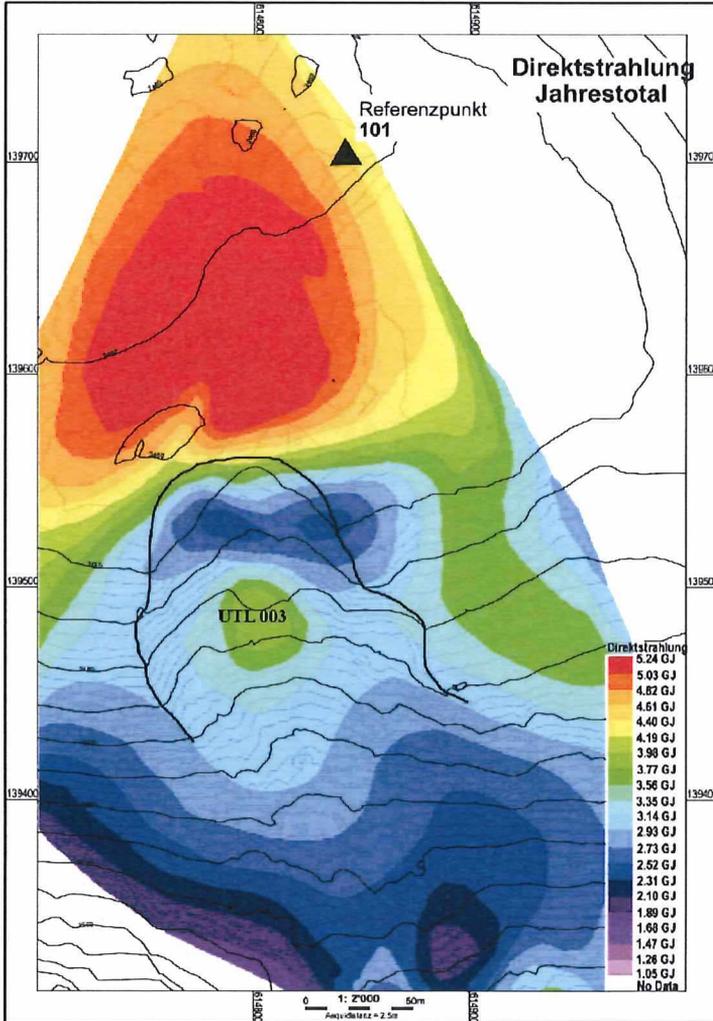


Abbildung 53: Strahlungsmodell Leuenberger (Staub, 2008)

Neben der Modellierung wurde die kurzwellige Einstrahlung im Untersuchungsgebiet auch messtechnisch erfasst. Bereits die von Bernhard Kruppenacher realisierte Temperaturprofil-Messstation (Delta-Logger, Kapitel 2.1) von 1988 (Kruppenacher et al, 1998) war mit einem Pyranometer zur Messung der kurz-

welligen Einstrahlung ausgerüstet, dessen Messreihe allerdings von vielen Ausfällen geprägt war.

Mit der Installation von zwei automatischen Klima-Messstationen im Herbst 1999 durch Severin Schwab (2000) wurde die Messreihe zur Strahlung erneut aufgenommen. Während eine Station in der Nachbarschaft der ursprünglichen Temperaturprofil-Messstation die kurzwellige Einstrahlung registriert, wird an der anderen Station auf der Blockgletscheroberfläche die Nettostrahlung erfasst, abgeleitet aus der separat gemessenen kurzwelligen und langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz.

Reto Affentranger (2001) entwickelte in einer weiteren Arbeit zur Thematik kurzwellige Einstrahlung und Permafrostverbreitung eine Feldmethode, bei der mit Hilfe eines Sonnenkompasses und einer Checkliste im Gelände auf das Vorkommen von Permafrost geschlossen werden kann.

Weitere Untersuchungen zum Zusammenhang Strahlung und Permafrost durch Dragan Mihajlovic (2003; 2008; in Arbeit) befassen sich einerseits mit dem Einfluss der Schneedecke auf die kurzwellige Einstrahlung, und andererseits mit den Auswirkungen der prozessbedingten Formveränderung des Blockgletschers auf die eingestrahle Energiemenge.

Mit der Verfügbarkeit von hoch auflösenden Geländemodellen, welche aus den Luftaufnahmen extrahiert wurden, und Dank der rasanten Entwicklung bei GIS-Software und Rechenleistung konnte die Auflösung der Strahlungsmodellierungen seit dem ersten Modell von 1993 erheblich gesteigert werden (vgl. Abbildung 54).

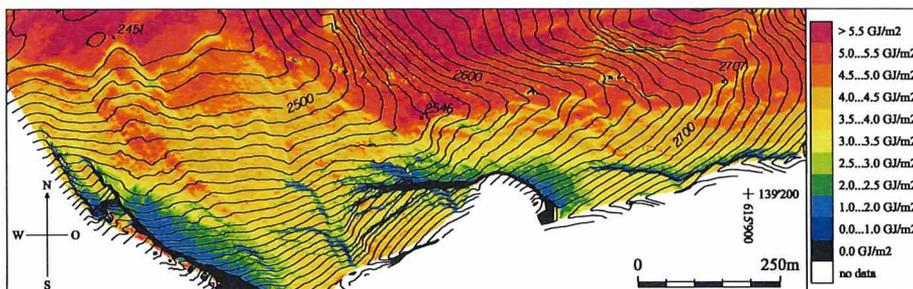


Abbildung 54: Modellierter kurzwelliger Einstrahlung im Gelände des Untersuchungsgebiets. Die Werte repräsentieren die Energiemenge der potentiell pro (planimetrischen) Quadratmeter eingestrahlt kurzwelligen Globalstrahlung für den Zeitraum vom 1. April bis 30. September, unter Berücksichtigung von Exposition, Hangneigung, Horizontüberhöhung und Schattenwurf. (Geländemodell aus dem Jahr 2000, kurzwellige Albedo flächendeckend $\alpha = 0.1$, zeitliche Auflösung 30 min). (Mihajlovic, in Arbeit)

Die Strahlungsmodellierung zeigt den markanten Unterschied zwischen den nord- und südexponierten Talseiten auf. Das Vorkommen von Permafrost in Form von Blockgletschern beschränkt sich auf den nordexponierten Hang, wo der Strahlungsinput im Schatten der Felswände der Plattenhörner gering ist. Die Ausnahme bildet der kleinste aktive Blockgletscher zuoberst im Tal (östlich vom Punkt 2707 in Abbildung 54), welcher massiv mehr Strahlung erhält als der grosse Blockgletscher am westlichen Talausgang. Die Stirn dieses Blockgletschers liegt allerdings 250 m höher als jene des grössten Blockgletschers, und damit dürfte dort auch der Jahresdurchschnitt der Lufttemperatur deutlich unter 0°C liegen.

Einfluss der Schneedecke auf die kurzwellige Einstrahlung

Interessant ist es, der Modellierung der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung die Daten der tatsächlich gemessenen Einstrahlung entgegenzustellen, unter Berücksichtigung der Schneebedeckung im Untersuchungsgebiet. (Abbildung 55).

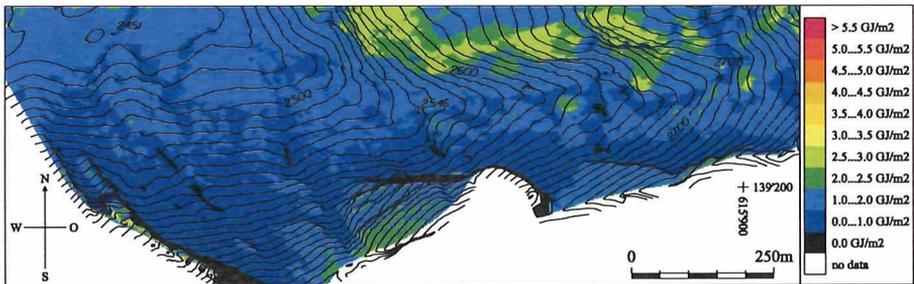


Abbildung 55: Kurzwellige Einstrahlung im Untersuchungsgebiet, im Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September 1997. Die Werte stellen die während dem Zeitraum pro planimetrischen Quadratmeter eingestrahelte Energiemenge dar. Berechnet mit extrapolierten Strahlungsdaten der SMA ANETZ-Station Montana und Adelboden, unter Berücksichtigung der Schneeverhältnisse im Untersuchungsgebiet 1997, welche aus wiederholten Luftaufnahmen während der Periode des Ausaperns abgeleitet wurden (vgl. Kapitel 3.2). Geländemodell aus dem Jahr 1995, Albedo der schneefreien Flächen $\alpha = 0.1$, zeitliche Auflösung 30 min (Mihajlovic, in Arbeit).

Der Vergleich zeigt, wie stark der Einfluss der Schneedecke auf den Strahlungsinput an der Bodenoberfläche im Untersuchungsgebiet ist. Dank der lang anhaltenden Schneebedeckung und dank des Schattenwurfes erhalten besonders die „Nährgebiete“ der Blockgletscher während der warmen Monate einen nur kleinen kurzwelligen Strahlungsinput, was das Vorkommen von Permafrost in dieser Höhenlage überhaupt erst ermöglicht.

Für den grössten Blockgletscher am Ausgang des Tales wurde der Einfluss der Schneebedeckung auf die eingestrahelte Energiemenge während der Frühlings- und Sommermonate der Jahre 1995 und 1996 noch detaillierter betrachtet.

Die Entwicklung der Schneedecke unterscheidet sich (wie im Kapitel 3.2 beschrieben) in den beiden aufeinander folgenden Jahren sehr stark. Während im Jahr

1995 der Schnee bis Mitte Juli weite Teile der Blockgletscheroberfläche bedeckt, ist diese 1996 bereits Anfangs Juni grösstenteils schneefrei. Auch die Entwicklung der Schneedecke im Herbst unterscheidet sich in den beiden Jahren grundsätzlich: im Herbst 1995 setzten nach einem kühlen Bergsommer bereits im September wiederholte Schneefälle ein, welche das Untersuchungsgebiet mit einer dünnen Schneedecke überziehen. Die Mächtigkeit der Schneedecke bleibt dann aber bis im Januar 1996 unüblich dünn. Im Herbst 1996 setzten die Schneefälle nach einem warmen Bergsommer erst einen Monat später ein, dafür ist die Schneedecke im Herbst und Frühwinter erheblich mächtiger. Die beiden Jahre stellen eine Abfolge von einem Jahr mit besonders permafrostgünstigem Witterungsverlauf zu einem Jahr mit einer deutlich permafrostungünstigeren Witterung dar.

Für beide Jahre wurde vom 1. April bis zum 30. September die kurzweilige Nettostrahlung modelliert. Als Input-Daten dienten neben dem Geländemodell (Exposition, Hangneigung, Horizontüberhöhung und Schattenwurf) die Daten zur Schneebedeckung, welche aus den Bildern der Schrägbildkamera abgeleitet wurden (zeitliche Auflösung 1 Tag). Diese Schneebedeckung wurde mit den extrapolierten Strahlungsdaten der SMA-Station Montana verrechnet, als zeitliche Auflösung für die Modellierung wurde ein Intervall von einer Stunde gewählt.

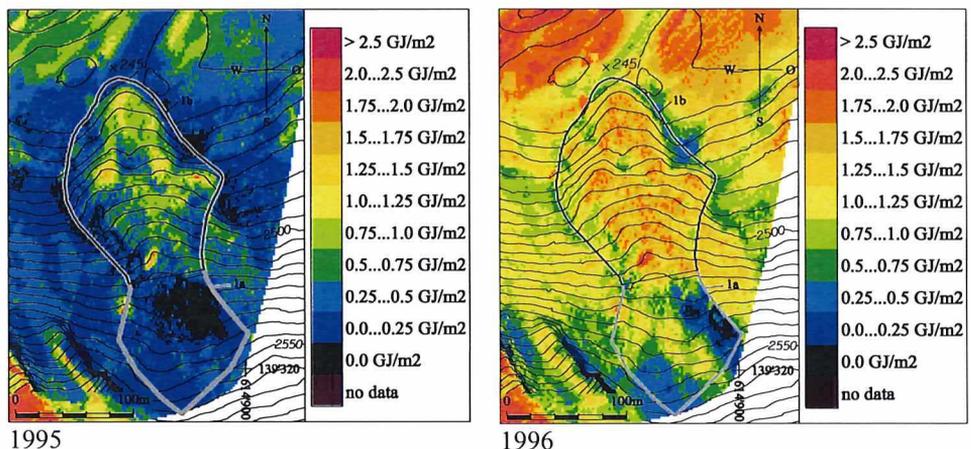


Abbildung 56: Kurzweilige Einstrahlung auf den grössten Blockgletscher am Westrand des Untersuchungsgebietes, 1995 und 1996. Berechnet mit Strahlungsdaten der SMA ANETZ-Station Montana unter Berücksichtigung der Schneebedeckung. Die Werte stellen die pro planimetrischen Quadratmeter eingestrahelte Energiemenge dar, für den Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September 1995 resp. 1996. Geländemodell aus dem Jahr 1995, Albedo der schneefreien Flächen $\alpha = 0.1$, zeitliche Auflösung 1 h. (Mihajlovic, in Arbeit)

Der Unterschied zwischen den beiden Jahren ist enorm. Betrachtet man das Total der in den beiden Jahren auf die wahre Oberfläche des Blockgletschers eingestrahltene Energiemenge (Perimeter 1a in Abbildung 56), so stellt sich heraus, dass zwischen 1. April und 30. September 1995 total 10.3 TJ eingestrahlt wurden, im gleichen Zeitraum im Jahr 1996 hingegen total 29.4 TJ. Somit standen 1995 nur ca. 35% der Energiemenge von 1996 zum Auftauen des Active Layers zur Verfügung. Gleichmässig über die betrachtete Fläche des Perimeters und über den untersuchten Zeitraum verteilt entspräche das einer konstanten, an der Oberfläche des Active Layers einwirkenden Heizleistung von ca. 38 W/m^2 1995, gegenüber ca. 108 W/m^2 1996!

Das Resultat dieser unterschiedlichen Entwicklung ist das festgestellte Absinken der Winter-Gleichgewichtstemperatur (WEQT) im Frühjahr 1996, im Anschluss an den schneereichen, nasskalten Sommer 1995. Im Gegensatz dazu steht das beobachtete Ansteigen der WEQT nach der schneearmen und deutlich wärmeren Warmphase 1996 (vgl. Kapitel 3.7). Die unterschiedliche Erwärmung von Active Layer und Permafrost während der beiden Jahre spiegelt sich auch in der unterschiedlichen Aktivität des Blockgletschers wieder (vgl. Kapitel 3.5).

Prozessbedingte Veränderung der eingestrahltene Energiemenge

Die „Nährgebiete“ des westlichen und des mittleren der untersuchten Blockgletscher liegen typischerweise an Hanglagen im Schatten einer Felswand. Je nach Exposition des Hanges wird beim Vorrücken das Blockgletschermaterial hangabwärts immer weiter aus dem Schatten der Felswand hinaus transportiert, was beim grössten Blockgletscher, dessen Kriechbewegung fast exakt Richtung Norden verläuft, besonders rasch erfolgt. Dadurch erfährt die Blockgletscheroberfläche system- resp. prozessbedingt einen immer höheren Eintrag an kurzweiliger Einstrahlung. Stösst der Blockgletscher (wie im Fall dieses Blockgletschers) zudem in flacheres Gelände vor, steigt der kurzweilige Strahlungsinput aufgrund der geringeren Neigung der Blockgletscheroberfläche zusätzlich an.

Durch ihre Aktivität vergrössern die Blockgletscher zudem kontinuierlich ihre Ausdehnung. Dadurch verändert sich prozessbedingt auch das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Blockgletschers. An der sich vergrössernden Oberfläche kann dadurch pro Volumeneinheit Blockgletschermaterial z.B. mehr kurzweilige Energie eingestrahlt werden. Diese zunehmende Vergrösserung der Tauscherfläche an der Grenzschicht zwischen Active Layer und Atmosphäre bedeutet, dass das System Blockgletscher den klimatischen Signalen der Atmosphäre stärker ausgesetzt ist. Dadurch nimmt die Dynamik der Energieflüsse an der Grenzschicht generell zu. Abhängig davon, ob die klimatischen Verhältnisse für den Permafrost des Blockgletschers eine Gunst- oder Ungunstsituation darstellen, verstärkt sich dadurch der Netto-Energiefluss vom Permafrost in Richtung Atmosphäre oder umgekehrt.

Die Entwicklung dieser beiden system- resp. prozessbedingten Veränderungen wurde für die Blockgletscher im Furggentäli genauer analysiert. Dazu wurde die potentielle kurzweilige Einstrahlung jeweils mit den Geländemodellen berechnet, die aus den Luftbildern der verschiedenen Jahre extrahiert wurden.

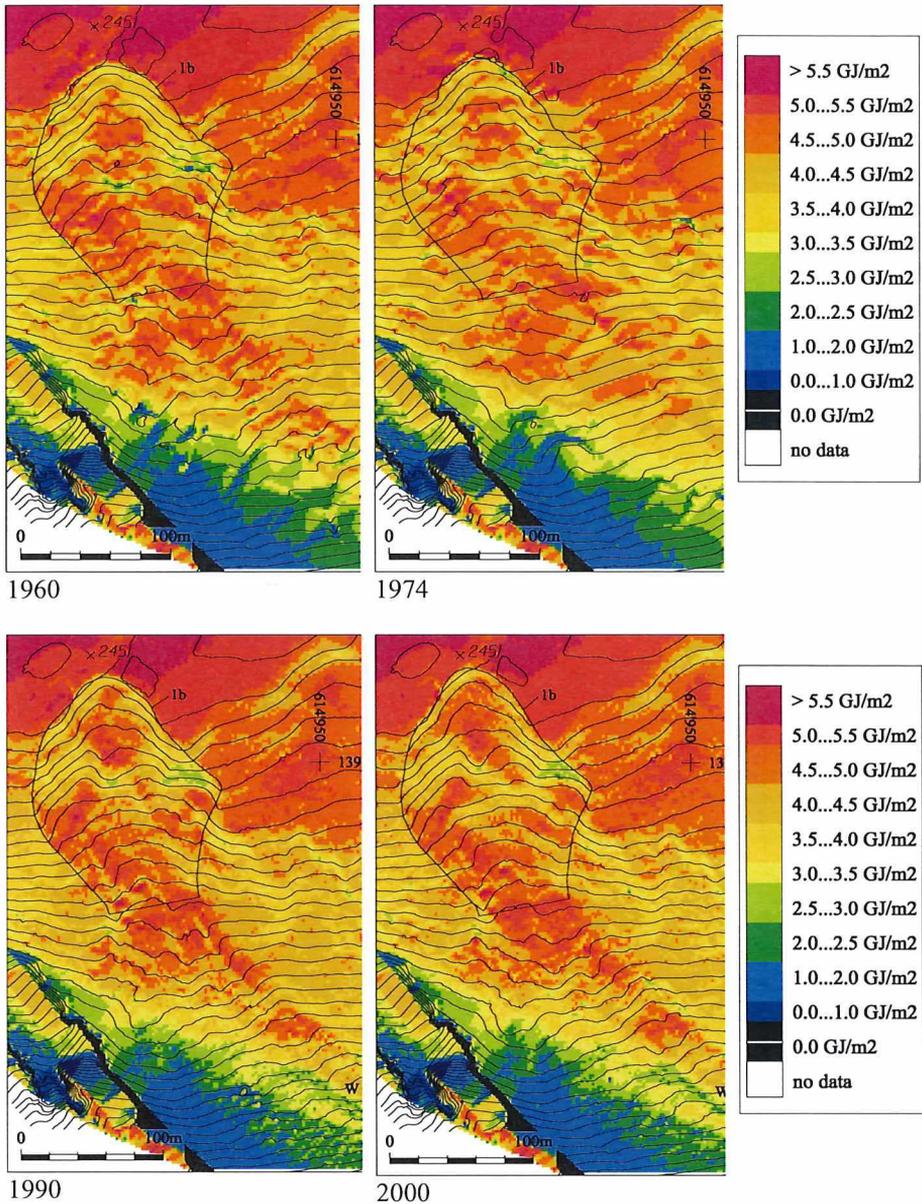


Abbildung 57: Kurzwellige Einstrahlung im Bereich des grössten der untersuchten Blockgletscher, im Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September des jeweiligen Jahres. Die Abbildung zeigt auch den für die Bilanzierung des Strahlungsinputs verwendete Perimeter 1b. Geländemodell des jeweiligen Jahres, Albedo der flächendeckend $\alpha = 0.1$, zeitliche Auflösung 30 min. (Mihajlovic, in Arbeit).

Da der Zuwachs an Oberfläche und an Strahlungsinput hauptsächlich im Zungenbereich der Blockgletscher stattfindet, wurden für die Bilanzierung der Unterschiede nur diese Bereiche betrachtet. Dazu wurde der Perimeter im Stirnbereich der Ausdehnung des Blockgletschers im jeweiligen Jahr angepasst. (Abbildung 57)

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Flächenänderung der wahren Oberfläche des vorrückenden Blockgletschers für den Zeitraum von 1960 bis 2000, dazu den dadurch verursachten Anstieg der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung.

<i>Perimeter Ib</i>	<i>A [m²]</i>	<i>A [%]</i>	<i>A_{3D} [m²]</i>	<i>A_{3D} [%]</i>	<i>A_{3D}/ A</i>	<i>Pot. S↓ [TJ]</i>	<i>Pot. S↓ [%]</i>
1960	14118	92.1	16280	92.7	1.15	70.9	90.8
1974	14298	93.3	16279	92.7	1.14	71.6	91.7
1990	14949	97.5	17187	97.9	1.15	75.7	96.9
2000	15327	100.0	17556	100.0	1.15	78.1	100.0

Tabelle 4: Entwicklung der Oberfläche des Blockgletschers (Perimeter Ib) und der darauf potenziell einfallenden kurzwelligen Strahlung, von 1960 bis 2000. A= planimetrische Fläche des Perimeters; A_{3D}= wahre Oberfläche im Perimeter; Pot. S↓= Summe der modellierten potenziellen kurzwelligen Einstrahlung auf die wahre Oberfläche im Perimeter, vom 1. April bis zum 30. September. (Mihajlovic, in Arbeit)

Die Zahlen zeigen, dass die für den Energieaustausch mit der Atmosphäre zur Verfügung stehende Blockgletscheroberfläche allein in den vier Jahrzehnten von 1960 bis 2000 um über 7% zugenommen hat, die potentiell darauf eingestrahlte kurzwellige Energie um fast 10%.

Dabei stellt der Blockgletscher hinsichtlich der beiden eingangs beschriebenen system- respektive prozessbedingten Effekten quasi ein Worst-Case-Szenario dar:

- Der Blockgletscher weist eine enorm hohe Aktivität auf, was zur raschen Ausdehnung der Oberfläche beiträgt.
- Die Bewegung des Blockgletschers zeigt ziemlich genau in Richtung Norden, in welcher die Abnahme der Abschattung durch die Felswand am stärksten ist.
- Gleichzeitig hat der Blockgletscher den Talboden erreicht und stösst seit vier Jahrzehnten in flaches Gelände vor.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses prozessbedingte, interne Forcing teilweise mitverantwortlich sein dürfte für die starke Beschleunigung der Prozessdynamik, welche beim grössten der untersuchten Blockgletscher beobachtet wurde.

Da sich die Beschleunigung auch bei den anderen untersuchten Blockgletschern abzeichnet (vgl. Kapitel 3.5), welche bezüglich Flächenvergrößerung und Schatten-

situation anderen Rahmenbedingungen unterliegen, dürfte aber der Grossteil der beobachteten Beschleunigung der Prozessdynamik klimatisch bedingt sein.

3.7 Dynamik der Bodenoberflächentemperatur

Der saisonale Verlauf der Bodenoberflächentemperatur (BOT oder GST)

In Abhängigkeit von der Schneedeckendynamik erfassen die UTL-1 (siehe Kapitel 3.2) in der Bodenoberflächentemperatur über den Jahresverlauf unterschiedliche Signale aus der bodennahen Atmosphäre. Während der Schneeschmelze im Frühsommer (sog. Zero-Curtain) sowie der schneefreien oder nur leicht schneebedeckten Phase werden an der Oberfläche der Auftauschicht thermische Signale "angelegt". Das Integral dieser Signale (nachfolgend als **Signalphase** beschrieben) induziert in der Auftauschicht über den Jahresverlauf gesehen einen Netto-Energiefluss, dessen Intensität und Richtung vom durchschnittlichen Gradienten zwischen der Temperatur an der Oberfläche und der Temperatur im Untergrund mitbestimmt wird.

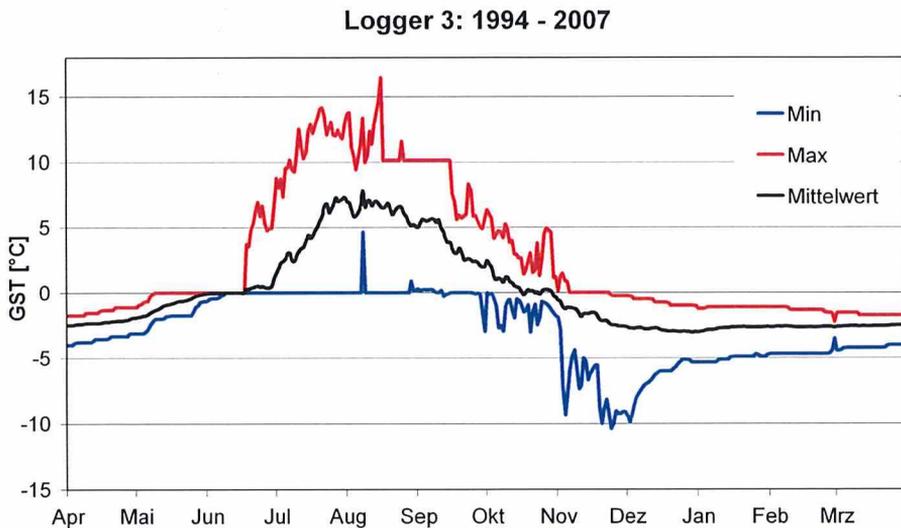


Abbildung 58: Je nach Witterungsverlauf und Schneedeckendynamik registrieren die UTL-1 – speziell im Sommerhalbjahr und im Frühwinter – sehr unterschiedliche Temperaturen. Die Abbildung zeigt anhand von UTL Nr. 3 über die gesamte Messreihe für jeden Kalendertag die Bandbreite der Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperaturen.

Der UTL-1 erfasst das an der Bodenoberfläche angelegte thermische Signal als

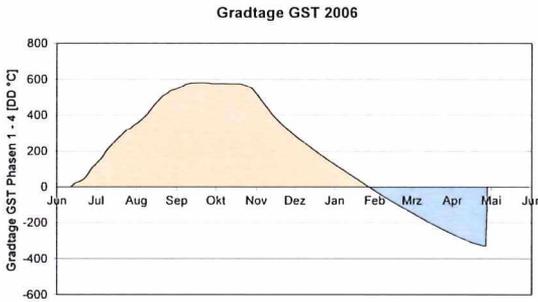


Abbildung 59: Die Graphik zeigt die Temperatursumme an der Bodenoberfläche (UTL Nr. 3) nach Beginn des Zero-Curtains im Juni 2005 bis hin zum Zero-Curtain im folgenden Jahr. Die Signalphase (orange) endet infolge späten Einschneiens erst gegen Ende Januar; der Untergrund gibt zwischengespeicherte Wärme an die Atmosphäre zurück. Entsprechend kühl ist die Gradtagsumme vor Beginn des Zero-Curtains (Im Anschluss an die in blau dargestellte Antwortphase).

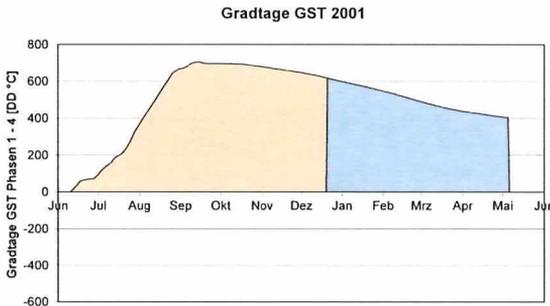


Abbildung 60: Gradtagsumme von UTL Nr. 3. Die Signalphase (orange) endete bereits im Dezember 2000. Der Untergrund hatte nicht genügend Zeit, die im Sommer zwischengespeicherte Wärmeenergie wieder an die Atmosphäre abzustrahlen. Somit resultierte für die Periode 2001 ein stark positiver Nettoenergieeintrag; dem Permafrost wurde Wärme zugeführt.

diffuses Integral. Da darin sowohl die Umgebungstemperatur, die Strahlungsbilanz als auch komplexe Luftumwälzungsprozesse im grobblockigen Lockermaterial abgebildet sind, eignen sich UTL-Daten sehr gut für pauschale Aussagen über den Energieaustausch in der Auftauschicht (Active Layer) und an dessen Grenzschicht zur Atmosphäre. Über die gesamte Signalphase eines Jahres betrachtet, beschreiben auch einfache Temperaturmittelwerte oder Gradtagsummen den Energieeintrag während der durch die Atmosphäre beeinflussten Phase qualitativ sehr gut. Besonders interessant sind Vergleiche innerhalb mehrjähriger Datenreihen, die sowohl im Sommer als auch im Winter extreme Witterungszustände beinhalten. Wie Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen, fiel der atmosphärische Netto-Energieeintrag zwischen 1994 und 2007 sehr verschieden aus: Je nach Witterungsverlauf dringt während der schneefreien Phase im Hochsommer unterschiedlich viel Wärme in den oberflächennahen Untergrund. Diese wird in Abhängigkeit von der Schneedeckendynamik im Frühwinter wiederum verschieden effizient an die Atmosphäre zurückgegeben. Die Gradtagsummen in Abbildung 59 zeigen für die Signalphase 2006 einen ausgesprochen kühlen Witterungsverlauf ohne

Nettoenergieeintrag aus der Atmosphäre. Verglichen mit anderen Jahren kann die Periode 2006 demnach als „permafrostkühlend“ oder „permafrostfreundlich“ bezeichnet werden. Verglichen mit der Periode 2006 war speziell der Frühwinter 2000/01 ausgesprochen warm und damit klar „permafrostunfreundlich“: Die Gradtagsumme war Anfang November zwar nur unwesentlich höher als 2006, durch das frühe Einschneien aber fast vollständig im Untergrund konserviert worden. In der Folge hat sich zwischen den relativ warmen oberen Bodenschichten bis in den tieferen Untergrund ein thermisches Gleichgewicht eingestellt.

Elemente der Signalphase: Einfluss der Witterungsverläufe auf den Nettoenergieeintrag

Einige wichtige witterungsabhängige Steuerfaktoren des Nettoenergieeintrags während der Signalphase wurden bereits angesprochen. Anhand der Bodenoberflächentemperaturen lassen sich jedoch eine Vielzahl an Steuerfaktoren auslesen, die entweder den Energieeintrag in den Untergrund oder die Wärmeabgabe an die Atmosphäre beschreiben.

Im **Hochsommer** wird die Bodenoberfläche primär durch die bodennahen Luftschichten sowie durch die kurzweilige Einstrahlung erwärmt. Meist apert der Blockgletscher erst im Juni oder Juli aus, wodurch dieser während des Sonnenhöchststandes durch eine Schneedecke vor kurzweiliger Einstrahlung geschützt und auch der Austausch von Gasen mit der Atmosphäre sehr stark limitiert bleibt. Als einfacher Steuerfaktor lässt sich daher das Ausaperungsdatum verschiedener Loggerstandorte – welches sehr einfach anhand des Zero-Curtains ermittelt werden kann – relativ über alle Messperioden vergleichen: Der Energieeintrag ist daher auch abhängig von der Schneemenge im Spätwinter und dem Witterungsverlauf im Frühsummer.

Im Spätsommer und **Herbst** steht die Sonne bereits sehr viel tiefer am Horizont und im Furgentälti fällt hin und wieder etwas Schnee. Die Lufttemperaturen unterscheiden sich in dieser Jahreszeit von Periode zu Periode sehr stark und beeinflussen schneebedeckten und schneefreien Untergrund ganz verschieden: Eine schneebedeckte Oberfläche ist vor kurzweiliger Strahlung geschützt, kann jedoch speziell in klaren Nächten sehr effizient Wärmeenergie abstrahlen. Zudem haben Untersuchungen von KELLER (1994) gezeigt, dass eine dünne, bis etwa 5 cm mächtige Schneedecke den thermischen Austausch zwischen dem Untergrund und der Atmosphäre verstärken kann. Der so genannte *Herbstschneeeffekt* – ebenfalls mittels einfacher Filter aus UTL- und Meteodaten detektierbar – verringert demnach den Nettoenergieeintrag der Signalphase und kann ebenso als Steuerfaktor verwendet werden.

Ein besonders relevanter Steuerfaktor des Nettoenergieeintrags in den Untergrund ist die Schneedeckendynamik im **Frühwinter**. Grundsätzlich konserviert frühes Einschneien wesentlich mehr Wärmeenergie im oberflächennahen Untergrund als späte Schneefälle.

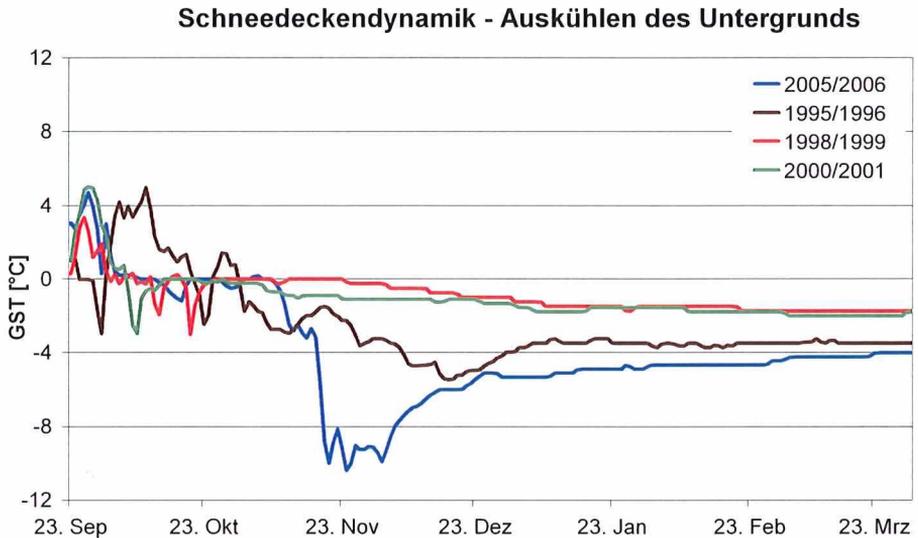


Abbildung 61: Frühes Einschneien verhindert eine effiziente Auskühlung des Bodens und konserviert die in den Sommermonaten aufgenommene Wärmeenergie im Untergrund. Anders führen kalte, aber schneefreie Tage wie im Frühwinter 2005/06 sehr viel Wärme zurück in die Atmosphäre. Die ausgewählten Temperaturverläufe von UTL Nr. 3 zeigen zudem je nach Witterungsverlauf Ende März zwei unterschiedliche „Energie-Zustände“.

Daher lassen sich auch anhand der Schneemächtigkeit – welche wiederum aus den UTL-Daten herausgefiltert werden kann – pauschale Aussagen über die „Permafrostfreundlichkeit“ eines Witterungsverlaufs machen und mit anderen Referenzjahren vergleichen. Wesentlich exakter beschreiben hier aber Gradtagsummen der Bodenoberflächentemperatur den zur Atmosphäre hin gerichteten Energiefluss (vgl. Abbildung 59 und Abbildung 60).

Winter EQUilibrium Temperature (WEQT) - Antwort des Untergrunds auf die Signalphase

Mit der Isolationswirkung einer mächtigen Schneedecke im Hochwinter wird der Untergrund von der Atmosphäre abgekoppelt. Die UTL-1 registrieren fortan die Antwort des Untergrundes (**Antwortphase**) auf das vorher angelegte Signal. Konkret erfolgt im Active Layer ein thermischer Ausgleich: Bei einem positiven Nettoenergieeintrag während der Signalphase fließt Wärmeenergie von der Bodenoberfläche zum Permafrostkörper und kann diesen an dessen Oberfläche antauen. Voraussetzung zur Messung dieser Reaktion ist, dass die Bodenoberfläche während einer genügend langen Zeit ausreichend gegen die Signale aus der Atmosphäre isoliert bleibt, ehe die Schneeschmelze (Beginn des Zero-Curtains) einsetzt. Kurz vor Beginn der Schneeschmelze ist der thermische Ausgleich im Untergrund bereits

weit fortgeschritten und die UTL-1 registrieren so näherungsweise die Temperatur an der Permafrostoberfläche. Dieses semi-quantitative Antwortsignal auf die atmosphärischen Einflüsse der vorhergehenden Signalphase wird auch Winter Equilibrium Temperature **WEQT** genannt.

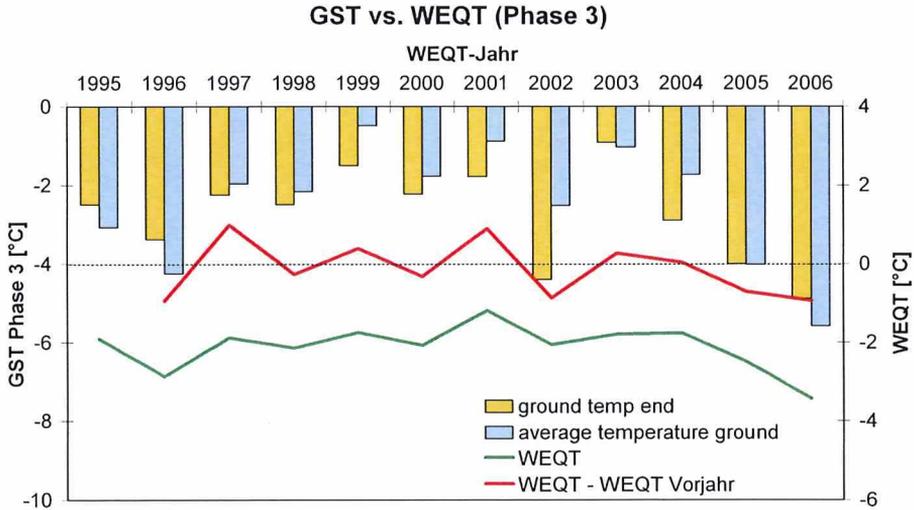


Abbildung 62: zeigt den Zusammenhang zwischen der mittleren Bodenoberflächentemperatur im Frühwinter und der winterlichen Gleichgewichtstemperatur (die x-Achse ist nach der darauf folgenden WEQT benannt). Obwohl hier lediglich ein Temperaturmittel über die kurze nur leicht schneebedeckte Phase im Frühwinter (Phase 3) oder sogar nur ein einzelnes Tagesmittel (letztes Tagesmittel vor dem Einwintern) betrachtet wird, widerspiegelt sich in diesen Daten die Tendenz des frühwinterlichen Witterungsverlaufs: 1999, 2001 und 2003 schneite es direkt auf warmen Boden und die WEQT im folgende Winter lag relativ hoch. In den Jahren 2002, 2005 sowie 2006 konnte der Boden effizient auskühlen.

Insgesamt fällt auf, dass die WEQT sehr sensitiv auf die vorhergehenden Signalphasen reagiert und somit über die gesamte Messperiode beträchtlich schwanken kann (vgl. Abbildung 64). Dies ist für einzelne Standorte in schneearmen Wintern auf eine unzureichende Isolation der Bodenoberfläche zurück zu führen, weist jedoch auch auf ein eher geringmächtiges Eisvolumen hin: Enthielte der Blockgletscher sehr viel Poreneis, so würde dessen grosse Wärmekapazität die WEQT stärker ausgleichen.

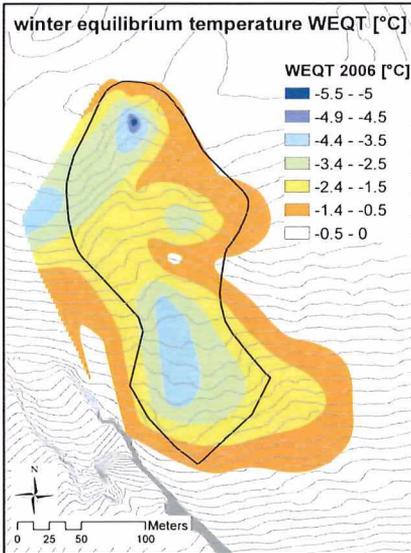


Abbildung 63: WEQT im Frühjahr 2006 als IDW-Flächeninterpolation der UTL-Punktdaten. Eine WEQT unter $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ weist auf Permafrost hin, Temperaturen über $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind nicht zwingend an Permafrost gebunden. Im Spätwinter 2005 wurden fast überall auf dem Blockgletscher sehr tiefe Werte gemessen, die auf Permafrost hinweisen.

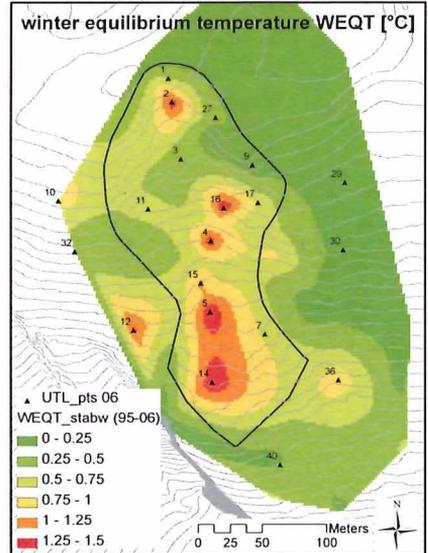


Abbildung 64: Überblick über die Loggerstandorte und deren Standardabweichung der WEQT. Speziell zu beachten ist Standort Nr. 3: Obwohl dies die längste Messreihe ist, zeigt die WEQT hier aufgrund günstiger Isolationsverhältnisse im Spätwinter (Muldenlage) nur kleinere Abweichungen der WEQT.

Speziell mit der Erwärmung der Atmosphäre und Verschiebungstendenzen in den Jahreszeiten bleibt die Beobachtung der Bodenoberflächentemperaturen weiterhin sehr interessant. Eine besonders wichtige Rolle im Energieaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und der Auftauschicht spielt die saisonale Dynamik der Schneedecke: Verschieben sich die Schneefälle tendenziell weiter in den Spätwinter, so bleibt der Blockgletscheroberfläche mehr Gelegenheit zur Abstrahlung zwischengespeicherter Wärmeenergie. Somit könnten permafrostgünstige Witterungsverhältnisse im Frühwinter auch besonders warme Sommer kompensieren und das Abschmelzen des Permafrost trotz der stark erwärmten Umgebung beachtlich verzögern. Zusätzlich unterstützt wird diese „Selbsterhaltung des Poreneises“ durch die Beschaffenheit des grobblockigen Lockermaterials und durch die Hanglage: Einerseits ist die Luftzirkulation und damit der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zwischen den grossen Gesteinskomponenten im Frühwinter sehr viel effektiver als im Hochsommer. Andererseits braucht das Anschmelzen von Poreneis sehr viel Energie, die dem Active Layer und dem Permafrostkörper entzogen wird. Diese Er-

starrungswärme würde beim Gefrieren wieder in Form von Wärme an das Umgebungsmedium abgegeben. Da in Hanglagen jedoch Schmelzwasser abfließt, entgeht dem System auch dann sehr viel latente Wärme, wenn der Nettoenergiefluss während der Signalphase zum Permafrost hin gerichtet ist.

4 Diskussion

4.1 Markante Veränderungen in kurzem Zeitraum

Mit den immer länger werdenden Messreihen und der zunehmenden Fülle an Untersuchungen hat sich das Bild verdeutlicht, dass die Blockgletscher im Furggentäli raschen Veränderungen unterliegen. Markantestes Merkmal dafür ist die beobachtete, für aktive Blockgletscher aussergewöhnliche Prozessdynamik:

- Unüblich hohe Kriechgeschwindigkeiten, welche im Beobachtungszeitraum stark zugenommen haben.
- Die Aktivität folgt eng der klimatischen Entwicklung und zeigt starke saisonale Schwankungen.
- Partielle Inaktivierung von Randbereichen, welche beim grössten Blockgletscher beobachtet wurde.

Diese Entwicklungen manifestieren sich deutlich in der Form des grössten Blockgletschers:

- flache Front
- Scherzonen mit tiefen Gräben und Rinnen in den Randbereichen des Blockgletschers
- Vorschub an der Stirn des Blockgletschers
- Absenkung der Oberfläche im Bereich direkt hinter der Stirn

Während der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums in den 90er-Jahren existierten nur wenige Daten zur Aktivität von anderen Blockgletschern im Alpenraum. Die mangelnden Vergleichsmöglichkeiten erschwerten die Interpretation der bereits damals im Furggentäli festgestellten Veränderungen, welche bei anderen bis dato untersuchten, klimatisch oft günstiger gelegenen Blockgletschern (noch) nicht aufgetreten waren. Gleichzeitig waren auch das Grundlagenwissen und das Prozessverständnis noch weniger weit entwickelt.

Dies hat sich in der zweiten Hälfte des Beobachtungszeitraums geändert. Gerade in jüngster Zeit haben sich die Forschungsergebnisse zur Aktivität von Blockgletschern im Alpenraum und aus anderen Teilen der Welt vervielfacht, ebenso die Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung im Labor.

Neuere Beobachtungen bei anderen Blockgletschern im Alpenraum (Ikeda et al, 2003; Roer, 2005; Krainer/Mostler, 2006; Käab et al, 2007; Delaloye et al, 2008; Ikeda et al, 2008) bestätigen eine generelle Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeiten und teilweise der Prozessdynamik, was letztlich die Konsequenz des immer wärmeren Klimas der letzten Jahrzehnte darstellt.

Dieser generelle Trend zur Erwärmung bewirkt, dass die Blockgletscher im Furggentäli sich rasch in Richtung klimatischer Inaktivierung bewegen. Die bereits fest-

gestellten Veränderungen bestätigen diese Entwicklung, und bestätigen die klimatische Grenzlage des Standorts der periglazialen Formen.

Dank den Messdaten zu Klima und Prozessdynamik sind detaillierte Betrachtungen möglich, welche verfeinerte Erklärungen für die beobachtete Entwicklung der Blockgletscher bieten.

4.2 Hohe Bewegungsgeschwindigkeit und Prozessdynamik als Konsequenz von warmen Eistemperaturen

Als zentrale Steuergrösse der Prozessdynamik und damit für die Entwicklung der Blockgletscher hat sich im Verlauf der Untersuchungen die Temperatur des Poreneises herauskristallisiert (Mihajlovic et al, 2003). Diese bestimmt den Wassergehalt des Eises, welcher wiederum dessen Plastizität beeinflusst (Arenson, 2002; Ikeda et al, 2008).

Die Temperatur des eishaltigen Permafrost der Blockgletscher wurde zwar bisher mangels Bohrung nicht direkt gemessen, diese kann aber während des Hochwinters aus den Bodenoberflächentemperaturen abgeleitet werden.

Anhand der langen Messreihe zu den Bodenoberflächentemperaturen konnte festgestellt werden, dass die Eistemperaturen im Permafrost der Blockgletscher vergleichsweise sehr warm sind. Die Wintergleichgewichtstemperaturen liegen im Bereich von -1.5 bis -3.5°C (UTL Logger Nr. 3, vgl. Abbildung 19). Zudem wurde beobachtet, dass die Eistemperaturen ohne grosse Verzögerung auf den Verlauf der Witterung reagieren (vgl. Kapitel 3.5).

Seit Beginn der BOT-Messreihe 1994 wurden insgesamt nur drei Jahre registriert, in denen im Vergleich mit dem Vorjahr der Wetterverlauf zu einer signifikanten Abkühlung der Eistemperaturen führte. Umgekehrt bedeutet das, dass das lokale Klima während den anderen 11 Jahren des Beobachtungszeitraums (1994 - 2008) vermutlich wärmer war, als langfristig für die Erhaltung des Permafrost erforderlich ist.

Neben deutlich kühleren Jahren gab es im Beobachtungszeitraum auch besonders warme Jahre, wie die Rekordjahre 2003 und 2005. Obwohl die Luft- und Bodenoberflächentemperaturen in diesen Jahren deutlich höher waren als in den anderen warmen Jahren, führte die starke Erwärmung nicht zu einem signifikanten Anstieg der Wintergleichgewichtstemperaturen sondern zu ähnlichen Werten im Bereich von -1.5 bis -1.8°C (UTL Logger Nr. 3) wie in den andern Jahren.

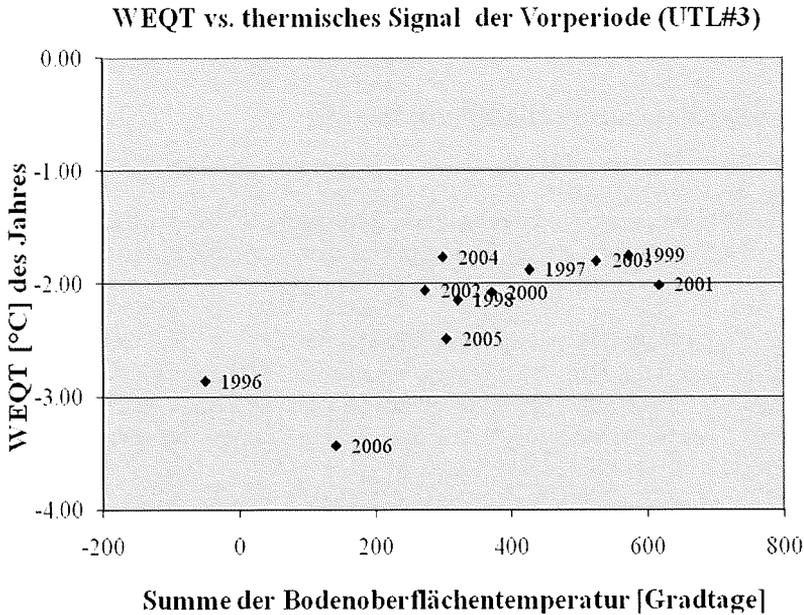


Abbildung 65: Wirkung des Poreneises als Temperaturpuffer bei der Erwärmung des Permafrosts im Furggentälti-Blockgletscher. Die Darstellung zeigt die beobachtete Wintergleichgewichtstemperatur WEQT (UTL Logger Nr. 3) von 1995 – 2006, im Vergleich mit der aufsummierten Bodenoberflächentemperatur der jeweils vorangegangenen Signalphase (Ende Zero Curtain bis zur thermischen Isolation durch eine mächtige Schneedecke, vgl. Kapitel 3.7). Während eine Halbierung des Temperatursignals von 300 Gradtagen auf 150 Gradtage ein markantes Absinken der WEQT bewirkt, führt eine Verdoppelung auf 600 Gradtage nicht zu einem entsprechenden Anstieg, was auf ein Abschmelzen von Poreneis im Blockgletscher hinweist (Mihajlovic et al, 2008).

Diese festgestellte „Begrenzung“ der Wintergleichgewichtstemperatur nach oben deutet darauf hin, dass der Wärmeüberschuss in den zu warmen Jahren durch das Abschmelzen von Poreneis kompensiert wurde, wobei die Energie mit dem abfließenden Schmelzwasser abgeführt wird. Dieser Eisverlust konnte in der photogrammetrischen Bilanzierung des Blockgletschervolumens aus Gründen der Messgenauigkeit noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Dafür zeichnen sich die Veränderungen im Eisgehalt im Aktivitätsmuster ab: die partielle Inaktivierung der Randbereiche des grössten der untersuchten Blockgletscher sind ein Beleg dafür, dass seit Beginn der Beobachtungen Eis verloren gegangen ist.

Die generell warmen Eistemperaturen liefern einen plausiblen Erklärungsansatz für die vergleichsweise hohen festgestellten Kriechgeschwindigkeiten. Diese sind die

Folge der erhöhten internen Deformation des Blockgletschermaterials aufgrund der erhöhten Plastizität des Poreneises, denn der Wassergehalt des Eises und die Plastizität nehmen zwischen -2.5°C und 0°C überproportional zu (Arenson, 2002).

4.3 Andere Faktoren und Mechanismen

Für die aussergewöhnliche Prozessdynamik lassen sich auch andere plausible Erklärungsansätze als rein klimatische Faktoren finden. So könnten sowohl die hohe Aktivität wie auch deren grosse Schwankungen zumindest teilweise durch spezielle örtliche Gegebenheiten oder durch die interne Struktur des Blockgletschers erklärt werden.

Destabilisierung des Blockgletschers oder Teilen davon

Die sehr hohe Oberflächengeschwindigkeit von bis zu 4 Metern pro Jahr, welche beim grössten der untersuchten Blockgletscher beobachtet wurde, könnte auch das Resultat einer Destabilisierung des Active Layers, des Blockgletschermaterials oder von Teilbereichen davon sein.

Die grossen Bewegungen würden dabei nicht einzig das Resultat einer internen Deformation darstellen, welche gleichmässig durch das ganze Profil des eishaltigen Blockgletschermaterials verteilt erfolgt, sondern könnten entlang einer oder mehrerer klar definierten Scherzonen erfolgen, wie dies beim Kriechen von kalten Gletschern in nördlichen Breiten typischerweise der Fall ist.

Beim grössten Blockgletscher im Furggentälti bietet sich besonders der Kontakt zum permafrostfreien Untergrund als Scherzone an: der Blockgletscher überfährt seit mehreren Jahrzehnten Oberflächenmaterial, welches am Hang östlich davon als permafrostfreies, feinkörniges und oft wassergesättigtes Lockermaterial in Erscheinung tritt und zur Bildung von Frostschuttloben und Solifluktioniszungen neigt. Dieses Material eignet sich als Gleithorizont, sobald genügend Wasser vorhanden ist.

Die Quelle, welche während der Warmphase bis in den Herbst im westlichen Bereich der Stirn auftritt, liefert einen Hinweis auf eine wasserundurchlässige Schicht, zumindest unter dem Stirnbereich des Blockgletschers.

Die Stauchwülste an der Stirn des Blockgletschers, in denen der Bodenhorizont des Vorfeldes inklusive Vegetation zusammengeschoben wird, weisen darauf hin, dass die Vorwärtsbewegung zumindest in diesem Bereich nicht mehr durch ein förderbandartiges Vorschütten von Material des Active Layers erfolgt, sondern durch eine Gleitbewegung.

Dieser Mechanismus könnte auch die ausgeprägte Saisonalität der Vorwärtsbewegung des Blockgletschers erklären. Das sprunghafte Ansteigen der Kriechgeschwindigkeit unmittelbar nach der Durchnässung der Schneedecke (vgl. Kapitel 3.5) weist zwar eindeutig auf Wasser als Ursache hin, lässt sich aber ebenso wie die hohen Bewegungsgeschwindigkeiten mit beiden Ansätzen erklären:

- Durch das sprunghafte Ansteigen der Temperatur von Active Layer und Permafrost durch einsickerndes Schmelzwasser und den Anstieg des Wassergehalts im Eis.
- Durch das Einstellen einer Übersättigungssituation in einer Scherzone, welche den Blockgletscher oder Teile davon schneller kriechen lässt.

Erhöhter Energieinput durch internes Forcing und Prozess-Rückkoppelung

Alternative Erklärungsmöglichkeiten für die festgestellte Beschleunigung der Prozesse bieten sich auch beim Faktor Strahlung an (vgl. Kapitel 3.6):

- Anhand von Strahlungsmodellierungen konnte gezeigt werden, dass durch die zunehmende Ausdehnung der immer schneller kriechenden Blockgletscher die Summe der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung stetig zunimmt.
- Zudem steigt die potentielle Einstrahlung auf der Blockgletscheroberfläche auch dadurch an, dass sich der Blockgletscher immer weiter aus dem Schattenbereich der Plattenhörner in flacheres Gelände ausdehnt.

Diese beiden Effekte haben zusammen seit 1960 zu einem Anstieg der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung um fast 10% geführt.

Diese alternativen Erklärungsmöglichkeiten greifen allerdings zu kurz, sobald es um die Begründung der zeitgleichen Beschleunigung aller untersuchten Blockgletscher im Furggentäli geht, da diese bezüglich Fließrichtung und Schattenwurf des umliegenden Geländes gänzlich andere Dispositionen aufweisen (vgl. Kapitel 3.5 und 3.6). Diese zeitgleiche Entwicklung kann nur durch die klimatische Entwicklung im Untersuchungsgebiet erklärt werden.

4.4 Auswirkungen des Klimawandels

Die im Beobachtungszeitraum festgestellten Auswirkungen auf den Permafrost im Untersuchungsgebiet zeigen, wie sensitiv dieser an der klimatischen Grenzlage auf die Veränderungen reagiert. Dabei spielt die Schneedecke eine zentrale Rolle: im Verlauf der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der beobachtete Trend zu Schneearmut tendenziell zu einem Abbau von Permafrost führt, da der Wirkung der Schneedecke als Strahlungsschutz im Frühsommer hier eine besondere Wichtigkeit zukommt (vgl. Kapitel 3.2).

Die vereinzelt, permafrostgünstigen Jahre im Beobachtungszeitraum zeigen auf, wie das Klima im Untersuchungsgebiet sein müsste, damit sich ein langfristiger Erhalt oder sogar ein Aufbau von Permafrost einstellen würde. Sie zeigen auch, dass Jahre mit einem günstigen Witterungsverlauf, der zu einem Abkühlen der Eistemperaturen führt, heute noch möglich sind, deren Häufigkeit im derzeitigen lokalen Klima des Untersuchungsgebietes jedoch zu gering ist.

Anstieg der Temperaturen

Die globale Erwärmungstendenz zeichnet sich in der 20-jährigen Messreihe zur Boden- und Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet mit einem Trend von $+1.4^{\circ}\text{C}$ auf 20 Jahre besonders stark bei der Lufttemperatur ab. Der Anstieg der Temperatur in den obersten Bodenschichten nimmt mit der Tiefe ab.

Die Messergebnisse aus dem Furggentälti zeigen eine sehr schöne Parallelität zu den Messungen von Rolf Philipona, die für den Standort Davos eine Zunahme der Boden- und Lufttemperaturen in den letzten 25 Jahren von 1.3°C ergeben.

Sollte sich der Trend bei der Lufttemperatur in den nächsten Jahrzehnten ungebrems fortsetzen, so würde die durchschnittliche Lufttemperatur MAAT im Untersuchungsgebiet in 100 Jahren im Bereich von $5-7^{\circ}\text{C}$ (!) liegen, was dem Permafrost und den periglazialen Formen im Furggentälti ein rasches Ende bereiten dürfte.

Ein Faktor, der in den bisherigen Untersuchungen kaum berücksichtigt wurde, sind die flüssigen Niederschläge während des Sommerhalbjahres. Permafrost und periglaziale Formen sind Phänomene des kalten Trockenklimas, und reagieren sehr sensitiv auf Veränderungen der Niederschlagsmenge. Wegen der Schwierigkeit der Niederschlagsmessung im Gebirge wurde bisher auf deren Erfassung verzichtet. Mit den neu auf den Markt kommenden akustischen Niederschlagssensoren kann diese Messgrösse im Hochgebirge in Zukunft zuverlässiger erfasst werden.

Zukünftige Entwicklung der Blockgletscher

Das direkte Nebeneinander von aktiven und inaktiven Blockgletschern und von Frostschuttloben am gleichen Hang im Untersuchungsgebiet bedeutet, dass die Entwicklung der periglazialen Prozesse und Formen an der klimatischen Grenzlage generell dynamischer erfolgt als in deutlich kälteren Lagen. Die im Beobachtungszeitraum festgestellten Veränderungen zeigen, dass die Entwicklung der Formen sehr rasch erfolgt, sobald die Eistemperaturen nur noch wenige Grade unter Null liegen.

Für ein Fortbestehen der aktiven Blockgletscher müsste ausser einem günstigen Klima, das den Erhalt des vorhandenen Poreneises ermöglicht, auch die Versorgung mit neuem Blockgletschermaterial garantiert sein. Dazu müsste die Sturzaktivität aus der Nordwand der Plattenhörner deutlich zunehmen, um den immer rascheren Abtransport des Materials zu kompensieren. Zudem sollte im Ablagerungsraum des Block- und Steinschlags Schnee liegen, der unter den Sturzmassen begraben werden kann. Das Absinken der Oberfläche im oberen Bereich des Blockgletschers (vgl. Kapitel 3.5) deutet darauf hin, dass dieser Nachschub seit einigen Jahrzehnten nicht mehr im Gleichgewicht ist mit der Massenverlagerung durch den Blockgletscher, so dass dem Blockgletscher in einigen Jahrzehnten das Material ausgehen dürfte.

Nur das Einschliessen von grossen Schneefeldern in die Ablagerungen von mächtigen Sturzereignissen könnte also den Blockgletscher über die nächsten Jahrzehnte erhalten.

Veränderte Wahrnehmung der Problematik Permafrost

Im Verlauf der letzten 20 Jahre hat sich mit der Zunahme der Forschungsintensität auch die Wahrnehmung von Permafrost und periglazialen Phänomenen verändert.

Während das unterschiedliche Verhalten von „trockenem“ Permafrost und eishaltigem Permafrost schon lange bekannt war, hat sich die Unterscheidung in warmen und kalten Permafrost erst in den letzten Jahren durchgesetzt. Die Differenzierung der Thematik in diese Unterkategorien folgt dabei dem zunehmenden Wissen über die Verbreitung und die Entwicklung von Permafrost im wärmer werdenden Klima. Permafrost, definiert über die Temperatur des Phasenübergangs von Wasser zu Eis, kann sich je nach Art und Ort des Vorkommens bei sich verändernden Umgebungsbedingungen unterschiedlich entwickeln. Ein Beispiel dafür ist die Schneearmut, welche sich während der Beobachtungsperiode im Furggentäli zunehmend manifestiert hat: während Permafrost in Höhenlagen mit einer $MAAT \ll 0^{\circ}\text{C}$ davon profitiert (bessere Auskühlung), kann die Schneearmut an der Untergrenze des Permafrosts zur Erwärmung beitragen.

5 Ausblick

Dank der Messungen und Untersuchungen der vergangenen 20 Jahre konnten zahlreiche Fragestellungen zur Permafrostverteilung, zum Einfluss der Strahlung und der Schneedecke auf den Permafrost, zur Bewegungsdynamik des Blockgletschers wie auch der Solifluktionszunge und zu vielen weiteren Phänomene und Prozesse beantwortet werden.

Noch fehlen wichtige Angaben zum inneren Aufbau des Blockgletschers und viele Prozesse sind noch nicht abschliessend verstanden. Zukünftige Forschungsaktivitäten können sich u. a. den folgenden Fragen widmen:

- Wo und wie gross ist der Eisgehalt im Blockgletscher?
- Welchen Volumenveränderungen ist der Blockgletscher in Raum und Zeit unterworfen?
- Gibt es einen Scherhorizont innerhalb der Blockgletschermasse, oder bewegt sich das gesamte Schuttmaterial auf dem Felsuntergrund?
- Wie entstand die Mulde im Zungenbereich, und welche Faktoren beeinflussen ihre Vergrösserung?
- Welchen Einfluss hat eine erhöhte Wärmezufuhr auf die Entwicklung der Bewegungsgeschwindigkeiten und -formen?
- Könnte der Blockgletscher mit geeigneten Methoden partiell vor der Strahlung und dem Wärmeeintrag geschützt werden, um Unterschiede in der weiteren Entwicklung feststellen zu können?
- Wie entwickelt sich die Schuttlieferung aus der Nordwand der Plattenhörner?

Zur Beantwortung dieser Fragen, sind weitere Messungen und Untersuchungen nötig.

Um Fragen der langfristigen Entwicklung zu beantworten, müssen die Messreihen aller Parameter unbedingt weitergeführt und nach Möglichkeit ausgebaut werden. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in einer für Permafrost kritischen Höhenlage. Dadurch besteht die Möglichkeit, dort allfällige Entwicklungstendenzen anderer Permafrostgebiete in grösserer Höhenlage im Zuge der Klimaerwärmung zu beobachten und Analogieschlüsse zu ziehen. Vermutlich kann im Verlauf der nächsten Dekaden das Kollabieren der Blockgletscher im Furggentäli dokumentiert werden, wodurch Schlussfolgerungen für die Entwicklung ähnlicher Phänomene in anderen Teilen der Schweiz möglich werden.

Fragen des Kollabierens bzw. des „Inaktiv-werdens“ oder Weiterbestehens sind unter anderem abhängig vom Eisgehalt und dessen dämpfender Wirkung auf Temperaturschwankungen. Um mehr Informationen über den Blockgletscheraufbau, die interne Temperaturverteilung und über die interne Bewegungsdynamik zu erhalten, sollte, wie an andern Standorten bereits ausgeführt, ebenfalls ein Bohrloch abgeteuft und instrumentiert werden. In Anbetracht der teils erheblichen Bewegungsgeschwindigkeiten ist der Standort sorgfältig auszuwählen, damit das Bohrloch nicht bereits im ersten Jahr abgesichert wird und dadurch keine Messdaten generiert werden können. Neue Methoden der Inklinometrie (*Time Domain Reflectometry (TDR) mit Koaxialkabel*) könnten dabei erstmals auf einem Blockgletscher angewendet werden.

Die Messreihen im Untersuchungsgebiet zeigen exemplarisch, wie wichtig es ist, ununterbrochene, langfristige Messreihen zu erhalten. Personelle Wechsel, die Entwicklungen in der Messtechnik und die Schwierigkeit der langfristigen Archivierung von digitalen Daten stellen dabei dauernde Herausforderungen bei allen Projekten speziell im Hochgebirge dar.

Auch in Zukunft soll das Furggentäli ein Testgebiet für Studierende sein um Felderfahrungen zu sammeln, Methoden kennen zu lernen und nicht zu letzt um neue Ideen auszuprobieren. Der Förderverein Pro-Gemmi wird Forschungsarbeiten und den Unterhalt der Anlagen im bescheidenen Rahmen unterstützen und Impulse für weitere Aktivitäten geben.

Literatur

AFFENTRANGER, R. (2001): Einsatz des Sonnenkompasses zur örtlichen Abschätzung des Vorkommens von Permafrost, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

ALIESCH, B. (1990): Untersuchungsgebiet Furggentäli: Eine automatische Temperaturstation. Vorschlag für ein geodätisches Vermessungsnetz, Unveröffentlichte Seminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

ARENSON, L.U. (2002): Unstable alpine permafrost: a potentially important natural hazard - variations of geotechnical behaviour with time and temperature. Doctoral Thesis No. 14801, Institute for Geotechnical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

ARENSON, L. U. (2004): Permafrost: proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland

BAULIG, H. (1956): Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie. Publications de la Faculté des lettres de l'Université de Strasbourg. Paris.

BLANK, B. (1997): Prozessmonitoring im Furggentäli, Gemmi, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

BUMANN, D.: Untersuchung der Permafrostverbreitung in den (Hoch)alpen mit Hilfe des Sonnenkompasses. Diplomarbeit

CATILLAZ, A.; REIST, M. (2007): Stauch-, Dehn- und Scherprozesse am Beispiel des Blockgletschers im Furggentäli, Unveröffentlichte Seminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

CHUCK, A.; LEIBUNDGUT, Ph. (2008): Analyse der Bewegungsdynamik des Blockgletschers im Furggentäli, Photogrammetrische Auswertung und Rasterverarbeitung in Arc GIS. Unveröffentlichte Proseminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

DAETWYLER, M., TSCHANZ, B. (1994): Horizontvermessung zur Berechnung der Strahlung; Ein Beitrag zur Untersuchung der Permafrostvorkommen im Furggentäli (Gemmigebiet). Unveröffentlichte Vordiplomarbeit. Geografisches Institut der Universität Bern, Bern

DELALOYE, R.; PERRUCHOUD, E.; AVIAN, M.; KAUFMANN, V.; BODIN, X.; HAUSMANN, H.; IKEDA, A.; KÄÄB, A.; KELLERER-PRIKLBAUER, A.; KRAINER, K.; LAMBIEL, C.; MIHAJLOVIC, D.; STAUB, B.; ROER, I.;

THIBERT, E. (2008): Recent Interannual Variations of Rock Glacier Creep in the European Alps. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008, Fairbanks, Alaska, USA,

von DESCHWANDEN, P. (1995): Alpine Vegetation in Abhängigkeit von Sonneneinstrahlung, Neigung und Höhe über Meer, am Beispiel Furggentälti (Gemmipass). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Bern, Bern.

DOEBELI, Ch. (2000): Das hochalpine Geoökosystem der Gemmi (Walliser Alpen). Eine landschaftsökologische Charakterisierung und der Vergleich mit der arktischen Landschaft (Ljefdefjorden, Nordwest-Spitzbergen). Physiogeographica, Basel.

EGGENBERG, S.; ZIMMERMANN, K. (1989): Fraktalstufen – Vergleich zwischen Vegetation und Geomorphologie am Beispiel des Gemmipasses. – Diplomarbeit des Geobotanischen Institutes der Universität Bern.

EGGENBERGER, S. (1988): Beiträge zur Geomorphologie des Gemmipasses. Unveröffentlichte Hausarbeit. Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

FREUND, R. (1972): Vergleichende Betrachtung von Kleinformen der Solifluktion im Raume Mittelbünden (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am Kilimandjaro. Dissertation, Universität Zürich, Zürich.

FURRER, H. (1962): Erläuterungen zum Geologischen Atlas der Schweiz, Blatt 32 „Gemmi“, Schweiz. Geologische Kommission, Bern.

GAMPER, M. (1981): Heutige Solifluktionsbeträge von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden. Geografisches Institut der Universität Zürich. Zürich.

GFELLER, U. E. (1989): Stratigraphische Untersuchungen der Doldenhorn- und der Gellihorn-Decke im Gemmipass-Gebiet. Lizentiatsarbeit, Geologisches Institut der Universität Bern, Bern.

HOELZLE, M. (1994): Permafrost und Gletscher im Oberengadin: Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. Dissertation, Mitteilungen VAW/ETH, Zürich.

IKEDA, A.; MATSUOKA, N.; KÄÄB, A. (2003): A rapidly moving small rock glacier at the lower limit of the mountain permafrost belt in the Swiss Alps. Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost 1: 455-460. Zürich, Switzerland.

IKEDA, A.; MATSUOKA, N.; KÄÄB, A. (2008): Fast deformation of perennially frozen debris in a warm rock glacier in the Swiss Alps: An effect of liquid water. *Journal of Geophysical Research*. 113, F01021

IMHOF, M. (1992): Permafrostkartierung am Blockgletscher im Furggentäli (Gemmi, VS). Unveröffentlichte Seminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

IMHOF, M. (1994): Die Verbreitung von Permafrost in den Berner Alpen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

IMHOF, M. (1999): «Ausaperung» (Snowmelt Evolution) – a new Parameter for the Simulation of Alpine Permafrost Distribution. – In: Beiträge zur Modellierung der Permafrostverbreitung in den Berner Alpen. Dissertation des Geographischen Institutes der Universität Bern, Bern.

INAUEN, C. (in Arbeit): Geoelektrische Messungen am Blockgletscher im Furggentäli. Unveröffentlichte Seminararbeit. Geografisches Institut der Universität Bern. Bern.

JOERGER, L., RIEDI, C. (in Arbeit): Terrestrische Vermessung eines Blockgletschers im Furggentäli. Unveröffentlichte Seminararbeit. Geografisches Institut der Universität Bern. Bern.

JEANNERET, F. (2006): Exkursion Gemmipass, Saumpfad zwischen Nord- und Zentralalpen. *Geographica Bernensia*, Bern.

KÄÄB, A.; FRAUENFELDER, R.; ROER, I. (2007): On the response of rock-glacier creep to surface temperature increases. *Global and Planetary Change*. 56(1-2), 172-187.

KELLER, F. (1994): Interaktion zwischen Schnee und Permafrost, eine Grundlagenstudie im Oberengadin. Mitteilung VAW Nr. 127, ETH Zürich.

KRAINER, K.; MOSTLER, W. (2006): Flow velocities of active rock glaciers, Austrian Alps. *Geografiska Annaler* 88A: 1-14.

KRUMMENACHER, B., KIENHOLZ, H. & BUDMIGER, K. (1990): Geomorphologische Arbeiten im Gemmigebiet. – Werkstattbericht, Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, Fribourg, 22.-23. Juni 1990, in *Berichte und Forschungen Geographisches Institut Fribourg*, 3; 110-114: Fribourg.

KRUMMENACHER, B. & BUDMIGER, K. (1991): Monitoring of Periglacial Phenomena in the Furggentäli Swiss Alps. – Permafrost and Periglacial Environments in Mountain Areas Workshop Interlaken, 15.-20. September 1991.

KRUMMENACHER, B.; BURDMIGER, K.; MIHAJLOVIC, D.; BLANK, B. (1998). Periglaziale Prozesse und Formen im Furggentälti, Gemmipass. Mitteilungen Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.

KÜNG, P. (1983): Räumliche Modellierung der Schneehöhe in Abhängigkeit von Exposition, Höhenlage und Zeit (Raum Berner Oberland). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

KUNZ, I. (2000): Die räumliche und zeitliche Variabilität der Schneehöhe im periglazialen Untersuchungsgebiet Furggentälti /Gemmipass (VS), Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

KOELBING, D. (2001): Saisonale Bewegungen des Blockgletschers im Furggentälti, Gemmi /VS, Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

LEUENBERGER, A. (1994): Der Einfluss der Globalstrahlung auf Permafrostphänomene: eine Abschätzung mit einem Strahlungsmodell. Unveröffentlichte Seminararbeit. Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

MATHYS, H. (1973) Klimatische Aspekte zu der Frostverwitterung in der Hochgebirgsregion. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.

MIHAJLOVIC, D. (1997): Ausaperungsmonitoring im Furggentälti. Erfassung der Ausaperung mit digitalen Orthofotos. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern.

MIHAJLOVIC, D. (in Arbeit): Blockgletscheraktivität und Klima im Furggentälti, Gemmipass. Dissertation, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

MIHAJLOVIC, D.; KRUMMENACHER, B.; IMHOF, M. (2003): Developing new methods for monitoring periglacial phenomena. Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost 1: 455-460. Zürich, Switzerland.

MIHAJLOVIC, D.; STAUB, B.; NUSSBAUM, A.; KRUMMENACHER, B.; KIENHOLZ, H. (2008): Twenty years of Permafrost research on the Furggentälti rock glaciers, Western Alps, Switzerland. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost 2008, 1209-1214. Fairbanks, Alaska, USA.

MITTAZ, C. (1998); Energiebilanz über alpinem Permafrost. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Geografisches Institut der Universität Zürich. Zürich.

NUSSBAUM, A. (2008): Geophysikalische Untersuchungen am Blockgletscher Furggentäli, Gemmi (VS). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern.

ROER, I.; KÄÄB, A.; DIKAU, R. (2005): Rockglacier acceleration in the Turtmann valley (Swiss Alps): Probable controls. *Norwegian Journal of Geography*. 59, 157–163

SCHWAB, S. (2001): Untersuchungen zur Lokalklimatologie und zur raumzeitlichem Dynamik der Permafrostverteilung im periglazialen Testgebiet Furggentäli (Gemmipass/VS). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

STAUB, B. (2007): Energieaustausch zwischen Boden und Atmosphäre über Permafrost. Unveröffentlichte Seminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

STAUB, B. (2008): Bewegungsdynamik eines Blockgletschers im Furggentäli, Auswertung terrestrischer und photogrammetrischer Vermessungsdaten. Unveröffentlichte Seminararbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

VEIT, H. et al. (1995): Zeitliche und räumliche Variabilität solifluidaler Prozesse und ihre Ursachen. Eine Zwischenbilanz nach acht Jahren Solifluktionmessungen (1985-1993) an der Messstation "Glorer Hütte", Hohe Tauern, Österreich. *Zeitschr. Geomorphologie, Suppl.-Bd.99, sept.1995*, Berlin, Stuttgart

VONLANTHEN, C. (2005): Alpine plant communities: ecology and species richness. Dissertation, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

WASHBURN, A. L. (1979): *Geocryology: a survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold. London.

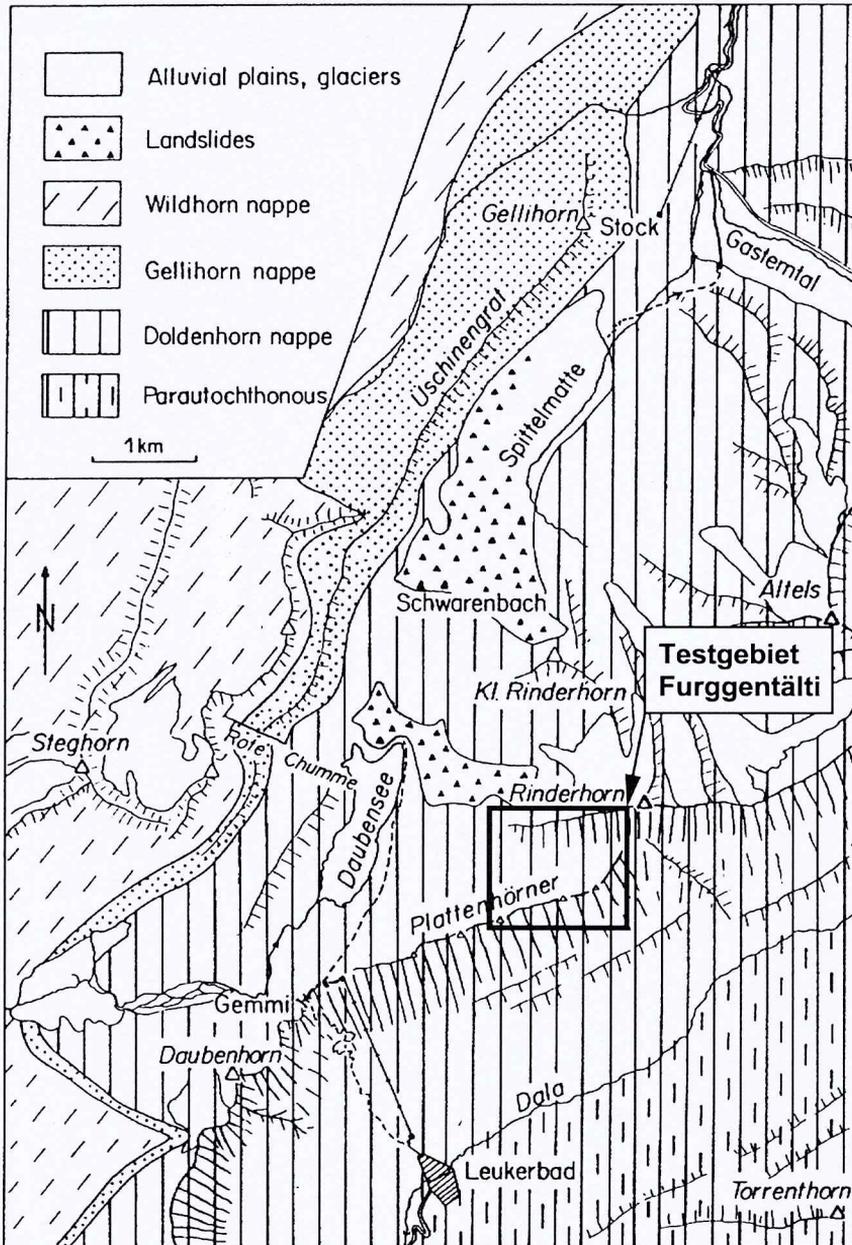
WITMER, U. (1984): Eine Methode zur flächendeckenden Kartierung von Schneehöhen unter Berücksichtigung von reliefbedingten Einflüssen. *Geographica Bernensia*, G21, Bern.

ZEILSTRA, P. (1991): Untersuchungen am oberflächennahen Untergrund mit Hilfe der Gleichstrom-Geoelektrik, unveröffentlichte Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Bern, Bern.

Anhang

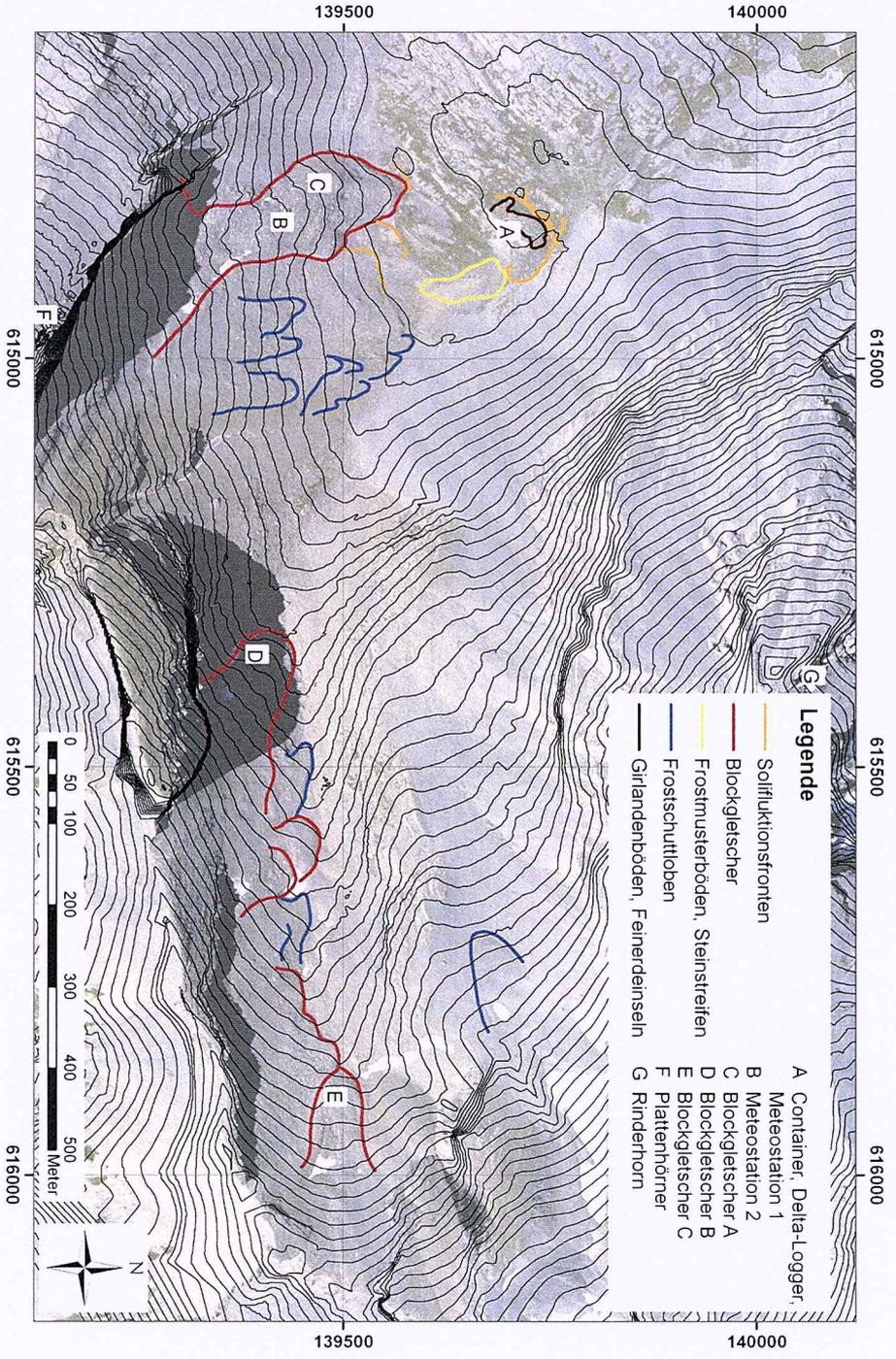
Geologische Karte Gemmi	108
Tektonische Karte Gemmi	109
Übersichtskarte.....	110
Temperaturkurven Deltalogger 1988 - 2008	111
Kriechbewegungen zwischen 1990 und 2005.....	112
Scherbewegung zwischen 1990 und 2005.....	113

Tektonische Karte Gemmi

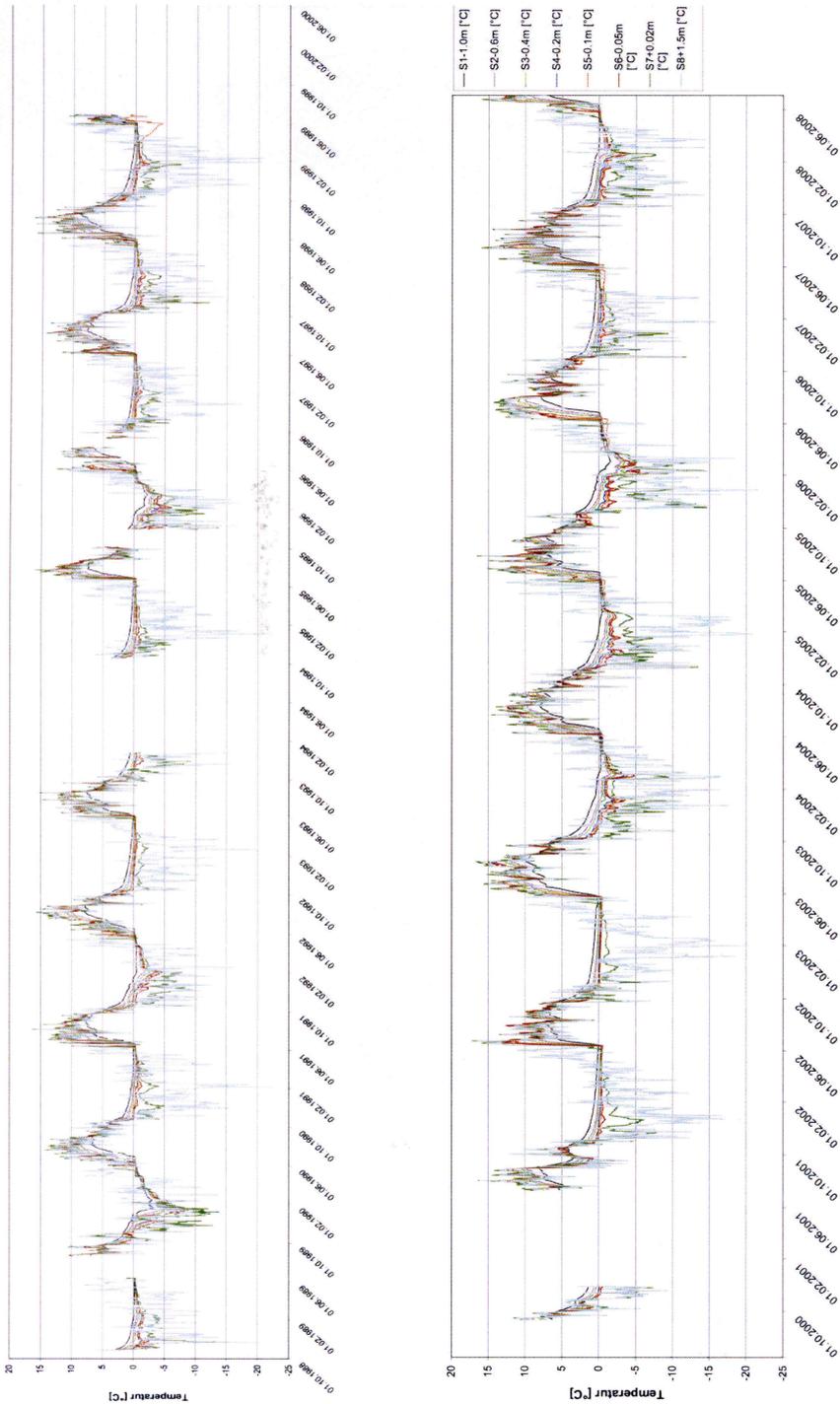


(Krummenacher, 1998)

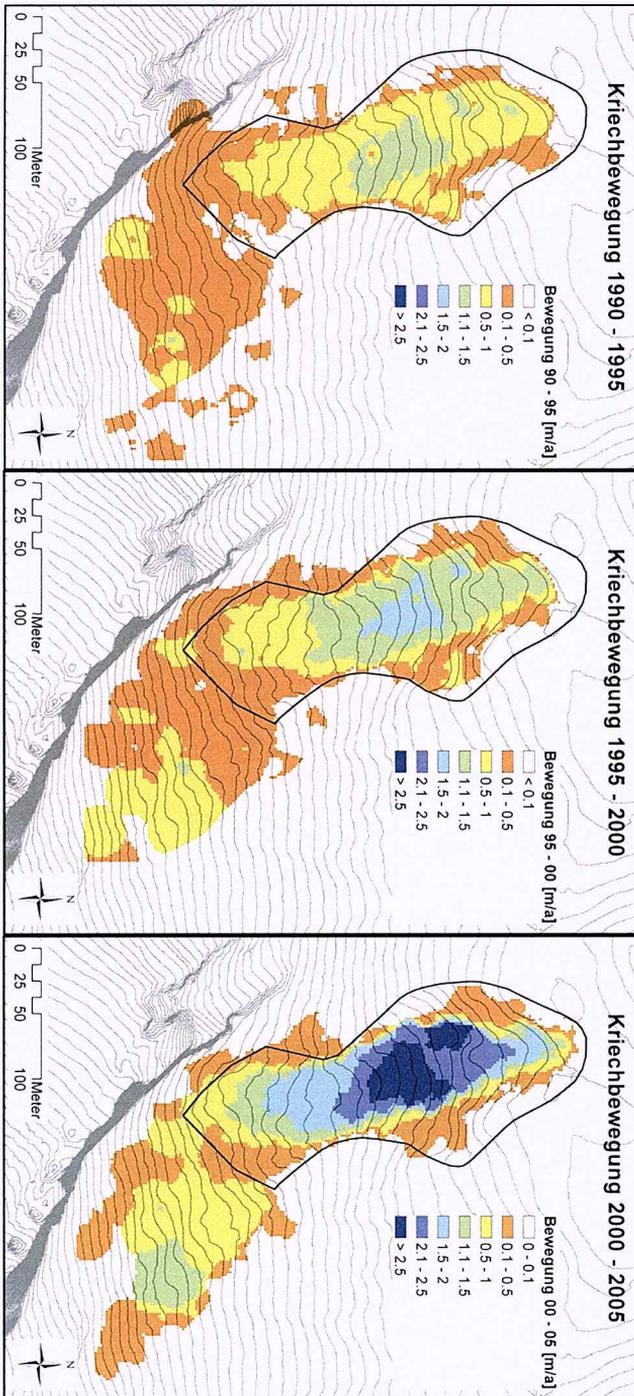
Übersichtskarte



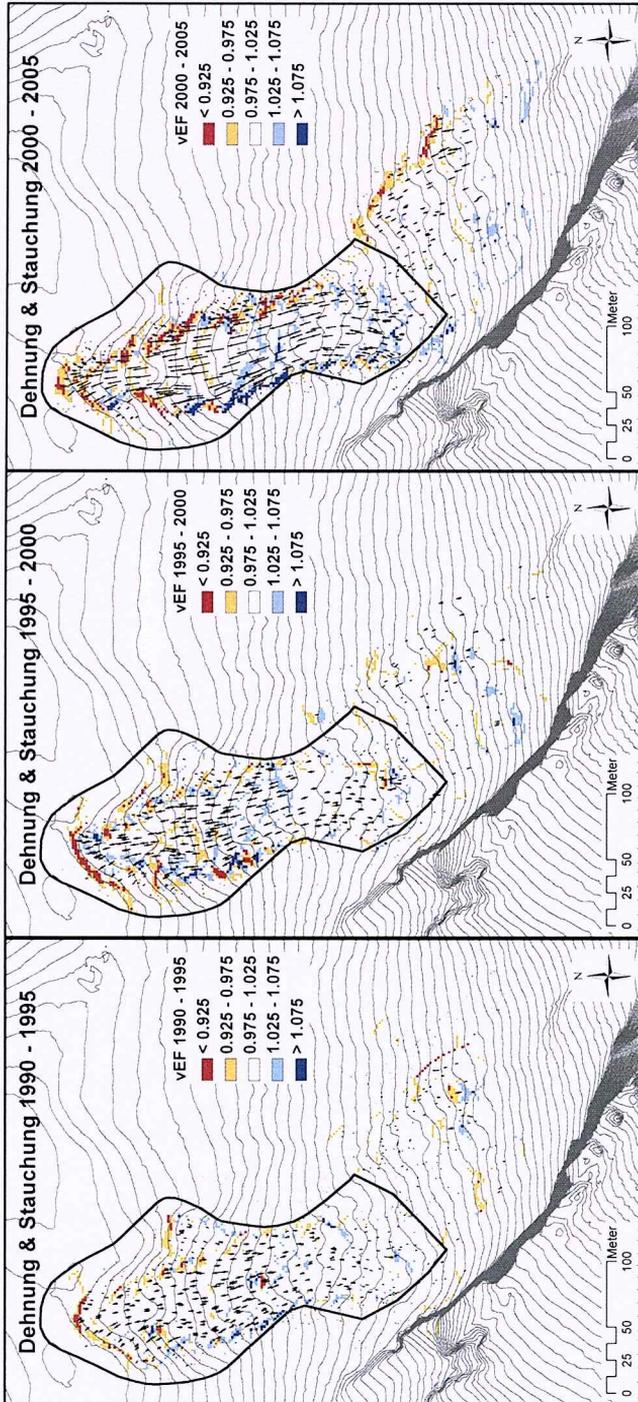
Temperaturkurven Deltalogger 1988 - 2008



Kriechbewegungen zwischen 1990 und 2005



Scherbewegung zwischen 1990 und 2005



Gletscherpfad Lämmeren

Der Erlebnisweg führt Sie vom Gemmipass durch den Lämmerenboden, einer alpinen Auenlandschaft von nationaler Bedeutung, bis hin zum Wildstrubelgletscher. Eine Broschüre versorgt Sie an verschiedenen Stationen mit Informationen zur lokalen Geologie, Landschaftsentstehung, Flora und Fauna. Der Pfad kann auch in zwei Teilen gemacht werden (mit einer Übernachtung in der Lämmerenhütte).

Bezugsquelle: Tourismusbüro Leukerbad und Kandersteg, Lämmernhütte



Geografische Exkursionsführer GEOGRAPHICA BERNENSIA

Exkursion Gemmipass

Saumpfad zwischen Nord- und Zentralalpen

François Jeanneret, 148 Seiten, mit 90 Abbildungen

ISBN 3-906151-94-8 – CHF 24.80

Die Exkursion Gemmipass erschliesst einen Alpenübergang, der eine besondere Einsicht in die Gebirgsgeographie vermittelt: auf seit Urzeiten begangenen Pfaden lassen sich gleichzeitig die Nord- mit den Zentralalpen vergleichen und einmalige Naturphänomene und Kulturdenkmäler entdecken. Als Wanderexkursion für Klassen, Gruppen und Familien stellt sie zwar einige Anforderungen an die Marschtüchtigkeit der Teilnehmerinnen und Teilnehmer, aber es werden lediglich sichere und markierte Wanderwege begangen. Die gute Erschliessung des ehemaligen Saumweges und die modernisierte Transport- und Beherbergungsinfrastruktur garantieren ein alpines Erlebnis in komfortabler Umgebung.

GEOGRAPHICA
BERNENSIA

B 15

Exkursion Gemmipass

Saumpfad zwischen Nord- und Zentralalpen

François Jeanneret



Geographisches Institut der Universität Bern

Exkursion Grimsel und Oberhasli

Natur- und Kraftwerklandschaft im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie

Werner Eugster und Michel Piot, 178 Seiten, mit 81 Abbildungen und 21 Tabellen
ISBN 3-906151-38-7 – CHF 29.80

Der Exkursionsführer für Wissensdurstige.

Hintergrundinformationen zu einer Natur- und Kraftwerklandschaft im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie. Das Kraftwerkprojekt Grimsel-West steht im Zentrum des Interesses. Welche Einflüsse hat ein derartiges Grossprojekt auf die Umwelt im Oberhasli? Welche Rolle spielen die Umweltverträglichkeitsprüfung und die Moorschutzverordnung?

Dieser Führer bietet einer vielseitig interessierten Leserschaft einen vertieften Einblick in die Geografie eines Randgebietes in den Alpen, das dank seines Wasserkraftpotenzials eine grosse Bedeutung im schweizerischen und europäischen Strommarkt besitzt, gleichzeitig aber eine wilde und imposante Hochgebirgslandschaft geblieben ist.

Wege durch die Wasserwelt

Hydrologische Exkursionen durch die Schweiz

Das neue Exkursionsprogramm „Wege durch die Wasserwelt“ schafft einen räumlichen Zugang zum Thema Wasser. Hauptziel einer HADES – Exkursion ist die Vermittlung und Vertiefung hydrologischer Fakten.

Region 1 Zürich

1.1 Gewässerzustand

Region Uster – Greifensee

1.2 Gewässerkorrekturen

Region Greifensee – Glattal

1.3 Grundwasser

Region Forch – Küsnacht

1.4 Wassernutzung neu

Zürich

1.5 Gewässer in der Stadt neu

Zürich

Region 2 Brig – Aletsch

2.1 Gletscher und Wasserkraftnutzung

Belalp – Blatten bei Naters

2.2 Gletscher und wasserversorgung

Riederalp – Fiescheralp

2.3 Hochwasser

Schallenberg – Brig

Région 3 Léman – Jura

3.1 L'eau en ville

Lausanne

3.2 L'eau dans le bassin versant

Châtel-St-Denis – Vevey

3.3 L'eau en zone calcaire

Le Brassus

Region 4 Davos

4.1 Schnee und Lawinen

Gotschnagrät – Schatzalp

4.2 Lawinen in der Landschaft Davos

Davos Dorf – Teufli

4.3 Alpine Hydrologie

Flüelapass – Dischmatal

Die Installation der ersten Messstation für Boden- und Lufttemperaturen im Herbst 1988 hat den Grundstein gelegt für die Instrumentierung des periglazialen Versuchsfeldes Furggentälti am alten Gemmiweg. Seither wurden weitere Versuchs- und Messvorrichtungen zur Analyse der verschiedenen periglazialen Phänomene entwickelt, installiert und getestet. In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wurden neue Methoden entwickelt, mit denen interessante Erkenntnisse zu den periglazialen Formen und Prozessen im Furggentälti gewonnen werden konnten.

Anlässlich des 20-jährigen Jubiläums der wissenschaftlichen Aktivitäten im Furggentälti wurden die wichtigsten Erkenntnisse in der vorliegenden Jubiläumsschrift zusammengestellt.



ISBN 978-3-905835-07-6