



universität
wien

Diplomarbeit

Titel der Diplomarbeit

Rezente Verbreitung und potenzielle Veränderung des
Permafrosts in hochalpinen Regionen

-

Eine Fallstudie im Gokyogebiet (Himalaja) auf Basis von
Blockgletschern und Bodentemperatur

Verfasser

Florian Mayer

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, im Jänner 2011

Studienkennzahl lt. Studienbuchblatt: A 453
Studienrichtung lt. Studienbuchblatt: Theoretische und Angewandte Geographie
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, im Jänner 2011

Unterschrift

Danksagung:

Auf dieser Seite möchte ich allen Menschen danken, die mich in meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Speziell danken möchte ich folgenden Personen:

- Prof. Thomas Glade und Dr. Juerg Merz für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit im Ausland und deren Mithelfen, damit sie zum Erfolg führt.
- Dr. Rainer Bell und Dr. Kirsten von Elverfeldt für ihre tatkräftige Unterstützung vor allem im Anfang und Endbereich der Diplomarbeit.
- Dr. Franz Holawe für die vielen Gespräche, inhaltlichen Anreize und persönliche Motivation.
- Angela Hudribusch für die inhaltlichen Gespräche und persönliche Motivation.
- Meine Kollegen von der Kathmandu University für ihr Engagement mir in einem fremden Land zur Seite zu stehen und allfällige Probleme zu lösen: Chhatra Mani Sharma, PhD; Roshan M. Bajracharya, Ph.D.
- vom Gokyo Ressort: Surendra Sharma, Kanchhi Sherpa, Jetha Rai, Sanjay Rai, Ishyam Rai. Besonderer Dank gilt Nischal Pokharel und Jetha (Parbat) Rai, die mir vor allem bei der Auslegung und Einsammlung der Instrumente sehr geholfen haben.
- Meinen Portern, die mich auch im schwierigen Gelände nicht verlassen haben, wodurch ich mich immer sicher fühlte.
- Den in- und ausländischen Mitgliedern der "Arbeitsgruppe Geomorphologie", die mich durch inhaltliche Anreize sehr unterstützten.
- Meinen Freunden Daniel Svejda, Herbert Glos und Johannes Horak für die ständige Motivation, vor allem in der Endphase der Diplomarbeit, in der ich sehr wenig Zeit hatte.
- Meiner Familie, die mich im gesamten Studium immer unterstützt und mir auch in schwierigen Zeiten beiseite gestanden hat.

Meinen Eltern widme ich diese Arbeit.

Die Universität Wien und den World Wide Fund for Nature Nepal möchte ich für die finanzielle Unterstützung speziell erwähnen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	viii
Diagrammverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis.....	xiii
Abkürzungsverzeichnis.....	xiv
Abstract (deutsch – englisch).....	xv
1 Grundlegender Rahmen.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Zielsetzungen und Gliederung.....	3
1.3 Wissenschaftlicher Hintergrund.....	5
2 Stand der Forschung.....	6
2.1 Permafrost.....	6
2.1.1 Definition und Aufbau.....	6
2.1.2 Verbreitung.....	7
2.1.3 Genese und energetische Einflussfaktoren.....	9
2.1.4 Hydrologie.....	12
2.1.5 Vegetations- und Schneebedeckung.....	13
2.2 Blockgletscher.....	13
2.2.1 Definition, Zustand und Erscheinungsbild.....	13
2.2.2 Genese.....	15
2.2.3 Blockgletscherbezeichnungen.....	17
2.3 Bodentemperatur.....	19
2.3.1 Zeitlich - punktuelle Bodentemperaturmessungen.....	19
2.3.2 Zeitlich - kontinuierliche Bodentemperaturmessungen.....	21
2.4 Modellierung von Permafrostverbreitung.....	22
2.4.1 Empirisch-statistische Modellierung.....	22
2.4.2 Prozess-orientierte Modellierung.....	24
2.5 Klimaänderungen.....	24
2.5.1 Szenarien.....	24
2.5.2 Temperaturmodelle.....	26
2.6 Forschungsarbeit in Nepal.....	28
3 Statistische Analyse des Untersuchungsgebiets.....	30

3.1	Datengrundlagen	30
3.2	Vorarbeit.....	32
4	Das Untersuchungsgebiet.....	34
4.1	Großräumliche Lage.....	34
4.2	Großklimatische Verhältnisse	34
4.3	Geologie	35
4.4	Geomorphologie.....	36
4.5	Abgrenzung und Höhenlage.....	36
4.6	Exposition, Hangneigung und Lufttemperatur.....	39
5	Methoden.....	42
5.1	Kartierung der Blockgletscher	42
5.1.1	Vorkartierung	42
5.1.2	Geländeaufnahme.....	43
5.1.3	Aufnahme in ArcGIS und Analyse	47
5.2	Bodentemperaturmessungen	48
5.2.1	Programmierung, Verteilung und Applizierung.....	49
5.2.2	Datenaufbereitung und -analyse.....	52
5.3	Modellierung der Permafrostverbreitung.....	53
5.3.1	Blockgletscher-Indikator.....	53
5.3.2	BTS-Indikator.....	54
5.3.3	Zukunftsszenario	56
6	Ergebnisse	57
6.1	Kartierungsergebnisse	57
6.1.1	Verteilung der Blockgletscher.....	57
6.1.2	Blockgletscherhöhen und -flächen.....	59
6.1.3	Exposition der Blockgletscher	61
6.1.4	Blockgletschercharakteristika	62
6.2	MTD-Standort- und Bodentemperaturanalyse.....	64
6.2.1	Räumliche Verteilung	64
6.2.2	Exposition der MTD-Standorte.....	66
6.2.3	Hangneigung	66
6.2.4	Standortcharakteristika.....	67
6.2.5	Zeitliche Einteilung des BTS-Zeitraums.....	68
6.2.6	Verortung der BTS	68

6.3	Permafrostmodellierungsergebnisse.....	72
6.3.1	Blockgletscherindikator	72
6.3.2	BTS-Indikator.....	75
6.3.3	Szenario Temperaturanstieg	77
7	Unsicherheiten.....	82
8	Diskussion	87
8.1	Blockgletscherkartierung und Analyse	87
8.2	Bodentemperaturmessungen	91
8.3	Permafrostverbreitung	98
8.3.1	Rezenter Permafrost	99
8.3.2	Vergleich der beiden Modellierungsmethoden und -ergebnisse	101
8.3.3	Zukunftsszenarien	105
9	Perspektiven	106
10	Zusammenfassung	108
11	Literaturverzeichnis.....	110
12	Anhang	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersetzte schematische Darstellung des Permafrostaufbaus (Quelle: FRENCH, 2007 nach FERRIANS, 1969).....	7
Abbildung 2: Übersetzte schematische Darstellung der Beziehung zwischen Gletscher, Permafrost und Baumgrenze nach MAAT und Niederschlag. (Quelle: FRENCH, 2007 nach HAEBERLI, 2002).....	9
Abbildung 3: Qualitative Faktoren der Energiebilanz (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach KELLER, 1994)	11
Abbildung 4: Schematisches Temperaturprofil im Permafrost (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach FRENCH, 1996)	11
Abbildung 5: Grundwassertypen im Permafrostgebiet wobei A: Supra-Permafrost Wasser; B: Intra-Permafrost Wasser; C: Sub-Permafrost Wasser, C1: Karst Wasser in Lösungskanälen, C2: Kluftwasser in Verwerfungen; C3: Wasserleiter in porösem Fels; C4: Kluftwasser im anstehenden Gestein; C5: Wasser im Alluvialboden (Quelle: FRENCH, 2007 nach CEDERSTROM, 1953).....	12
Abbildung 6: Aktiver Blockgletscher (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 09.10.2008 14:38)	15
Abbildung 7: Schematische Darstellung von Materialzulieferungsgebieten von Blockgletschern. (A) Blockgletscher aus Muränenmaterial unterhalb von Gletschern; (B) Talus-Blockgletscher unterhalb von Schutthalden/Schuttkegel. (Quelle: FRENCH, 2007 nach BARSCH, 1988).....	15
Abbildung 8: Schematische Darstellung von Blockgletschertypen in einer Abfolge. (Quelle: BARSCH, 1996 nach HÖLLERMANN, 1983)	16
Abbildung 9: Bezeichnungen eines Talus- Blockgletschers mit der zusätzlichen Bezeichnung Quellgebiet (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach BARSCH, 1996).....	18
Abbildung 10: Globale Emissionen von Treibhausgasen nach SRES und Frequenz - Verbreitung (F-Gase sind HFCs, PFCs und SF6) (Nach: IPCC, 2007b)	25
Abbildung 11: Temperaturänderung nach Region von 1980 - 1999 und 2080 -2099 nach dem A1B -Szenarium. Modellierung durch MMD. (Nach: IPCC, 2007c)	27
Abbildung 12: Überblickskarte Asien - Lage des Untersuchungsgebiets innerhalb des roten Kästchens (Datengrundlage: http://weltkarten-landkarten.com/la/asien/volksrepublik-china/Map_of_China_28physical29.png Zugriff: 18.10.2010; Karte als "Public Domain"	

ausgeschrieben siehe http://www.weltkarten-landkarten.com/html/impressum.php Unterpunkt "Kartenmaterial und Texte" Zugriff: 18.10.2010).....	34
Abbildung 13: Höhere Himalaja Zone im Großraum des Untersuchungsgebiets; Rotes Kästchen zeigt die ungefähre Lage des Untersuchungsgebiets (Ausschnittsquelle: SEARLE, 1999).....	35
Abbildung 14: Untersuchungsgebiet mit Teilgebieten und Fernerkundungsdaten	37
Abbildung 15: Aufnahme mit Blick auf Nogzumba Gletscherzunge (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 17.08.2009 17:24).....	38
Abbildung 16: Hangausrichtung nach Gebiet in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer).....	39
Abbildung 17: Exposition im Untersuchungsgebiet und Darstellung der MAAT.....	40
Abbildung 18: Übersetztes Blockgletscher Informationssystem (Quelle: BARSCH, 1996 S. 33 nach BARSCH 1987).....	46
Abbildung 19: HOBO Pedant Temperature Data MTD Typ UA-001-08 (Quelle: http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ua-001-08#tabs-product_page_tabs-1 Zugriff: 02.11.2010; Copyright/Permission: Copyright 1996–2007 Onset Computer Corporation, 470 MacArthur Blvd, Bourne, MA 02532 U.S.A. (mailing: P.O. Box 3450 Pocasset, MA, 02559-3450 U.S.A.) All rights reserved. - Permission to use, copy and distribute documents and related graphics available from this World Wide Web server ("Server") is granted, provided that (1) the above copyright notice appears in all copies and that both the copyright notice and this permission notice appear, (2) use of documents and related graphics available from this Server is for informational and non-commercial purposes only, (3) no documents or related graphics available from this Server are modified in any way, and (4) no graphics available from this Server are used, copied or distributed separate from accompanying text. siehe http://www.onsetcomp.com/corporate/policies/copyright-information Unterpunkt: "Copyright Information" Zugriff: 02.11.2010)	49
Abbildung 20: Applizierung eines MTDs (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 30.09.2009 10:30)	51
Abbildung 21: Verteilung der Blockgletscher in Gokyo 2010	58
Abbildung 22: Aufnahme mit Blick auf Blockgletscher 4f und 4e (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 06.09.2009 11:02)	59
Abbildung 23: Verteilung der MTD in Gokyo 2010.....	65
Abbildung 24: Darstellung der BTS und BTS-Abweichungen im Untersuchungsgebiet.....	71

Abbildung 25: Modellierung der Permafrostverbreitung auf Basis der Verteilung der Blockgletscher (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010	74
Abbildung 26: Modellierung der Permafrostverbreitung durch BTS-Messungen in Gokyo 2010	76
Abbildung 27: Modellierung der möglichen zukünftigen Permafrostverbreitung durch die Verteilung der Blockgletscher (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") und dem genannten Temperaturanstieg von IPCC (2007) in Gokyo 2010	79
Abbildung 28: Modellierung der möglichen zukünftigen Permafrostverbreitung durch BTS-Messungen und den genannten Temperaturanstieg von IPCC (2007) in Gokyo 2010	81

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Statistische Maßzahlen der Blockgletscherseehöhen und -ausdehnungen in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	60
Diagramm 2: Exposition der Blockgletscher und Abweichung von der Exposition in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	62
Diagramm 3: Vergleich der Exposition von Untersuchungsgebiet und MTD-Standorte (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	66
Diagramm 4: Vergleich der Hangneigung im Untersuchungsgebiet und an den MTD-Standorten (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010).....	67
Diagramm 5: Darstellung der täglichen Standardabweichung über den gesamten Aufnahmezeitraum und Auswahl des BTS-Zeitraums (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufnahme: Florian Mayer 2010).....	68
Diagramm 6: Permafrostverbreitung nach Exposition und Seehöhe in 50 Höhenmeterschritten (Blockgletscherindikator) in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010).....	72
Diagramm 7: Prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach Blockgletscherindikator (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	73
Diagramm 8: Prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach dem BTS-Indikator in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	75
Diagramm 9: Mögliche zukünftige prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach Blockgletscherindikator (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010).....	77
Diagramm 10: Mögliche zukünftige Permafrostverbreitung nach Exposition und Seehöhe in Meter in Gokyo 2010 (Blockgletscherindikator) 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)	78

Diagramm 11: Mögliche zukünftige prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach BTS-Indikator in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010).....	80
Diagramm 12: Temperatur und Standardabweichung von 5 MTD unter Laborbedingungen (Quelle: Florian Mayer 2010)	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturanstieg nach Szenario und Jahr in Südasien; Breite: 5N-30N, Länge: 65E-100E; Angaben in °C (Nach: IPCC, 2007a).....	27
Tabelle 2: Angaben über das Untersuchungsgebiet 2010 (Datengrundlage: NASA Astar, Aufbereitung: Florian Mayer 2010)	38
Tabelle 3: Kriterien der Blockgletscherkartierung durch Fernerkundungsdaten (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010).....	43
Tabelle 4: Großeinteilung des Auslandsaufenthalts (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)	44
Tabelle 5: Einteilung des Geländeaufenthalts (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010).....	45
Tabelle 6: Kriterien der Geländekartierung (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)	45
Tabelle 7: Kriterien der Verteilung der MTD (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010).....	50
Tabelle 8: Ergebnisse nach dem Schlüssel von BARSCH (1978) (Datenaufnahme: Florian Mayer 2009)	63
Tabelle 9: Auswertung der Blockgletschercharakteristika nach BARSCH (1978) (Aufnahme und Aufbereitung: Florian Mayer 2010)	63
Tabelle 10: Auswertung der Standortcharakteristika (Datenaufnahme und -aufbereitung: Florian Mayer 2009/2010)	67
Tabelle 11: Auflistung der Standortcharakteristika (erdig: 1; sandig: 2; blockig: 3), BTS und deren Abweichung in °C (n.v.: nicht vorhanden) (Quelle: Florian Mayer 2010)	69

Abkürzungsverzeichnis

.csv - Microsoft Office Excel Comma Separated Values File

.shp - Shape

AR4 - Assessment Report 4

BTS - Bottom Temperature of Snow

DEM - Digital Elevation Model

dpi - dots per inch

DSR - Direkte Sonneneinstrahlung

Email - electronic mail

GPS - Global Positioning System

GTS - Ground Surface Temperature

IPCC - International Panel of Climate Change

KU - Kathmandu University

MAGT - Mean annual ground temperature

MTD - Miniature temperature datalogger

NASA - National Aeronautics and Space Administration

PV - gesuchte Permafrostverbreitung in der Modellierung

tDSR - tägliche direkte Sonneneinstrahlung

tDSRJ - tägliche direkte Sonneneinstrahlung im Jänner

WGS84 - World Geodetic System 1984

WWF - World Wide Fund for Nature

ZZA - Zero annual amplitude

Abstract (deutsch – englisch)

In dieser Arbeit wird die rezente und zukünftige Permafrostverbreitung im Bereich Gokyo ($86^{\circ}41'37''\text{E}$; $27^{\circ}57'18''\text{N}$) in Nepal im Himalajagebirge großmaßstäbig untersucht, da Permafrost auf der Südseite des Himalajagebirges nur grundlegend erforscht ist. Hierfür wurden Blockgletscher kartiert und Messungen der Basistemperatur der Schneedecke (BTS) durch kleine Temperaturlogger an der Bodenoberfläche durchgeführt. Das erlaubt eine Modellierung der Permafrostverbreitung durch zwei unterschiedliche Methoden. Die Untersuchung basiert sowohl auf Fernerkundungsdaten als auch auf Feldbegehungen. Die mittlere Seehöhe der Blockgletscher nach Exposition wird verwendet, um die untere Grenze des Permafrostvorkommens zu berechnen (nach BARSCH, 1978), während das Permafrostvorkommen nach BTS durch eine lineare Regression mit den unabhängigen Variablen Seehöhe und direkte Sonneneinstrahlung im Jänner in Anlehnung an das Modell PERMAMAP von HOELZLE (1992) kalkuliert wird. Nach der Mittelung der Seehöhe der Blockgletscher liegt die untere Grenze bei: Nord 5021, Ost 5201, Süd 5271 und West 5114 Meter Seehöhe. Bei der BTS Modellierung liegt die Permafrostuntergrenze bedeutend tiefer, jedoch könnte hierfür eine zu geringe Schneedeckenmächtigkeit ausschlaggebend sein. Weitere Untersuchungen mit geophysikalischen Methoden sind notwendig, um diese Abschätzung zu untermauern. Nach dem Temperaturszenario vom International Panel of Climate Change (IPCC) für Nepal wird die untere Permafrostgrenze im Jahr 2039 um 188 Meter höher sein als 2009.

In this study recent and future Permafrost in the Gokyo area ($86^{\circ}41'37''\text{E}$; $27^{\circ}57'18''\text{N}$) in Nepal, Himalaya was investigated: Rockglaciers were mapped and the bottom temperature of snow was measured using miniature temperature data loggers. The lower limit of Permafrost distribution was modelled with two different methods: As first method the mean elevation of rockglaciers split into aspects (after BARSCH, 1978), and as second the model PERMAMAP (HOELZLE, 1992) were slightly modified and used. The calculated lower limit of Permafrost using rockglaciers was: North 5021, East 5201, South 5271 and West 5117 meters above sea-level. Using PERMAMAP model the lower limit of permafrost lies much deeper, maybe due to less snow cover making the results unreliable. Geophysical investigations are needed to improve permafrost knowledge in this area. The temperature rise calculated for Nepal by the International Panel of Climate Change (IPCC) was used to determine the lower permafrost limit for the year 2039, indicating a rise of up to 188 meters compared to the year 2009.

1 Grundlegender Rahmen

1.1 Einführung

Dass Permafrost im Himalajagebirge vorhanden ist, wurde bereits erstmals (1980) von KUHLE dokumentiert. Allerdings weist der Himalaja-Permafrost im Gegensatz zu anderem Hochgebirgspermafrost Spezifika auf, die einerseits auf die Ost-West-Erstreckung des Gebirges zurückzuführen sind, andererseits aber auch auf die stark unterschiedliche Ausprägung des Reliefs entlang der daraus resultierenden Nord- und Südexposition. So hat beispielsweise das auf der Südseite gelegene Nepal ein steiles Relief, das von Flüssen tief eingeschnitten ist, wohingegen das nordexponierte Tibet und das Qinghai-Plateau im Vergleich dazu ein geringer ausgeprägtes Relief hat. Dieser Unterschied spiegelt sich auch in der Einteilung des Permafrosts nach seinem Vorkommen wider: Permafrost auf der Südseite des Himalajas wird zum Hochgebirgspermafrost gezählt, während die Nordseite eine eigene Gruppe, den Plateau Permafrost bildet (FRENCH, 2007).

Die Permafrostforschung im Himalaja ist im Vergleich zu der Erforschung des dauerhaft gefrorenen Bodens in den Alpen oder auch in den arktischen Gebieten noch recht jung. Um Änderungen der Permafrostverbreitung, beispielsweise durch die anthropogene Klimaänderung, dokumentieren zu können, werden durch die Volksrepublik China Programme aufgebaut, die die Veränderung des Permafrost nach europäischen Vorbild aufzeichnen sollen (KING ET AL., 2006), die allerdings auf die Nordseite des Himalajas beschränkt sind. Seit Jahrzehnten wird dort die Permafrostforschung vorangetrieben. Dies geschieht jedoch nicht nur aus rein wissenschaftlichem Interesse, sondern ist auch für die wirtschaftliche Entwicklung der Region wesentlich. So konnte dieses Wissen beispielsweise auch für die Errichtung der Qinghai-Tibet-Bahn eingesetzt werden, da in Permafrostgebieten andere bautechnische Maßnahmen ergriffen werden müssen als auf permafrostfreien Gebieten.

Auf der Südseite des Himalajagebirges, in Nepal, ist Permafrost nur spärlich untersucht worden, so war JAKOB (1992) einer der Ersten, der die Permafrostverbreitung in der Umgebung des Mt. Everest untersucht hat. Weitere Arbeiten, die sich ausschließlich der Permafrostverbreitung in Nepal widmen, wurden seitdem nur im kleinmaßstäbigen Maßstab durchgeführt (ISHIKAWA ET AL., 2001).

Damit unterscheiden sich die beiden Hauptrichtungen des Himalajagebirges sowohl in geomorphologischen Eigenschaften, als auch – politisch und durch unterschiedliche Zugänglichkeit bedingt – im derzeitigen Stand der Permafrostforschung. Gerade für die Südseite ist somit ein großer Forschungsbedarf vorhanden.

Aufgrund der wenigen vorhandenen Studien müssen somit zunächst Grundlagenarbeiten durchgeführt werden, in denen erprobte Methoden der Permafrostkartierung angewendet werden. Dadurch resultiert eine erste großmaßstäbige Kartierung der rezenten Permafrostverbreitung. Diese ist von Bedeutung, da gegenwärtig davon ausgegangen wird, dass sich die Permafrostverbreitung im Zuge der Klimaänderung ändern wird (International Panel of Climate Change: IPCC, 2007c). Aus Kartierungen der rezenten Permafrostverbreitung können dann in einem weiteren Schritt zukünftige Permafrostszenarien aus Werten der Klimaänderung errechnet werden. Damit ist es möglich, in einer großmaßstäbigen Studie in Nepal folgende wesentliche Fragen zu klären:

- 1) Wo befindet sich Permafrost?
- 2) Sind gängige Methoden, die überwiegend in den europäischen Alpen entwickelt wurden, auch für den Himalaja anwendbar?
- 3) Wie könnte sich eine zukünftige Klimaänderung ggf. auswirken?

Wenn die Permafrostverbreitung kartiert und Änderungen dargestellt werden können, werden vergleichende Analysen der Permafrostverbreitung und -änderung nach Hauptrichtungen im höchsten Gebirge der Welt ermöglicht. Das stellt ein weiterführendes Forschungspotenzial dar.

Diese Grundlagenstudien können nicht nur für die Wissenserweiterung im Forschungsgebiet Permafrost verwendet werden, sondern auch die ansässige Bevölkerung profitiert, wie unten angeführt.

Das Untersuchungsgebiet, genannt Gokyo, liegt nur 20 km westlich des Mt. Everest entfernt, im Sagarmatha National Park. Sowohl der Mt. Everest als auch der angrenzende Gokyo-Bereich sind beliebte Ziele von Touristen aus aller Welt. Somit stellt der Tourismus im Sagarmatha National Park einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für Gokyo dar. Die Infrastruktur muss ständig erweitert werden, um den wachsenden Tourismus aufnehmen zu können. Damit sind Kenntnisse der Permafrostverbreitung bei derzeitigen Bauvorhaben von großem Nutzen für die ansässige Bevölkerung: Da Gebäude, die auf permafrostfreien Flächen gebaut werden, nicht von Prozessen beeinflusst werden, die für Permafrost typisch sind (beispielsweise Bodenfließen und das jährliche Tauen und Gefrieren des oberen Bereichs des

Untergrundes), ist es nachhaltiger, nach Möglichkeit auf permafrostfreiem Untergrund zu bauen.

1.2 Zielsetzungen und Gliederung

Zielsetzungen können aus der Problemstellung generiert werden, die in dieser Arbeit darin besteht, dass bisher kein Wissen über die kleinräumige Permafrostverbreitung im Untersuchungsgebiet vorliegt. Nach HEGINBOTTOM (2002) ist das fundamentale Problem in Permafrostkartierungen, dass man einen Zustand aufnimmt aber keine Substanz bzw. Erscheinungsform. Das ist bedingt durch die Definition von Permafrost auf Basis des thermalen Zustandes des Untergrundes. Aufgrund dessen müssen Indikatoren herangezogen werden, die den thermalen Zustand des Untergrundes beschreiben (FRENCH, 2007). Als natürliche Erscheinungsform können Blockgletscher als Permafrostindikatoren verwendet werden. Um den thermalen Zustand des Untergrundes aufzunehmen kann auch eine Messung der Temperatur erfolgen (HAEBERLI, 1973; HOELZLE ET AL., 1999). Folgende Zielsetzungen werden deshalb verfolgt:

- Kartierung und Auswertung der daraus generierten Daten aller Blockgletscher im Untersuchungsgebiet
- Messung der Bodentemperatur an ausgewählten Stellen im Untersuchungsgebiet
- Anwendung zweier verschiedener Methoden zur Modellierung der rezenten Permafrostverbreitung
- Erstellung von Permafrostszenarien bei Temperaturänderung

Das Gokyo Gebiet ist nur vage beschrieben (BHANDARI und JOO, 2007). Problematisch ist dabei auch, dass mit Gokyo sowohl der See "Gokyo" als auch das Gebiet "Gokyo", das aus fünf verschieden großen Seen besteht, angesprochen wird. Um die Zielvorgaben erreichen zu können, müssen Vorarbeiten geleistet werden. Diese bestehen darin, das Untersuchungsgebiet genau abzugrenzen und eine statistische Analyse dieses Gebietes durchzuführen.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über Permafrost, sowie dessen Indikatoren, Klimaänderung und bisherige permafrostrelevante Arbeiten in Nepal gegeben. Damit können grundlegende Definitionen zum Beispiel, was Permafrost ist, erläutert werden. Weiters wird in diesem Kapitel abgeklärt, welche Möglichkeiten der Permafrostmodellierung vorhanden sind und welche Vor- und Nachteile sie haben. Der Klimawandel ist nach IPCC gegenwärtig (IPCC,

2007a). Jedoch um eine Modellierung in die Zukunft durchführen zu können, muss das prinzipielle Vorgehen von IPCC zur Fragestellung von Klimawandel diskutiert werden. Erst danach kann ein Szenario ausgewählt werden und seine Aussagekraft bewertet werden.

Anschließend wird im Kapitel 3 die Vorarbeit präsentiert. Im Zuge dessen wurde der Rahmen für die Ergebnisse definiert. Dafür ist eine Vorgehensweise notwendig, die in eben jenem Kapitel beschrieben wird. Der Rahmen wird dadurch nachvollziehbar und Ergebnisse, die innerhalb dieses Rahmens entstehen, sind kontrollierbar und verständlich.

Danach wird in Kapitel 4 das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Es besteht aus dem Großraum in dem das Untersuchungsgebiet liegt und der genauen Darstellung der Ausdehnung des Untersuchungsgebietes. Statistische Kennzahlen sollen den Untersuchungsraum veranschaulichen, in dem Blockgletscher kartiert, Bodentemperaturmessungen durchgeführt werden und die Permafrostverbreitung modelliert wird.

Die Vorgehensweise um die Zielsetzung zu erreichen, werden in Kapitel 5 Methoden beschrieben. Ergebnisse bestehen aus dem Endprodukt von Variablen die miteinander verknüpft worden sind. Erst wenn bekannt ist, welche Variablen benutzt worden sind, wie sie zustande gekommen sind und wie die Verknüpfung aussieht, können Ergebnisse diskutiert werden. Dadurch werden diese nachvollziehbar und können ggf. reproduziert werden.

In Kapitel 6 werden schrittweise Ergebnisse dargestellt und beschrieben bis das Endprodukt, die Permafrostverbreitung, erstellt werden kann. Die schrittweise, wertfreie Darstellung ermöglicht die Nachvollziehbarkeit der Permafrostverbreitung, nicht nur anhand der Methodik sondern auch anhand deren schrittweisen Ergebnissen.

In Kapitel 7 werden Unsicherheiten erläutert. Diese sind zum Teil in der Methodik, als auch in den Ausgangsvariablen zu finden und haben maßgebend Einfluss auf die Aussagekraft von Ergebnissen. Für die Diskussion ist es daher notwendig die Stärken, aber auch die Schwächen der Ergebnisse kenntlich zu machen.

Kapitel 8 stellt die Kumulation von Kapitel 6 und 7 dar. Ergebnisse werden aufgrund der Unsicherheiten kritisch hinterfragt und gegeneinander abgewogen. Dabei wird das Schema der Zielsetzung eingesetzt.

Kapitel 9 soll weitere Forschungsmöglichkeiten auf Basis der vorliegenden Arbeit aufzeigen. Hier kann weiter- und aufgebaut werden, zum Beispiel kann die Genauigkeit erhöht und weitere Methoden zur Kartierung von Permafrost angewendet werden.

Abschließend fasst das Kapitel 10 das wichtigste der Arbeit in Kurzform zusammen. Es ist ein Überblick und beinhaltet keine Details, doch kann damit die Bedeutung der Arbeit in kürzester Zeit abgeschätzt werden.

1.3 Wissenschaftlicher Hintergrund

Die Arbeit ist Teil eines mehrjährigen Projekts des Zentrums für Aquatische Ökologie auf der Kathmandu University (KU). Es ist vom World Wide Fund for Nature (WWF) teilfinanziert und untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Seengebiete im Bereich Gokyo. Die Untersuchungen sind als Pionierarbeiten geplant, auf denen weiterführende Forschungsarbeiten aufbauen sollen. Der Themenkomplex Wasserhaushalt wurde in zwei Detailstudien aufgespaltet, in die Untersuchung der hydrologischen Situation, die sich der Wasserspiegelhöhe der Seen widmet und Messungen über die Abflussmenge durchführt. Die zweite Studie beschäftigt sich mit der Aufnahme und Beschreibung des Permafrosts. Die Detailstudien stellen von einander getrennte Aufgaben dar, deren Ergebnisse erst nach Abschluss zusammengeführt werden (pers. Mitt. Juerg Merz).

Diese Arbeit stellt die 2te Detailstudie des Großprojekts dar. Das zentrale Thema ist die Verbreitung des Permafrosts und dessen Veränderung in Klimaszenarien. Vom Projekt vorgegeben sind die Messung von Bodentemperaturen und die Kartierung von periglazialen Landformen. Die Bodentemperaturen sollen als Permafrostindikator dienen, bei der Kartierung liegt der Fokus auf Blockgletschern (pers. Mitt. Juerg Merz). Der Geländeaufenthalt wurde nach dem Projektplan mit zwei Monaten beziffert, die in dieser Periode applizierten Temperaturmessgeräte waren über den gesamten nachfolgenden Winter aktiviert.

2 Stand der Forschung

Die nachfolgenden Kapitel sollen den derzeitigen Wissensstand darstellen. Dabei werden aktuelle Vorgehensweisen und Erkenntnisse aufgezeigt, die vor allem aus Europa und Kanada stammen. Deswegen wird im Kapitel 2.6 ein Abriss aus der Forschungsgeschichte im Bereich des Untersuchungsgebietes gegeben.

2.1 Permafrost

2.1.1 Definition und Aufbau

Permafrost wird als Untergrund (Boden, Felsen) definiert, der für die Zeitspanne von mindestens zwei aufeinander folgenden Jahren eine Temperatur von unter 0 °C aufweist (FRENCH, 2007). Der Begriff Permafrost geht auf S. MULLER (1945) zurück und ist die Abkürzung für "permanently-frozen-ground". Da Permafrost über die Temperatur und Zeit definiert ist, muss Permafrost nicht unbedingt gefroren sein, da der Gefrierpunkt von Wasser unter Druck einige Grade unter 0 °C sein kann (FRENCH, 2007). Obwohl Permafrost meist eishältig ist, muss dieses im Permafrost nicht vorkommen, wenn Grob- und Feinporen fehlen und damit keine Wasserspeicherung möglich oder das Wasserangebot zu gering ist. In diesem Fall spricht man von trockenem Permafrost (ZEPP, 2004; NYENHUIS, 2006). Im Regelfall ist der Porenraum teilweise bzw. vollständig mit Eis gefüllt, weshalb von eisuntersättigtem bzw. gesättigtem Permafrost gesprochen wird. Übersteigt das Volumen des Eises hingegen das der Poren, so ist der Permafrost eisübersättigt.

Abbildung 1 zeigt einen schematischen Aufbau vom Permafrost. Unterhalb der Oberfläche ist die aktive Schicht (sommerliche/r Auftauschicht/Auftaubereich), darunter ist der eigentliche Permafrostkörper, der dauerhaft das ganze Jahr hindurch gefroren verbleibt. Die Grenzfläche zwischen Auftaubereich und Permafrostkörper ist die Permafrosttafel (ZEPP, 2004) oder der Permafrostspiegel (NYENHUIS, 2006). Aufgrund der Erdwärme, die der Kälte mit zunehmender Tiefe entgegenwirkt, ist unterhalb des Permafrostkörpers der Niefrostbereich bzw. Sub-Permafrost-Talik. Diese Grenzfläche wird Permafrostbasis genannt (FRENCH, 2007). Da Gefrierfronten bei unterschiedlichen Materialien unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten haben, können sich ungefrorene Bereiche bilden. Diese

können bei der Permafrosttafel vorliegen oder innerhalb des Permafrosts als geschlossene Linsen vorkommen. Offene Taliks sind ungefrorene Stellen, die über den Permafrostkörper hinausgehen. Bei FRENCH (2007) ist Talik jeglicher ungefrorener Bereich, auch wenn er eine Temperatur unterhalb von 0 °C aufweist.

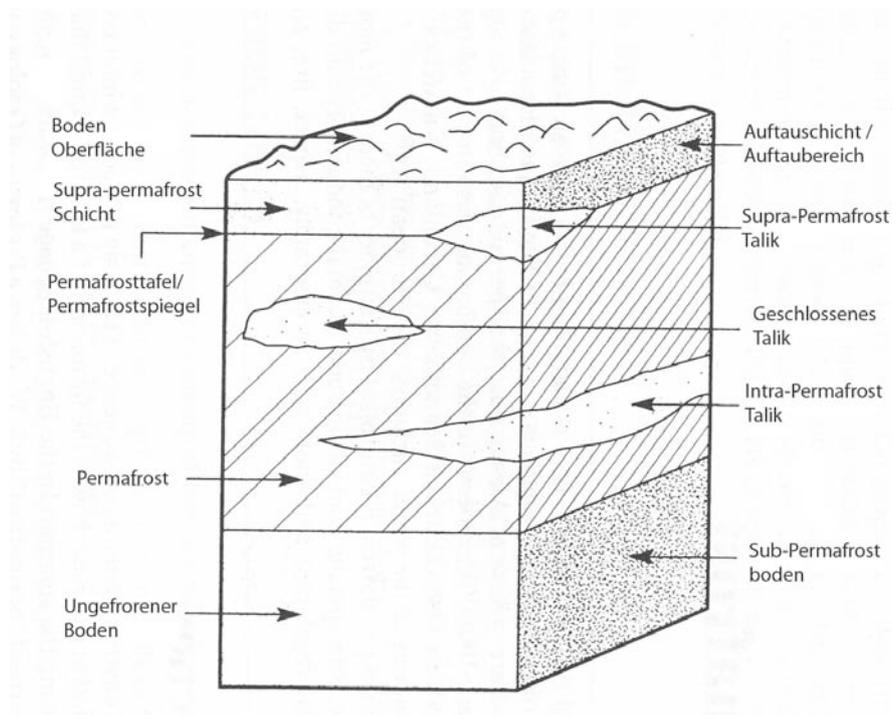


Abbildung 1: Übersetzte schematische Darstellung des Permafrostaufbaus (Quelle: FRENCH, 2007 nach FERRIANS, 1969)

2.1.2 Verbreitung

Permafrost ist auf 23 - 25 % der Landoberfläche auf der nördlichen Hemisphäre anzutreffen. Davon entfällt der Großteil auf Russland, gefolgt von Kanada und China. Die Verbreitung des Permafrosts ist abhängig von vielen Faktoren, der einflussreichste ist das Klima. Man unterscheidet zwischen polarem, plateau und alpinem bzw. Gebirgspermafrost (FRENCH, 2007). Weiters gibt es submarinen Permafrost in arktischen Gewässern. Um den Verbreitungsgrad von Permafrost zu beschreiben, wird meist auf eine Dreiteilung zurückgegriffen: kontinuierlich, diskontinuierlich und sporadisch. In SCHROTT (1999) werden Flächenanteile von Permafrost über 80 % als kontinuierlich, zwischen 30 und 80 %

als diskontinuierlich und unter 30 % als sporadisch angesehen. In der Literatur schwanken diese Prozentangaben allerdings sehr stark.

Die Permafrostverbreitung lässt sich in nordpolarem Gebiet grob durch die durchschnittliche Jahrestemperatur der Luft (eng. mean annual air temperature: MAAT) abschätzen. So erstreckt sich kontinuierlicher Permafrost nördlich der -6 bis -8 °C MAAT Isotherme, südlich davon ist diskontinuierlicher Permafrost bis zu der -1 °C MAAT Isotherme. Weiter südlich ist Permafrost nur mehr auf Gunstlagen, wie Moorgebieten und Nordhängen anzutreffen (FRENCH, 2007).

Der Plateau Permafrost ist auf Zentralasien beschränkt, das durch eine große Seehöhe, ohne ausgeprägtes Relief, bei gleichzeitigem stark kontinentalem Klima charakterisiert ist. Die untere Begrenzung von Permafrost liegt zwischen 4200 und 4800 m Seehöhe, wobei hier von einer MAAT von $-3,6$ bis $-2,5$ °C ausgegangen wird (FRENCH, 2007).

Gebirgspermafrost kommt sowohl in den mittleren als auch niederen Breiten vor, da bei der Verbreitungsabschätzung Höhe, Hangneigung, Exposition und Schnee miteinbezogen werden müssen. Eine Zonierung kann auch im Gebirgspermafrost erfolgen, so ist unterhalb von vergletscherten Gebieten eine Zone kontinuierlichen Permafrosts, darauf folgt eine Zone diskontinuierlichen Permafrosts und darauf wieder sporadischer Permafrost bis aufgrund der hohen MAAT in tieferen Lagen überhaupt kein Permafrost mehr möglich ist. Dem widerspricht ETZELMÜLLER ET AL. (2001), da aufgrund des Reliefs und der damit verbundenen Berge und Täler nicht von einem kontinuierlichen Permafrost im Hochgebirge gesprochen werden kann. Abbildung 2 stellt diese Zonierung trotzdem mit dem zusätzlichen Attribut Niederschlag dar, nachdem sich die Gletscher- und Baumgrenze richtet. Dort wo kein Gletscher ist können sich Indikatoren von Permafrost an der Oberfläche wie zum Beispiel Blockgletscher und ganzjährig vorhandene Schneeflecken ausbilden. Das untere Limit von Gebirgspermafrost ist sehr unterschiedlich und steigt grob von 1000 m Seehöhe bei einer Breite von 60 ° Nord zu 4800 Höhenmeter bei 15 ° nördlicher Breite an (FRENCH, 2007).

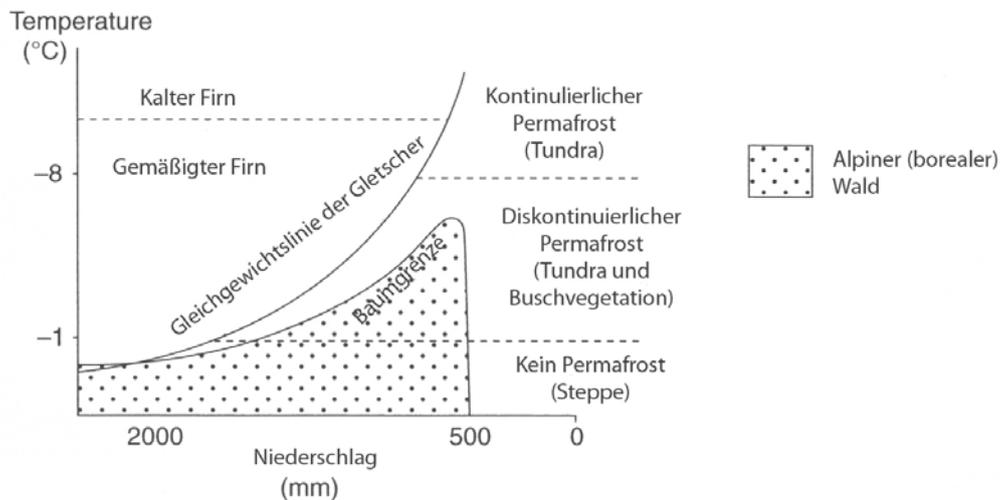


Abbildung 2: Übersetzte schematische Darstellung der Beziehung zwischen Gletscher, Permafrost und Baumgrenze nach MAAT und Niederschlag. (Quelle: FRENCH, 2007 nach HAEBERLI, 2002)

2.1.3 Genese und energetische Einflussfaktoren

Im Winter gefriert der Boden von der Oberfläche nach unten. Sobald das Wetter wieder wärmer wird fängt der Boden an von oben nach unten aufzutauen. Taut bis zum nächsten Winter die gesamte Tiefe nicht auf, so entsteht Permafrost, der im Laufe der Jahre bei gleich bleibendem Klima immer dicker wird. Der Permafrost setzt sich weiter nach unten fort bis der geothermische Gradient keine weitere Ausbreitung zulässt (FRENCH, 2007). Dieser ist ungefähr $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ für 30 - 60 m Tiefe nach LACHENBRUCH (1968). Sobald der winterliche Frost nicht mehr bis zur Permafrosttafel vordringen kann, spricht man von einem inaktiven Permafrost (NYENHUIS, 2006). Weiters ist die Zusammensetzung des Gesteins, Sediments und der Vegetation von großer Wichtigkeit, da sie die thermische Leitfähigkeit stark beeinflusst und somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit des gefrorenen Zustandes. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Sättigungsgrad sowie der Zustand der Poren. Poren, die mit Eis gefüllt sind, haben eine höhere thermische Leitfähigkeit als wassergefüllte Poren, diese wiederum eine höhere als luftgefüllte Poren (FRENCH, 2007).

Permafrost ist das Ergebnis der negativen Energiebilanz an der Oberfläche und wird durch die Wärmehaushaltsgleichung beschrieben,

$$Q_R \pm Q_H \pm Q_{LE} \pm Q_G \pm Q_M = 0$$

- Q_R die Strahlungsbilanz
- Q_H der fühlbare Wärmefluss
- Q_{LE} der latente Wärmefluss
- Q_G die Leitung von Wärme im Untergrund
- Q_M die Schmelzwärme von Eis

Die Gleichung muss über eine große Zeitspanne negativ verbleiben, damit Permafrost eine große Mächtigkeit erlangen kann. Umgekehrt ist eine lange Zeitspanne mit positiver Energiebilanz notwendig um Permafrost abzutauen. Damit ist eine Abschätzung der Permafrostentwicklung aufgrund von physikalischen Eigenschaften des Grundgesteins und derzeitiger MAAT nicht möglich.

Die Abbildung 3 fasst die qualitativen Einflussfaktoren zusammen. Die vorhandene Strahlung ist der Hauptfaktor und wird erst in weiterer Folge von den anderen Faktoren verändert, was letztendlich zur Oberflächentemperatur führt, die die Permafrostverbreitung bestimmt. Weiters ist die Erdwärme der einzige Faktor der die absolute Grenze des Permafrosts in die Tiefe bestimmt. Die genaue Quantifizierung der Faktoren ist problematisch, weswegen auch bei diesem Ansatz eine vollständige Klärung des Permafrostverhaltens derzeit nicht machbar ist (NYENHUIS, 2006).

Abbildung 4 stellt das Eindringen der Temperatur in den Boden im zeitlichen Kontext dar. So kann der jahreszeitlich bedingte Temperaturunterschied an der Oberfläche bis zur Tiefe der Nullamplitude (engl. zero annual amplitude: ZAA) in den Boden eindringen. Die Tiefe der jährlichen Auftauschicht ist mit dem Eindringen der maximalen Temperatur im Sommer bis zum Gefrierpunkt definiert. Die Permafrostbasis befindet sich in der Tiefe, wo die mittlere jährliche Bodentemperatur (engl. mean annual ground temperature: MAGT) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ überschreitet.

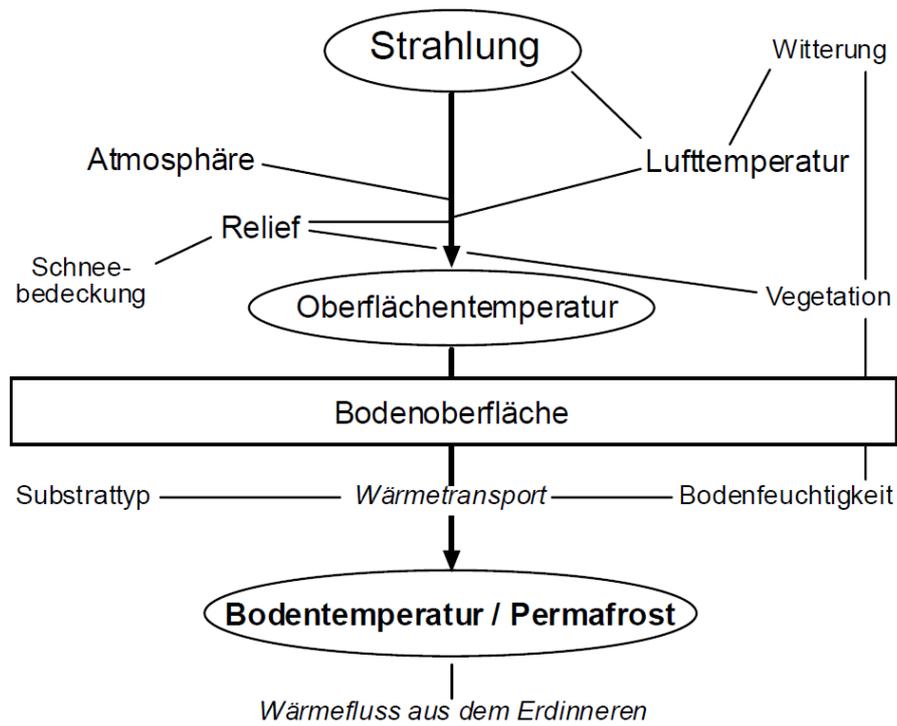


Abbildung 3: Qualitative Faktoren der Energiebilanz (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach KELLER, 1994)

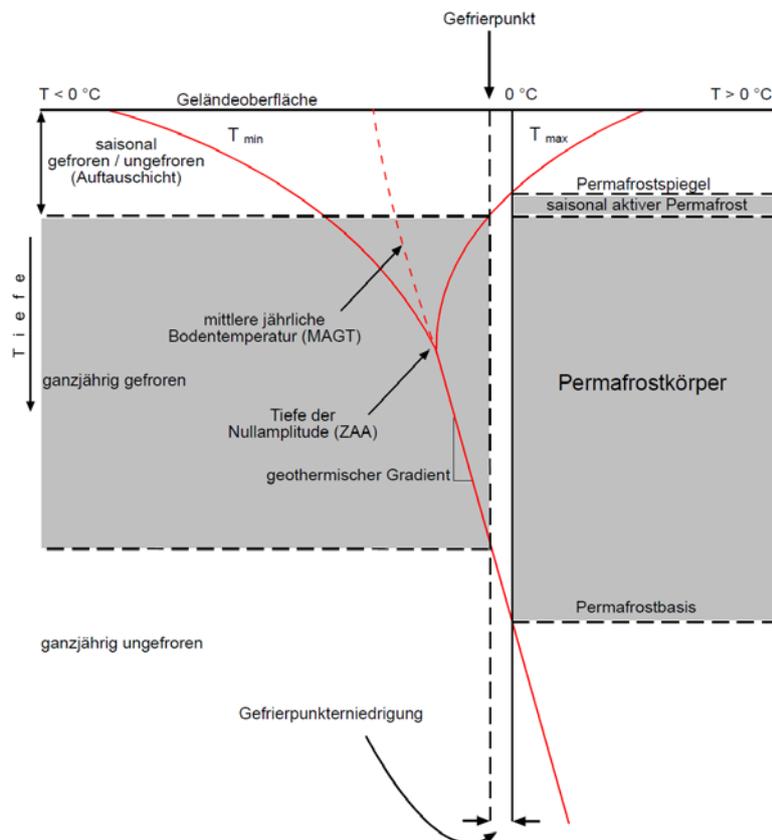


Abbildung 4: Schematisches Temperaturprofil im Permafrost (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach FRENCH, 1996)

2.1.4 Hydrologie

Da Wasser eine hohe Wärmekapazität besitzt, wirkt sich stehendes Wasser stark auf den Permafrost aus. So ist ein See, der im Winter nicht bis zum Boden zufriert, meist von einem Talik Bereich umgeben, der über 0 °C Bodentemperatur aufweist. Verändern sich Seen bzw. Wasserkörper in einem Gebiet, so können weitere Talik Bereiche entstehen oder vorhandene zufrieren. Fließendes Wasser, das stark vom umgebenden Gestein mineralisiert ist, kann auch das Zufrieren von kryonischen Talik Bereichen verhindern. Permafrost selbst ist ein Wasserstauer, weswegen der Wasserfluss entweder an die Oberfläche, die Auftauschicht bzw. auf Taliks beschränkt ist. Diese können auch mit dem Grundgestein verbunden sein, wo Wasser in weiterer Folge bei Verwerfungen eindringen kann. Wenn der Permafrost inaktiv ist kommt es zu einem Grundwasserstrom oberhalb des Permafrosts im Winter. Grundwasserstrom ist vor allem in Gebieten mit diskontinuierlichen Permafrost weit verbreitet. Abbildung 5 zeigt verschiedene Arten von wasserleitenden Schichten im Untergrund. Grob wird in Wasserströme oberhalb der Permafrosttafel (A), innerhalb des Permafrostkörper (B) und unterhalb der Permafrostbasis (C) eingeteilt. Wasserströme im C Bereich werden danach weiter nach den Eigenschaften des durchflossenen Materials bezeichnet. Zum Beispiel Kalk, Sand, Kies und Schiefer und Sandstein (FRENCH, 2007).

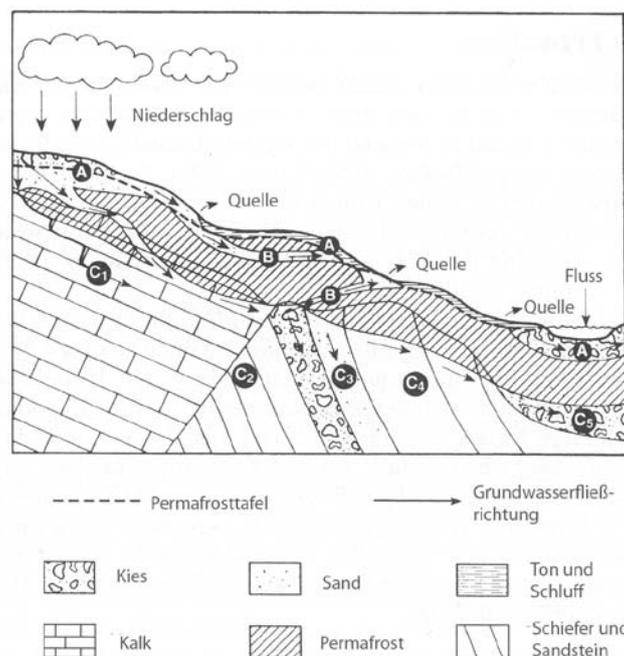


Abbildung 5: Grundwassertypen im Permafrostgebiet wobei A: Supra-Permafrost Wasser; B: Intra-Permafrost Wasser; C: Sub-Permafrost Wasser, C1: Karst Wasser in Lösungskanälen, C2: Kluftwasser in Verwerfungen; C3: Wasserleiter in porösem Fels; C4: Kluftwasser im anstehenden Gestein; C5: Wasser im Alluvialboden (Quelle: FRENCH, 2007 nach CEDERSTROM, 1953)

2.1.5 Vegetations- und Schneebedeckung

Vegetation und Schnee an der Oberfläche wirken als Isolatoren, wobei Vegetation nur vor Wärme und Schnee sowohl vor Wärme als auch vor Kälte schützt. Bei beidem ist die Art und Dicke ausschlaggebend. Bei Schnee ist zu unterscheiden ob es sich um losen Neuschnee oder eine schon verdichtete Schneesicht handelt. Die Art der Vegetation entspricht der Dichte der Vegetationsschicht und das gehaltene Wasservolumen kann darüber bestimmt werden (FRENCH, 2007).

Die Auftauschicht ist am dünnsten bei einem schlecht entwässerten, mit dichter Vegetation überwachsenen Boden. Umgekehrt ist sie auf gut drainiertem blanken Felsen bzw. Boden am dicksten. Im Gegensatz zur Vegetation ist die Schneesicht von Niederschlag und kalten Temperaturen abhängig, damit ist der Zeitpunkt des Schneefalls wichtig. Bildet sich eine Schneesicht bei Winterbeginn, so kann eine Dicke von 70 cm die Ausbildung von Permafrost verhindern, indem sie das Eindringen von Frost in den Untergrund verhindert. Umgekehrt kann das Auftauen des Bodens beim ersten Schneefall zu Winterende bis weit in den Frühling unterbunden werden, wodurch Permafrost begünstigt wird. Vegetation und Schnee sind beide von der Art und Aktivität des Reliefs abhängig. Vegetation kann sich auf einem steilen aktiven Hang nicht ausreichend ausbilden und Schnee wird aufgrund der steilen Lage in Form von Schneelawinen abgehen. Vegetation, speziell Bäume, wirkt sich auch auf die Schneesicht aus, da sie Schneefall schon vor der Bodenoberfläche abfängt und darunter eine geringere Schneedecke entsteht (FRENCH, 2007; DAMM und LANGER, 2006).

2.2 Blockgletscher

2.2.1 Definition, Zustand und Erscheinungsbild

Aktive Blockgletscher bestehen aus ganzjährig gefrorenem, nicht konsolidiertem Material und Eislinsen dessen Zwischenräume mit Eis übersättigt sind, sich aufgrund der Deformation des in ihnen enthaltenen Eises kriechend abwärts bewegen und eine loben- oder zungenförmige Form haben (BARSCH, 1996).

Diese Definition beinhaltet die Form, den Aufbau und den Zustand des Blockgletschers. Damit ein Landschaftselement als Blockgletscher definiert werden kann, muss er über einen längeren Zeitraum dieser Definition entsprechen, weswegen ein Blockgletscher ohne zusätzliches Attribut ein aktiver Blockgletscher ist. Andere Blockgletscherzustände sind

inaktiv oder reliktsch/fossil, wobei Inaktivität zwei Gründe haben kann. Entweder ist er klimatisch inaktiv, dann sind Teile des enthaltenen Eises geschmolzen, aufgrund dessen keine weitere Kriechbewegung mehr möglich ist. Bei dynamisch inaktiv hat sich der Blockgletscher zu weit vom Quellgebiet weg bewegt, wodurch veränderte Eigenschaften des Blockgletschers keine weitere Verformung mehr zulassen.

Aktive Blockgletscher bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 0,1 - 1 Meter pro Jahr (BARSCH, 1996). Das ist sehr viel schneller als sich Permafrostboden unter dem Einfluss von Gravitation kriechend bewegen kann. Permafrostboden bewegt sich zwischen 0,0003 und 0,004 Meter pro Jahr (FRENCH, 2007), wodurch sich Blockgletscher, obwohl vom Vorhandensein von Permafrostboden abhängig, kriechenden Permafrostboden "überfahren" können. An der Oberfläche der Blockgletscher sind alle Korngrößen vertreten, von Ton bis zu Blöcken, die einen Durchmesser von zig Meter haben können. Durch die Kriechbewegung entstehen oberflächlich Furchen und Rücken, die quer zur Fließrichtung verlaufen und eine Neigung zwischen 5 und 25 ° aufweisen. Die Tiefe der Furchen ist abhängig von der Korngröße, so können bei einzelnen großen Blöcken auch Schluchten entstehen. Blockgletscher erheben sich 10 - 20 Meter über das angrenzende Terrain und ihre Seiten haben einen steilen (> 35°) Winkel. Die Seiten von Blockgletschern weisen einen höheren Anteil an feinkörnigem, unverwittertem Material auf und sind meist vegetationslos. Dadurch erscheinen die Seiten von Blockgletschern auf Fernerkundungsbildern meist heller als ihre Oberfläche. Inaktive Blockgletscher können auf Fernerkundungsbildern nur sehr schwer von aktiven unterschieden werden, weswegen diese beiden Zustände unter dem Begriff intakte Blockgletscher zusammengefasst werden können. Im Gegensatz dazu ist ein reliktscher oder fossiler Blockgletscher von eingestürzten Bereichen an der Oberfläche gekennzeichnet, da das gesamte Eis innerhalb dieses Blockgletschers geschmolzen ist. Dieser Blockgletscher kann starke Vegetation aufweisen (BARSCH, 1996). Blockgletscher gehören zu den oberflächlichen Permafrost-Phänomenen, die im meso-skalischen Bereich liegen und deren Fläche größer als 0,01 km² ist (BARSCH, 1978).

Abbildung 6 zeigt einen aktiven Blockgletscher. Er liegt am Fuße der Felswand, die steile, weiße Front ist sehr gut zu erkennen. Weiters ist die oberflächliche Struktur durch hellere und dunklere Bereiche sichtbar. Die Länge beträgt ungefähr 500 Meter.

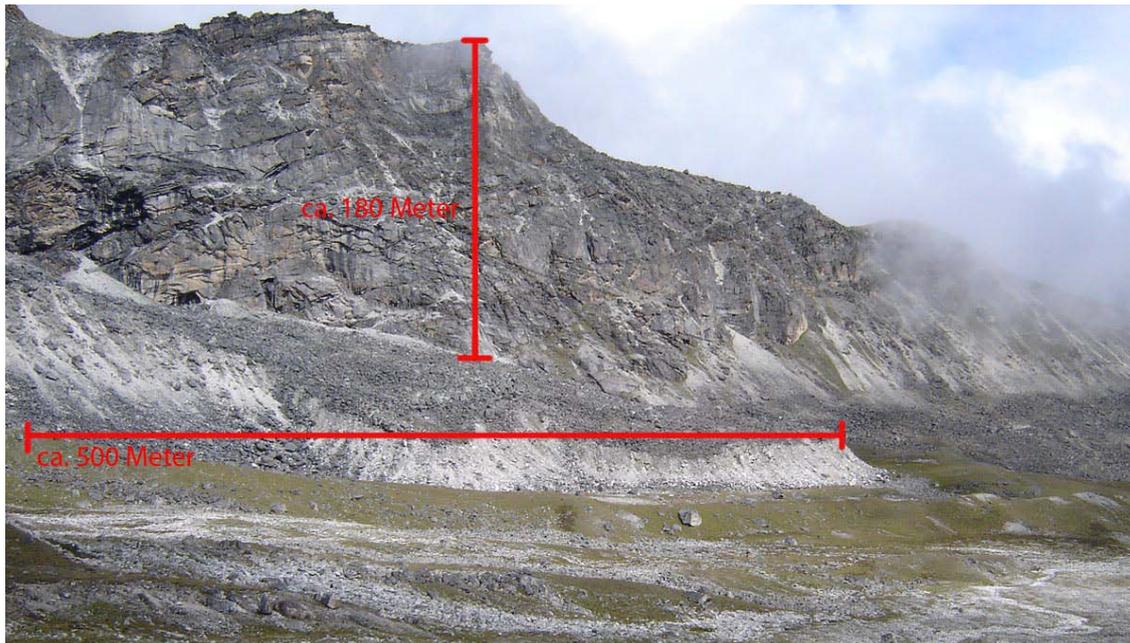


Abbildung 6: Aktiver Blockgletscher (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 09.10.2008 14:38)

2.2.2 Genese

Blockgletscher benötigen zum Wachsen einen ständigen Nachschub von Material und Wasser (Eis, Schnee). Weiters muss darunter liegender Permafrost eine Eisbildung innerhalb des Blockgletschers gewährleisten, wodurch eine Kriechbewegung zustande kommt. Deswegen sind zwei Zonen im Gebirge bevorzugt: Unterhalb von aktiven Schuttkegeln oder direkt anschließend an Gletschermoränen und wenn das Relief es zulässt kann der Eintrag auch von beiden Zonen stattfinden. Abbildung 7 stellt den Zusammenhang dar.

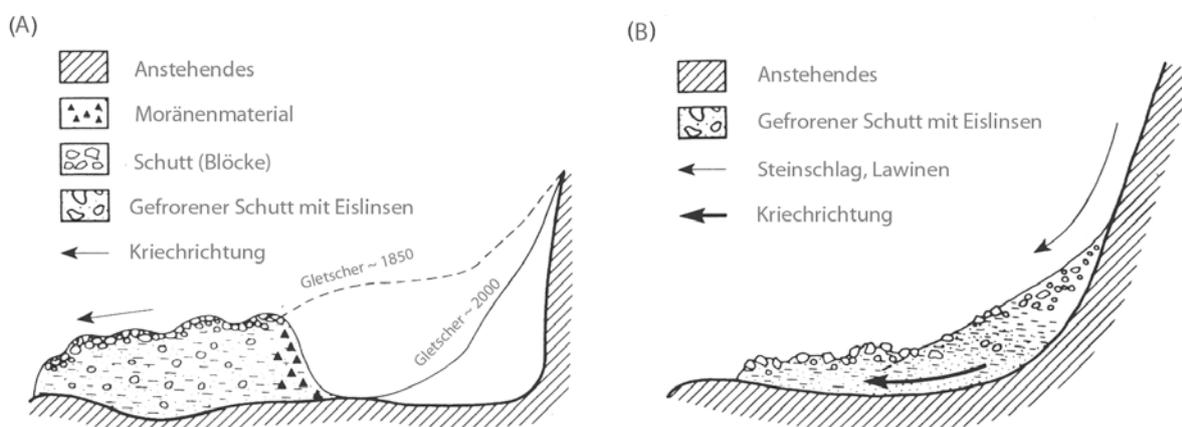


Abbildung 7: Schematische Darstellung von Materialzulieferungsgebieten von Blockgletschern. (A) Blockgletscher aus Moränenmaterial unterhalb von Gletschern; (B) Talus-Blockgletscher unterhalb von Schutthalden/Schuttkegel. (Quelle: FRENCH, 2007 nach BARSCH, 1988)

In Abbildung 7 (A) entsteht der Blockgletscher aus der Endmoräne. Die Endmoräne kann auch ein Material/Eis Gemisch sein und zusätzlich wird Wasser vom abschmelzenden Gletscher in den Blockgletscher eingebracht. Diese Art von Blockgletscher bildet meist die Form und damit den Typ "zungenförmig". In Abbildung 7 (B) wird Material über einen Schuttkegel in eine Schutthalde eingebracht, wo es sich mit Wasser vermischt, das aufgrund von Lawinen und Schneefall vorhanden ist. Das Gemenge aus Eis und Schutt ermöglicht duktilen Fließen. Diese Art von Quellgebiet führt meist zu der Form und somit zu dem Typ "lobenförmig". Eine Vorstufe davon ist der Protalus Rampart. Bei diesem ist der Hang vollständig mit Eis überzogen und der Schutt bleibt deswegen schon auf dem steilen Hang liegen. Im Laufe der Zeit wird der Schutt in den Eishang eingebracht und beginnt nach unten zu kriechen. Bei dieser Vorstufe ist noch keine eindeutige Blockgletscheroberfläche sichtbar.

Die Ausbildung von Blockgletschertypen lässt sich nicht anhand von Höhenstufen erklären. Trotzdem kommen zungenförmige Blockgletscher vermehrt in klimatischen Gunstlagen vor, wie zum Beispiel in ganzjährig abgeschatteten Bereichen.

Abbildung 8 veranschaulicht eine mögliche Abfolge von Blockgletschertypen. Bei Schuttkegeln in tieferen Lagen können keine Anzeichen von Blockgletscherbildung festgestellt werden. Als nächstes ist der Protalus Rampart sichtbar, der zwar schon Anzeichen einer Blockgletscherfront besitzt, aber noch keine typische Blockgletscheroberfläche aufweist. Es ist ersichtlich, dass eingetragener Schutt nicht mehr bis zum Rand vordringt. Die nächsten beiden Schuttkegel haben unterhalb einen vollständigen lobenförmigen Blockgletscher mit klar erkennbarer Oberfläche und Front. Der zungenförmige Blockgletscher verläuft vor dem Hang und bezieht sein Material aus der Endmoräne des Gletschers. Er hat eine größere Oberfläche und die Zungenförmigkeit ist deutlich sichtbar.

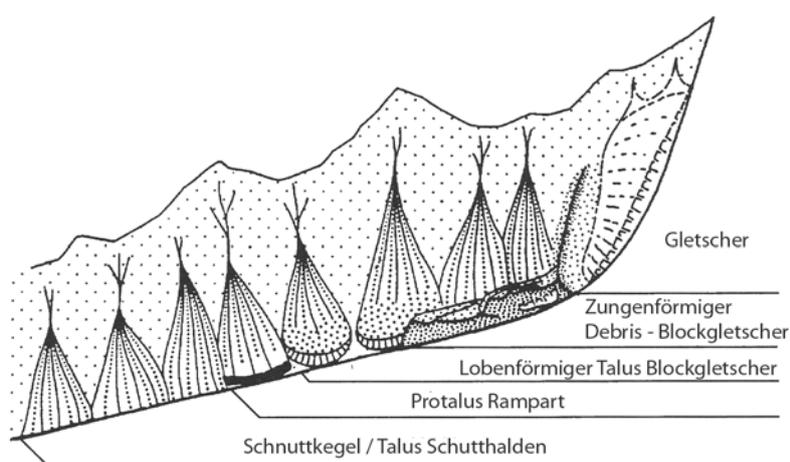


Abbildung 8: Schematische Darstellung von Blockgletschertypen in einer Abfolge. (Quelle: BARSCH, 1996 nach HÖLLERMANN, 1983)

Zungenförmige Blockgletscher unterhalb von Endmoränen konnten in den Anfängen der Blockgletscherforschung nur schwer von schuttbedeckten Gletschern unterschieden werden. Da bei Blockgletschern auch große Eisblöcke sichtbar sind, wurde postuliert, dass es sich bei Blockgletschern lediglich um schuttbedeckte (engl. debris - covered) Gletscher handelt.

Die innere Struktur eines Blockgletscher kann nur durch aufwendige und kostenintensive Verfahren, wie zum Beispiel Bohrungen, genau erforscht werden. Deswegen wurde zunächst die Herkunft der Eislinsen in Blockgletschern durch glaziale Prozesse erklärt (FRENCH, 2007). Somit wurde auch die periglaziale Genese in Frage gestellt, was dazu führte, dass Blockgletscher nicht als Indikatoren für Permafrost verwendbar waren (NYENHUIS, 2006). Untersuchungen des Aufbaus von Blockgletschern durch geophysikalische Methoden (Seismik, Geoelektrik, ...) konnten die Behauptung einer glazialen Genese nicht unterstützen, da zum Beispiel seismische Wellen in Blockgletschern andere Geschwindigkeiten aufweisen als bei echten Gletschern, weswegen gefolgert wurde, dass es sich nicht um Gletschereis handeln kann (FRENCH, 2007). Damit wird die Theorie der periglazialen Genese von Blockgletschern auf Permafrostboden erhärtet.

Ein kaltes Klima ist für die Genese von Blockgletschern Voraussetzung und somit reagieren sie auch auf Klimaänderungen. Sie reagieren schneller als Permafrost, deswegen eignen sich Blockgletscher sehr gut um Klimaänderungen festzustellen und die möglichen Auswirkungen auf den darunterliegenden Permafrost abzuschätzen. Weiters können vergangene klimatische Zustände aufgrund der Lage von klimatisch inaktiven und reliktschen Blockgletschern grob abgeschätzt werden. Blockgletscher die jetzt reliktsch sind, sind meist aus dem Pleistozän, während intakte Blockgletscher dem Holozän zugeschrieben werden (BARSCH, 1996).

2.2.3 Blockgletscherbezeichnungen

Die Abbildung 9 zeigt einen Talus - Blockgletscher. Die Länge und Breite des Blockgletschers wird über die Bewegungsrichtung definiert. So ist die Länge in Bewegungsrichtung und die Breite quer dazu. Die Länge verläuft gerade in der Mitte des Blockgletschers von der Grenze der Schutthalde bis zur Oberkante bei der Stirn. Damit wird der Wurzelbereich in die Länge mit einbezogen, nicht aber die planare (auf eine gerade Linie projizierte) Länge der Blockgletscherstirn. Die Blockgletscherstirn wird unten vom Boden

begrenzt, dessen Grenzlinie Stirnfuß genannt wird und Teillänge der Blockgletschergrenze ist. Die Blockgletschergrenze verläuft um den gesamten Blockgletscher, bis auf den Bereich des Materialeintrags. Die Breite und die Stirnhöhe können an mehreren Stellen gemessen werden. Dabei wird bei der Höhe gegen den Uhrzeigersinn und bei der Breite von der Stirn bis zum Wurzelbereich durchnummeriert. Weiters wird auch die Höhe des Wurzelbereichs angegeben um das Gefälle des Blockgletschers errechnen zu können. Der Bereich aus dem das Lithosphärenmaterial bezogen wird, wird Quellgebiet genannt.

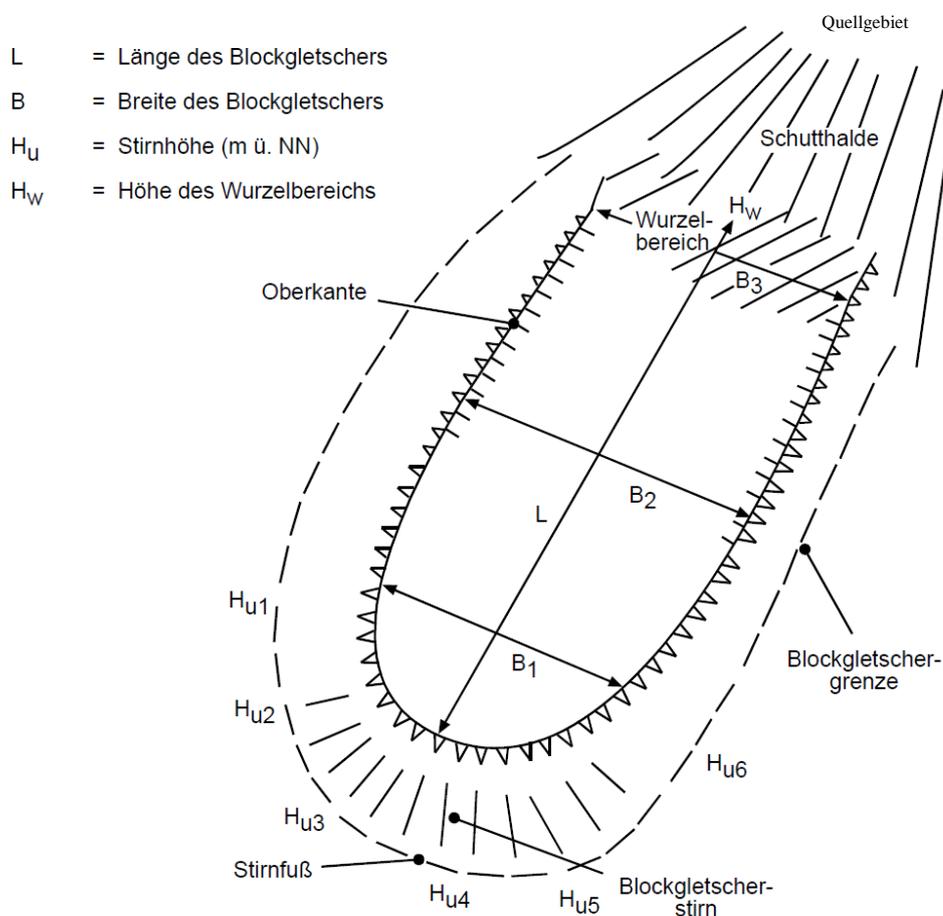


Abbildung 9: Bezeichnungen eines Talus- Blockgletschers mit der zusätzlichen Bezeichnung Quellgebiet (Quelle: NYENHUIS, 2006 nach BARSCH, 1996)

Die Unterteilung der Blockgletscherform in loben- und zungenförmig wird über das Verhältnis von Länge zu Breite (L:B) definiert. Ist das Verhältnis $L:B > 1$, so ist der Blockgletscher "zungenförmig", ist $L:B < 1$ so ist er "lobenförmig". Generell kommen lobenförmige Blockgletscher bei Talus-Schutthalden vor und zungenförmige unterhalb von Endmoränen. Jedoch können sich auch lobenförmige unterhalb kleiner Gletschermoränen

bilden. Deswegen wurde von WAHRHAFTIG und COX (1959) eine dritte Bezeichnung eingeführt, die komplex genannt wird und sich in vier Subtypen unterteilen lässt. Zusammenfassend gilt (BARSCH, 1996):

1. zungenförmig
2. lobenförmig
3. komplex
 - a. bestehend aus mehreren Blockgletschern (engl.: multipart)
 - b. aus mehreren Loben aufgebaut (engl.: multilobe)
 - c. Unterschiedliche Aktivität innerhalb eines Blockgletschers (engl.: multiunit)
 - d. Material kommt aus unterschiedlichen Quellgebieten (engl.: multiroot)

2.3 Bodentemperatur

Die Messung der Bodentemperatur hat eine lange wissenschaftliche Geschichte. Im Jahre 1880 wurden die ersten dokumentierten Messungen der Bodentemperatur im Winter durchgeführt, um die isolierende Eigenschaft von Schneebedeckung zu prüfen. Die Untersuchung fokussierte auf landwirtschaftliche Anwendbarkeit (N, 1880). THOMSON und BREMNER (1952) führten Bodentemperaturmessungen in Verbindung mit einer Bohrung im Permafrostbereich durch. Sie gaben Aufschluss über die thermische Leitfähigkeit des Untergrundes. Zusätzlich konnte die Zeitspanne des Zufrierens der Auftauschicht, sowie Temperatursignale der Außenluft in verschiedenen Tiefen festgestellt werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden die neueren Erkenntnisse der Bodentemperaturmessungen speziell für Permafrost im Hochgebirge diskutiert. Dabei wird zwischen zeitlich - punktuellen Messungen und zeitlich - kontinuierlichen Messungen unterschieden.

2.3.1 Zeitlich - punktuelle Bodentemperaturmessungen

Speziell für den Nachweis von Permafrost stellte HAEBERLI im Jahre 1973 die Messung der Grundtemperatur der winterlichen Schneedecke (engl. Bottom temperature of snow: BTS) vor. Sie nutzt die isolierende Wirkung einer durchgehenden Schneedecke auf den Untergrund, kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur können nicht mehr die Bodenoberfläche

erreichen. Dadurch wird die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke vom Wärmestrom des Untergrundes gesteuert. BTS Messungen werden durchgeführt, indem man im Winter eine Sonde durch die Schneedecke stößt und die Temperatur auf der Bodenoberfläche misst (KNEISEL und KÄÄB, 2007). Zeitgleich kann die Höhe der Schneebedeckung durch die Eindringtiefe der Bohrstange normal zur Schneeoberfläche abgelesen werden. Die Höhe der Schneedecke bestimmt die Effektivität der Isolierung der Bodentemperatur von der Lufttemperatur. Nach empirischeren Ermittlungen ist Permafrost wahrscheinlich, wenn die Messung mittels BTS-Sonde unter -3°C liegt. Zwischen -3° und -2°C ist Permafrost möglich und über -2°C ist Permafrost unwahrscheinlich (HAEBERLI ET AL., 1993).

Mit der BTS-Sonden-Methode wurde sowohl in Europa als auch in anderen Ländern die Permafrostverbreitung erhoben. In Europa ist das wichtigste Projekt davon „Permafrost and Climate in Europa“ (PACE). Viele Permafrost relevante Untersuchungen werden unter dieser Dachorganisation durchgeführt. Dabei kommen auch andere geophysikalische Messmethoden zur Anwendung, wie zum Beispiel Geoelektrik, Seismik und Bodentemperaturmessungen in Bohrlöchern in verschiedenen Tiefen. Dadurch konnte die BTS-Sonden-Methode und deren empirische Grenzwerte diskutiert werden (HARRIS ET AL., 2001; HARRIS ET AL., 2009; HAUCK ET AL., 2004). Außerhalb von Europa wird die BTS-Methode unter anderem in Japan (ISHIKAWA und HIRAKAWA, 2000), Kanada (LEWKOWICZ und EDNIE, 2004; LEWKOWICZ und BONNAVENTURE, 2008) und in Qinghai-Tibet angewendet. Wobei in Qinghai-Tibet Permafrostmonitoring nach Vorbild des PACE Projekts aufgebaut werden soll (KING ET AL., 2006).

Die BTS-Sonden-Methode wurde als kostengünstige und effektive Methode zur Kartierung der Permafrostverbreitung vorgestellt (HAEBERLI, 1973). Trotzdem ist die Schneedecke ein limitierender Faktor für ihre Anwendbarkeit. Nicht nur die Dicke, sondern auch ihre Entwicklung beeinflusst die BTS (VONDER MÜHLL, 2002; ISHIKAWA, 2003). Darüber hinaus hat die Entwicklung der Lufttemperatur einen entscheidenden Einfluss auf das thermale Bodenregime (BRENNING ET AL., 2005). KELLER (1994) und SCHROTT (1999) gehen von einer Abdämpfung der Lufttemperaturschwankung auf die BTS auf wenige Zehntelgrade aus, wenn eine Schneedecke über 0,8 m vorliegt. Nach HAUCK und VONDERMÜHLL (2003) muss eine durchgehende Schneedecke von 0,8 Meter Dicke ein Monat vor den BTS-Sonden Messungen vorliegen, damit der thermische Zustand des Untergrundes gemessen werden kann. Trotzdem können innerhalb eines Permafrostbereichs unterschiedliche BTS gemessen werden, was mit den unterschiedlichen Bodencharakteristika

des Untergrundes zusammen hängt. Diese können unter anderem unterschiedliches Lithosphärenmaterial, Korngröße und Schichtung sein (HAEBERLI ET AL., 1993; LAMBIEL und PIERACCI, 2008).

2.3.2 Zeitlich - kontinuierliche Bodentemperaturmessungen

Nach HOELZLE ET AL. (1999) können kleine Temperaturdatenlogger (engl. miniature temperature datalogger: MTD) die Messung der Basistemperatur der winterlichen Schneedecke durchführen. Diese werden an der Bodenoberfläche vor dem ersten Schneefall angebracht. Sie zeichnen, solange sie aktiv sind, die Oberflächentemperatur in der gesamten Zeitspanne auf. Sie sollten klein, robust und wasserdicht sein, damit sie Scherdruck und Schneeschmelze unbeschadet überstehen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Bodentemperatur kontinuierlich aufgezeichnet wird und man so den Temperatur- und Niederschlagsverlauf des Winters nachvollziehen kann (VONDERMÜHLL, 2002).

Die Kombination von MTD und BTS-Sonden ist eine weitere Möglichkeit um die BTS-Sonden Messergebnisse in Hinblick auf eine konstante MTD-BTS zu überprüfen (ISHIKAWA und HIRAKAWA, 2000; ETZELMÜLLER ET AL., 2001). Sobald ein MTD eine konstante Temperatur anzeigt bzw. die Temperaturschwankungen minimal sind, kann der Zeitraum als BTS-Zeitraum bezeichnet werden. Der BTS-Zeitraum wird durch alle eingesetzten MTD durch Mittelung der Temperaturwerte bestimmt, daher können einige MTD größere Temperaturschwankungen anzeigen, ohne dass sie sich auf den BTS-Zeitraum auswirken. In diesem Fall könnte die Schneedecke vereinzelt nicht hoch genug gewesen sein. Kleinräumige Luftzirkulationen mit Kontakt zur Atmosphäre könnten, trotz vorhandener Schneedecke zu MTD Temperaturschwankungen führen (NYENHUIS, 2006).

Die MTD sollten vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden und daher in Schuttpackungen (DAMM und LANGER, 2006) gelegt oder knapp (< 10 cm) unter die Oberfläche eingegraben werden. Die Temperaturmessung wird dann als Bodenoberflächentemperatur (engl. Ground Surface Temperature: GST) bezeichnet. Erst wenn die Temperatur über einen längeren Zeitraum einen konstanten Wert aufweist, kann von einem Temperaturregime des Untergrundes ausgegangen werden (vgl. GADEK und KEDZIA, 2008; HEGGEM ET AL., 2006).

2.4 Modellierung von Permafrostverbreitung

Nach ETZELMÜLLER ET AL. (2001) kann man Permafrostverbreitung durch drei Arten von Modellen im Raum errechnen:

- empirisch-statistische Modelle
- prozess-orientierte Modelle
- thermale Ausgleichsmodelle (engl. Thermal Offset Models)

In den folgenden Abschnitten werden diese Modelle erklärt, wobei der Schwerpunkt auf den empirisch-statistischen Modellen liegt. Prozess-orientierte Modelle und thermale Ausgleichsmodelle verfolgen den gleichen Ansatz (ETZELMÜLLER ET AL., 2001). Aus diesem Grund werden sie hier in einem Kapitel bearbeitet.

2.4.1 Empirisch-statistische Modellierung

Generell sind Indikatoren von Permafrost, wie Blockgletscher oder niedrige Bodentemperaturen, Punktinformationen. Deswegen wird ein Modell benötigt um räumliche Interpolation bzw. Extrapolation durchzuführen (GRUBER und HOELZLE, 2001; RISEBOROUGH ET AL., 2008). Dabei bezieht man dokumentiertes Permafrostvorkommen zu topoklimatischen Faktoren. Diese Faktoren sind unter anderem Lufttemperatur, Höhe und Sonneneinstrahlung. Sie dienen als Proxy-Variablen um die Beziehung zwischen vorherrschendem Klima und Permafrostverbreitung zu vereinfachen. Permafrostverbreitung wird somit durch empirische und statistischen Daten modelliert (STOCKER-MITTAZ ET AL., 2002).

Nach NYENHUIS (2006) stellte BARSCH (1978) die Möglichkeit vor die Permafrostverbreitung aufgrund der Seehöhe von Blockgletschern zu eruieren. Dabei stellt der Mittelwert der Stirnhöhe aller intakten Blockgletscher in einem Gebiet, die Untergrenze des kontinuierlichen Permafrosts dar. Weiters wird zwischen den einzelnen Expositionen differenziert, wodurch für jede Exposition mindestens ein intakter Blockgletscher vorhanden sein sollte. NYENHUIS (2006) entwickelte das Modell weiter und benannte es ROGMOD.

Das erste automatisierte Verfahren um Permafrostverbreitung zu modellieren, stellte KELLER (1992) vor. Es wird PERMAKART genannt und basiert auf der GIS Plattform ARC/INFO der Firma ESRI. Es beruhte auf empirisch ermittelten Grenzwerten, die von

HAEBERLI (1975) aus der Permafrostverbreitung des "Flüelapass" (Schweiz) abgeleitet wurden. Im Allgemeinen basieren sie auf Seehöhenwerte in Abhängigkeit von der jeweiligen Exposition. Als Input wird ein digitales Höhenmodell (engl. Digital Elevation Model: DEM) des jeweiligen zu untersuchenden Gebiets benötigt. Unter Anwendung der Grenzwerte von HAEBERLI (1975) erfolgt die automatische Berechnung der Permafrostverbreitung. Von IMHOF (1996) wurde dieses Programm unter der Bezeichnung PERM auf die Raster-basierte GIS Plattform IDRISI übertragen (EBOHON und SCHROTT, 2008).

Die Methode des Programms PERMAMAP wurde von HOELZLE (1992) vorgestellt. Der statistisch-empirische Zusammenhang zwischen gemessener BTS und MAAT und direkter kurzweiliger Sonneneinstrahlung wird anhand einer linearen Regression berechnet. Die Koeffizienten der Regressionsgleichung werden anschließend für räumliche Extrapolation der BTS verwendet. Daraus lässt sich die Permafrostverbreitung unter Anwendung der von HAEBERLI (1973) vorgestellten Grenzwerte ableiten. In einer späteren Studie von GRUBER und HOELZLE (2001) wurden weitere Faktoren, wie Vegetation, in die Regressionsanalyse aufgenommen.

PERMAMOD wurde von FRAUENFELDER (1998) vorgestellt. Zusätzlich zu den von HAEBERLI (1975) vorgestellten Grenzwerten werden weitere topoklimatische und biogeographische Faktoren berücksichtigt. Ein Beispiel dafür wäre der Standort Blockgletscher als Indikator für lokalen Permafrost.

Damit teilt sich das empirisch-statistische Verfahren in zwei Vorgänge. Erstens wird eine Beziehung zwischen punktförmigen Permafrostindikatoren in einem Gebiet und Proxy-Variablen hergestellt. Punktförmige Permafrostindikatoren können zum Beispiel BTS Messungen oder Blockgletscher sein. Im zweiten Teil wird diese Beziehung genutzt um das Permafrostvorkommen im gesamten Gebiet zu modellieren.

BRENNING ET AL. (2005) analysierten speziell für das PERMAMAP Verfahren den ersten Vorgang anhand einer Permafrostkartierung mit 451 BTS-Sonden-Daten von GRUBER und HOELZLE (2001). Aufgrund des Terrains ist die Anzahl der BTS Punkte nach Exposition meist ungleich verteilt. Das bedeutet, dass gewisse Expositionsklassen (z.B.: Nord) in der Regressionsanalyse übergewichtet sind. Daher sollten BTS Punkte nach Exposition unterschiedlich gewichtet werden. Weiters treten BTS Messungen clusterartig mit einem Radius von 50 zu 100 Meter auf oder folgen Konturlinien. In diesem Fall könnten Clustermittelwerte für weitere Berechnungen sinnvoll sein. Wenn mehrere BTS Messungen innerhalb ein paar Metern Umkreis genommen wurden, sollten diese zusammengefasst

werden. Sie stellen unterschiedliche Messungen der gleichen Variable dar. Weiters sollten BTS Messungen gleichverteilt im kontinuierlichen, diskontinuierlichen und sporadischen Permafrost durchgeführt werden. Damit könnte die Modellqualität gesteigert werden (BRENNING ET AL., 2005).

2.4.2 Prozess-orientierte Modellierung

STOCKER-MITTAZ ET AL. (2002) stellten das Modell PERMABAL vor, das aus zwei Modulen besteht. Das Erste simuliert Energieflüsse zwischen Atmosphäre und Bodenoberfläche, wie Strahlung, sensible Wärme, fühlbare Wärme, Schneeschmelzenergie und Schneevertelung. In weiterer Folge wird die Bodenoberflächentemperatur berechnet. Das zweite Modul besteht aus einem thermischen Ausgleichsmodell und berechnet Wärmeflüsse des Untergrundes. Beide Module berechnen nur in vertikaler Richtung.

GUGLIELIM ET AL. (2003) stellten das Modell PERMACLIM vor. Bei diesem Programm wurden zusätzlich zur Lufttemperatur, Schneehöhe und Seehöhe die Komponente Sensible Wärme von der Energiebilanzgleichung der Bodenoberfläche berücksichtigt.

Prozess-orientierte Modelle benötigen eine große Anzahl von präzise gemessenen Daten (ETZELMÜLLER ET AL., 2001), die oft nicht vorhanden sind (RISEBOROUGHT ET AL., 2008). Prinzipiell fokussieren prozess-orientierte Modelle auf einem erhöhten Verständnis der Komplexität der Wärmeflüsse im Untersuchungsgebiet. Das ermöglicht eine Extrapolation der Permafrostverbreitung in die Zukunft, wo Interaktionen und Rückkoppelungseffekte besser simuliert werden können (RISEBOROUGHT ET AL., 2008).

2.5 Klimaänderungen

In diesem Kapitel werden zukünftige Klimaänderungen diskutiert. Es gliedert sich in die Diskussion von Szenarien und Temperaturmodellen.

2.5.1 Szenarien

Nach dem vom IPCC herausgegebenen Assessment Report 2004 (AR4) ist es sehr wahrscheinlich, dass es in Zukunft Klimaänderungen mit starken Auswirkungen geben wird.

Klimawandelszenarien werden über die zukünftige Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre modelliert. Dabei wird die zukünftige Treibhausgaskonzentration aufgrund von vergangenen Beobachtungen extrapoliert. Die verwendeten Parameter beschränken sich auf sozioökonomische Variablen. Treibhausgase haben einen Effekt auf die Strahlungsbilanz, der grundsätzlich zu einer Erwärmung des Klimas führt. Variationen, wie zum Beispiel Vulkanausbrüche, sind in diesen Modellierungen nicht enthalten. Es gibt verschiedene Szenarien, die im Special Report of Emission Scenarios (SRES) publiziert sind. Sie unterscheiden sich marginal bis stark, sowohl bei den angenommen zukünftigen Emissionen als auch bei der Sensitivität der Klimaparameter. Überprüft werden sie durch eine Modellierung in die Vergangenheit um die Effizienz und Treffergenauigkeit mit beobachteten Werten zu vergleichen (IPCC, 2007c). Abbildung 10 zeigt den Anstieg der Emissionen nach Szenario von SRES im Vergleich zu den Ausstößen im Jahr 2000. Im Jahr 2000 ist die Summe aller Emissionen im Equivalent von CO₂ 40 Giga-Tonnen pro Jahr. Davon nimmt den Hauptteil CO₂ ein. Im Jahr 2030 ist die Summe immer größer als 2000, während im Jahr 2100 einige Szenarien (A1T, B1) einen Rückgang des jährlichen Ausstoßes angeben. Die durchschnittliche globale Klimaerwärmung wird, je nach Szenario im Vergleich von der durchschnittlichen Temperatur von 1980 - 1999 und der modellierten durchschnittlichen Temperatur von 2090 – 2099, berechnet. Zusätzlich ist die Unsicherheitsbandbreite angegeben, wobei einige Szenarien nur anthropogen bedingte Faktoren berücksichtigen und andere auch umweltsystembedingte Rückkoppelungseffekte einberechnet haben (IPCC, 2007b).

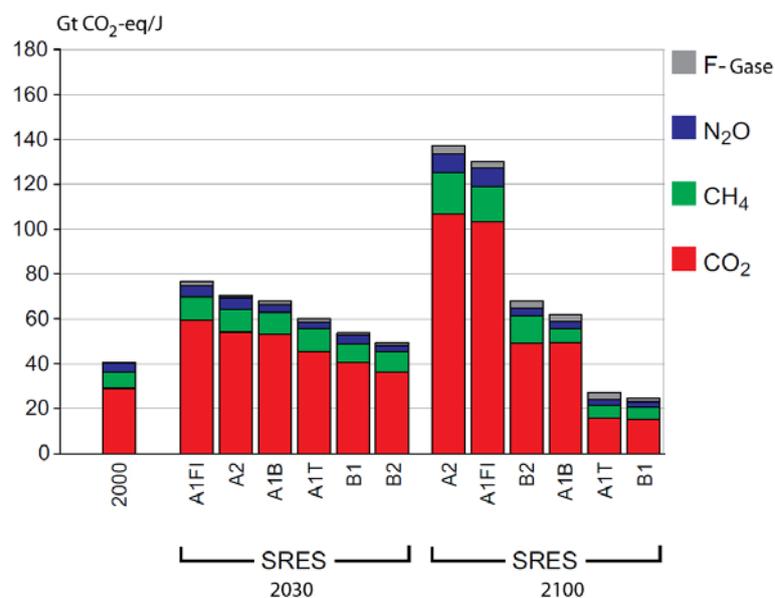


Abbildung 10: Globale Emissionen von Treibhausgasen nach SRES und Frequenz - Verbreitung (F-Gase sind HFCs, PFCs und SF₆) (Nach: IPCC, 2007b)

Szenario A1 beschreibt ein globales wirtschaftliches Wachstum mit einem starken Bevölkerungszuwachs bis 2050, bei dem viele neue Technologien entwickelt werden. Grundsätzlich wird von einem Ausgleich zwischen armen und reichen Schichten und Regionen ausgegangen. Weitere Gruppen beinhalten die Art der entwickelten Technologie und darauf basierende Energiequellen: A1FI nutzt stark fossile Energie, A1T kommt ohne sie aus und A1B besitzt viele unterschiedliche Energiequellen, die gleichermaßen zur Entwicklung beitragen.

Szenario A2 beschreibt eine Weiterentwicklung ohne Ausgleich, da lokale Identitäten ihre Eigenständigkeit behalten. Ökonomisches Wachstum ist von Region zu Region unterschiedlich und die Weltbevölkerung steigt kontinuierlich an.

Szenario B1 beschreibt das gleiche Bevölkerungsverhalten wie in Szenario A1, unterscheidet sich aber durch die Entwicklung zu einer Informationsgesellschaft, die weniger Rohstoffe benötigt und effiziente, wieder verwertbare Technologien verwendet. Trotzdem werden keine weiteren Klima relevanten Eingriffe in das Ökosystem gemacht.

Szenario B2 beschreibt eine Welt ähnlich von Szenario A2, nur dass Wachstum und Weiterentwicklung sehr viel langsamer geschieht. Grundsätzlich wird hier von einer Strategie die Umwelt zu bewahren und sozialer Fairness ausgegangen, was aber auf regionale Basis fokussiert wird. (IPCC, 2007b)

2.5.2 Temperaturmodelle

Nachfolgend werden die einzelnen Szenarien mit Temperaturwerten und deren Bandbreite in Beziehung gesetzt:

- B1: +1.8°C (1.1°C bis 2.9°C)
- B2: +2.4°C (1.4°C bis 3.8°C)
- A1B: +2.8°C (1.7°C bis 4.4°C)
- A1T: +2.4°C (1.4°C bis 3.8°C)
- A2: +3.4°C (2.0°C bis 5.4°C)
- A1FI: +4.0°C (2.4°C bis 6.4°C)

(Quelle: IPCC, 2007c)

Klimaänderungen sind regional sehr unterschiedlich. Abbildung 11 zeigt die für Asien modellierte Temperaturänderung nach dem A1B-Szenario. Das Modell wurde vom Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) durch die Multi-Model Data (MMD) erstellt. Die Temperaturwerte sind das durchschnittliche Ergebnis von 21 unterschiedlichen Modellierungen. Es lässt sich erkennen, dass grundsätzlich die Landmasse eine höhere Temperaturänderung erfahren wird, als die Meeresoberfläche. In den Sommermonaten ist der Temperaturanstieg am höchsten und im Winter am niedrigsten. Im

Jahresdurchschnitt sind die hohen Breiten am stärksten betroffen, während die niederen Breiten mit weniger Temperaturanstieg zu rechnen haben. Die Gebirge des Himalajas bilden eine Wärmeinsel, die im Jahresdurchschnitt am deutlichsten erkennbar ist, aber auch in den Wintermonaten, wo das Hochplateau von Tibet vollständig erfasst ist. Im Sommer ist ein Temperaturanstieg zu den westlichen Ausläufern des Himalajas zu erkennen, speziell im Mt. Everest Gebiet. Nach diesem Modell wird dem Himalaja ein Temperaturanstieg von 3,5 - 4,0 °C zugeschrieben (IPCC, 2007c). Das würde einen Temperaturanstieg pro Jahr von 0,035 bis 0,040 °C pro Jahr ausmachen.

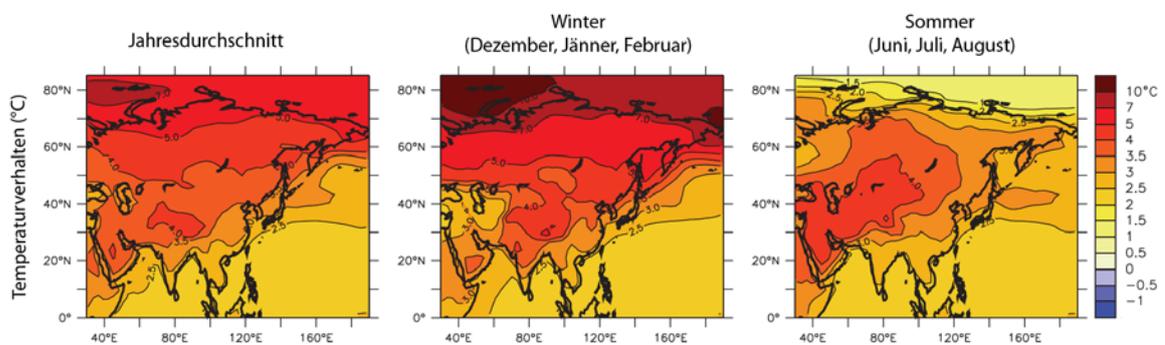


Abbildung 11: Temperaturänderung nach Region von 1980 - 1999 und 2080 -2099 nach dem A1B - Szenarium. Modellierung durch MMD. (Nach: IPCC, 2007c)

Tabelle 1 gibt den Durchschnitt des Temperaturanstiegs für den Bereich Südasien an, aufgespalten sowohl nach Untersuchungszeitraum als auch nach Szenario. Man erkennt, dass A1FI einen starken Anstieg von 4,5 °C aufweist, was sich mit obigem Diagramm deckt. Der Anstieg bei B1 beläuft sich nur auf 2,34 °C in 90 Jahren. Bis 2040 ist bei beiden Szenarien der Anstieg unter 1 °C, wobei für Winter und Frühling ein Anstieg von bis zu 1,18 °C erwartet wird. Bis 2099 ist der jährliche durchschnittliche Anstieg 0,05 °C (A1FI) und 0,026 °C (B1) (IPCC, 2007c).

Szenario	2010 bis 2039		2040 bis 2069		2070 bis 2099	
	A1FI	B1	A1FI	B1	A1FI	B1
Winter	1,17	1,11	3,16	1,97	5,44	2,93
Frühling	1,18	1,07	2,97	1,81	5,22	2,71
Sommer	0,54	0,55	1,71	0,88	3,14	1,56
Herbst	0,78	0,83	2,41	1,49	4,19	2,17
Durchschnitt	0,92	0,89	2,56	1,54	4,50	2,34

Tabelle 1: Temperaturanstieg nach Szenario und Jahr in Südasien; Breite: 5N-30N, Länge: 65E-100E; Angaben in °C (Nach: IPCC, 2007a)

Nach PARK (2010) gab es für China in den letzten 50 Jahren einen Temperaturanstieg von 0,022 °C pro Jahr und die Temperatur wird Ende des Jahrhunderts um 2,2 - 3,0 °C ansteigen. Speziell für das Himalajagebirge hat BHUTIYANI (2010) einen Anstieg von 0,011 °C pro Jahr für die vergangene Zeitspanne von 1876 bis 2006 publiziert. IPCC (2007a) gibt für das Land Nepal einen vergangenen Temperaturanstieg von 0,09 °C pro Jahr an.

2.6 Forschungsarbeit in Nepal

Die vorangegangenen Kapitel haben den Wissensstand zusammengefasst. Dieser ist das Produkt aus vielen Jahrzehnten Forschungsarbeit, zumeist aus Europa, Kanada, Russland und China.

Nach JAKOB (1992) haben FUJI und HIGUCHI im Jahre 1976 Bodentemperaturmessungen in Ostnepal (Khumbu) durchgeführt. Die Ergebnisse decken sich mit geophysikalischen Untersuchungsmethoden (Refraktionsseismik) in Bereichen von Blockgletschern. Diese wurden von JAKOB (1992) im Zuge der Feststellung der unteren Höhengrenze von diskontinuierlichem Permafrost in diesem Gebiet durchgeführt und zwischen 5560 und 5360 Meter für Südost- und von 4959 bis 5050 Meter Seehöhe für Westexposition beziffert. Eine weitere Studie in diesem Gebiet von BARSCH und JAKOB (1998) widmete sich dem Massentransport von Blockgletschern. Dabei wurde wiederum Refraktionsseismik verwendet, um die Höhengrenze des diskontinuierlichen Permafrosts zu ermitteln. Diese wurde mit 5400 bis 5500 Meter für Süd- und um 5150 Meter Seehöhe für West- und Ostexposition angegeben.

ISHIKAWA ET AL. (2001) führten in Ostnepal (Kanchanjunga) Permafrostuntersuchungen über den Indikator Blockgletscher durch. Weiters setzten sie die Blockgletscherstandorte mit der MAAT und dem Niederschlag in diesem Gebiet in Beziehung. Das Ergebnis ist, dass das Limit diskontinuierlichen Permafrosts bei Süd- bis Westexposition ungefähr 5300 und bei Nordexposition 4800 Meter Seehöhe beträgt. Weiters geben sie an, dass es einen Unterschied der Blockgletscherhöhen zwischen diesem Gebiet und weiter westlichen Gebieten gibt.

REGMI (2008) führte eine Studie mit fünf Untersuchungsgebieten, verteilt in Nepal durch. Blockgletscher wurden über Luftbilder identifiziert und anschließend in drei Untersuchungsgebieten überprüft. Danach wurde die Verteilung statistisch ausgewertet. Damit konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Seehöhe der Blockgletscherstandorte

von Osten nach Westen abnimmt. Intakte und reliktsche Blockgletscher kommen in Ostnepal (Khumbu) zwischen einer Seehöhe von 4440 bis 5400 Metern Seehöhe vor.

Obwohl in Nepal schon einige Arbeiten durchgeführt wurden, bieten sich noch intensivere Forschungsarbeiten an. Zuerst sollten grundlegende Studien durchgeführt werden, bei denen mehrere Methoden angewendet werden. Angepasst an vorhandene Ressourcen sollen diese grundlegende Fragstellungen lösen können. In Nepal ist Forschungsarbeit auf der fünften Hierarchiestufe nach dem PACE Projekt möglich. In dieser Stufe werden BTS Daten erhoben und über Fernerkundungsbilder Permafrostverbreitung abgeleitet (HARRIS ET AL., 2001). Erst wenn diese Arbeit auf viele andere noch unerforschte Gebiete ausgedehnt wird, können Hot Spots im Sinne der ersten Hierarchie nach dem PACE Projekt eingerichtet werden. In dieser Stufe werden unter anderem 100 Meter tiefe Bohrlöcher angelegt, um Permafrost zu erforschen (HARRIS ET AL., 2001).

3 Statistische Analyse des Untersuchungsgebiets

3.1 Datengrundlagen

Die Bearbeitung raumbezogener Daten wird zum Großteil in dem Programm ArcGIS 9.3 der Firma ESRI durchgeführt. Das ist ein Programmpaket, das unter anderem aus ArcMap und ArcCatalog, sowie aus Bearbeitungsrouninen besteht. Diese, auch Extensions genannt, sind in ArcGIS teilweise integriert, bzw. müssen zusätzlich erworben werden. Davon stehen in ArcGIS der „3D Analyst“ und der „Spatial Analyst“ zur Verfügung. In SPSS Inc. und Microsoft Excel werden Daten bearbeitet, wo der Raumbezug in die Analyse nicht einbezogen wird. MTD können über das Programm HoboWare 2.7.3 der Firma ONSET programmiert und ausgelesen werden.

Als primäre Datengrundlage dient ein DEM. Es hat eine Auflösung von 30 Meter pro Höhenwert/Pixel und wurde von der Homepage der National Aeronautics and Space Administration (NASA) heruntergeladen und deckt das gesamte Untersuchungsgebiet ab.

Nach KÄÄB (2008) kann diese Datengrundlage in Bereichen mit großer Seehöhe und steilen Bergketten Datenlöcher und teilweise Fehler aufweisen. Aufgrund des Fehlens eines vergleichenden Datensatzes ist eine externe Fehlerabschätzung nicht möglich. Nach KÄÄB (2008) liegt die vertikale Genauigkeit bei einigen Metern und die horizontale Genauigkeit bei Zehner Metern.

Aus diesem DEM wurden Derivate durch ArcGIS 3D Analyst Routinen errechnet. Diese sind: Schummerungskarte, Neigungskarte und Expositions-karte. In der folgenden Analyse werden diese Derivate für weitere aufbauende Berechnungen verwendet. Zusammenfassend werden diese Daten als NASA Astar angesprochen. Die Auflösung der Derivate aus dem NASA DEM beträgt bestenfalls 30 Meter. Das NASA DEM hat als Referenzsystem das World Geodetic System von 1984 (WGS84). Es ist ein sphärisches und erdumspannendes System, dessen Standorte in Längen- und Breitengrad angegeben werden. Damit sind GPS-Daten, die im WGS84 liegen problemlos einspiel- und interpretierbar.

Von der Kathmandu Universität (KU) wurde ein Datensatz über das Untersuchungsgebiet postalisch zugesendet, der folgendes Datenmaterial enthielt:

- Rasterbasiertes digitales Satellitenbild mit 4 spektralen Kanälen (teilweise Abdeckung des Untersuchungsgebiets)
- Analoges Graustufen Orthofoto (teilweise Abdeckung des Untersuchungsgebiets)
- Rasterbasiertes DEM (Auflösung 10 Meter)
- Vektorbasiertes Gewässernetz
- Vektorbasiertes Seennetz
- Vektorbasierte Gletscherausdehnung
- Vektorbasierte Abgrenzung des Untersuchungsgebiets

Beim gesamtem Datenmaterial wurden fast keine Metainformationen mitgeliefert. So ist auch kein Referenzsystem angegeben, weswegen sie in das Referenzsystem der Primärdaten der NASA, dem WGS84 eingefügt wurden. Hierbei wurden die ArcGIS Routinen „Project“ und „Project Raster“ verwendet, bzw. konnten durch das ArcGIS Tool „Georeferencing“ auch Daten ohne Referenzsystem manuell verortet werden. Um das analoge Orthofoto in ArcGIS zu verwenden, wurde es zuerst mit einem CanonScan 4500F mit einer Auflösung von 600 Punkten pro Inch (engl. dots per inch: dpi) eingescannt und anschließend durch das ArcGIS Tool „Georeferencing“ verortet. Die Verortungen wurden durch markante Punkte im NASA DEM durchgeführt, wodurch die bestmögliche Standortgenauigkeit bei 30 Meter liegt. Diese kann aufgrund der verwendeten Algorithmen des Referenzierungstools von ArcGIS lokal stark variieren. Vektordaten werden zum Teil durch den ArcCatalog in der ArcGIS internen Verwaltungsdatenbank "File Geodatabase" abgespeichert. Innerhalb der "File Geodatabase" ist die Erstellung eines "Feature Data Set" notwendig, da es grundlegende Informationen über das verwendete Referenzsystem enthält. Es wurde FDS-WGS84 genannt. Darin werden die Geodaten als "Feature Class" abgespeichert. Außerhalb der "File Geodatabase" können Geodaten als Vektorfile mit der Endung Shape (*.shp) abgespeichert werden. In ArcGIS ist es möglich mit beiden Arten gleichzeitig zu arbeiten. Rasterdaten benötigen keine besondere Hierarchie bzw. Abspeicherungsstruktur, jedoch wird in Anlehnung an die automatische Verarbeitung in ArcGIS das Format GRID bevorzugt.

Des weiteren wurden Rohdaten der Wetterstation "Khumbu" in der Region Sagarmatha Nationalpark durch digitale Zusendung (email) zur Verfügung gestellt. Sie beinhalten Temperaturdaten von 1987 bis 2005. Die Wetterstation liegt in einer Seehöhe von 4355 Meter.

3.2 Vorarbeit

Um eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet zu erhalten, wurden die aus dem NASA DEM errechneten Derivate verwendet. Die Exposition wurde in 4 Klassen zu je 90° eingeteilt. Zum Beispiel ist Nord von 0 – 45 ° und 316 – 359 ° und die Ostexposition geht von 46 – 135 °.

Die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes zu anderen Gebieten wurde halbautomatisch in Anlehnung an die vorgegebene Abgrenzung der Daten der KU durchgeführt. Die Abgrenzung erfolgte durch das Heranziehen von großen Wasserscheiden und geomorphologischen Merkmalen, wie zum Beispiel der Noghumba Gletscherzunge. Wasserscheiden wurden automatisch berechnet und geomorphologische Merkmale unter Verwendung des Satellitenbildes und des Orthofotos manuell abgegrenzt. Für die automatische Berechnung wurde die Extension „Spatial Analyst“ mit dem Tool-Konvolut „Hydrology“ eingesetzt. Manuell wurde mit dem ArcGIS „Editor“ gearbeitet. Um eine vektorbasierte Darstellungsform zu erreichen wurden Ergebnisse im Rasterformat durch das Tool Conversions: Raster to Polygon in eine vektorbasierte Form übertragen und weiterverarbeitet. Die Auflösung des Endprodukts beträgt, obwohl in der Vektorgraphik ein verlustfreier Zoom möglich ist, 30 Meter und die Genauigkeit richtet sich nach dem NASA DEM.

Für die Unterteilung des Untersuchungsgebiets wurden die Wasserscheiden innerhalb des Untersuchungsgebiets herangezogen. In Bereichen, wo eine automatische Zuteilung nur beschränkt möglich ist, wurden geomorphologische Merkmale herangezogen. Die Grenzen wurden wiederum durch das Tool-Konvolut: Hydrology und den ArcGIS „Editor“ festgelegt und mit dem ArcGIS Conversion Tool in ein vektorbasiertes Format übertragen.

Alle aus dem DEM errechneten bzw. digitalisierten Daten sind im Referenzsystem WGS84 und stellen keine projizierten Daten dar, die aus anderen Systemen durch Approximationsalgorithmen übertragen werden müssten.

Um die MAAT im Untersuchungsgebiet darstellen zu können wurden die Rohdaten der Wetterstation aufbereitet. Danach konnte durch Mittelung aller Temperaturwerte die MAAT berechnet werden. Nach REGMI und WATANABE (2005) beträgt der feuchtadiabatische Temperaturgradient in der Kangchenjunga Region (ca. 130 km östlich vom Untersuchungsgebiet) 0,49 ° C pro 100 Meter Seehöhe. Er wurde zwischen zwei Stationen berechnet, die zeitgleich ein Jahr die Temperatur gemessen haben. Eine liegt tiefer (4755 Höhenmeter) und eine höher (6012 Höhenmeter) als das Untersuchungsgebiet. Dieser

Gradient wurde verwendet, um durch das NASA DEM die MAAT der Station Khumbu auf MAAT-Isolinien im Untersuchungsgebiet zu übertragen. Dafür wurde der Raster Calculator in der Extension „Spatial Analyst“ verwendet.

Die Ergebnisse wurden in ArcGIS visualisiert und Diagramme der statistischen Analyse in MS Excel erstellt. Dafür wurden DEM, Exposition und Hangneigung mit dem Zonal Statistics Tool im "Spatial Analyst" analysiert und nach MS Excel exportiert. Unterteilt wurde nach den Teilgebieten im Untersuchungsgebiet.

4 Das Untersuchungsgebiet

4.1 Großräumliche Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt im Himalajagebirge im Staat Nepal im Sagarmatha National Park. Abbildung 12 veranschaulicht die politischen Grenzen in Asien und gibt einen Überblick über die Ausdehnung des Himalajagebirges. Das zu untersuchende Gebiet liegt innerhalb des roten Kästchens. Es befindet sich im Osten Nepals nahe der Grenze zu China.



Abbildung 12: Überblickskarte Asien - Lage des Untersuchungsgebiets innerhalb des roten Kästchens (Datengrundlage: http://weltkarten-landkarten.com/la/asien/volksrepublik-china/Map_of_China_28physical29.png Zugriff: 18.10.2010; Karte als "Public Domain" ausgeschrieben siehe <http://www.weltkarten-landkarten.com/html/impressum.php> Unterpunkt "Kartenmaterial und Texte" Zugriff: 18.10.2010)

4.2 Großklimatische Verhältnisse

Der Südasien Monsun, der vom indischen Ozean kommt, hat den größten klimatischen Einfluss auf die Region. Der höchste Niederschlag fällt im Sommer zwischen Mai und Mitte September. In dieser Zeit fällt der meiste Regen zwischen 5000 und 7000 Meter Seehöhe (HAMBREY ET AL., 2008). In Namche Bazar (Sagarmatha National Park, 3450 Höhenmeter) ist der durchschnittliche jährliche Niederschlag 1052 mm. Die MAAT ist 6,5 °C

und die Schneegrenze variiert zwischen 5600 und 5800 Meter Seehöhe (BÄUMLER, 2004). BARSCH und JAKOB (1998) gaben einen jährlichen Niederschlag im Höhenbereich des Untersuchungsgebiets zwischen 400 und 500 mm an. Diese Menge ist für eine Bergkette in den Subtropen, die vom Monsun beeinflusst ist, sehr niedrig. Erklärbar ist sie durch ausgeprägten Regenschatten über einer Seehöhe von 4000 Metern. Im ungefähr 150 km entfernten Kathmandu (1337 Meter Seehöhe) ist der durchschnittliche jährliche Niederschlag 1427 mm und die MAAT beträgt 18,7 ° C (SCHÖNWIESE, 2003).

4.3 Geologie

Das Untersuchungsgebiet liegt an der Grenze der großgeologischen Zone der Tethys (engl. Tethyan Zone) und des Höheren Himalajas (eng. High Himalaya) (SEARLE ET AL., 2003). Bei STÖCKLING (1980) wurde noch eine Sedimentäre Zone, aus dem die höheren Berge (z. B.: Mt. Everest) bestehen, der Zone des Höheren Himalajas hinzugezählt.

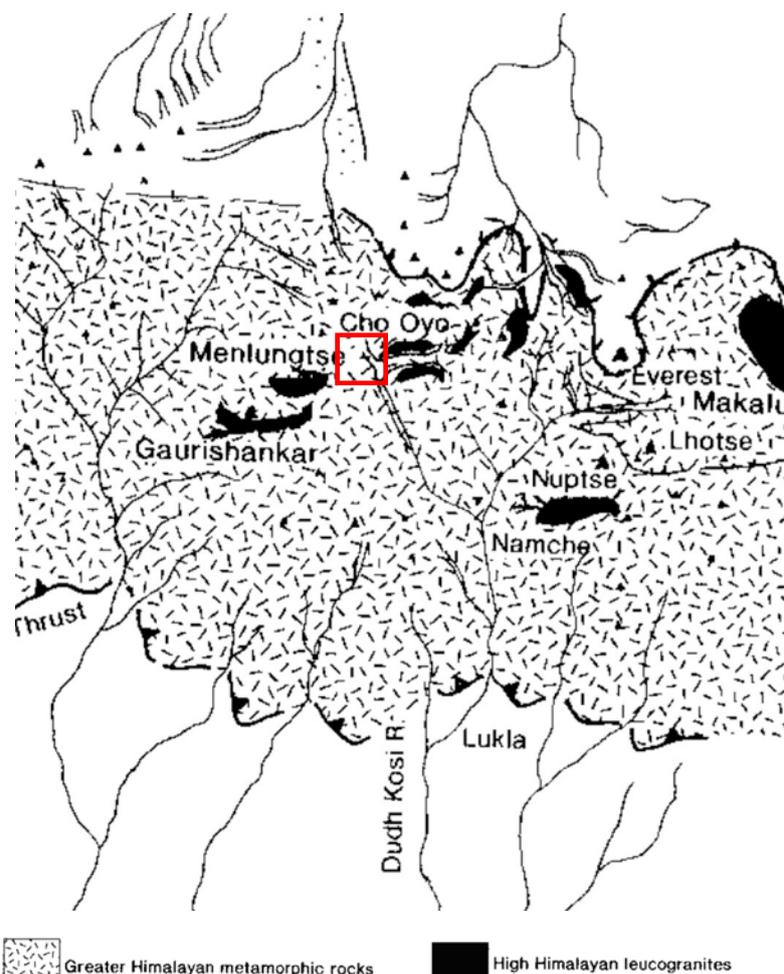


Abbildung 13: Höhere Himalaja Zone im Großraum des Untersuchungsgebiets; Rotes Kästchen zeigt die ungefähre Lage des Untersuchungsgebiets (Ausschnittsquelle: SEARLE, 1999)

Die Zone des höheren Himalajas bestehen zum Großteil aus Gneis, einem metamorphen Gestein, und Graniten, welche zu den Plutoniten gezählt werden (ZEPP, 2004). In Abbildung 13 werden diese mit ihren Gesteinen in Beziehung gesetzt. Man erkennt, dass das Untersuchungsgebiet aus Umwandlungsgesteinen besteht und nur einige Gebiete dem Leukogranit zugezählt werden (JESSUP ET AL., 2008; SEARLE, 1999).

4.4 Geomorphologie

Die Region des Untersuchungsgebiets beinhaltet eine große Vielfalt von geomorphologischen Erscheinungen. Über 6000 Meter Seehöhe ist eine Zone mit sehr steilem Relief, bei deren Wänden es häufig zu Steinschlag und Schneelawinenabgängen kommt. Steinschlag ist in jeder Größenordnung vorhanden, von kleineren Steinen, die aus der Felswand herausfallen, bis zu massiven Abgängen, bei denen sich große Bereiche einer Felswand lösen (HAMBREY ET AL., 2008). In niederen Bereichen des Untersuchungsgebiets sind große Gletscherzungen anzutreffen, die meist mit Schutt bedeckt sind, sowie große Bereiche von abgelagertem Material, das schon Vegetation aufweist.

4.5 Abgrenzung und Höhenlage

Abbildung 14 gibt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet und dessen Teilgebiete. Es setzt sich aus 6 getrennten Gebieten zusammen, die jeweils ein Seitental westlich der Nodzumba Gletscherzunge darstellen. Bei Teilgebiet 3 und 4 ist die Nordseite der Täler stark abgeflacht, was dazu führt, dass sich kleinere Tälchen gebildet haben. Diese Tälchen weisen West- und Ostexposition auf ihren Seiten auf, während der Tälchenboden südexponiert ist. Der nächste hohe Berg, außerhalb des Untersuchungsgebiets, ist der Cho Oyo/Cho Oyu mit einer Seehöhe von 8.188 Meter. Man erkennt drei große Seen, wovon einer Thonak Cho und der andere Dudh Pokhari genannt wird. Für den dritten konnte kein Name eruiert werden. Bei Dudh Pokhari befindet sich eine kleine saisonale Siedlung (Abbildung 15).

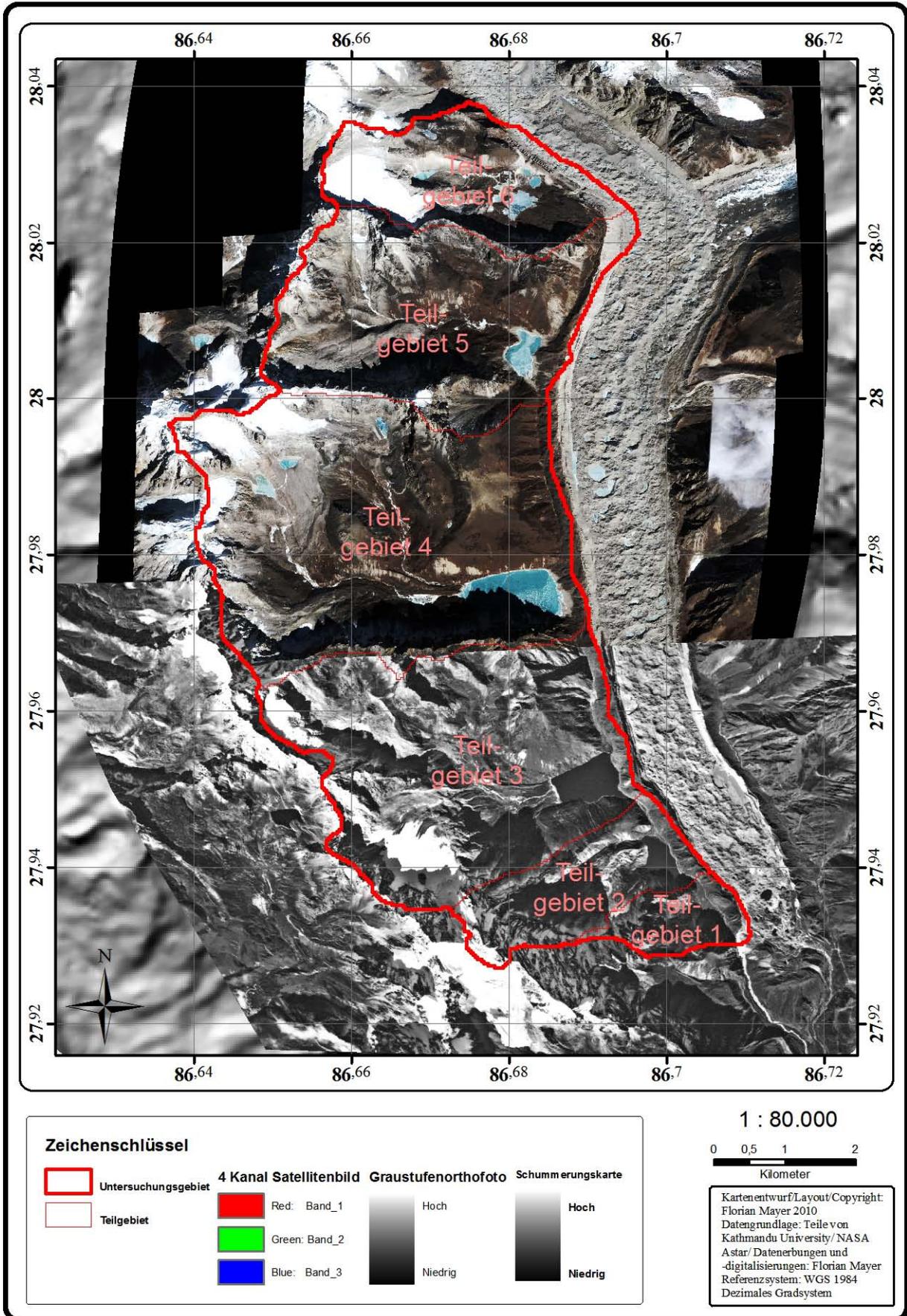


Abbildung 14: Untersuchungsgebiet mit Teilgebieten und Fernerkundungsdaten



Abbildung 15: Aufnahme mit Blick auf Noghumba Gletscherzunge (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 17.08.2009 17:24)

Abbildung 15 zeigt den östlichen Teil des Dudh Pokhari See und die Siedlung. Das Photo ist aus einer Höhe von 5100 Meter Richtung Südosten aufgenommen worden. Vegetation und Blöcke sind sichtbar. Der Noghumba Gletscher ist als weiße Zone erkennbar. Zwischen See und Gletscher liegt eine Seitenmoräne von ungefähr 50 Meter Höhe. Die Siedlung liegt auf 4750 Meter Seehöhe. Die Breite der Gletscherzunge beträgt ca. 1 km. Von der Siedlung bis zum südlichen Ende des Sees sind es ca. 600 Meter.

Tabelle 2: Angaben über das Untersuchungsgebiet 2010 (Datengrundlage: NASA Astar, Aufbereitung: Florian Mayer 2010)

Teilgebiet		1	2	3	4	5	6	Gesamt
Fläche in km ²		0,15	0,37	1,32	1,71	1,03	0,53	5,12
Seehöhe in Meter	Minimum	4629	4671	4711	4802	4920	4985	4629
	Maximum	5361	6003	5816	5786	5798	5587	6003
	Spannweite	732	1332	1105	984	878	602	1374
	Mittelwert	4855	5029	5115	5176	5240	5288	5117
	Median	4836	4973	5145	5174	5234	5278	5160

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 4629 bis 6003 Höhenmeter, wobei es durchschnittlich 5117 Meter hoch ist. Damit ergibt sich eine Spannweite von 1374 Meter. Wie in Abbildung 14 und Tabelle 2 zu sehen ist, sind die Teilgebiete von Süd nach Nord bzw.

vom Tiefsten bis zum Höchsten fortlaufend nummeriert. Teilgebiet 1 befindet sich auf durchschnittlich 4855 Meter und ist mit nur 0,15 km² das kleinste Teilgebiet. Teilgebiet 2 hat eine durchschnittliche Höhe von 5029 Meter und beinhaltet die größte Erhebung von 6003 Höhenmetern in seinem Bereich. Die Spannweite ist mit 1332 Meter Höhenunterschied auch am größten, obwohl die Fläche mit 0,37 km² sehr klein ist. Teilgebiet 3, 4 und 5 nehmen zusammen den Großteil der Fläche mit 4,06 km² ein und erstrecken sich von 4711 bis 5816 Höhenmeter. Dabei bleibt das Maximum ungefähr gleich während sich die Untergrenze nach oben verschiebt. Teilgebiet 6 hat 0,53 km² Ausdehnung und erstreckt sich von 4985 bis 5587 Höhenmeter. Zwischen Teilgebiet 2 und 6 fallen die Bergspitzen von 6003 auf 5578 Höhenmeter ab.

4.6 Exposition, Hangneigung und Lufttemperatur

In Abbildung 16 wird die Expositionsverteilung nach Untersuchungsgebiet mit Teilgebieten dargestellt. Man erkennt, dass die Ostausrichtung bei allen Gebieten dominiert, während die Westrichtung immer prozentuell am kleinsten ist. Im Gesamtgebiet ist die Südausrichtung höher als die Nordausrichtung, jedoch sind die Teilgebiete in diesen Expositionen untereinander sehr verschieden. Teilgebiet 1 und 3 haben bei Nord- und Südausrichtung ungefähr den gleichen prozentuellen Anteil zwischen 21 und 28 %. Bei Teilgebiet 2 und 6 dominiert die Nordlage und bei Teilgebiet 4 und 5 die Südlage. Der Unterschied beträgt immer mehr als 12 %. Das gesamte Untersuchungsgebiet weist prozentuell am meisten Ostlage (38 %) auf, danach folgt mit 29 % Südlage. Nordlage ist mit 25 % vertreten, während Westlage nur mit 8 % im Untersuchungsgebiet vertreten ist.

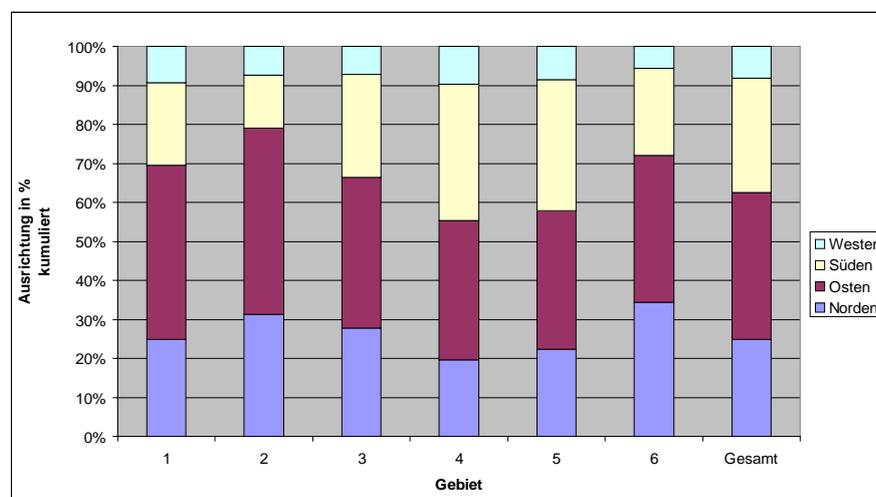


Abbildung 16: Hangausrichtung nach Gebiet in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer)

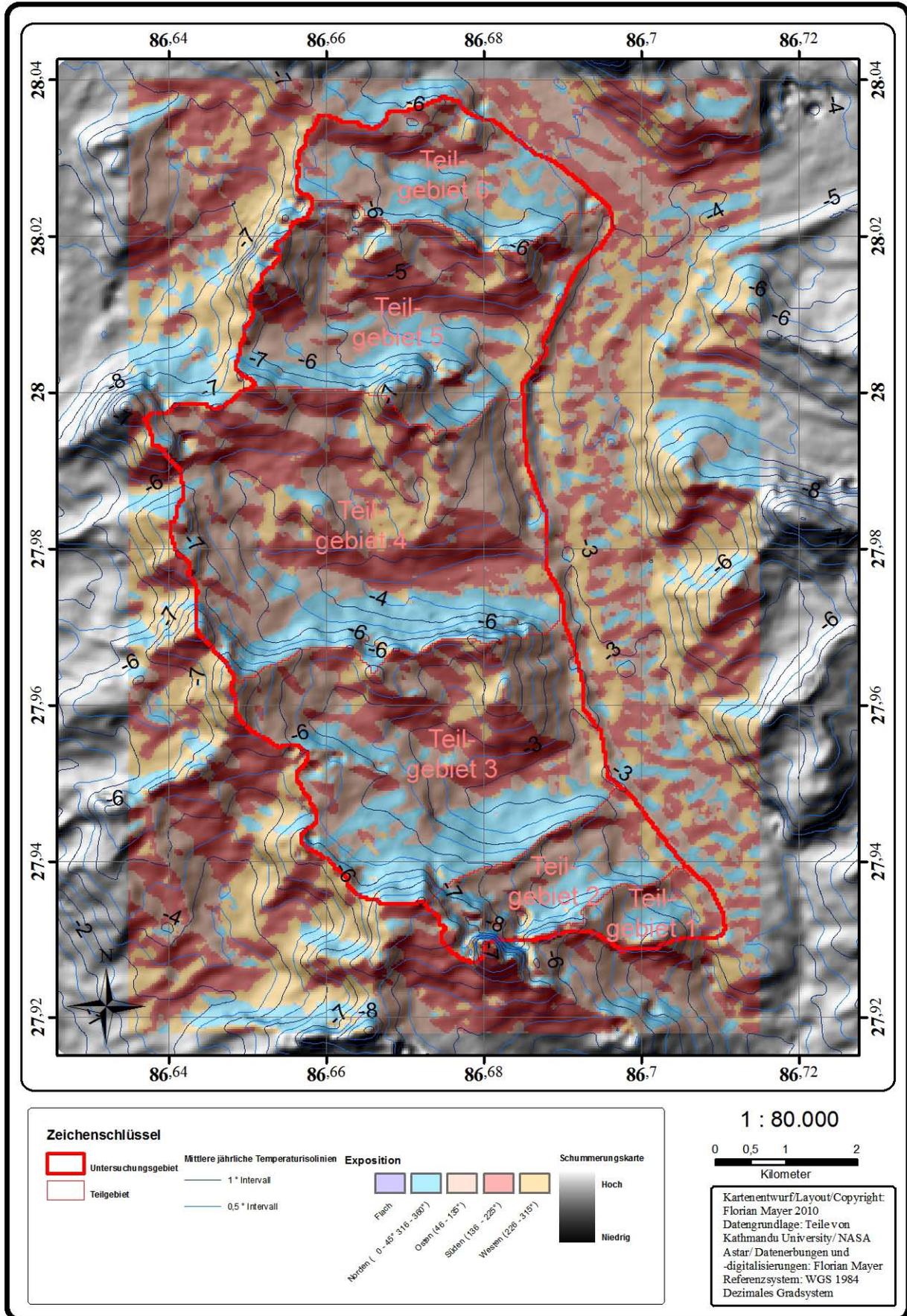


Abbildung 17: Exposition im Untersuchungsgebiet und Darstellung der MAAT

In Abbildung 17 ist die räumliche Verteilung der Exposition und die MAAT in Form von Isolinien dargestellt. Man erkennt, dass die Südseite der Täler eine einheitliche Nordexposition aufweisen. Vor allem bei Teilgebiet 4 ist ersichtlich, dass die Südhänge durch kleinere Tälchen weiter durchschnitten sind. In diesen Tälchen ist die Westausrichtung anzutreffen. Bei Tälern die nach Westen einschneiden und keine weiteren Tälchen haben, wäre diese Ausrichtung nicht vorhanden.

Die MAAT Isolinien können auch als relative Höhenlinien im Abstand von 102 Meter (Intervall 0,5 °C) gelesen werden. Der Abstand zwischen zwei Isolinien ist eine ungefähre Angabe der Neigung. Liegen zwei Isolinien nahe beieinander, so ist das eingeschlossene Gebiet sehr steil. Umgekehrt ist es flacher wenn sie weit auseinander liegen. Der Abstand kann sich von Bereich zu Bereich ändern. Das gesamte Untersuchungsgebiet liegt unter einer MAAT von -2 °C und kann bis zu -9 °C bei 6003 Meter Seehöhe absinken. Am Talboden bei Teilgebiet 1, 2 und 3 herrscht die -3 °C Isolinie vor. Beim Talboden des Teilgebietes 4 senkt sie sich auf -3,5 °C ab, während bei Teilgebiet 5 und 6, die -4 und -5 °C Isolinie in dieser Reihenfolge anzutreffen ist.

5 Methoden

5.1 Kartierung der Blockgletscher

Die Kartierungsarbeit ist auf das Vorhandensein von Blockgletschern und deren nähere Umgebung limitiert. Die nähere Umgebung stellt die Gesamtsituation, in der sich der Blockgletscher entwickelt hat, dar. Nach FUCHS ET AL. (2001 S. 32) ist das Ziel einer Geländeanalyse das "Erkennen und Beurteilen [...] spezieller Konstellationen im Gelände im Zusammenspiel naturräumlicher, geologischer, hydrologischer oder geomorphologischer Erscheinungen und Prozesse".

In diesem Kapitel wird unterschieden in die Vorkartierung, den Ablauf des Geländeaufenthalts und die Nachkartierung und Analyse.

5.1.1 Vorkartierung

Die Vorkartierung erfolgte mittels ArcGIS, wobei alle Daten schon wie in Kapitel 3.1 Datengrundlagen zur Kartierung aufbereitet wurden. In ArcCatalog wurde im FDS-WGS84 eine Polyline Feature Class „Blockgletscher“ erstellt in denen alle Blockgletscher abgespeichert wurden. In einer separaten Polygon Feature Class „Hot Spots“ werden Erscheinungen, die nicht eindeutig als Blockgletscher identifiziert werden konnten und Gebiete, die eine Überprüfung im Gelände erfordern, abgespeichert. Nach dem vorgegebenen Referenzsystem des Feature Dataset liegen sie im WGS84.

Als Kartierungsgrundlage diente das Graustufen-Orthofoto und das 4 - Kanal Satellitenbild.

Blockgletscher können durch ihre Größe und Oberflächenstrukturen von anderen glazialen und periglazialen Erscheinungsformen unterschieden werden (vgl. Kapitel 2.2 Blockgletscher).

Kriterien für Blockgletscher können die gewellte Oberfläche (Rücken und Gräben) oder die weißen Ränder sein. Ersteres ist am besten erkennbar bei zungenförmigen Blockgletschern und zweiteres bei aktiven Blockgletschern. Um zu erkennen, ob es sich bei einer weißen Fläche um einen Blockgletscher handelt, muss die Gesamtsituation analysiert werden. Zum Beispiel kann eine weiße Fläche am Fernerkundungsbild einen lobenförmigen

Blockgletscher in Hangfußlage darstellen, handelt es sich aber um einen Berggipfel so kann ein Blockgletscher ausgeschlossen werden. Hangrutschungen, die auch als helle Flächen erscheinen, schließen durch die lokal stark variierende unterschiedliche Höhe des Anrissbereiches Blockgletscher aus.

Reliktische Blockgletscher stammen aus dem Pleistozän (vgl. Kapitel 2.2 Blockgletscher). Aufgrund des langen Wachstums und weitergehenden reliktschen Zustandes wird ein zungenförmiger Typ vorausgesetzt.

Damit ergeben sich in der Vorkartierung folgende Kriterien (in Tabelle 3 dargestellt), die miteinander teilweise in Beziehung stehen:

Tabelle 3: Kriterien der Blockgletscherkartierung durch Fernerkundungsdaten (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)

Kriterium	Blockgletscher		
	Intakt		Reliktisch
	lobenförmig	zungenförmig	zungenförmig
Gewellte Oberfläche	/	/	/
Weiße Fläche	/	/	
Durchgehende Höhe der weißen Fläche	/	/	
Große Ausdehnung		/	/
Am Hangfuß	/	/	/

Treffen drei der in Tabelle 3 angeführten Kriterien zu, so kann von einem Blockgletscher ausgegangen werden und wird deshalb als Blockgletscher in die ArcGIS Datenbank „Blockgletscher“ aufgenommen. Sollten nur zwei der Kriterien zutreffen so wird die Lage in der Datenbank „Hot Spots“ vermerkt. Fernerkundungsbilder weisen Bereiche auf, die zur Zeit der Aufnahme abgeschattet waren. Diese Bereiche wurden in der Feature Class „Hot Spots“ eingezeichnet, da prinzipiell auch dort Blockgletscher vorhanden sein könnten.

5.1.2 Geländeaufnahme

Der Auslandsaufenthalt fand vom 09.08 bis 13.10.2009 statt. Dieser Zeitraum wurde nach der Monsunzeit, die von Mai bis September ist, gewählt. Damit war gewährleistet, dass das Wetter ausreichend beständig war und zum Großteil gute Sichtverhältnisse herrschten. Tabelle 4 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf des Auslandsaufenthalts. Der tatsächliche Aufenthalt im Himalaja - Hochgebirge ist mit ungefähr 7 Wochen (genau 48 Tage) festgelegt. Davon entfielen zwei Wochen auf Aufstieg und Abstieg ins/vom

Untersuchungsgebiet. Da es sich um eine projektbezogene Untersuchung handelte war ein Aufenthalt vor und nach der Zeit im Gelände im Projektbüro eingeplant, das sich außerhalb des Untersuchungsgebiets in Kathmandu der Hauptstadt Nepals befand. Diese beiden Zeiträume wurden für Kontaktaufnahme, organisatorische Maßnahmen und Anpassung der Vorkartierungsarbeit an die zur Verfügung stehenden Mittel im Gelände verwendet.

Tabelle 4: Großeinteilung des Auslandsaufenthalts (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)

Zeitraum	Vorgehen
09.08.09 - 20.08.09	Aufenthalt KTM Nepal
21.08.09 - 08.10.09	Aufenthalt in der Untersuchungsregion
09.10.09 - 13.10.09	Aufenthalt KTM Nepal

Im Feld standen Laptop, Global Position System-Empfänger (GPS-Empfänger), Digitalkamera, Feldstecher, sowie umfangreiches analoges Kartenmaterial, das aus der Vorkartierung unter Verwendung der Export-Funktion von ArcGIS generiert und ausgedruckt wurde, zur Verfügung. Der Laptop wurde als kostengünstiges Kommunikationsmittel für organisatorische und inhaltliche Fragen im Feld und als Speichermedium für digital aufgenommene Bilder verwendet. Die Digitalkamera ermöglichte eine Vielzahl von Bildern der Erscheinungsformen und des Untersuchungsgebiets. Der GPS-Empfänger der Firma GARMIN war für die Verortung wichtiger Punkte zu verwenden, konnte aber als Kartierungswerkzeug aufgrund der geringen Speicherkapazität nicht genutzt werden. Trotzdem erleichterte die Aufnahme von rudimentären Koordinaten sowie Seehöhe, Datum und Uhrzeit im Bereich von interessanten Erscheinungen, die Verortung von aufgenommenen Erscheinungen und Digitalbilder. Während des Geländeaufenthalts wurden Feldergebnisse analog aufgezeichnet.

Nach FUCHS ET AL. (2001) sollte eine geomorphologische Kartierung in Form von drei separaten Geländebegehungen durchgeführt werden. Die erste sollte einen Überblick geben, die zweite war der punktuellen systematischen Kartierung gewidmet und eine dritte war als abschließende Überprüfung der Ergebnisse gedacht. Diese Vorgehensweise diente als Orientierungshilfe zur Strukturierung des Geländeaufenthalts. Tabelle 5 soll diese Zeit unterteilt in Abschnitte darstellen.

Tabelle 5: Einteilung des Geländeaufenthalts (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)

Struktur nach FUCHS (2001)	Einteilung	Vorgehen
Überblick	1. Abschnitt	Überblick
Kartierung	2. Abschnitt	Überprüfung der Vorkartierung und Nachkartierung
	3. Abschnitt	Aufnahme von Blockgletschercharakteristika
Überprüfung	4. Abschnitt	Abschlussüberprüfung

Der 1te Abschnitt diente für die Erkunden des Untersuchungsgebietes, sowie der prinzipiellen Überprüfung der Einteilung der Teilgebiete nach Kapitel 3.2 Vorarbeit. Weiters wurde mit den Einheimischen Kontakt aufgenommen. Dabei konnten Routen und Wege erörtert werden, die für Touristen normalerweise nicht zugänglich sind. Dieses Wissen war für die anschließende Kartierungsarbeit von großem Nutzen.

Der 2te Abschnitt diente der Überprüfung, sowohl der Vorkartierung der Blockgletscher als auch der Hot Spots. Die aus Kapitel 5.1.1 Vorkartierung bekannten Kriterien behielten ihre Gültigkeit. In der Geländebegehung lag der Fokus auf Kriterien, die in Tabelle 6 dargestellt sind. Dabei wird teilweise zwischen den Blockgletschertypen intakt und reliktsch unterschieden. In den Hot Spot Gebieten wurden die Kriterien aus der Vorkartierung zusätzlich angewendet.

Tabelle 6: Kriterien der Geländekartierung (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)

Kriterium	Blockgletscher	
	Intakt	reliktsch
Vegetation	fast keine	bewachsen
Fronthöhe	> 5 m	> 5 m
Frontneigung	Steil	abgerundet
Oberflächenrelief	Gewellt	eingestürzt

Im Gelände wurden die Kriterien ohne technische Hilfsmittel abgeschätzt. Als Ergebnis dieses Abschnittes sind alle Blockgletscher im Untersuchungsgebiet kartiert. In weiterer Folge wurden sie alphanumerisch benannt um eine eindeutige Zuordnung im nächsten Abschnitt zu ermöglichen. Die Nummer gibt dabei das Teilgebiet wieder, wobei der Buchstabe die eindeutige Kennzeichnung im Teilgebiet gewährleistet.

Im 3ten Abschnitt wurden Blockgletschercharakteristika aufgenommen. Als Vorlage für diese Aufnahme diente der Schlüssel von BARSCH (1996). Es ist ein weltweit applizierbares System zur strukturierten Aufnahme von Blockgletschern. Es kommt teilweise mit den gewählten Kriterien der Blockgletscherkartierung zu Überschneidungen. Abbildung 18 veranschaulicht dieses System.

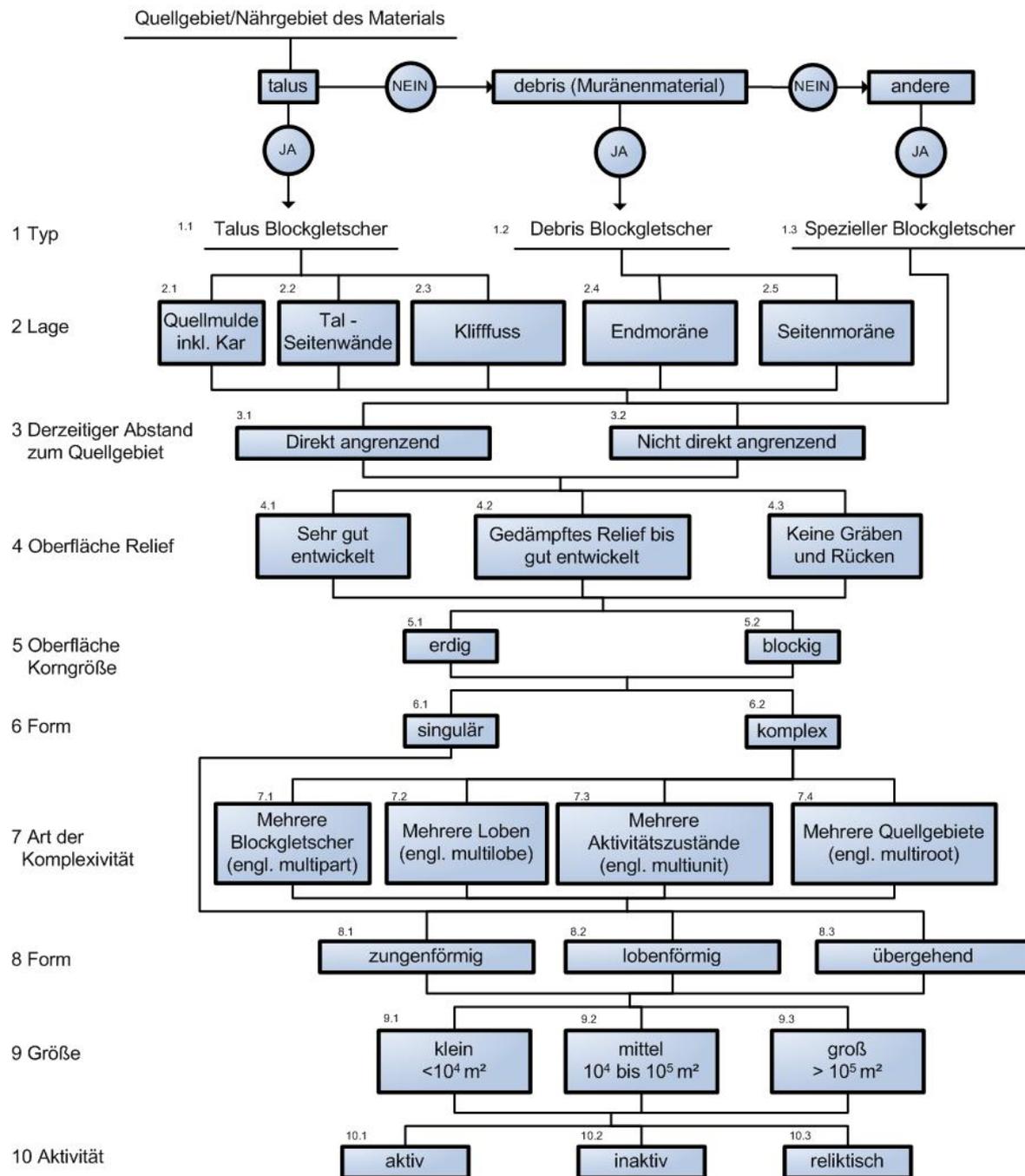


Abbildung 18: Übersetztes Blockgletscher Informationssystem (Quelle: BARSCH, 1996 S. 33 nach BARSCH 1987)

Im letzten Abschnitt werden die Teilgebiete des Untersuchungsgebiets noch einmal abgegangen und Erkenntnisse, sowie erste Interpretationsmöglichkeiten bezüglich Permafrost notiert.

5.1.3 Aufnahme in ArcGIS und Analyse

Im ersten Schritt wurde die digitale Kartierung aus der Vorkartierung überarbeitet und den Ergebnissen der Geländebegehung angepasst. Dabei wurden Blockgletscher aus der Feature Class „Hot Spots“ in die Feature Class „Blockgletscher“ integriert. Das erfolgte durch eine erneute Kartierung der Blockgletscher durch den ArcGIS „Editor“. GPS-Daten aus dem GPS-Gerät konnten direkt in das Programm ArcGIS unter der Verwendung der Extension „DNR Garmin Toolbar“ eingespielt werden. Dadurch konnten auch Blockgletscher, die in Schattenseiten von Fernerkundungsbildern liegen, lagegetreu in die Feature Class „Blockgletscher“ durch den ArcGIS „Editor“ aufgenommen werden. Die Feature Class „Hot Spots“ wurde danach aufgelöst.

Im nächsten Schritt wurden in ArcGIS die individuellen Charakteristika der Blockgletscher dem Datensatz manuell hinzugefügt. Das erfolgte durch den ArcGIS „Editor“ in der tabellarischen Funktion. Alle Blockgletscher haben eine Begrenzungslinie, die aber nicht abgeschlossen ist. Daher wurde eine weitere Polyline Feature Class „Blockgletscher_Begrenzung“ erstellt. Diese stellt die Schließung aller Blockgletscher durch eine gerade Linie sicher. Darauf aufbauend konnten alle Blockgletscher in eine Polygon Feature Class „Blockgletscher_a“ übertragen werden. Das ist in ArcGIS unter Verwendung des Tools „Feature zu Polygon“ und anschließenden Import in die Feature Class möglich. Nach diesem Schritt war eine vollständige Visualisierung der Blockgletscher in ArcGIS möglich.

Im dritten Schritt wurden statistische Kennwerte durch das Tool „Zonal Statistics“ für die Fläche der Blockgletscher errechnet. Die Auswertung unterteilt sich in die einzelnen Blockgletscher, wobei alle Pixel innerhalb der Blockgletscher zur statistischen Auswertung herangezogen wurden. Als Auswertungsgrundlage wurden das NASA DEM, Hangneigung und Exposition verwendet. Die Auswertung der Exposition wurde unterteilt in vier Klassen von Nord nach West zu je 90 °, analog zur Vorgehensweise in Kapitel 3.2 Vorarbeit.

Im letzten Schritt wurden nach dem Export durch ArcGIS „Zonal Statistics“ die Rohdaten für eine weitergehende Analyse und Darstellung nach MS Excel kopiert. Die aufgenommen Attribute der Blockgletschercharakteristika wurden ebenfalls exportiert und in MS Excel

integriert. Nachfolgende Auflistung gibt eine Übersicht über Kennwerte, die zusätzlich zu den Charakteristika in Excel als Ergebnis dargestellt werden können.

- Blockgletschergröße
- Blockgletscherexposition
- Mittlere Blockgletscher Höhe (Mittelwert)
- Mittlere Blockgletscher Höhe (Medianwert)
- Blockgletscher Höhe Spannweite
- Blockgletscher Höhe Minimum
- Blockgletscher Höhe Maximum

Die mittlere Blockgletscherhöhe und die dazugehörige Exposition wird in Kapitel 5.3 Modellierung der Permafrostverbreitung für weitere Berechnungen herangezogen.

5.2 Bodentemperaturmessungen

Die Bodentemperaturmessungen wurden mit 30 MTD der Firma ONSET Computer Corporation Untergruppe "HOBO Pedant Temperature Data MTD" vom Typ "UA-001-08" durchgeführt. Sie sind vergleichbar mit den von HOELZLE ET AL. (1999) für Bodentemperaturmessungen in Permafrostgebieten vorgestellten HOBO HTC 08. ISHIKAWA (2003) verwendete in seiner Untersuchung der Bodentemperatur im Gebirge von Japan auch MTD der Firma ONSET. UA-001-08 MTD haben einen Messbereich von -20° bis 70°C , eine Auflösung von $0,10^{\circ}\text{C}$ und eine Genauigkeit von $\pm 0,47^{\circ}\text{C}$ bei 25°C . Sie sind in einem Temperaturbereich von -20° bis 45°C bis zu 10 Meter Tiefe wasserdicht. Abbildung 19 zeigt das Werbefoto des MTD heruntergeladen von der ONSET Corporation Homepage. Die Abmessungen betragen $5,8 \times 3,3 \times 2,3$ Zentimeter.



Abbildung 19: HOBO Pedant Temperature Data MTD Typ UA-001-08 (Quelle: http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ua-001-08#tabs-product_page_tabs-1 Zugriff: 02.11.2010; Copyright/Permission: Copyright 1996–2007 Onset Computer Corporation, 470 MacArthur Blvd, Bourne, MA 02532 U.S.A. (mailing: P.O. Box 3450 Pocasset, MA, 02559-3450 U.S.A.) All rights reserved. - Permission to use, copy and distribute documents and related graphics available from this World Wide Web server ("Server") is granted, provided that (1) the above copyright notice appears in all copies and that both the copyright notice and this permission notice appear, (2) use of documents and related graphics available from this Server is for informational and non-commercial purposes only, (3) no documents or related graphics available from this Server are modified in any way, and (4) no graphics available from this Server are used, copied or distributed separate from accompanying text. siehe <http://www.onsetcomp.com/corporate/policies/copyright-information> Unterpunkt: "Copyright Information" Zugriff: 02.11.2010)

5.2.1 Programmierung, Verteilung und Applizierung

Die MTD wurden zwischen dem Abschnitt 3 und 4 der Geländebegehung (vergl. Kapitel 5.1.2 Geländeaufnahme: Tabelle 5) von Dr. Juerg Merz in die Untersuchungsregion gesendet und erst nach Erhalt programmiert. Die Programmierung erfolgte durch das mitgelieferte Programm HoboWare 2.7.3 unter Verwendung der Optic USB Base Station Typ: BASE-U-4. Alle MTD wurden mit entsprechenden Softwarenamen versehen, was eine standortbezogene Zuordnung der Temperaturdaten ermöglichte und es wurde ausschließlich die Temperatur gemessen. Ein Messintervall von einer Stunde wurde gewählt, damit tageszeitliche Schwankungen genau nachvollzogen werden können. Die Messungen erfolgten alle

zeitgleich, wobei die zu diesem Zeitpunkt vorkommende Temperatur gemessen und abgespeichert wurde. Synchrone Messungen wurden durchgeführt, um eine zeitliche Vergleichbarkeit der Messungen von allen MTD herzustellen. Der Startzeitpunkt wurde noch vor der Applizierung gewählt und die Temperaturmessungen enden automatisch nach ungefähr 8,5 Monaten, wenn das Speicherlimit erreicht ist.

Dadurch konnte im gesamten Winter gemessen werden, was einen langen Zeitraum für BTS-Werte ermöglichte. Bei der Verwendung von BTS-Sonden würde nur eine zeitlich punktuelle Messung den BTS Wert darstellen.

Die Applizierung erfolgte vom 28. September bis zum 06. Oktober 2009 (Abschnitt 4 der Geländebegehung). Die Standorte wurden nach großräumlichen und lokalen Kriterien ausgewählt, die in Tabelle 7 aufgelistet sind.

Tabelle 7: Kriterien der Verteilung der MTD (Zusammenstellung: Florian Mayer 2010)

Großräumliche Kriterien	Lokale Kriterien
<ul style="list-style-type: none"> • In jedem Teilgebiet • Nord als auch die Südseite der Täler • Auf der Seitenmoräne des Noggumba Gletschers • Auf Blockgletschern • Vor Blockgletschern • In Bereichen ohne Blockgletscher • Vermehrt in Bereichen mit verschiedenen geomorphologischen Erscheinungsformen • Nicht in Sumpfgebieten 	<ul style="list-style-type: none"> • An windgeschützten Stellen (Mulden) • Unterhalb der Oberfläche

Die MTD wurden drei cm tief in den Boden eingegraben, sodass sie vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und für wandernde Touristen unsichtbar waren. Die Oberfläche wurde danach wiederhergestellt. Um das Auffinden zu erleichtern und den Boden in der direkten Umgebung des MTDs so wenig wie möglich zu stören wurde ein 40 cm langes Plastikrohr in einer Entfernung von 1 Meter nach Osten in den Boden versenkt und durch

Steine von ungefähr 40 Zentimeter Durchmesser fixiert. An jedem Standort wurden 400 GPS Messungen durchgeführt und der Mittelwert gespeichert. Anschließend wurde der Standort aufgrund seiner Beschaffenheit bewertet. Dabei wurde der direkte Kontakt der MTD mit Lithosphärenmaterial und die nähere Umgebung im Umkreis von zwei Metern notiert, wobei unterschieden wurde zwischen „erdig“, „sandig“ und „blockig“.

Abbildung 20 veranschaulicht die Applizierungsart. Steine sollen das Plastikrohr sichern, damit die Position einfach wiedergefunden werden kann. Auf dem Plastikrohr wurden die GPS Messungen durchgeführt. Ein Meter Richtung Osten wurde der MTD drei cm tief vergraben. Auf diesem Bild ist sowohl die direkte Umgebung als auch der Umkreis von zwei Metern „erdig“.



Abbildung 20: Applizierung eines MTDs (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 30.09.2009 10:30)

Nachdem das Untersuchungsgebiet Ende Mai 2010 wieder begehbar war, wurden die MTD von Nischal Pokharel ausgegraben und die Daten mit der Software HoboWare 2.7.3 ausgelesen. Die Rohdaten wurden anschließend als .csv (Microsoft Office Excel Comma Separated Values File) über Internet zugesendet.

In Kathmandu wurde eine weitere Messung der Temperatur durch die MTD unter Laborbedingungen durchgeführt. Dabei wurden alle Logger in ein Wasserbad mit Eiswürfeln gelegt, die Temperatur gemessen, anschließend ausgelesen und die Daten von Dr. Juerg Merz wiederum über Internet zugesendet.

Die Standorte der MTD wurden durch die Extension „DNR Garmin Toolbar“ in ArcGIS eingelesen und in der Point Feature Data Class „BTS-Werte“ abgespeichert. Dabei wurde auf die Korrektur von einem Meter in östliche Richtung verzichtet, da die Pixelgröße des NASA DEM weit über einem Meter liegt. Anschließend wurden die Standorte statistisch ausgewertet. Dafür wurden für jeden Standort durch das ArcGIS Tool "Values to Points" die Höhenlage, Exposition und Neigung ermittelt. Die Werte wurden exportiert und in MS Excel eingelesen, wo sie analysiert und dargestellt werden. In Anlehnung an BRENNING ET AL. (2005) wurde die Analyse durchgeführt und umfasst die statistische Auswertung nach Höhe, Exposition und Neigung in Verbindung mit statistischen Kennzahlen aus dem Untersuchungsgebiet. Diese umfassen Fläche der Teilgebiete, Exposition und Hangneigung.

5.2.2 Datenaufbereitung und -analyse

Die Daten sind intervallskaliert ($^{\circ}\text{C}$) und liegen als diskrete Temperaturwerte im Stundentakt vor und daher ist die Ermittlung von Verteilungsmaßen, wie Mittelwert und Standardabweichung statistisch erlaubt (SCHÖNWIESE, 2000).

Zuerst wurden alle Daten in ein einziges MS Excel Dokument überführt. Die Messungen der Temperatur unter Laborbedingungen wurden analysiert, indem die Abweichung von 5 MTD zueinander als Fehlerbandbreite berechnet wurde.

In MS Excel wurden die Daten aufbereitet, sodass sie in SPSS eingelesen werden konnten und danach wurden die Datenreihen auf Plausibilität überprüft. Bei der zeitlichen Abfolge der Temperatur wurden Ausreißer eruiert. Deshalb wurden Temperaturwerte entfernt, die eine Abweichung zwischen drei Werten über 40°C aufweisen, zum Beispiel ist der erste Wert 0°C , der zweite 45°C und der dritte Wert 1°C , so wurde der Wert mit 45°C aus der Datenreihe entfernt. Eine Abfolge von 0°C , 20°C und dann 45°C ist zwar unwahrscheinlich, wurde aber nicht entfernt.

In SPSS wurde die tageszeitliche Standardabweichung von allen MTD berechnet und Ergebnisse von SPSS zu MS Excel exportiert, wo der Mittelwert der Standardabweichung aller MTD errechnet wurde. Aus dieser Datenreihe wurde ein Überblicksdiagramm erstellt und in Anlehnung an die Vorgehensweise von NYENHUIS (2006) ein Zeitraum extrahiert, in dem anzunehmen ist, dass es sich um BTS Werte handelt. Um diesen Zeitraum zu eruieren wurden alle Tage, die eine Standardabweichung über $0,4^{\circ}\text{C}$ aufwiesen aus der Datenreihe entfernt. Werte die eine so geringe tageszeitliche Abweichung über einen längeren Zeitraum aufwiesen wurden als von der Außenlufttemperatur isolierte Messungen interpretiert und als BTS

angenommen. Der längste Zeitraum aller zusammenhängenden Daten der Werte, deren Standardabweichung unter $0,4\text{ °C}$ lagen, gilt als BTS-Zeitraum. Der Mittelwert (BTS-Temperatur) und die Standardabweichung (BTS-Standardabweichung) wurden für alle einzelnen MTD innerhalb des BTS-Zeitraums berechnet.

Die Mitteltemperaturen (BTS-Temperatur), sowie die tageszeitliche Standardabweichung (BTS-Standardabweichung) des BTS-Zeitraums wurden den Positionsdaten in ArcGIS manuell durch den ArcGIS „Editor“ hinzugefügt. Diese lassen sich durch ArcGIS visualisieren.

Die Ergebnisse (BTS-Temperatur und BTS-Standardabweichung) werden in Kapitel 5.3 Modellierung der Permafrostverbreitung weiterverarbeitet.

5.3 Modellierung der Permafrostverbreitung

In diesem Kapitel wird die Methodik der Modellierung der Permafrostverbreitung dargestellt. Wie im Kapitel 2.4 benötigen Modelle Input Daten. Diese Input Daten bestehen zum Teil aus dem NASA DEM und dessen Derivaten und zum Teil aus den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel. Als letztes wird dargestellt, wie die mögliche Permafrostverbreitung der Zukunft aus der vorhandenen Modellierung berechnet werden kann.

5.3.1 Blockgletscher-Indikator

Für die Ermittlung der Permafrostverbreitung gilt das Modell ROGMOD.

Da die Auflösung des NASA DEM zu gering war um zwischen Stirnhöhe und normaler Oberfläche unterscheiden zu können, wurde der Mittelwert der Blockgletscherseehöhe als Wert für die Stirnhöhe angenommen. Die planare Fläche der Blockgletscherfront war im Vergleich zur planaren Ausdehnung der Gesamtoberfläche des Blockgletschers vernachlässigbar. Die Rohdaten der mittleren Blockgletscherseehöhe wurden aus dem Kapitel 5.1.3 Aufnahme in ArcGIS und Analyse übernommen.

Sie wurden in MS Excel zur Weiterverarbeitung kopiert. Im weiteren Analyseverlauf wurden nur intakte Blockgletscher zur Modellierung der Permafrostverbreitung herangezogen. Der Flächenanteil der Blockgletscher an einer der vier Himmelsrichtungen wurde prozentuell ermittelt. Anschließend wurde der Blockgletscher jener Exposition zugeordnet, die den höchsten prozentuellen Anteil aufweist. Danach wurden je nach Exposition die Blockgletscherhöhen gemittelt. Das Ergebnis stellte die Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrosts nach Exposition dar.

Diese Werte wurden in ArcGIS verwendet um die Permafrostverbreitung nach dem Modell ROGMOD zu visualisieren. Die Berechnung erfolgte unter der Verwendung des Raster Calculators in der Extension „Spatial Analyst“. Danach konnten zwei Zonen der Permafrostverbreitung dargestellt werden. Die erste ist aus der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Permafrostzone zusammengefasst, während die zweite aus der permafrostfreien Zone besteht.

5.3.2 BTS-Indikator

Die Modellierung erfolgte in Anlehnung an das Modell PERMAMAP (HOELZLE, 1992). Dabei wurde eine Regression berechnet, wobei die BTS als abhängige Variable der Seehöhe und der kurzwelligen solaren Strahlung im Sommer gesehen wurde.

Als BTS Werte gelten die BTS-Temperaturen aus Kapitel 5.2.2 Datenaufbereitung und -analyse, wobei nur jene BTS-Temperaturen in die Regressionsberechnung einfließen, deren zugehörige BTS-Standardabweichung im BTS-Zeitraum unter $0,40\text{ °C}$ liegt. Bei NYENHUIS (2006) wurde ein Grenzwert von $0,2\text{ °C}$ angegeben, jedoch sind die MTD in der Studie von NYENHUIS (2006) genauer als die MTD UA-001-08, die in dieser Studie verwendet wurden. Deswegen wurde der absolute Grenzwert der BTS-Standardabweichung mit der doppelten Standardabweichung von $0,2\text{ °C}$, dementsprechend $0,4\text{ °C}$ festgelegt. Die Genauigkeit der MTD in dieser Studie beträgt $0,47\text{ °C}$ daher ist dieser Grenzwert in Anlehnung an die vorgegebene Genauigkeit der MTD und die Studie von NYENHUIS (2006), wobei die Genauigkeit der MTD stärker einbezogen wurde. Ab einer Fehlergröße von über $0,4\text{ °C}$ kann eine Zuordnung alle drei Zonierungen (kontinuierlicher, diskontinuierlicher Permafrost und permafrostfreie Zone) enthalten, wenn die BTS - $2,5\text{ °C}$ beträgt. Sie wird als $\text{BTS} - 2,5 \pm 0,5$ angeschrieben, was eine Zonierung von „Permafrost wahrscheinlich“ ($< - 3\text{ °C}$), „Permafrost möglich“ (zwischen $- 3$ und $- 2\text{ °C}$) und „Permafrost unwahrscheinlich“ ($> -$

2 °C) gestattet. Deswegen wurden BTS-Temperaturen, deren zugehörige Standardabweichung über 0,4 °C war aus der Berechnung mit der Regressionsgleichung entfernt.

Die direkte Sonneneinstrahlung (engl. direct solar radiation: DSR) wurde durch das ArcGIS Tool "Solar Radiation" berechnet. In Anlehnung an JULIAN und CHUECA (2007) wurden für mehrere Zeiträume die DSR berechnet und anschließend eine Korrelationsanalyse mit den BTS-Werten an diesen Standorten durchgeführt. Es wurde der Zeitraum des ganzen Jahres 2010, des Sommers und der Monate einzeln berechnet. Dabei wurde zwischen dem meteorologischen von Juni, Juli, August und kalendarischen Sommer vom 21. Juni bis 22. September unterschieden. Da die Berechnung kumulativ war würden größere Zeiträume einen höheren absoluten Einstrahlungswert haben, daher wurden die Pixelwerte durch die Anzahl der Tage unter Verwendung des Tools "Raster Calculator" dividiert und als tDSR bezeichnet. Es standen somit 15 gemittelte Zeiträume zur Korrelationsanalyse zur Verfügung.

Die Werte der direkten Einstrahlung wurden für alle MTD Standorte und Zeiträume durch das ArcGIS Tool „Values to Points“ exportiert und ins Format von MS Excel überführt. Die Höhenwerte der Standorte wurden ebenfalls aus dem NASA DEM exportiert und in die gleiche MS Excel Tabelle eingefügt. Als letzter Schritt wurden die BTS der einzelnen Standorte lagerichtig hinzugezählt. Danach wurde die Tabelle aufbereitet, sodass sie in SPSS importiert werden konnte. Anschließend wurde für alle Zeiträume eine Korrelationsanalyse mit der BTS durchgeführt. Nicht signifikante Korrelationskoeffizienten wurden verworfen und von den Signifikanten wurde der Zeitraum ausgewählt, der die höchste Korrelation mit den Werten der BTS aufweist. Danach wurde mit der BTS als abhängige Variable und der ausgewählten täglichen direkten Sonneneinstrahlung und dem Seehöhenwert als unabhängigen Variablen eine lineare Regression berechnet. Als Ergebnis stehen Regressionskoeffizienten, sowie der Erklärungsgrad und Signifikanz des Modells zur Verfügung. Damit ergab sich die Regressionsgleichung:

$$\text{BTS} = k + \text{DEM} * x + \text{tDSR} * y$$

- k der Standard Regressionskoeffizient
- DEM das Digitale Höhenmodell
- x der Regressionskoeffizient für DEM
- tDSR die tägliche direkte Sonneneinstrahlung
- y der Regressionskoeffizient für tDSR

In ArcGIS wurde mit dem Raster Calculator die Koeffizienten der Gleichung angewendet um die BTS im gesamten Gebiet zu simulieren. Die Zonierung der Permafrostverbreitung erfolgte nach den Grenzwerten von HAEBERLI (1978) in $< -3^{\circ}\text{C}$ (wahrscheinlich Permafrost), zwischen -3 und -2°C (möglich Permafrost) und $> -2^{\circ}\text{C}$ (Permafrost unwahrscheinlich). Damit war eine Zonierung in drei Bereiche möglich.

5.3.3 Zukunftsszenario

Für die Berechnung des Szenarios der zukünftigen Permafrostentwicklung wurden auf die Werte des Temperaturanstiegs aus dem Kapitel 2.5 Klimaänderungen zurückgegriffen. Darin wurde ein Temperaturanstieg von $0,92^{\circ}\text{C}$ nach dem A1FI Szenario der IPCC für den Zeitraum von 2010 – 2039 angegeben. Dieser Temperaturanstieg wurde in den nachfolgenden Modellierungen verwendet.

Blockgletscherindikator:

Für die Modellierung des Permafrostindikators wurde der Temperaturanstieg in Höhenmeter ausgedrückt. Die Umrechnung des Temperaturanstiegs in Höhenmeter erfolgte durch den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten von $0,49^{\circ}\text{C}$ für 100 Meter (REGMI und WATANABE, 2005). Zum Modell ROGMOD wurde unter Verwendung des Raster Calculator das Höhenmeterequivalent zu $0,92^{\circ}\text{C}$ zu den Grenzwerten addiert. Das Ergebnis konnte in ArcGIS visualisiert werden.

BTS-Indikator:

Für das Modell Temperaturwerte wurden zu den Grenzwerten, die von HAEBERLI (1978) vorgeben wurden, $0,92^{\circ}\text{C}$ addiert. Diese neue Klassifizierung stellte die mögliche Permafrostverbreitung im Jahre 2039 dar.

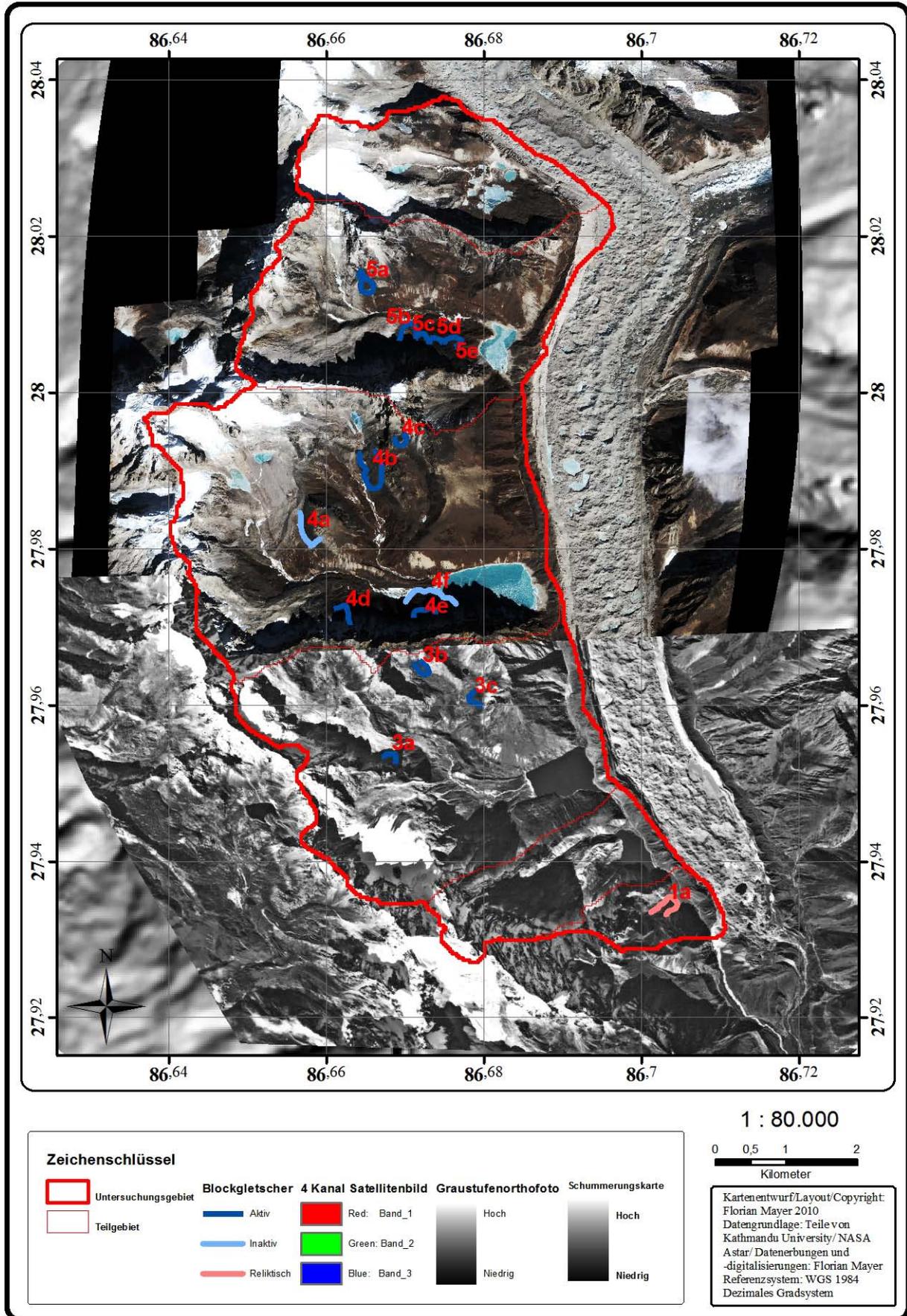
6 Ergebnisse

6.1 Kartierungsergebnisse

Dieser Abschnitt setzt sich mit der Verteilung der Blockgletscher auseinander. Dabei werden nur die Verteilung und ihre Analyse beschrieben.

6.1.1 Verteilung der Blockgletscher

Abbildung 21 zeigt die räumliche Verteilung aller Blockgletscher in Gokyo. Sie sind an die Fernerkundungsbilder, die vor allem an den Rändern stark verzerrt sind, angepasst. Jedoch lässt sich erkennen, dass im Untersuchungsgebiet vor allem in den Bereichen, wo Blockgletscher vorkommen keine sichtbaren Verzerrungen vorhanden sind. Intakte Blockgletscher, zusammengefasst aus aktiven und inaktiven Blockgletscher, erstrecken sich von Teilgebiet 3 bis 5. Ein reliktscher (1a) ist bei Teilgebiet 1 anzutreffen. In Teilgebiet 4 und 5 sind anzahlmäßig gleich viele Blockgletscher verteilt, wobei die Fläche von Teilgebiet 5 bedeutend geringer ist als die von Teilgebiet 4. Die meisten Blockgletscher sind in Hangfusslage und lobenförmig. Im Teilgebiet 5 reihen sie sich am Nordhang aneinander, trotzdem lässt sich bei jedem von einem eigenständigen Blockgletscher sprechen. In den anderen Teilgebieten liegen Blockgletscher weiter entfernt von einander. Blockgletscher 4f liegt unterhalb von Blockgletscher 4e, wobei 4f inaktiv ist. Der zweite inaktive (4a) ist ebenfalls im Teilgebiet 4 großräumig auf der Südseite anzutreffen. In den Teilgebiet 2 und 6 gibt es keine Blockgletscher.



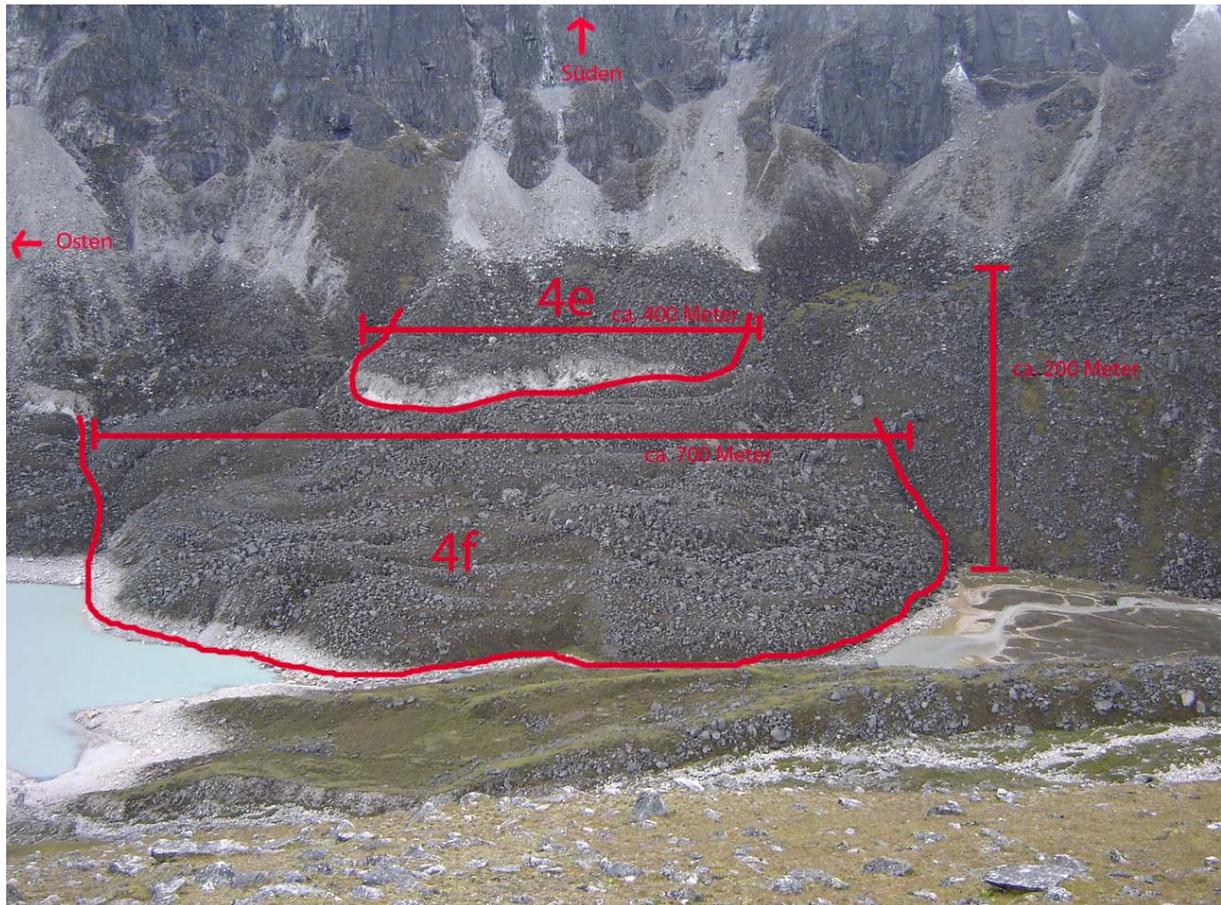


Abbildung 22: Aufnahme mit Blick auf Blockgletscher 4f und 4e (Aufnahme/Quelle: Florian Mayer, Gokyo 06.09.2009 11:02)

Abbildung 22 zeigt den inaktiven und aktiven Blockgletscher im Teilgebiet 4. Beim inaktiven 4f sind die Formen und unterschiedlichen Korngrößen auf der Oberfläche gut sichtbar, während beim dahinterliegenden aktiven Blockgletscher nur Ansätze der Rücken und Gräben erkennbar sind, jedoch ist die helle Front des Blockgletschers klar identifizierbar. Auf beiden ist Vegetation in Form von Gräsern und Moosen vorhanden. Im Vordergrund kann man sowohl den See (links unten), als auch das Feuchtgebiet (rechts) erkennen. Vor dem Blockgletscher 4f befindet sich eine Seitenmoräne.

6.1.2 Blockgletscherhöhen und -flächen

Diagramm 1 zeigt statistische Maßzahlen der Blockgletscherhöhe und -fläche. Das Diagramm setzt sich aus zwei unterschiedlichen Achsen zusammen. Auf der linken y-Achse ist die Höhe und auf der rechten ist die Fläche aufgetragen. Die Blockgletscher sind nach Aktivität und Name geordnet. Es gibt 12 aktive, zwei inaktive (4a, 4f) und einen reliktschen

(1a). Es lässt sich erkennen, dass sich die meisten Blockgletscher in einer Seehöhe um 5100 Meter befinden. Die zwei inaktiven 4a und 4f liegen auf deutlich unterschiedlichen Seehöhen. 4a liegt über 5100 Meter Seehöhe und 4f befindet sich unterhalb von 4900 Meter Seehöhe. Aktive Blockgletscher liegen ausnahmslos über 4900 Meter Seehöhe. Der reliktsche Blockgletscher liegt unterhalb von einer Seehöhe von 4800 Meter. Die Spannweite der Unter- und Obergrenze der Blockgletscherseehöhe beträgt zwischen 19 und 144 Meter, mit einem Mittelwert von 74 und einem Median von 65 Meter. 5d hat die kleinste Spannweite und 4b die größte. 4c ist mit einer durchschnittlichen Seehöhe von 5403 Meter am höchsten gelegen, der tiefste aktive Blockgletscher liegt durchschnittlich auf 4933 Meter Seehöhe. Die Abweichung zwischen arithmetischem Mittel und Median beträgt durchschnittlich 2 Meter, wobei die Abweichung von 4b, die 17 Meter beträgt, nicht einberechnet ist, da sie als Ausreißer die Abweichung stark erhöhen würde. Der größte Blockgletscher ist 4b mit 115.000 m². Durchschnittlich sind sie 36.000 m² groß, der Median liegt bei 23.000 m². Der kleinste Blockgletscher ist 5d mit 11.700 m², gefolgt von 5c mit 12.600 m².

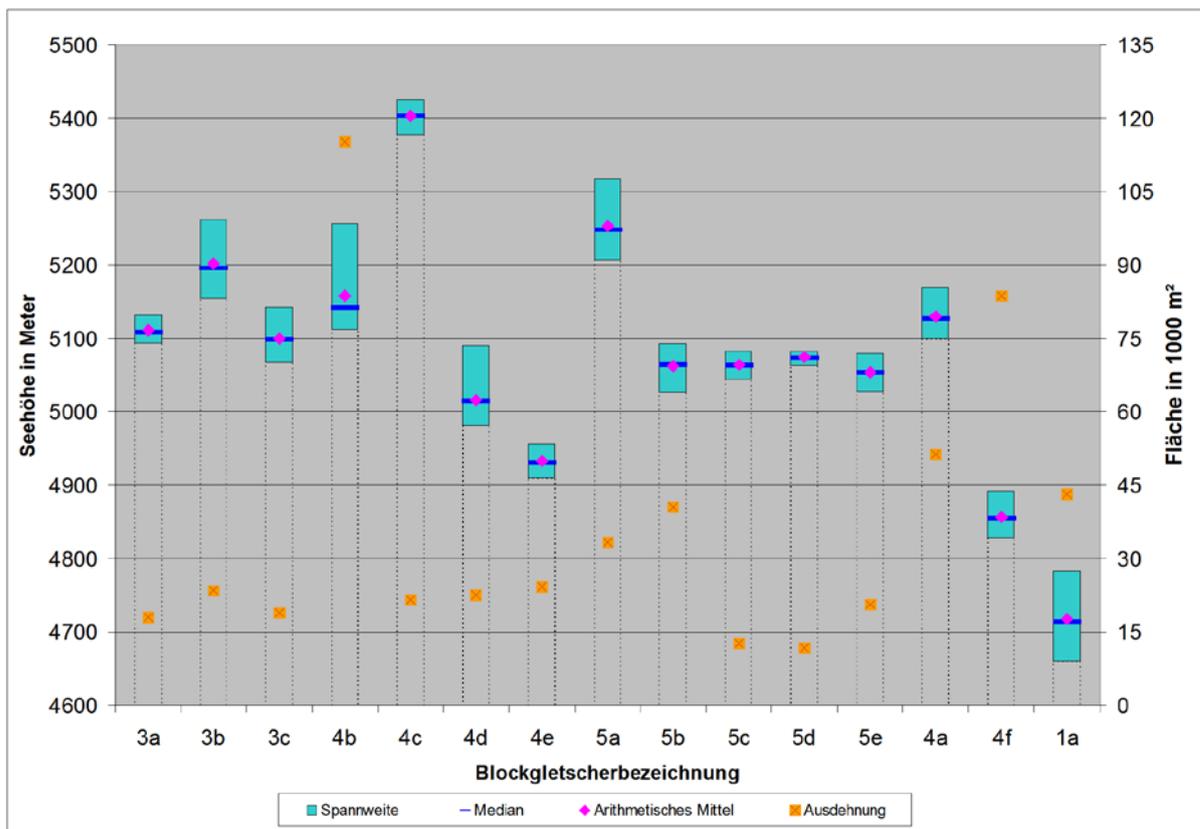


Diagramm 1: Statistische Maßzahlen der Blockgletscherseehöhen und -ausdehnungen in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

6.1.3 Exposition der Blockgletscher

Diagramm 2 stellt die Ausrichtung der Blockgletscher dar. Auf der linken y-Achse ist der Anteil der Ausrichtung in % angegeben, auf der rechten ist der Median der jeweiligen Expositionen absolut aufgetragen. Der Anteil der Expositionen wird auf 100 % kumuliert, wobei beim Median eine Abweichung von $\pm 45^\circ$ möglich ist. Dabei befindet sich die 0 Grad Achse bei der 50 % Achse der prozentuellen Verteilung. Die Blockgletscher sind nach Aktivität und Name geordnet.

Zum Beispiel hat der Blockgletscher 3a 65 % Nordanteil und 35 % Ostanteil. Auf der rechten y-Achse ist der Median der Abweichung von diesen Ausrichtungen angegeben. Bei Blockgletscher 3a liegt der Nordmedian bei $+22^\circ$. Damit liegen 50 % der Pixel in Nordlage zwischen 316° bis 22° . Die andere Hälfte liegt zwischen 22° und 45° . Beim Ostanteil der Pixel liegt der Ostmedian bei -41° . Damit liegt die eine Hälfte der Pixel innerhalb von 4° , während sich die andere Hälfte in einer Bandbreite von 86° aufhält. Insgesamt bedeutet das, dass der Blockgletscher 3a eine Exposition von Nordnordost aufweist, da der höhere Anteil der Pixel in Nordlage ist und der Nordmedian näher bei einer Abweichung von 0° ist.

Bis auf die Blockgletscher 4a und 4f haben alle nur eine oder zwei Ausrichtungen. Sechs Blockgletscher haben ausschließlich Nordlage und einer (4c) hat Südexposition. Der Blockgletscher 5d befindet sich in absoluter Nordlage, da der Abweichungsmedian genau bei 0° verläuft. West- und Ostlage kommen nur in Verbindung mit anderen Expositionen vor. Zwei Blockgletscher haben vorherrschend Westlage, aber nur einer (3b) weist eine Ostausrichtung über 50 % auf. 4a erstreckt sich über drei Himmelsrichtungen, wobei Nordlage mit nur 4 % vertreten ist. Bei Blockgletscher 4f kommen alle Expositionen vor, dabei entfallen 86 % auf die Exposition Norden. Osten ist mit 10 %, Süden mit 1 % und Westen mit 3 % vertreten. Außer 5d haben alle Blockgletscher, die Nordlage aufweisen, einen Nordmedian im positiven Bereich. Die Südlage ist am zweitstärksten mit 7 Blockgletschern vertreten. Dabei entfallen drei Südmediane in den positiven Bereich (Abweichung Richtung Westen) und 4 in die negative Bandbreite (Abweichung Richtung Osten). Die Mediane der Westexposition zeigen zu drei Viertel eine Verschiebung nach Süden an. Abweichungsmediane der Ostexposition kommen sowohl im stark positiven als auch im negativen Bereich vor.

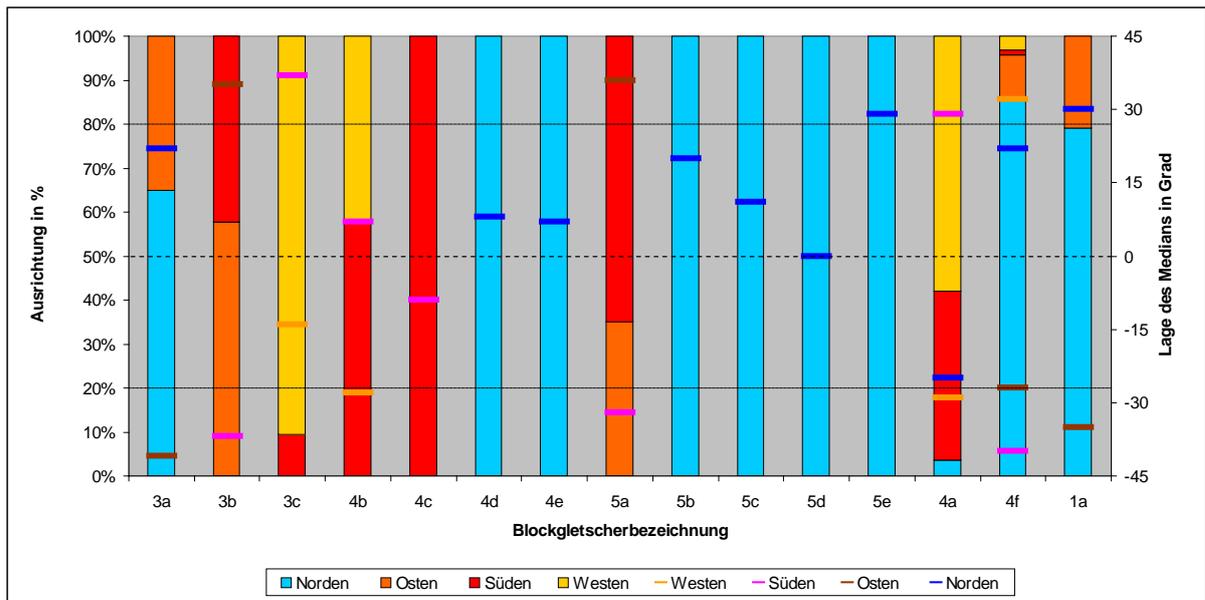


Diagramm 2: Exposition der Blockgletscher und Abweichung von der Exposition in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

6.1.4 Blockgletschercharakteristika

Die genaue Auflistung der einzelnen Blockgletscher nach dem Schlüssel von BARSCH (1987) ist in Tabelle 8 angeführt. In Tabelle 9 wird die Zusammenfassung tabellarisch aufbereitet, da die genaue Auflistung nach BARSCH (1978) schwer interpretierbar ist. Sie besteht aus dem Modalwert, der Anzahl der Möglichkeiten, zum Beispiel hat „Typ“ die 3 Möglichkeiten Talus-, Debris- und Spezieller Blockgletscher, und der relativen Höhe des Modalwerts in Prozent. Man erkennt, dass der Modalwert immer über 50 % einnimmt. In 7 von 10 Fällen sogar 80 % und darüber. Davon ausgenommen sind Typ, Lage und Form, mit 53, 60 und 67 %. Es ist ersichtlich, dass der Prozentwert nicht abhängig von der Anzahl der Möglichkeiten ist, da es bei zwei Möglichkeiten einmal einen hohen (93 %) und einmal einen niedrigen (67 %) Prozentsatz gibt. Das Gleiche liegt bei 4 und 5 Möglichkeiten vor mit 100 und 60 %.

Tabelle 8: Ergebnisse nach dem Schlüssel von BARSCH (1978) (Datenaufnahme: Florian Mayer 2009)

Blockgletscher	1. Typ	2. Lage	3. Abstand Quellgebiet	4. Relief	5. Korngröße	6. Form	7. Komplexität	8. Form	9. Größe	10. Aktivität
1a	0	0	1	1	2	2	4	1	3	3
3a	3	0	1	2	2	2	4	2	2	1
3b	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1
3c	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1
4a	3	0	1	2	2	2	4	2	2	2
4b	2	4	1	1	2	1	0	1	3	1
4c	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1
4d	3	0	1	2	2	2	4	2	2	1
4e	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1
4f	1	2	2	1	1	1	0	3	2	2
5a	2	4	1	2	2	1	0	2	2	1
5b	3	2	1	2	2	2	4	2	2	1
5c	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1
5d	1	2	1	2	2	1	0	2	1	1
5e	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1

Tabelle 9: Auswertung der Blockgletschercharakteristika nach BARSCH (1978) (Aufnahme und Aufbereitung: Florian Mayer 2010)

	1. Typ	2. Lage	3. Abstand zum Quellgebiet	4. Relief	5. Korngröße
Modalwert	Talus	Talseitenwände	direkt angrenzend	gedämpftes Relief bis gut entwickelt	blockig
Anzahl der Möglichkeiten	3	5	2	3	2
Prozentsatz des Modalwerts	53 %	60 %	93 %	80 %	93 %

Fortsetzung Tabelle 9

	6. Form	7. Art der Komplexität	8. Form	9. Größe	10. Aktivität
Modalwert	singulär	Mehrere Quellgebiete	lobenförmig	Mittel	aktiv
Anzahl der Möglichkeiten	2	4	3	3	3
Prozentwert des Modalwerts	67 %	100 %	80 %	80 %	80 %

6.2 MTD-Standort- und Bodentemperaturanalyse

Von 30 applizierten MTD sind die Daten von 28 verfügbar. Einer konnte nicht gefunden werden und der zweite hatte eine Fehlfunktion, sodass die Daten nicht ausgelesen werden konnten. In Kapitel 6.2.1 Räumliche Verteilung werden alle 30 ausgelegten MTD diskutiert. Die Standorte wurden mit der Annahme, dass alle MTD nach dem Messzeitraum für die Modellierung verwendbare BTS Daten liefern, ausgewählt. In den weiteren Kapiteln werden nur mehr die verfügbaren 28 angesprochen, da nur diese für das Ergebnis relevant sind. Ab diesem Kapitel bezieht sich die Aussage "alle MTD" auf die Standorte und MTD, deren Messungen verfügbar sind.

6.2.1 Räumliche Verteilung

Abbildung 23 zeigt Standorte aller ausgelegten MTD. Sie sind über alle 6 Teilgebiete verteilt und kommen sowohl auf der nördlichen als auch auf der südlichen Seite der Seitentäler vor. Die Feucht- und Sumpfbereiche, die sich in der Mitte der Täler am Talboden erstrecken beinhalten keine MTD-Standorte. Im Teilgebiet 1 sind vier MTD in sehr kleinräumiger Entfernung von einander angebracht. Im Teilgebiet 2 ist nur ein MTD-Standort anzutreffen, da der Großteil des Seitentals durch eine schuttbedeckte Gletscherzunge ausgefüllt ist. In den Teilgebieten 3 - 5 sind 22 der 30 MTD stationiert. Dabei werden bei den Teilgebieten 3 und 4 auf der Nordseite (großräumig Südexposition) eine höhere Anzahl an Standorten ausgewählt. In Teilgebiet 5 ist die Nordexposition höher bestückt als die Südexposition. Bei Teilgebiet 6 kann man von einer flächenhaften Aufteilung sprechen, da das Teilgebiet im Vergleich zu den anderen sehr flach ist und keine Tälchen, wie Teilgebiet 4, aufweist. Weiters lässt sich erkennen, dass sich MTD-Standorte in kleinen Bereichen häufen, während andere Flächen nicht aufgenommen wurden. Hier war der Zugang entweder nicht möglich (z. B.: Westen des Teilgebietes 5) oder entsprach nicht den Kriterien (z. B.: Teilgebiet 2).

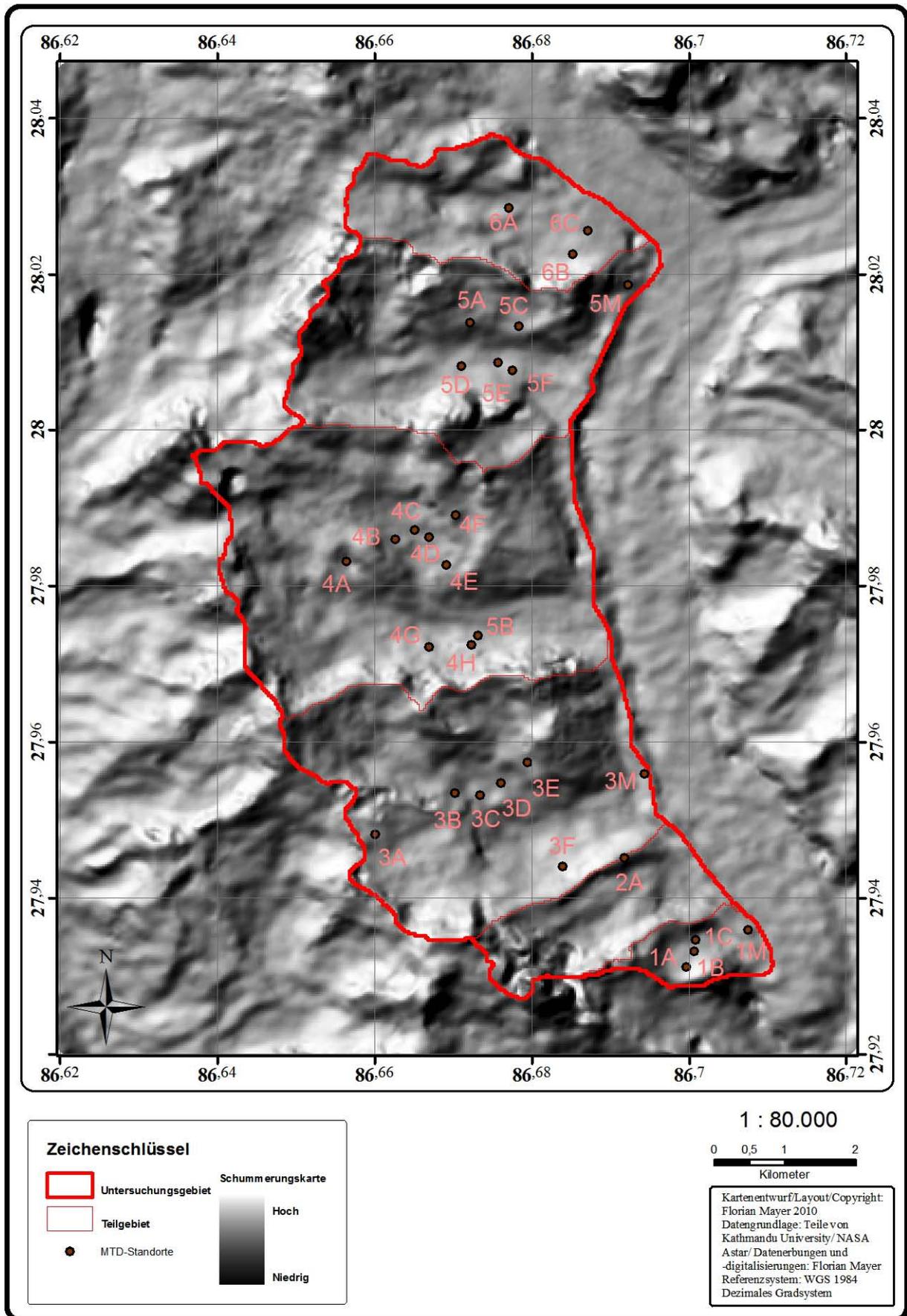


Abbildung 23: Verteilung der MTD in Gokyo 2010

6.2.2 Exposition der MTD-Standorte

Diagramm 3 zeigt den prozentuellen Anteil der Exposition im Untersuchungsgebiet, sowie die punktuelle Hangrichtung der MTD-Standorte. Die Exposition im Untersuchungsgebiet wurde schon im Kapitel 4.6 Exposition, Hangneigung und Lufttemperatur ausführlich diskutiert. Bei den MTD-Standorten ist die Südlage mit nur 7 % am wenigsten vertreten, während die Nordlage mit 39 %, dicht gefolgt von der Ostlage mit 36 %, die am häufigsten vertretenen Expositionen darstellen. Die Westlage hat einen Anteil von 18 % an den MTD-Standorten.

Der prozentuelle Unterschied zwischen den MTD-Standorten und dem Untersuchungsgebiet ist bei der Südlage mit 22 % am größten, danach folgen die Nordlage mit 15 % und die Westlage mit 10 %. Die Ostexposition ist mit einem Unterschied von 3 % nahezu gleich.

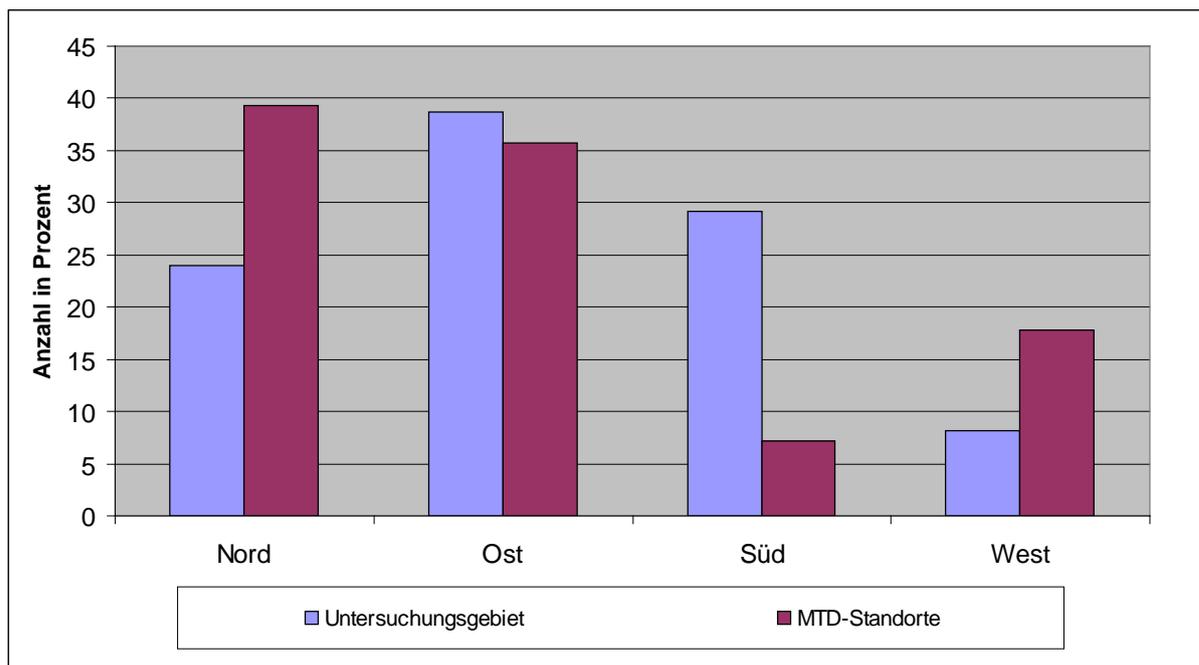


Diagramm 3: Vergleich der Exposition von Untersuchungsgebiet und MTD-Standorte (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

6.2.3 Hangneigung

Diagramm 4 setzt die Anzahl der Logger mit der Hangneigungsverteilung im Untersuchungsgebiet in Beziehung. Auf der x-Achse ist die Hangneigung in Grad aufgetragen. Die Anzahl der Logger für jedes Grad ist anhand von Säulen veranschaulicht,

deren Wertebereich auf der linken y-Achse dargestellt sind. Auf der rechten y-Achse kann man die Anzahl der Pixel ablesen, die im Diagramm linienhaft für jedes Grad dargestellt sind. Die Anzahl der Pixel im Untersuchungsgebiet steigt bis zu einer Neigung von 10 Grad auf 1800 Pixel an, hält sich leicht fallend bis 30 Grad, um sich dann bei knapp 90 Grad wieder 0 Pixel anzugleichen. Die MTD sind auf einer Hangneigung von 5 bis 35 Grad verteilt, 19 davon sind zwischen 10 und 25 Grad Neigung appliziert, 28 % aller MTD-Standorte liegen zwischen 20 und 25 Grad Hangneigung.

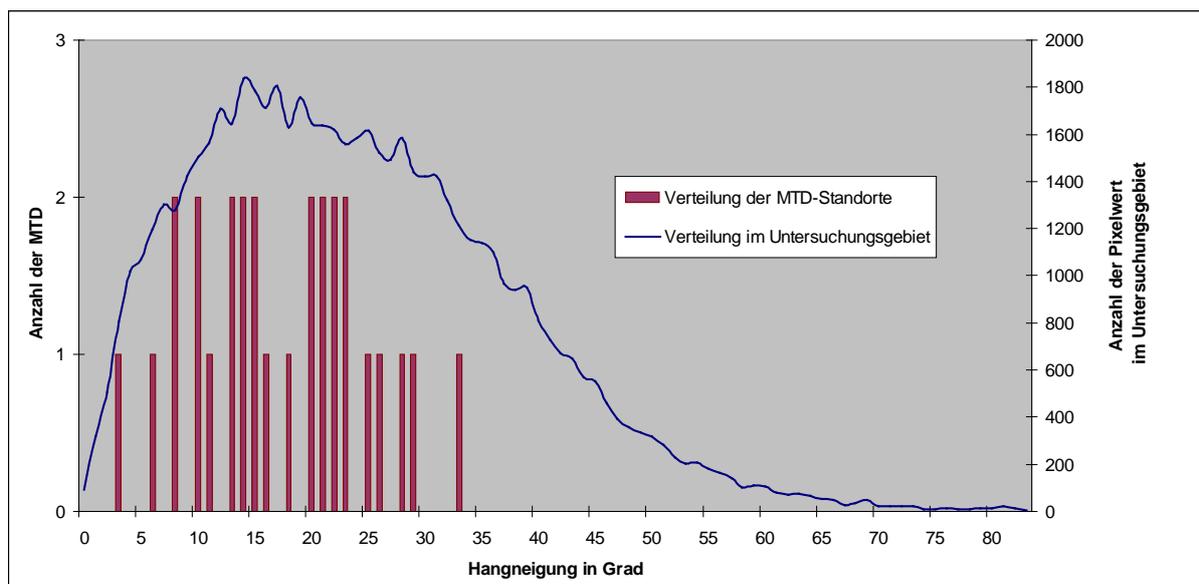


Diagramm 4: Vergleich der Hangneigung im Untersuchungsgebiet und an den MTD-Standorten (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

6.2.4 Standortcharakteristika

Tabelle 10 zeigt die Auswertung der direkten und kleinräumigen Charakteristika im Umkreis von 2 Meter aller MTD-Standorte. Den größten Anteil hat "erdig" bei den MTD-Standorten, sowohl direkt (82 %) als auch im „Umkreis“ (68 %). Der Anteil "sandige" ist mit 14 % bei direkt und Umkreis gleich hoch. Der Anteil "blockig" ist bei der direkten Umgebung mit 4 % und beim Umkreis 18 %. In Tabelle 11 ist die Auflistung der genauen Charakteristika einzusehen, jedoch werden diese in Beziehung zur BTS im Kapitel 6.2.6 dargestellt.

Tabelle 10: Auswertung der Standortcharakteristika (Datenaufnahme und -aufbereitung: Florian Mayer 2009/2010)

	erdig (Anteil in %)	sandig (Anteil in %)	blockig (Anteil in %)
Direkt	82	14	4
Umkreis	68	14	18

6.2.5 Zeitliche Einteilung des BTS-Zeitraums

Diagramm 5 zeigt die tägliche Standardabweichung des arithmetischen Mittels aller MTD-Daten, sowie den Zeitraum in dem diese Abweichung unter $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Das Diagramm zeigt, dass es zu hoher Abweichung innerhalb eines kleinen Zeitraums kommt (z. B.: 06.04. - 26.05.2010), aber auch Bereiche mit kleinen, niedrigen Schwankungen gibt (z. B.: 17.11. - 07.12.2009). Weiters erkennt man Zeiten, wo die Standardabweichung abrupt auf ein sehr niedriges Niveau fällt (z. B.: 31.12.2009; 26.01.2010). In vier Zeiträumen liegt die tägliche Standardabweichung unter $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da der Zeitraum vom 09.02. - 20.02.2010 der längste ist, wird dieser als BTS-Zeitraum bestimmt.

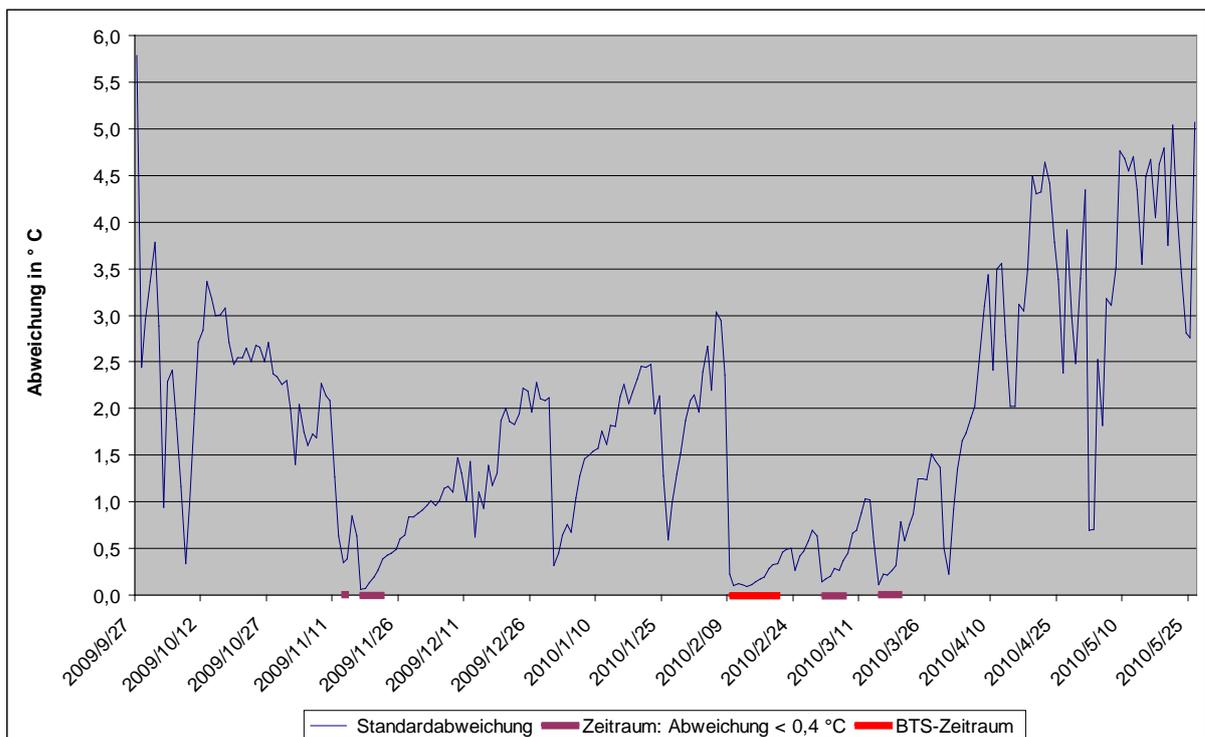


Diagramm 5: Darstellung der täglichen Standardabweichung über den gesamten Aufnahmezeitraum und Auswahl des BTS-Zeitraums (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufnahme: Florian Mayer 2010)

6.2.6 Verortung der BTS

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften der Standorte nach dem aufgenommenen Schema und der BTS sowie die tägliche Standardabweichung dargestellt, wobei die beiden

letzteren in ArcGIS visualisiert sind, während die Standorteigenschaften tabellarisch dargestellt werden. Die Beschreibung dieser Ergebnisse bezieht sich auf beide Darstellungen und ist mit dem Namen der MTD-Standorte bezeichnet.

Abbildung 24 zeigt den visualisierten Mittelwert der BTS-Temperatur innerhalb des BTS Zeitraums und die BTS-Abweichung. Dabei wird die BTS-Temperatur in Abbildung 24 nach der Permafrostzonierung nach HAEBERLI (1978) dargestellt. Tabelle 11 zeigt die zugehörigen Standortcharakteristika und die genauen BTS-Werte, sowie deren Abweichung.

Tabelle 11: Auflistung der Standortcharakteristika (erdig: 1; sandig: 2; blockig: 3), BTS und deren Abweichung in °C (n.v.: nicht vorhanden) (Quelle: Florian Mayer 2010)

Name	1A	1B	1C	1M	2A	3A	3B	3C	3D	3E	3F	3M	4A	4B	4C
Direkt	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
Umkreis	3	3	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
BTS	-5,9	-7,0	-1,2	-0,8	-2,0	-8,8	-4,5	-3,4	-3,7	-2,0	-5,5	-3,9	-3,8	n.v.	n.v.
Abweichung	0,03	0,10	0,15	0,09	0,06	0,21	0,27	0,16	0,08	0,19	0,07	0,12	0,31	n.v.	n.v.

Fortsetzung Tabelle 11

Name	4D	4E	4F	4G	4H	5A	5B	5C	5D	5E	5F	5M	6A	6B	6C
Direkt	1	1	2	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1
Umkreis	1	1	2	1	3	1	1	1	3	1	1	1	2	1	3
BTS	-2,9	-1,3	-5,4	-6,1	-8,9	-4,1	-7,4	-3,9	-6,7	-3,4	-6,2	-4,0	-4,9	-6,3	-5,9
Abweichung	0,22	0,14	0,20	0,03	0,08	0,09	0,17	0,10	0,62	0,21	0,19	0,52	0,20	0,27	0,38

In Teilgebiet 1 liegen vier MTD-Standorte, wobei alle eine tägliche Standardabweichung von unter 0,2 °C anzeigen. Die direkte Umgebung ist bei allen Standorten erdig, während sie beim Umkreis von einander abweichen. Die blockigen Umkreis-MTD-Standorte haben eine niedrige, die erdigen Direkt-MTD-Standorte haben eine hohe BTS.

In Teilgebiet 2 und 3 sind die Standortcharakteristika bei fast allen MTD erdig, sowohl im Umkreis, als auch direkt. Die BTS liegt in einem Bereich zwischen -8,8 und -2,0 °C und die Abweichung reicht von < 0,2 bis > 0,4 °C.

Nur 3A verhält sich anders als die restlichen BTS-Werte in diesem Gebiet, die Standortcharakteristika sind sandig. Zusätzlich weist er den niedrigsten BTS-Wert mit einer Differenz von 3,4 °C auf, was die Hälfte der gesamten Bandbreite darstellt. Seine tägliche Standardabweichung ist zwischen 0,2 und 0,4 °C.

Die MTD 3B bis 3E bilden eine Transekte durch das Tälchen in Teilgebiet 3. Die BTS nimmt von Westen nach Osten um 2,5 °C zu. Die Standardabweichung liegt bei 3B zwischen 0,2 und 0,4 °C und bei den anderen drei unter 0,2 °C.

3F und 3M weisen ein BTS von -5,4 und -3,8 °C und eine Abweichung < 0,2 °C auf.

In Teilgebiet 4 bilden die MTD 4A bis 4F eine Transekte durch die Tälchen im nördlichen Bereich und die MTD 4G, 4H und 5B sind im südlichen Bereich (Nordexposition) des Teilgebiets angebracht.

Die Standortcharakteristika sind im nördlichen Bereich erdig oder sandig. Die BTS ist zwischen -5,4 und -1,3 °C und die Abweichung verbleibt unter 0,4 °C.

Die MTD-Standorte 4D und 4E liegen nahe beieinander im gleichen Bereich und zeigen BTS-Werte über -3 °C an.

Die drei MTD am Nordhang haben eine tiefe BTS von unter -6,1 °C und eine Standardabweichung kleiner 0,2 °C.

In Teilgebiet 5 liegen die MTD 5A und 5C in Südexposition und 5D bis 5F in Nordexposition. MTD 5M ist auf der Seitenmoräne des Nogzumba Gletschers.

Die BTS der MTD auf Südexposition liegen um -4 °C und weisen eine Standardabweichung um 0,1 °C auf. Die Standortcharakteristika sind erdig, wobei bei 5A die direkte Umgebung sandig ist.

Auf der Nordexposition und der Seitenmoräne sind die BTS und die Standardabweichung von je zwei MTD ähnlich und unterschiedlich. Das heißt, dass 5D und 5F eine ähnlich niedrige BTS haben, aber eine stark unterschiedliche Abweichung, während 5D und 5M ähnliche Abweichung haben, allerdings eine stark unterschiedliche BTS. Die Standortcharakteristika sind hauptsächlich erdig, bei 5D aber blockig. Die BTS ist bei 5D und 5M mit um -6,4 °C sehr niedrig und die Standardabweichung mit über 0,4 °C sehr hoch. Bei 5E und 5F ist die Standardabweichung unter 0,2 °C und die BTS ist im Bereich von -3,5.

In Teilgebiet 6 sind die MTD-Standorte in der direkten Umgebung erdig, während im Umkreis alle drei Charakteristika vertreten sind. 6A ist sandig, 6B ist erdig und 6C ist blockig. Die BTS ist bei 6B und 6C um -6,1 °C, die Standardabweichung zwischen 0,2 und 0,4 °C. Bei 6A beträgt die BTS -4,9 °C und die Standardabweichung ist unter 0,2 °C.

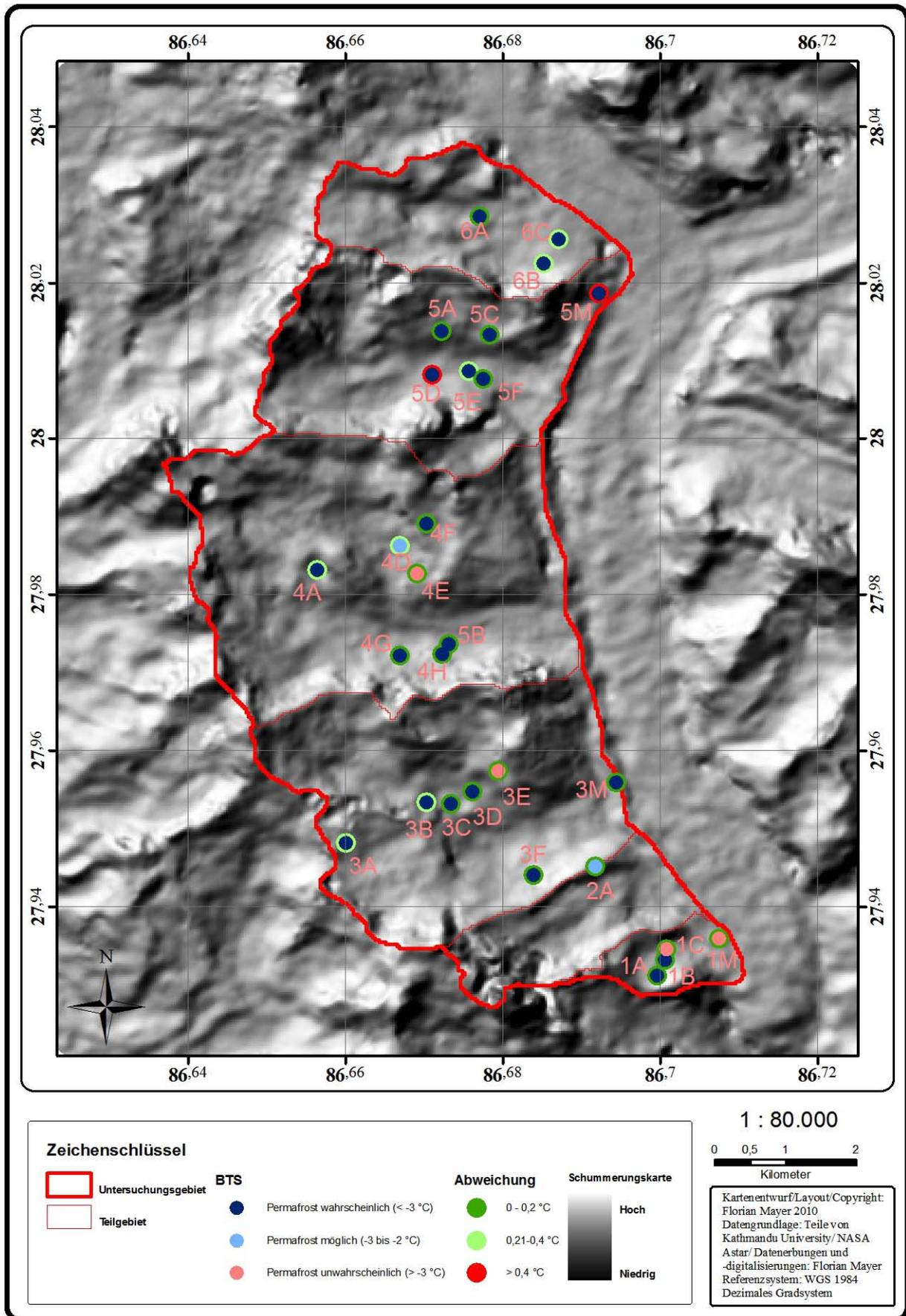


Abbildung 24: Darstellung der BTS und BTS-Abweichungen im Untersuchungsgebiet

6.3 Permafrostmodellierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Permafrostmodellierungen vorgestellt. Dafür wurden Karten generiert und Diagramme erstellt. Die Säulendiagramme (z. B.: Diagramm 7) stellen den prozentuellen Flächenanteil der Permafrostzonen innerhalb eines Teilgebietes dar. Ein größeres Teilgebiet, kann eine absolut größere Fläche einer Permafrostverbreitzungszone haben und trotzdem einen prozentuell kleineren Anteil als ein benachbartes Gebiet, das eine absolut gesehen kleinere Fläche dieser Zone hat.

6.3.1 Blockgletscherindikator

Diagramm 6 zeigt die Permafrostverbreitung im Kreisdiagramm, nach den Mittelwerten der jeweiligen intakten Blockgletscher in der speziellen Exposition. Die einzelnen Höhenstufen sind in 50 Meter Schritten angegeben. Das Diagramm zeigt, dass die Permafrostverbreitung nach Höhenstufen im Norden am höchsten ist, es folgt Westen und danach Osten. In südexponierten Gebieten ist die Permafrostverbreitung nach den gerundeten Diagrammschritten auf 5250 Meter Seehöhe.

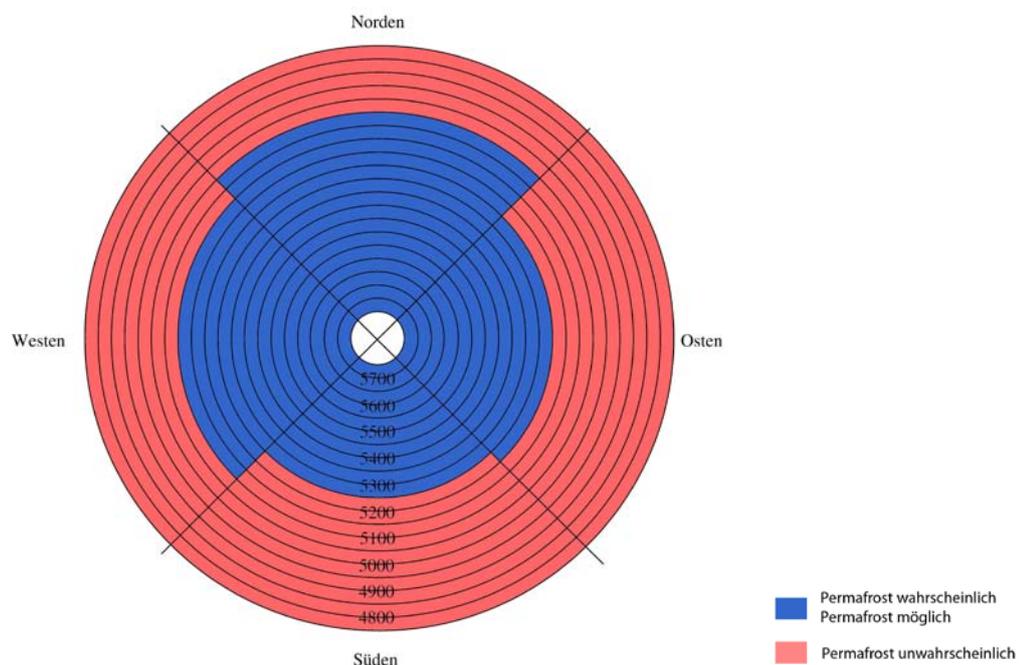


Diagramm 6: Permafrostverbreitung nach Exposition und Seehöhe in 50 Höhenmeterschritten (Blockgletscherindikator) in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

Diagramm 7 zeigt die prozentuelle Aufteilung der Permafrostverbreitung nach Gebieten. Die Permafrostverbreitung nimmt vom tiefsten bis zum höchsten Teilgebiet stetig zu. Im Teilgebiet 1 ist auf 96 % der Fläche Permafrost unwahrscheinlich, während bei Teilgebiet 4 nur mehr 52 % der Fläche als Permafrost unwahrscheinlich eingestuft werden. Ab Teilgebiet 5 überwiegt die Fläche auf der Permafrostvorkommen entweder als wahrscheinlich oder als möglich eingestuft wird. Im hochgelegenen Teilgebiet 6 sind auf 76 % der Fläche Permafrost möglich oder wahrscheinlich. Im Gesamtgebiet überwiegt die Fläche auf der Permafrost unwahrscheinlich ist mit 51 %.

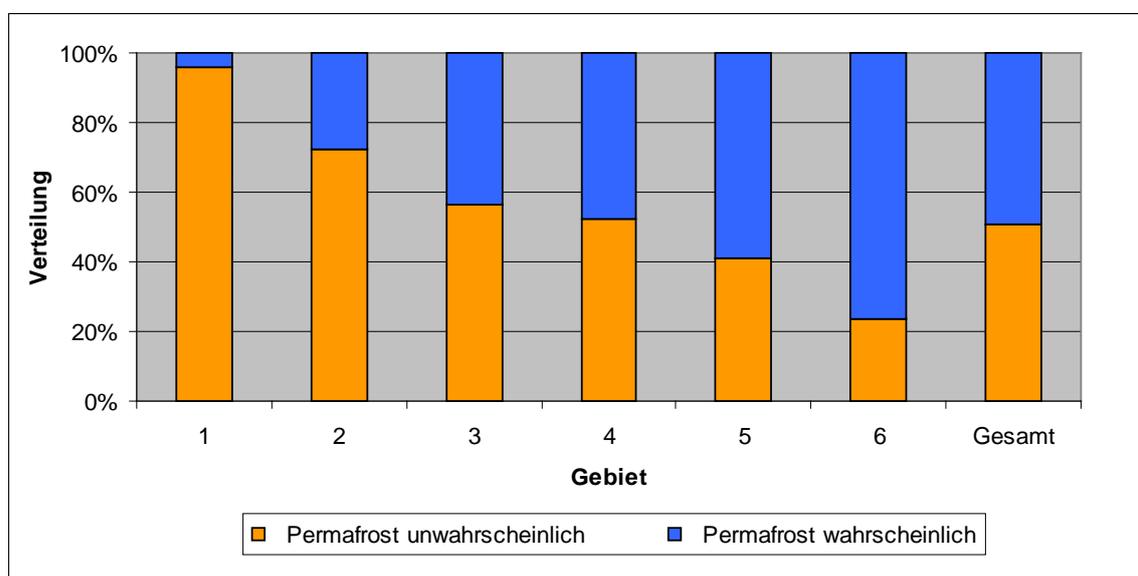


Diagramm 7: Prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach Blockgletscherindikator (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

Abbildung 25 veranschaulicht die Permafrostverbreitung. Weite Teile sind mit Permafrost unwahrscheinlich gekennzeichnet. Nur Bereiche in sehr hoher Lage und Bereiche in Nordlage weisen wahrscheinliche Permafrostverbreitung auf. Einige intakte Blockgletscher liegen zur Gänze im Permafrost unwahrscheinlichen Bereich. Der reliktsche Blockgletscher im Teilgebiet 1 liegt weit unterhalb des ersten wahrscheinlichen Permafrostvorkommens. Im Teilgebiet 5 liegen alle Blockgletscher der Nordexposition innerhalb, nur der südexponierte liegt außerhalb des Permafrostbereichs.

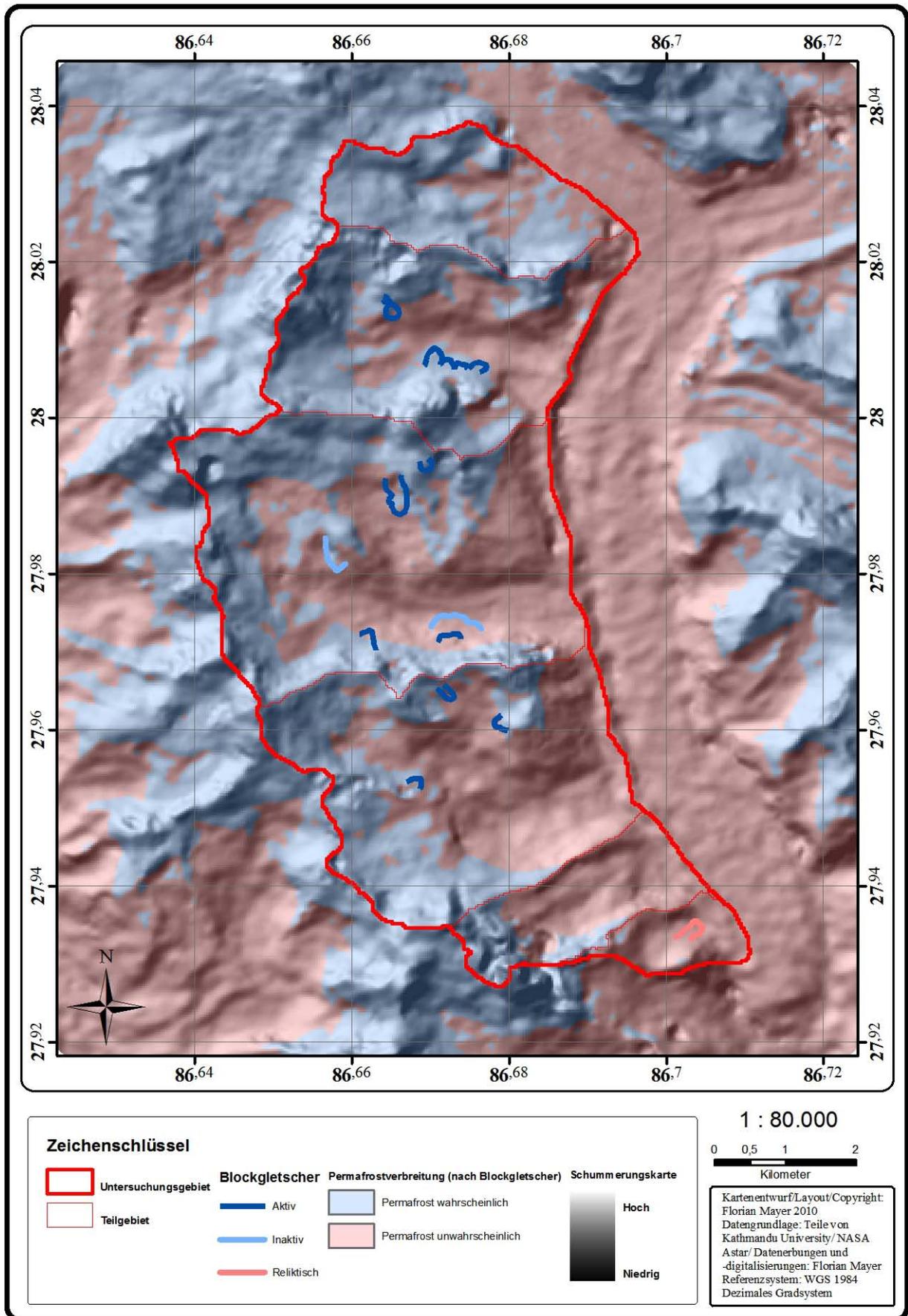


Abbildung 25: Modellierung der Permafrostverbreitung auf Basis der Verteilung der Blockgletscher (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010

6.3.2 BTS-Indikator

Die SPSS-Korrelationsanalyse ergab für den Monat Jänner den R²-Wert, der Erklärungsgehalt, von 0,508, auf dem 0,005 Signifikanzniveau. Dieser war von allen Korrelationskoeffizienten der höchste, weswegen dieser Koeffizient weiterverwendet wurde.

Die SPSS-Regressionsanalyse ergab folgende Formel:

$$PV = 35,31926468969 + (DEM * -0,008712934677108) + (tDSRJ * 0,001498803394125)$$

- PV die gesuchte räumlich modellierte Permafrostverbreitung
- tDSRJ die direkte tägliche Sonneneinstrahlung im Jänner
- DEM das Digitale Höhenmodell

Dabei hat die Konstante eine Signifikanz von 0,004, während tDSRJ eine von 0,000 und das DEM eine von 0,001 haben. Der R²-Wert des Modells beträgt 55,3 %.

Diagramm 8 zeigt die Verteilung des Permafrosts nach dem BTS-Indikator. Demnach ist Permafrost im Untersuchungsgebiet stark vertreten. 83 % der Gesamtfläche weisen die Zonierung "Permafrost wahrscheinlich" auf. Bei weiteren 9 % Fläche ist Permafrost möglich. In allen Teilgebieten, bis auf Teilgebiet 6, verbleibt "Permafrost unwahrscheinlich" zwischen 8 und 10 %. In Teilgebiet 6 ist der Anteil an "Permafrost wahrscheinlich" 99 %. "Permafrost wahrscheinlich" nimmt prozentuell nach Teilgebietnummer zu und dementsprechend die Zone "Permafrost möglich" stark ab. Im Teilgebiet 1 beträgt sie noch 40 %, bei Teilgebiet 4 nur mehr 7 %.

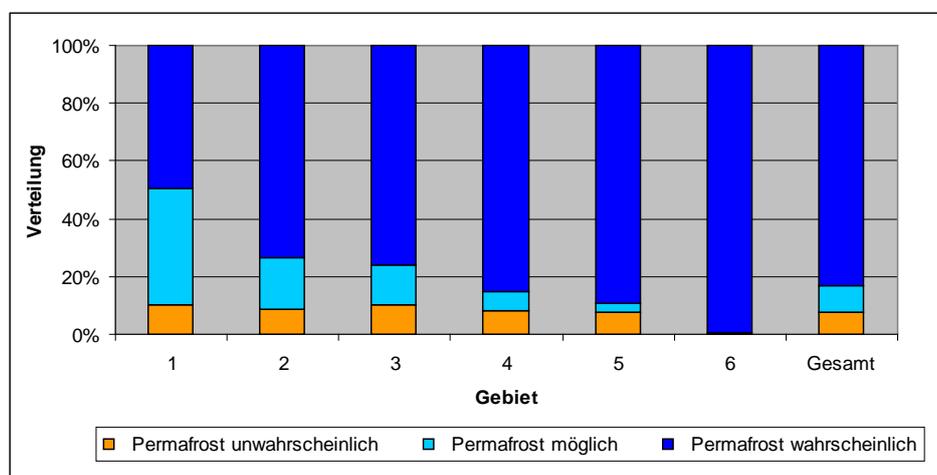


Diagramm 8: Prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach dem BTS-Indikator in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

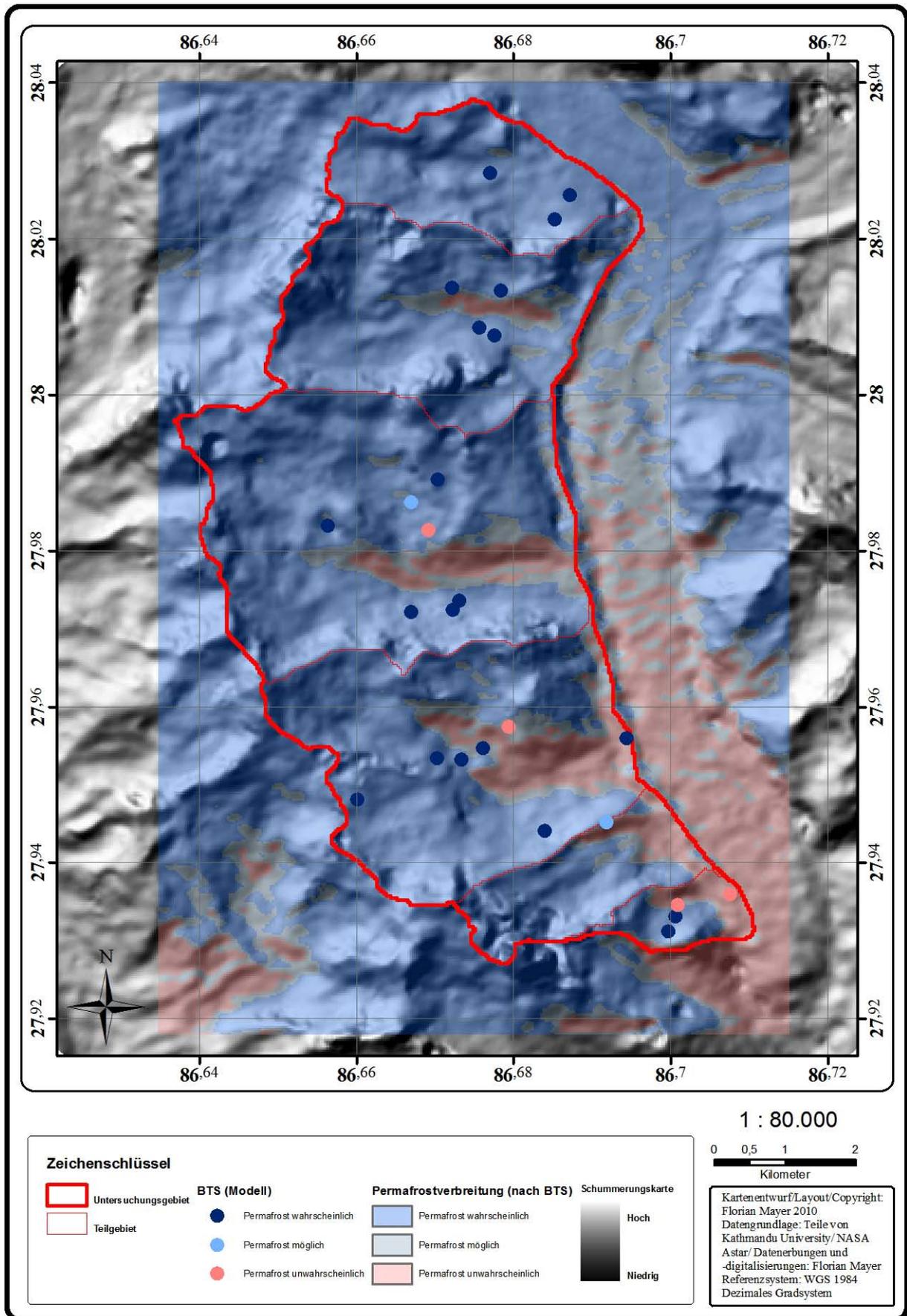


Abbildung 26: Modellierung der Permafrostverbreitung durch BTS-Messungen in Gokyo 2010

Abbildung 26 zeigt die räumliche Permafrostverteilung nach dem BTS-Indikator, wobei fast das gesamte Untersuchungsgebiet Permafrostverbreitung aufweist. Fast alle MTD, die Permafrost anzeigen liegen auch im Permafrostgebiet, allerdings liegen auch einige MTD, die möglichen oder unwahrscheinlichen Permafrost anzeigen innerhalb des Permafrostgebietes.

6.3.3 Szenario Temperaturanstieg

Nach dem A1F1 Szenario von IPCC gibt es einen Temperaturanstieg von 0,92 °C bis 2039 in Nepal-Himalaja. Die nachfolgenden Abbildungen stellen die mögliche Permafrostverbreitung nach diesem Szenario für 2039 dar.

Diagramm 9 zeigt, dass die Prozentwerte der Verbreitung von "Permafrost unwahrscheinlich" in Zukunft im Vergleich zu 2009/10 (vgl. Diagramm 7) stark zunehmen werden. In Teilgebiet 1 ist Permafrost zur Gänze unwahrscheinlich. Im Gesamtgebiet beträgt der Bereich "Permafrost wahrscheinlich" und "Permafrost möglich" nur mehr 21%, wobei Teilgebiet 5 und 6 einen Anteil von 26 bzw. 39 % aufweisen.

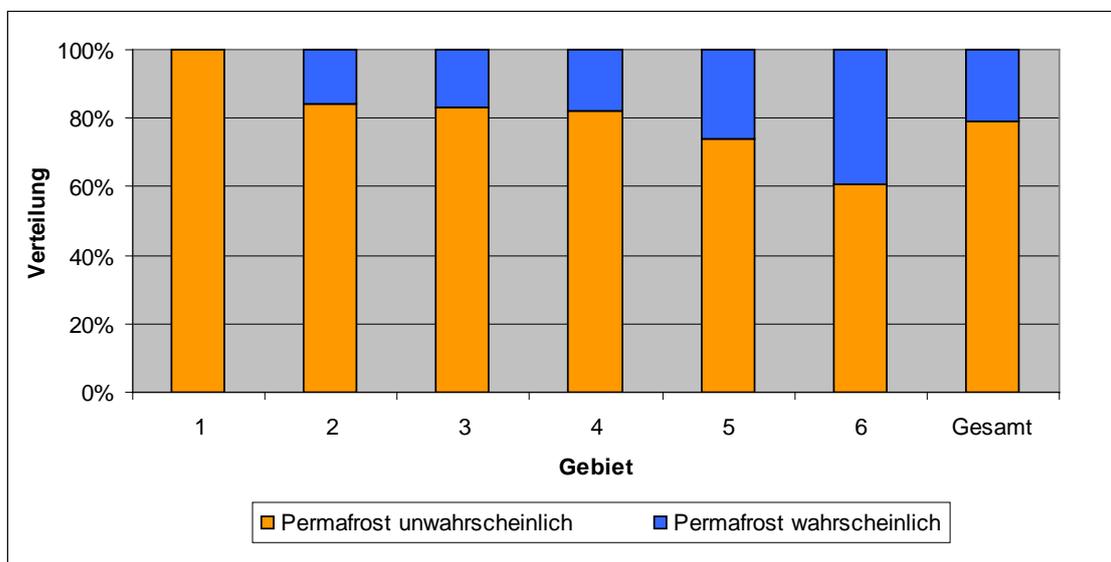


Diagramm 9: Mögliche zukünftige prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach Blockgletscherindikator (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

Diagramm 10 zeigt die möglichen Permafrosthöhenstufen in der Zukunft. Die relative Verteilung ist gleich geblieben, daher sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Expositionen gleich, während sich die absolute Seehöhe der Permafrostuntergrenze in größere Höhen verschoben hat.

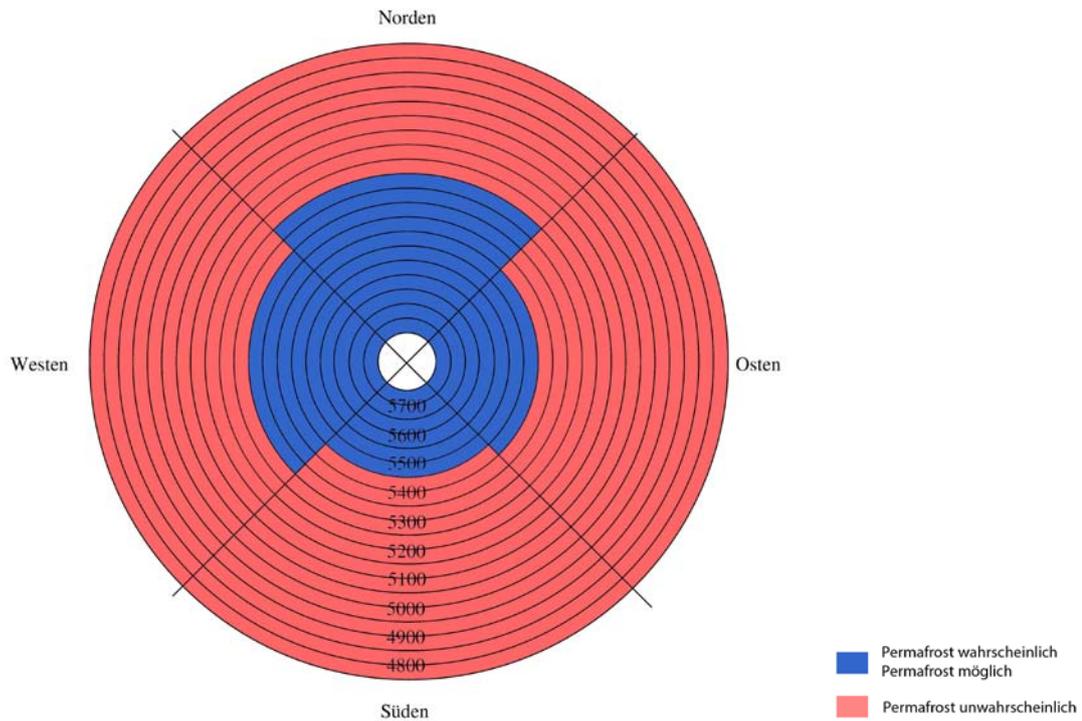


Diagramm 10: Mögliche zukünftige Permafrostverbreitung nach Exposition und Seehöhe in Meter in Gokyo 2010 (Blockgletscherindikator) 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

Abbildung 27 zeigt die Permafrostverbreitung nach dem Szenario des Temperaturanstiegs. Die Permafrostbereiche sind stark zurückgegangen, die Permafrostverbreitung beschränkt sich nur mehr auf hohe Berggipfel im Untersuchungsgebiet. Alle Seitentäler weisen am Talboden eine Permafrost unwahrscheinlich Zone auf.

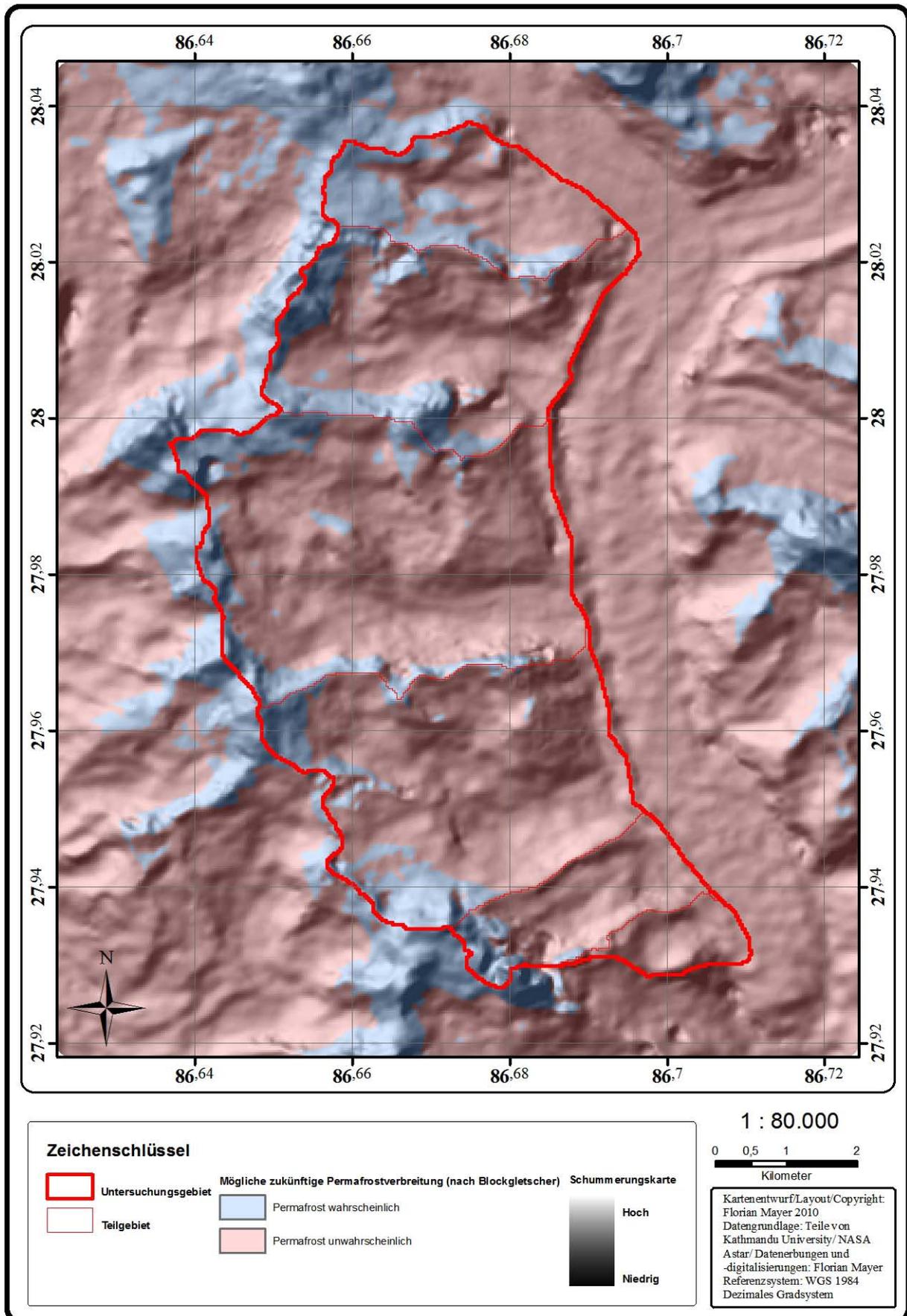


Abbildung 27: Modellierung der möglichen zukünftigen Permafrostverbreitung durch die Verteilung der Blockgletscher (Zone "Permafrost wahrscheinlich" beinhaltet auch "Permafrost möglich") und dem genannten Temperaturanstieg von IPCC (2007) in Gokyo 2010

Diagramm 11 zeigt die prozentuelle Permafrostverbreitung nach dem möglichen Temperaturanstieg aufbauend auf das BTS-Modell. Im Untersuchungsgebiet beträgt die wahrscheinliche Permafrostverbreitung 72 %. Bei 16 % der Fläche ist Permafrost möglich und bei 12 % ist er unwahrscheinlich. Teilgebiet 1 hat mit 49 % den prozentuell größten Anteil an der Zone "Permafrost möglich", bei 11 % ist Permafrost unwahrscheinlich. Die Zone "Permafrost wahrscheinlich" steigt mit der Seehöhe der Teilgebiete an. Die Teilgebiete 2 und 3 sind fast gleich mit 63, 64 % und die Teilgebiete 4 und 5 sind ebenfalls fast gleich mit 74 und 75 %, während Teilgebiet 6 mit 95 % den größten Anteil hält.

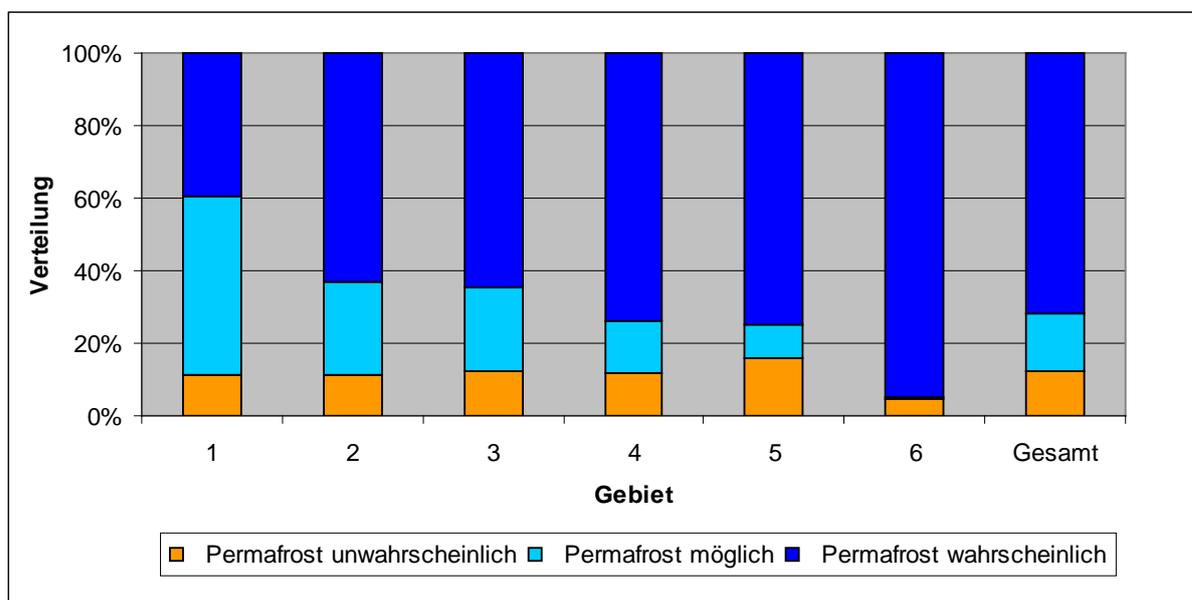


Diagramm 11: Mögliche zukünftige prozentuelle Verteilung des Permafrosts nach BTS-Indikator in Gokyo 2010 (Datengrundlage: NASA Astar/ Florian Mayer; Datenaufbereitung: Florian Mayer 2010)

Abbildung 28 zeigt die räumliche Verteilung der Permafrostzonen in Gokyo mit einem möglichen Temperaturanstieg von 0,92 °C bis zum Jahr 2039 (siehe Kapitel 2.5 Klimaänderungen). Bereiche der unwahrscheinlichen Permafrostverbreitung sind auch im Teilgebiet 6 sichtbar und die Permafrostgebiete werden kleiner. Weiters lässt sich erkennen, dass die Zone "Permafrost möglich" vor allem im Teilgebiet 4 und 5 fleckenhaft ausgeprägt ist.

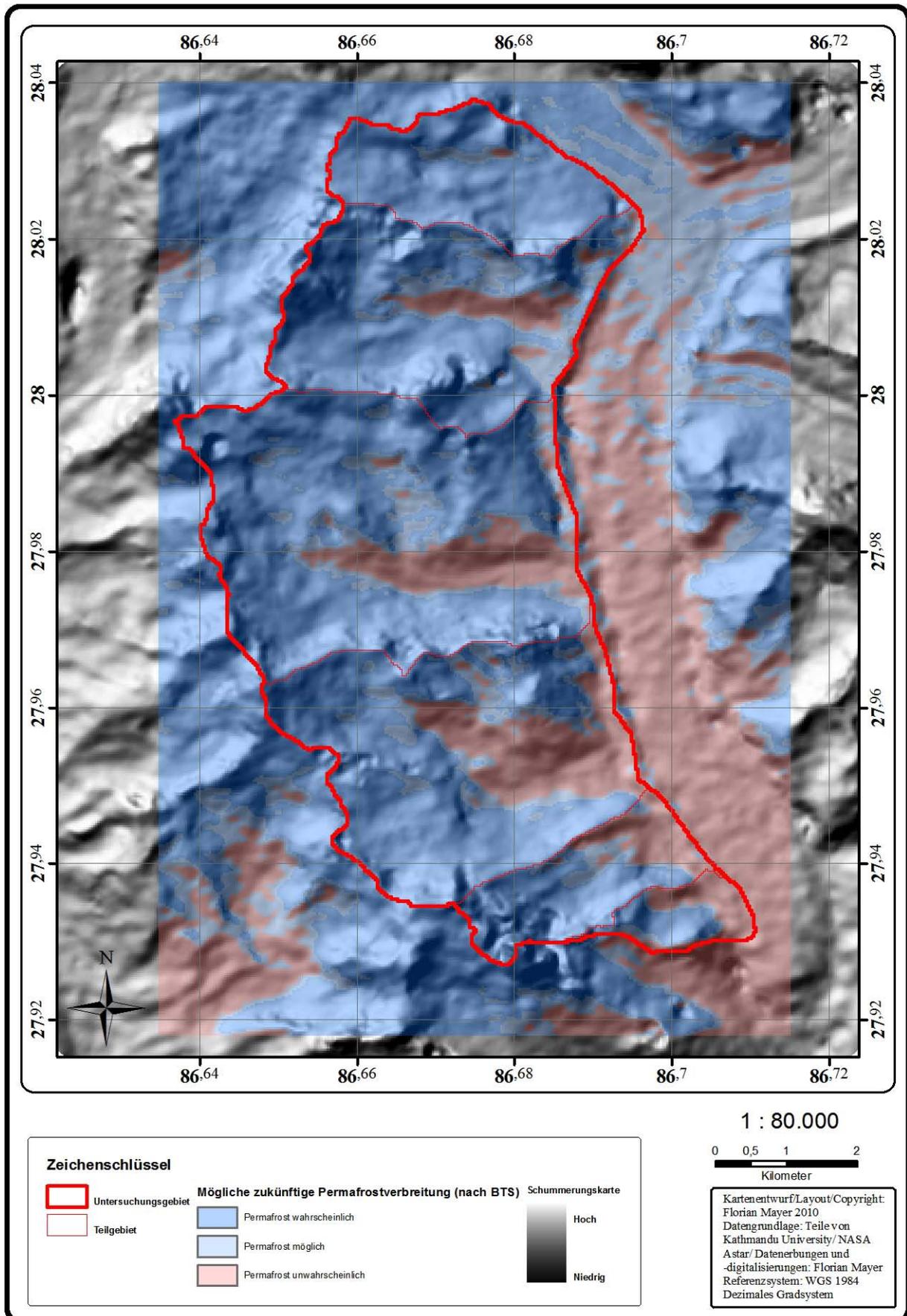


Abbildung 28: Modellierung der möglichen zukünftigen Permafrostverbreitung durch BTS-Messungen und den genannten Temperaturanstieg von IPCC (2007) in Gokyo 2010

7 Unsicherheiten

Die Kartierungsgrundlagen NASA Astar, das 4 Kanal Satellitenbild und das Orthofoto bieten eine Auflösung, die eine Analyse der Fragestellungen ermöglichen. Flächenschritte von 900 m² (30 Meter Auflösung) sind für Blockgletscher, deren Ausdehnung sich nach BARSCH (1978) im Mittel zwischen 10.000 und 100.000 m² bewegt, ausreichend. Da beide Fernerkundungsbilder eine höhere Auflösung von ungefähr 4 Metern haben, ist die Digitalisierung von Geländeformen genauer als die Datengrundlage auf der die Analyse aufbaut. Die Aufnahme der MTD-Standorte durch das GPS weist eine ungefähre Genauigkeit von drei Metern bei 200 facher gemittelter Messung auf.

Die Kartierung erfolgte durch qualitative visuelle Kriterien. Diese sind auf Fernerkundungsdaten und im Feld gut abgrenzbar. Trotzdem kommt es vereinzelt zu einem verschwommenen Übergang zwischen den Kriterien, die Blockgletscher von anderen Oberflächenformen, wie schuttbedeckten Gletscherzungen, unterscheiden. Dadurch könnten in kleinräumigen Bereichen Oberflächenphänomene, die Blockgletschern sehr ähnlich sind, diesen zugeordnet werden. Die Entscheidung ob ein Blockgletscher vorherrscht, kann durch stichhaltige Argumente untermauert werden, was aber trotzdem, gerade bei nicht genau abgrenzbaren Phänomenen, eine Ungenauigkeit der subjektiven Aufnahme beinhaltet. Da es mehrere Kriterien für Blockgletscher gibt und diese erst im Zusammenspiel einen Blockgletschertyp ausmachen, wird die Subjektivität der Aufnahme aber stark vermindert. Meistens kann nur ein Kriterium, wie oberflächliches Relief, nicht einwandfrei zugeordnet werden. Die Gesamtausprägung Blockgletscher wird durch weitere Kriterien gefestigt, was zu einer objektiven Klassifizierung der Oberflächenformen führt.

Die Unsicherheit der Kartierung wird bemessen nach der Zusammenführung mit der Datengrundlage. Die Grenzen der Teilgebiete sind aus dem NASA DEM generiert, während die Fernerkundungsdaten projiziert und manuell verortet wurden (vgl. Kapitel 3.2 Vorarbeit). Ungenauigkeiten zwischen Fernerkundungsbildern und NASA DEM können bei der Grenze zwischen den Teilgebieten durch die Grenzlinie und den Schatten am Fernerkundungsbild qualitativ abgeschätzt werden (Abbildung 14). Sie beträgt für das Satellitenbild zwischen Teilgebiet 3 und 4 ungefähr 60 - 90 Meter, dies entspricht zwei bis drei Pixel des NASA DEMs. Bei der Grenze des Teilgebiets 5 und 6 kann der Unterschied geringer sein (0 Meter/0

Pixel), aber auch bedeutend höher (210 Meter/7 Pixel). Die Ungenauigkeit des Orthofotos lässt sich zwischen Teilgebiet 2 und 3 ungefähr auf 150 Meter/5 Pixel schätzen.

Die Blockgletscher wurden nach dem Fernerkundungsbild kartiert, während die Analyse auf dem in der gleichen Position liegenden NASA Astar durchgeführt wurde. Dadurch sind Blockgletscher auf den Fernerkundungsbildern lagerichtig, während sie durch die Lageungenauigkeit des Fernerkundungsbildes zum NASA Astar lageungenau liegen. Damit erfährt die Analyse eine Verschiebung der Blockgletscher. Sie werden dadurch entweder als höher, niedriger oder gleich bleibend analysiert. Durch Verzerrungen der Fernerkundungsbilder kann es aber innerhalb von Blockgletschern zu Ungenauigkeiten kommen. Auch bei großen Blockgletschern kann eine Verschiebung vorhanden sein. Der Höhenfehler, der aus der Verschiebung entsteht, wird gerade in steilen Hangbereichen größer, da hier eine Verschiebung abwärts oder aufwärts einen größeren Gradienten aufweist als eine Verschiebung im flachen Bereich. Da lobenförmige Blockgletscher in Hangfuslage vorkommen, wäre eine Verschiebung hangabwärts mit geringeren Fehlern behaftet als eine Verschiebung hangaufwärts. Bei zungenförmigen Blockgletschern, die sich zumeist aus Endmoränenmaterial entwickeln, kann der Höhenfehler geringer sein, da Endmoränen eher in Talmitte vorkommen und damit eine größere Entfernung zu steilen Hängen haben. Deshalb können Blockgletscher aus Endmoränen in jede Richtung verschoben werden und weisen trotzdem die gleiche Fehlergröße auf.

Daraus ergibt sich, dass die Permafrostmodellierung eine Höhenunsicherheit aufweist, die auf den Blockgletscherunsicherheiten aufbaut. Die Blockgletscherhöhen wurden nach Exposition gemittelt. Kommen Blockgletscher in unterschiedlichen Teilgebieten in der gleichen Exposition zahlreich vor, so können Unsicherheiten minimiert werden, da die Lageungenauigkeit regional unterschiedlich ist. Damit gilt die Einstufung der Höhengrenze in Nordexposition als sicher, da hier der Mittelwert aus 8 Blockgletschern genommen wurde. Bei den anderen Expositionen sind nur ein bis vier Blockgletscher vorhanden. Trotzdem kann die Genauigkeit sehr hoch sein, wenn die Blockgletscherstandorte eine hohe Lagegenauigkeit aufweisen und sie für die jeweilige Exposition repräsentativ sind.

Die Größenordnung der Ungenauigkeit beträgt zwischen 10 und 100 Metern, da eine Verschiebung bei sehr steilen Bereichen von zum Beispiel 3 Pixel/90 Meter einen Höhenunterschied von 100 Meter ausmachen kann. Im flachen Bereich kann der Unterschied nur 10 Meter betragen. Damit sind die Grenzen der Permafrostverbreitung nach Blockgletscher zwischen ungefähr 10 und 100 Höhenmeter ungenau. Weiters ist eine Unterteilung in kleinere Expositionsschritte nicht erfolgt, da nicht genügend Blockgletscher

zur Verfügung standen. Deswegen ist die Permafrostverbreitung innerhalb der einzelnen Expositionen als Richtwert zu sehen.

Das Koordinatensystem der Analysegrundlage der MTD-Standorte ist gleich dem des Aufnahmekoordinatensystems. Dadurch ist eine Verschiebung ausgeschlossen. Da die MTD-Standorte eine höhere Lagengenauigkeit aufweisen, als das NASA Astar, wird die räumliche Analysegenauigkeit ausschließlich vom NASA Astar bestimmt.

Die MTD wurden einige cm tief in die Erde vergraben und unterscheiden sich daher zum Teil von der BTS-Sonden. Die MTD wurden in anderen Studien (HOELZLE ET AL. 1999, ISHIKAWA und HIRAKAWA, 2000; ETZELMÜLLER ET AL., 2001) unterschiedlich am Untergrund befestigt. Eine einwandfreie Durchführung der BTS Messung war schon zum Zeitpunkt der Benutzung von MTD nicht mehr möglich, da die BTS-Sonden Methode erprobt ist, während die MTD-BTS noch erforscht wird. Auch konnten keine weiteren Parameter, wie die Schneehöhe oder die Lufttemperatur gemessen werden, was die gesamte Analyse in einen Graubereich mit vielen Unsicherheiten stellt.

Die Temperaturdaten der MTD beinhalten ebenfalls große Unsicherheiten. Die Lufttemperatur für den Untersuchungszeitraum steht nicht zur Verfügung. Daher ist die Annahme, dass eine Entkoppelung der Bodentemperatur von der Lufttemperatur durch eine ausreichend hohe Schneedecke stattgefunden hat, mit großen Unsicherheiten behaftet. Es könnten auch über eine längere Zeit starker Nebel und Wolken geherrscht haben, was eine konstante Lufttemperatur und damit Bodentemperatur ermöglichte. Zur Abschätzung dieser Unsicherheit konnten keine Aufzeichnungen ausgewertet werden. Des Weiteren ist es möglich, dass die Dauer der Schneedecke nicht ausreichend lang war. Damit könnte sich die Bodentemperatur nicht auf das Temperaturregime des Untergrundes eingestellt haben und somit eine Übergangstemperatur zwischen Lufttemperatur und Temperatur des Untergrundes gemessen worden sein. Zu dieser Unsicherheit gibt es keine Aufzeichnungen.

Die BTS wurde als Mittelwert des längsten Zeitraums angenommen, in dem die tägliche Standardabweichung unter $0,4\text{ °C}$ verbleibt. Das ist die doppelte Schwankungsbreite als bei NYENHUIS (2006) angenommen wurde und ergibt eine Abweichung von $0,8\text{ °C}$. Die Zone "Permafrost möglich" hat im Mittel eine BTS von $-2,5\text{ °C}$. Dieser Mittelwert könnte aufgrund der Unsicherheit zwischen $-2,9$ und $-2,1\text{ °C}$ schwanken, bleibt aber dennoch innerhalb der eigentlichen Zone. Erst in Nähe der Grenzwerte kommt es zu Unsicherheiten, in der die Bereiche die Permafrostzonen wechseln könnten. Damit sind diese Grenzwerte die Bereiche größter Unsicherheit. Die Zone "Permafrost möglich" weist nur zwischen $-2,4$ und $-2,6\text{ °C}$

einen sicheren Bandbereich auf, die restlichen $0,8\text{ °C}$ sind unsicher. Weiters wird diese Zone in der Klassifizierung nach HAEBERLI ET AL. (1993) generell als Graubereich definiert. Aufgrund dessen kann diese Zone generell für unsicher angesehen werden. Die anderen Zonen sind auf eine Seite offen, so ist die Zone "Permafrost wahrscheinlich" als $< - 3\text{ °C}$ definiert. Damit ist nur die Bandbreite von $- 3$ bis $- 3,4\text{ °C}$ als unsicher zu betrachten, da die Abweichung kleiner als $0,4\text{ °C}$ sein muss. Damit kann selbst wenn die maximale mögliche Abweichung von $0,4\text{ °C}$ erreicht ist, ab einer BTS von unter $- 3,5\text{ °C}$ kein Wechsel der Permafrostzone mehr stattfinden. Damit ist die Unsicherheit bei den Zonen "Permafrost wahrscheinlich" und "Permafrost unwahrscheinlich" geringer, als bei der Zone "Permafrost möglich".

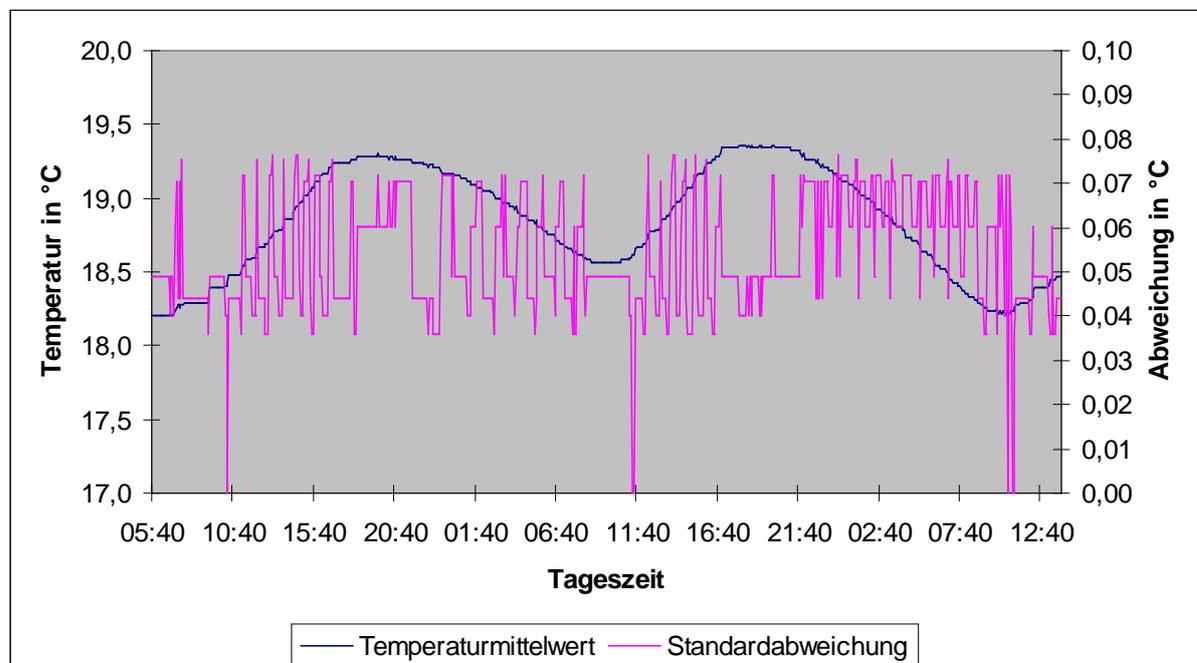


Diagramm 12: Temperatur und Standardabweichung von 5 MTD unter Laborbedingungen (Quelle: Florian Mayer 2010)

Diagramm 12 zeigt, dass die Temperatur innerhalb des Analysezeitraums zwischen $18,20$ und $19,36\text{ °C}$ schwankte. Die Standardabweichung liegt zwischen $0,00$ und $0,08\text{ °C}$. Das arithmetische Mittel der Standardabweichung beträgt $0,05\text{ °C}$ Abweichung. Damit kann von einer sehr geringen Abweichung der MTD zueinander ausgegangen werden. Die Unsicherheit ist vernachlässigbar. Trotzdem sind die Temperaturwerte nicht mit einem externen Temperaturmessgerät geeicht, was bedeutet, dass ein systematischer Fehler der Temperatureaufzeichnung vorliegen kann. Die Logger wurden bei Zimmertemperatur im Wasser überprüft. Der Mittelwert beträgt $19,36\text{ °C}$. Damit kann eine grobe qualitative

Abschätzung erfolgen, dass die MTD nicht stark vom wahren Wert abweichen, jedoch verbleibt eine systematische Unsicherheit bei der Permafrostmodellierung vorhanden.

Die Modellierung wurde mit 28 Temperaturwerten, Höhe und Einstrahlung durchgeführt. Die Signifikanz ist mit 0,004 ausreichend, jedoch ist der Erklärungsgehalt der Regression nur bei 55,3 %. Das bedeutet, dass 44,7 % der Temperaturwerte nicht erklärt werden konnten. Damit weist die abgebildete Permafrostverbreitung zusätzlich zu den vorher aufgezeigten Fehlermöglichkeiten große Unsicherheiten auf.

Die Modellierung der zukünftigen Permafrostverbreitung wurde auf einem Szenario aufgebaut, das sozioökonomische Variablen verwendet um die mögliche zukünftige Entwicklung der Lufttemperatur zu modellieren. Der zukünftige anthropogene Einfluss auf die chemische und physikalische Zusammensetzung der Atmosphäre wird bei IPCC in unterschiedlichen Szenarien dargestellt, die stark von einander abweichen. Damit liegt der naturwissenschaftlichen Modellierung des Temperaturanstieges unter Verwendung von veränderten Absorptionseigenschaften der Atmosphäre ein humanwissenschaftlich generiertes Szenario zugrunde. Damit werden Unsicherheiten, die mit der Erstellung eines zukünftigen sozioökonomischen Szenarios entstehen, an die Modellierung der Höhe des zukünftigen Temperaturstiegs weitergereicht. Da IPCC den möglichen Temperaturanstieg für alle Szenarien berechnet, kann von keiner Favorisierung eines Szenarios gesprochen werden. Daraus ergibt sich, dass alle Szenarien eintreten könnten, was bedeutet, dass das in dieser Arbeit gewählte Szenario einen Ausschnitt darstellt um eine prinzipielle Abschätzung der möglichen zukünftigen Permafrostverbreitung zu ermöglichen.

8 Diskussion

8.1 Blockgletscherkartierung und Analyse

Aufgrund der Fernerkundungsbilder und der Feldbegehung konnte das Ziel:

- Kartierung und Auswertung der daraus generierten Daten aller Blockgletscher im Untersuchungsgebiet

ausgeführt werden, da anhand der Blockgletscherkriterien Oberflächenphänomene als solche identifizierbar sind. Die gewählten Kriterien entsprechen dem Stand der Forschung, der vor allem in den Alpen und hohen Breiten generiert worden ist. Das bedeutet, dass Blockgletscher im Himalajagebirge mit Blockgletschern aus anderen Weltteilen vergleichbar sind. Trotzdem ist die Unterscheidung zwischen Protalus Rampart und Blockgletscher, wenn er sich in einem Übergangsstadium befindet noch unzureichend. Angewendete Kriterien benutzen das Mehrheitsprinzip, das heißt, dass nicht alle Kriterien zutreffen müssen, jedoch eine Mindestanzahl erfüllt sein muss. Dadurch können Protalus Ramparts im Übergangsstadium auch als Blockgletscher ausgewiesen werden. Ist ein Protalus Rampart im Übergangsstadium zu einem Blockgletscher, und es treffen ausreichend viele Blockgletschermerkmale zu, so kann davon ausgegangen werden, dass Permafrost vorliegt.

Einige Gebiete im Untersuchungsgebiet waren "Hot Spots", da sie durch Abschattungseffekte der Fernerkundungsbilder nicht einsehbar waren. Diese Bereiche wurden markiert, um sie im Zuge der Feldbegehung auf Blockgletschervorkommen zu untersuchen. Da einige Bereiche nicht begehbar waren, kann hier nicht einwandfrei von einer Zone ohne Blockgletschervorkommen gesprochen werden. Im Satellitenbild kommen sie auf nordexponierten Hängen und im Orthofoto in Nord- und Ostexposition vor. Im Satellitenbild ist der Abschattungseffekt stärker, als im Orthofoto, was bedeutet, dass im Orthofoto die Oberfläche zwar nicht klar erkennbar ist, aber grobe Unterscheidungen möglich sind. Diese sind zum Beispiel zwischen einem Gletscher (mit weißer Oberfläche) und dunkler Oberfläche, wobei letztere Schutt oder Boden (mit oder ohne Vegetation) darstellen kann. Gebiete, die nicht begehbar waren, sind meist sehr hoch gelegen oder es war die

Überschreitung eines Gletschers bzw. dessen Gletscherzunge notwendig. Eine Feldbegehung ist hier ohne zusätzliche Ausrüstung nicht möglich.

Es kann festgehalten werden, dass die Mehrzahl der aufgenommenen Blockgletscher in Nordexposition liegen, wodurch die zusätzliche Aufnahme von nordexponierten Blockgletschern und eine erneute statistische Auswertung das Ergebnis nur minimal ändern würde.

Anders verhält es sich bei nicht aufgenommenen ostexponierten Blockgletschern. Im Untersuchungsgebiet wurde nur ein Blockgletscher mit Ostexposition auf einer durchschnittlichen Seehöhe von 5201 Meter aufgenommen.

Aufgrund der groben Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen heller und dunkler Oberfläche im Orthofoto können Blockgletschervorkommen in den Abschattungsbereichen zum Teil ausgeschlossen werden. Trotzdem ist festzuhalten, dass eine eindeutige Aussage ohne neues Material (Fernerkundungsbilder, Feldbegehung) nicht möglich ist.

Die Aufnahme nach BARSCH (1987) wurde zwar durchgeführt, jedoch konnten hier keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Feststellung der Permafrostverbreitung anwendbar wären. Auch die Zuordnung der Aktivität von Blockgletschern wurde in den Kriterien verankert, sodass sie nachvollziehbar ist. Eine statistische Analyse der Ausprägungen nach Teilgebiet ist nicht sinnvoll, da zu wenige Blockgletscher vorliegen. Trotzdem lässt sich erkennen, dass sich die Ausprägungen nach dem Schlüssel von BARSCH (1978) im Untersuchungsgebiet zum Großteil ähnlich verhalten, was bedeutet, dass das Gebiet in sich einheitlich ist. Der Aufwand, diese Merkmale zuzuordnen ist gering und kann während der Blockgletscherkartierung durchgeführt werden. Damit ist die Durchführung im Hinblick auf weitere Forschungsarbeiten (vgl. Kapitel 9 Perspektiven) gerechtfertigt.

Zusätzliche, markante Merkmale nach einem nicht-systematischen Schema aufzunehmen lässt sich neben den Kartierungsarbeiten durchführen und bringt trotzdem wertvolle Hinweise. Zum Beispiel ist die Aufnahme eines großen, schuttbedeckten Gletschers im Teilgebiet 2 sinnvoll, da er sich bis zum See in diesem Teilgebiet erstreckt und jegliche Blockgletscherbildung unterbindet. Ohne die Erwähnung, dass ein schuttbedeckter Gletscher das Teilgebiet 2 ausfüllt, wäre es nicht nachvollziehbar, warum in diesem Gebiet keine Blockgletscher vorliegen.

Die gesamte Analyse beinhaltet den Fehler der möglichen Verschiebung aufgrund der Kartierungsmethode (vgl. Kapitel 7 Unsicherheiten). Zum Beispiel beinhaltet die Fläche des Blockgletscher 4f vier unterschiedliche Expositionen. Das ist ein Fehler, der aufgrund der Unsicherheiten entstanden ist und in diesem Fall sichtbar wird und auch in allen anderen Blockgletschern vorkommen kann. Die prozentuelle Verteilung zeigt für die Südexposition 1 % und für die Westexposition 3 %. Die Südexposition ist fehlerhaft, da der Blockgletscher sich von der überwiegenden Nordexposition (86 %) über den Talboden auf die andere Seite des Tals erstrecken müsste, was nicht der Fall ist. Dies wurde im Feld überprüft. Damit ist 1 % als Fehler zu bewerten. Bei diesem Blockgletscher ist er sehr gering und deswegen vernachlässigbar. Bei Blockgletschern, die eine geringere Ausdehnung haben, können diese Fehler bis zu 54 %, unter der Annahme einer großen Verschiebung von 7 Pixel beim flächenmäßig kleinsten Blockgletscher (13 Pixel), betragen. Bei allen anderen Blockgletschern liegt dieser Prozentsatz bei 50 oder darunter, was bedeutet, dass mindestens 50 % der Pixel richtig platziert sind. Damit ist die mögliche Verschiebung zwar nicht als vernachlässigbar einzustufen, eine Interpretation der Ergebnisse ist aber zumindest zulässig.

Blockgletscher sind vermehrt im Teilgebiet 4 und 5 vorhanden, die meisten Blockgletscher sind nordexponiert. Die Teilgebiete unterscheiden sich voneinander sowohl in der mittleren Höhe als auch in den geomorphologischen Charakteristika. Blockgletscher können in niedrigeren Stufen nur in Gunstlagen vorkommen, da auch Permafrost auf Gunstlagen beschränkt ist. So kann ein Blockgletscher erst entstehen, wenn alle Faktoren, wie Permafrost und ausreichend Material, an diesem Standort vorhanden sind. Im Teilgebiet 1 ist das derzeit nicht mehr der Fall, da hier ein reliktscher Blockgletscher vorkommt. Reliktische Blockgletscher stammen aus dem Pleistozän, wo die Grenze des diskontinuierlichen Permafrosts aufgrund des Klimas herabgesetzt war (BARSCH, 1999).

Im Teilgebiet 2 kommen keine Blockgletscher vor, obwohl potenzielle Blockgletscherstandorte vorhanden wären. Das sind Blockgletscherstandorte, bei denen alle Faktoren für Blockgletscherentstehung vorhanden sind, es aber trotzdem zu keiner Ausbildung kommen konnte. Teilgebiet 2 reicht sehr weit hinauf und weist steile Felswände zu beiden Seiten auf, wodurch weite Bereiche abgeschattet sind. Der gesamte Bereich wird von einem schuttbedeckten Gletscher ausgefüllt, wodurch die Entstehung von Blockgletschern in größeren Höhen unterbunden wurde. Zusätzlich grenzt die Endmoräne direkt an den darunterliegenden See, was die Entstehung eines Blockgletschers aus dem Material der Endmoräne verhindert.

Die Teilgebiete 3 und 4 haben eine große Ausdehnung, wobei die Nordseite vom Talboden bis zum Gipfelgrad höher ist und steiler abfällt als die Südseite. Damit sind Nordhänge im Untersuchungsgebiet nicht nur Gunstlagen aufgrund der niedrigen Einstrahlung, sondern auch wegen des potenziell höheren Materialeintrags. Dadurch können sich auf der Nordseite vermehrt lobenförmige Blockgletscher bilden. Die Südseite ist noch dazu durch kleinere Tälchen durchschnitten, was eine einheitliche Südexposition unterbindet. Deswegen sind hier auch west- und ostexponierte Lagen möglich, die eine geringere Einstrahlung aufweisen, als eine einheitliche Südexposition und damit als klimatische Gunstlagen fungieren.

In Teilgebiet 6 kommen überhaupt keine Blockgletscher vor, was bedeutet, dass einer der Faktoren, die für das Ausbilden von Blockgletschern notwendig sind, nicht vorhanden ist. Aufgrund der vielen Blockgletscher in Nordlage in den unterhalb liegenden Teilgebieten, kann ausgeschlossen werden, dass es sich um eine permafrostfreie Fläche handelt. Daher ist anzunehmen, dass hier nicht genügend Material zur Verfügung steht oder dass aufgrund der großen Seehöhe potenzielle Blockgletscherstandorte durch Gletscher besetzt sind.

Die Blockgletscher haben, bis auf wenige Ausnahmen, eine ähnliche Ausdehnung, da 12 von 15 Blockgletschern eine Fläche von 10.000 bis 45.000 m² aufweisen. Lobenförmige Blockgletscher in Hangfußlage haben eine geringere Ausdehnung, da sie von Steinschlagsmaterial abhängig sind. Im Vergleich dazu haben Blockgletscher aus Endmoränenmaterial eine große Menge an Material zur Verfügung das sich als Ganzes kontinuierlich bewegt. Der Blockgletscher 4b ist ein Beispiel für Material aus Endmoränen, während die Blockgletscher 5c, 5d, 5e Blockgletschergenese in Hangfußlage veranschaulichen. Blockgletscher, die sowohl Moränenmaterial, als auch Eintrag von Felshängen erhalten, haben eine geringfügig größere Ausdehnung, da mehr Material zur Verfügung steht. Der Blockgletscher 4b und der inaktive 4f sind lobenförmig am Hangfuß und haben trotzdem eine größere Ausdehnung als die anderen lobenförmigen Blockgletscher. Bei Felswänden kann es Zeiträume erhöhter Aktivität geben, in denen sehr viel Material in den entstehenden Blockgletscher eingebracht wird. Durch diese Faktoren können sich auch hier größere Blockgletscher bilden. Diese Faktoren wurden in die Untersuchung aber nicht aufgenommen, deshalb können nur grobe Einschätzungen getroffen und markante Beispiele angeführt werden.

Die Blockgletscher im Untersuchungsgebiet liegen überwiegend in Nordexposition, dieser Umstand ist auf die Charakteristika der einzelnen Teilgebiete zurückzuführen. Die West- und

Ostexposition tritt bei Blockgletschern nicht eigenständig auf und sie sind zumeist auf der Südseite der Teilgebiete in den Tälchen. Das bedeutet, dass sie sich dabei über den Bereich einer Exposition zu anderen Expositionen hinentwickeln. Als Beispiel dient die Westlage der Blockgletscher 3c und 4a, die sich in die Südlage hineinentwickelten.

Die Lage der meisten Blockgletscher kann nicht exakt einer der vier Hauptexpositionen zugeordnet werden. Es kann jedoch keine genauere Diversifizierung erfolgen, da die Anzahl der aufgenommenen Blockgletscher zu gering ist. Blockgletscher in Nordexposition tendieren mehr zu dieser Exposition, was bedeutet, dass es dort für Blockgletscherstandorte günstigere Bedingungen gibt (siehe Diagramm 2). Für die anderen Expositionen kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, daher ist anzunehmen, dass sich die Umweltbedingungen nicht stark unterscheiden und sie dem Gefälle folgen, das ihr Wachstum am stärksten begünstigt.

Blockgletscher sind natürliche Proxy für den thermalen Zustand des Untergrundes (BARSCH, 1978). Sie kommen nicht überall vor, wo Permafrost vorliegt, jedoch wo sie vorkommen, sind sie JA-Indikatoren für Permafrost an dieser Stelle. Reliktische Blockgletscher wären NEIN-Indikatoren für Permafrost an diesem Standort, trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass an dieser Stelle einmal Permafrost vorhanden war. Da Blockgletscher lange Entwicklungszeit brauchen, um als solche erkannt werden zu können, stellen sie einen kontinuierlichen Permafrostindikator über eine sehr lange Zeitspanne dar.

8.2 Bodentemperaturmessungen

MTD wurden primär eingesetzt um die Permafrostverbreitung modellieren zu können. Trotzdem werden hier die einzelnen MTD Standorte und die Analyse der zugehörigen Daten aufgrund der Zielvorgabe:

- Messung der Bodentemperatur auf ausgewählten Stellen im Untersuchungsgebiet

diskutiert.

Die Dauer der Messperiode ist ausreichend und durch die gleichzeitige, stündliche Temperaturmessung sind alle MTD Daten miteinander vergleichbar. Die tageszeitlichen Schwankungen können abgebildet werden. Die Daten der MTD sind für das Vorhaben einsetzbar und hervorragend analysierbar. 24 Werte pro Tag sind für die Berechnung der

täglichen Standardabweichung vorhanden, was für das weitere Vorgehen eine sehr gute Datenbasis bildet.

Jedoch können die verwendeten MTD aufgrund der vorgegebenen Genauigkeit von $0,47\text{ °C}$ für diese Zielsetzung nur bedingt eingesetzt werden, da Grenzwerte der Permafrostklassifizierung über die BTS nur einen Bandbereich von 1 °C haben. Jedoch konnte im Labor eine relative Genauigkeit von maximal $0,08\text{ °C}$ Abweichung untereinander festgestellt werden, was bedeutet, dass ein systematischer Fehler bei den Temperaturmessungen vorhanden sein kann, jedoch die Vergleichbarkeit der MTD gewährleistet ist. Die Grenzwerte der BTS von HAEBERLI (1973) als Permafrostindikator zu verwenden ist unter diesen Bedingungen nur bedingt möglich (vgl. Kapitel 7 Unsicherheiten).

Die räumliche Verteilung der MTD im Untersuchungsgebiet ist stark abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden MTD, da sie die Genauigkeit der Aufnahme bestimmen. Eine detailreiche Aufnahme ist trotzdem möglich, wenn viele MTD mit kleineren räumlichen Abständen zueinander in Teilbereichen eingesetzt werden. Dadurch können allerdings andere Gebiete und deren Charakteristika nicht bzw. nur unzureichend analysiert werden.

In detailreich aufgenommenen Bereichen besteht ein erhöhtes Forschungsinteresse. So sind zum Beispiel die Tälchen bei Teilgebiet 3, 4 und 5 von erhöhtem Forschungsinteresse, weil dort durch das Vorhandensein von Blockgletschern, Endmoränen, Feuchtgebieten und kleinen Bächen eine Vielzahl von Phänomenen auf kleinem Raum beobachtbar sind. Diese können die Temperaturwerte so stark beeinflussen, sodass ein MTD nur die thermalen Eigenschaften des jeweiligen Phänomens an seinem Standort messen würde. Durch die größere Anzahl von MTD ist in den Tälchen die Permafrostverbreitung besser abschätzbar, leider auf Kosten von anderen Bereichen.

Die Analyse der Verteilung der MTD nach Exposition (vgl. Diagramm 3) im Untersuchungsgebiet gibt einen Überblick, ob die einzelnen Expositionen ausreichend abgebildet worden sind. Nach den Kriterien ist das Vorhandensein von Blockgletschern ein Grund MTD zu installieren. Blockgletscher kommen vermehrt in Nord-, Ost- und Westexposition vor, was bedeutet, dass hier MTD in deren Nähe angebracht worden sind. Damit ist der prozentuelle Anteil an diesen Expositionen auf Kosten der Südexposition höher. Dadurch konnte die Permafrostverbreitung in Nord-, Ost- und Westexposition verbessert abgebildet werden.

Bei der Hangneigung (vgl. Diagramm 4) konnte festgestellt werden, dass die Aufteilung der Neigung an den MTD-Standorten und deren absoluten Anzahl im Untersuchungsgebiet in etwa übereinstimmt. Damit sind die unterschiedlichen Hangneigungen im Untersuchungsgebiet ausreichend gut abgebildet. Dieses Diagramm ist vergleichbar, da zwar die Auflösung der Ausgangsdaten nicht hervorragend ist, jedoch sowohl die Hangneigung der MTD als auch die des Untersuchungsgebiets auf die gleiche Datengrundlage zurückgreifen, wodurch eine relative Vergleichbarkeit möglich ist. Untersucht man nur die Anzahl der Pixel im Untersuchungsgebiet nach Neigungsgrad, so erkennt man, dass sie gerade im oberen Bereich stark zurückgehen, da die planare Fläche angezeigt wird. Die wahre Fläche kann aufgrund der Datengrundlage nicht eruiert werden, liegt aber aufgrund des hohen Reliefs viel höher.

Die Standortcharakteristika der MTD (vgl. Tabelle 10) wurden aufgenommen, wobei der höchste Anteil erdig ist, da im Untersuchungsgebiet zum Großteil Boden vorhanden ist. Die einzelnen Charakteristika der Standorte, können mit der Ausprägung der BTS in Beziehung gesetzt werden, da sie sowohl die Temperaturleitfähigkeit des Untergrundes, als auch die Beschaffenheit der Schneedecke beeinflussen. Zum Beispiel kann es bei blockigem Untergrund zur Bildung von Schloten kommen, in denen kalte Luft zirkulieren kann (HOELZLE ET AL., 1999; ISHIKAWA, 2003; BRENNING ET AL., 2005).

Die BTS ist der Mittelwert der Temperaturwerte im BTS-Zeitraum. Dieser stellt den längsten Zeitraum mit einer täglichen Standardabweichung der Temperaturwerte von unter $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ im gesamten Aufnahmezeitraum dar.

Im November 2009 war die Lodge "Gokyo Ressort", welche im Untersuchungsgebiet liegt, noch besetzt. Eine persönliche Mitteilung von Nischal Pokharel, der ein Mitarbeiter von "Goyko Ressort" ist, enthielt, dass es in der zweiten Novemberwoche 2009 zu Schneefall im Untersuchungsgebiet gekommen ist. Unmittelbar nach diesem Zeitraum gab es einen Abfall der täglichen Standardabweichung von über $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf unter $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vgl. Diagramm 5). Daraus lässt sich schließen, dass die Standardabweichung im Gesamtzeitraum den Verlauf des Winters in Hinblick auf die Schneentwicklung darstellt.

Im weiteren Verlauf nimmt die Standardabweichung wieder zu, was bedeutet, dass der Schnee sich setzt und die Wärmeleitfähigkeit zunimmt. Zwischen November 2009 und dem BTS-Zeitraum kam es zu kleineren abrupten Abfällen der Standardabweichung, woraus

geschlossen wird, dass es zu minimalen Schneefällen gekommen ist. Erst Anfang Februar 2010 kam es zu längere Schneefällen, was die Standardabweichung für mehr als eine Woche unter $0,5\text{ °C}$ Abweichung sinken ließ. Dieser Zeitraum ist in Anlehnung an HAUCK und VONDERMÜHLL (2003), die eine geschlossene Schneedecke von einem Monat vor den BTS Messungen als notwendig erachten, zu wenig. Trotzdem wird die Analyse weitergeführt, da diese Woche den besten zu Verfügung stehenden Zeitraum darstellt.

Der Winter 2009/10 in Gokyo hatte in Anlehnung an BRENNING ET AL. (2005) die Form von R1. R1 bedeutet, dass kalte Luft sehr lange im direkten Kontakt mit der Erdoberfläche gestanden hat, was den Untergrund stark auskühlt. Zusätzlich kann diese kalte Luft bei blockigem Material durch Lufttunnel in den Untergrund eindringen und ihn weiter auskühlen, was vereinzelt zu sehr tiefen Temperaturen im Untergrund führt.

Die BTS der MTD ist im ganzen Untersuchungsgebiet eher niedrig, die Abweichung ist klein und die Standortcharakteristika sind weitgehend homogen. Die MAAT des gesamten Untersuchungsgebiets liegt unter -2 °C . Aufgrund der für BTS-Berechnungen zugrunde liegenden Methodik, muss die Abweichung eher klein und erdige Standorte vorherrschend sein. Trotzdem weicht die BTS von der MAAT des Standortes ab, die Abweichung ist bei allen MTD unterschiedlich und einige Standorte haben andere Charakteristika als erdig. Das bedeutet, dass die Temperatur des Untergrundes maßgeblichen Einfluss auf die meisten MTD-Standorte hatte. Erst dort, wo die tageszeitliche Schwankung über $0,4\text{ °C}$ beträgt, kann mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass es in diesem Zeitraum zu keiner Entkoppelung der Lufttemperatur von der Temperatur des Untergrundes kam. Die einzelnen Bereiche und deren MTD-Standorte können durch die BTS, deren Abweichung und Standortcharakteristika in Beziehung gebracht werden. Die einzelnen Bereiche in gleicher Höhenlage mit mehreren BTS Messungen haben zum Teil so starke Unterschiede, dass die Abweichungen nicht mit dem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten erklärt werden können. Diese Messungen in geringer vertikaler und horizontaler Distanz sind nur über das Temperaturregime des Untergrundes und die Standortcharakteristika erklärbar, da nach REGMI und WATANABE (2005) die Lufttemperatur konstant mit der Seehöhe ($0,49\text{ °C}$ für 100 Höhenmeter) abnimmt.

1A und 1B im Teilgebiet 1 zeichnen sich durch zwei relativ tiefe BTS Werte aus, die in blockigen Standorten, sowie 1C und 1M durch relativ hohe BTS Werte, die im erdigen Bereich gemessen worden sind. Sie liegen im gleichen Höhenbereich, sodass der Unterschied

von über 5 °C nicht dem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten entsprechen kann. Bei den beiden blockigen Standorten ist die Temperatur sehr tief, was durch Schlotenbildung und der daraus entstehende Luftzirkulation (HOELZLE ET AL., 1999; ISHIKAWA, 2003; BRENNING ET AL., 2005) erklärt werden könnte. Im Widerspruch dazu ist die Standardabweichung sehr niedrig, was bedeutet, dass die MTD von den Schwankungen der Lufttemperatur entkoppelt waren und so wahrscheinlich keine Luftzirkulation stattgefunden hat. Daher ist davon auszugehen, dass Schloten vorhanden waren und diese den Untergrund im Laufe des Winters bis in große Tiefe auskühlen konnten wodurch es zu einem Erliegen der Luftzirkulation gekommen ist. Damit konnte der neu gefallene Schnee und dessen Schneedecke nicht mehr durchbrochen werden bzw. so tiefe Temperaturen ohne große tageszeitliche Schwankungen gemessen werden.

Daher ist es möglich, dass aufgrund von Schloten eine Gunstlage für Permafrost entsteht und so der Untergrund in dieser Umgebung dauerhaft gefroren verbleibt, andererseits könnte trotz der Schloten der Untergrund vollständig auftauen und deswegen kein Permafrostbereich vorhanden sein.

Aufgrund der Datenlage ist eine eindeutige Klärung nicht möglich, jedoch sind diese BTS im gleichen Wertebereich wie jene aus Teilgebiet 6. Alle drei MTD (6A, 6B, 6C) haben unterschiedliche Standortcharakteristika, aber ungefähr die gleichen BTS. Geht man davon aus, dass dort Permafrost vorhanden ist, weil alle BTS das anzeigen, so kann Permafrost auch im Teilgebiet 1 unter diesen Bedingungen möglich sein.

Die MTD in Teilgebiet 2 und 3 teilen sich auf in die Transekte des Tälchens und die MTD 2A, 3A, 3F und 3M, wobei auf 3M in der Diskussion von Teilgebiet 5 eingegangen wird. Zusätzlich werden die MTD-Standorte aus dem Teilgebiet 4 in Südexposition herangezogen und diskutiert, weil diese miteinander vergleichbar sind. In beiden Teilgebieten sind auf engem Raum mehrere MTD in unterschiedlichen Expositionen, Höhenlagen und kleinräumlichen Gegebenheiten (Blockgletscher-, Gletscher- und Gewässernähe) angebracht.

2A liegt bei einer Kuppe zwischen Teilgebiet 2 und 3 in einer kleinen Mulde. Der MTD-Standort unterscheidet sich von dem in der Nähe befindlichen, tiefer am Fuß des Nordhangs liegenden 3F durch 3,5 °C. Das bedeutet, dass hier die Exposition ausschlaggebend war, weil die Standortcharakteristika gleich sind.

3A liegt am höchsten und hat eine der niedrigsten BTS (- 8,8 °C) im ganzen Untersuchungsgebiet. Da dieser MTD eine Abweichung zwischen 0,2 und 0,4 °C hat, kann davon ausgegangen werden, dass sowohl das Temperaturregime des Untergrundes als auch

der Luft zu diesem Wert geführt haben. Da keine blockige Umgebung vorliegt muss von einer geringeren Schneebedeckung ausgegangen werden, die in dieser exponierten Höhenlage wahrscheinlich durch Windverwehungen niedriger ausgefallen ist. Aufgrund der sehr tiefen BTS und der Standortcharakteristik sandig, wird davon ausgegangen, dass das Temperaturregime des Untergrundes maßgeblich war. Luft konnte nur in eine geringe Tiefe des Bodens eindringen und die Untergrundtemperatur in geringem Maße verändern, wodurch nur eine tageszeitliche Schwankung um die Temperatur des Untergrundes messbar war. Deswegen ist hier von einem Permafroststandort auszugehen.

Die BTS der MTD 3B – 3E ist im Mittel etwas tiefer als die BTS der MTD 4A – 4F, obwohl die MTD im Tälchen des Teilgebietes 4 ein wenig höher liegen. Das bedeutet, dass hier angezeigt wird, dass in tieferen Höhenlagen Permafrost wahrscheinlicher ist, als in höheren. Das könnte an den Tälchen im Teilgebiet 4 liegen, das breiter ist als im Teilgebiet 3, was bedeuten könnte, dass der Abschattungseffekt nicht sehr groß ist und mehr Sonnenenergie den Boden erwärmen kann. 3E und 4E liegen am äußeren Rand des Tälchens und haben beide eine hohe BTS um $-1,7\text{ °C}$. Es ist anzunehmen, dass hier noch weniger Abschattung auftritt und daher diese hohen BTS Werte möglich sind. Der Untergrund friert zwar, aber die Ausbildung einer dauerhaft gefrorenen Zone unterbleibt. Nur bei 4F, der eine BTS von $-5,4\text{ °C}$ aufweist, kann von Permafrost gesprochen werden. Alle anderen liegen um $-3,2\text{ °C}$, wobei der Grenzwert von HAEBERLI (1973) für „Permafrost wahrscheinlich“ bei einer BTS von -3 °C liegt, aber aufgrund der Unsicherheit in den Messungen könnte hier auch „Permafrost möglich“ vorliegen, was bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit in dem Tälchen Permafrost vorzufinden, drastisch sinkt. Damit ist festzuhalten, dass Permafrost im Tälchen von Teilgebiet 3 vorkommen kann, weil es hier mehr Abschattung gibt und die BTS niedriger sind, jedoch im Tälchen des Teilgebietes 4 Permafrost unwahrscheinlich ist.

Im Teilgebiet 4 am Nordhang sind alle BTS sehr tief (unter $-6,1\text{ °C}$), die Abweichung ist unter $0,2\text{ °C}$ und die Standortcharakteristika sind erdig und einmal blockig. Der blockige Standort hat die tiefste BTS von $-8,9\text{ °C}$. Es kann daraus geschlossen werden, dass hier der Untergrund dauerhaft gefroren ist, da die BTS bei dem blockigen Standort noch tiefer ist als bei den erdigen Standorten. Das kann bedeuten, dass die BTS dieses Standortes durch die Lufttemperatur um $2,8\text{ °C}$ vermindert wird. Da die Abweichung gering ist, kann von einem vorherrschenden Bodenregime ausgegangen werden, was bedeutet, dass die Temperatur vom Untergrund aus gesteuert wird. Dadurch ist es naheliegend, dass alle drei MTD Permafrost anzeigen.

In Teilgebiet 5 kommen keine Tälchen vor, daher ist die Nord- und Südexposition ungefähr gleich vertreten. 5A und 5C liegen etwas höher, haben aber trotzdem im Mittel eine höhere BTS und eine geringere Standardabweichung als die anderen MTD-Standorte. Der MTD 5D hat eine sehr hohe Standardabweichung (über $0,4\text{ °C}$), was wahrscheinlich an der Standortcharakteristik blockig liegt, er weist auch die geringste BTS in diesem Teilgebiet auf. Hier kann wieder von Schlotenbildung (HOELZLE ET AL., 1999; ISHIKAWA, 2003; BRENNING ET AL., 2005) ausgegangen werden, wo keine Entkoppelung des Untergrundes von der Luft stattgefunden hat. Da in der Nähe befindliche MTD ebenfalls eine niedrige BTS aufweisen, kann am Nordhang mit Permafrost gerechnet werden.

Der Südhang indiziert Permafrost, jedoch ist die BTS etwas höher, was bedeutet, dass hier nicht unbedingt mit Permafrost zu rechnen ist. Die MTD sind in einer größeren Seehöhe angebracht, haben aber trotzdem eine niedrigere BTS. Das bedeutet, dass diese Hangseite Gunstlagen für Permafrost aufweist, es aber wahrscheinlich kleinräumige, permafrostfreie Flächen gibt.

MTD 5M liegt auf der Seitenmoräne des Nogzumba Gletschers und zeigt eine BTS von $-3,9\text{ °C}$ an. Der Standort ist erdig und die Abweichung ist groß. Aufgrund der Lage auf der Seitenmoräne kann von zu geringer Schneebedeckung ausgegangen werden. In diesem Fall würde die BTS aus der Lufttemperatur, dem Temperaturregime der Seitenmoräne und der Sonneneinstrahlung bestehen. Es ist anzunehmen, dass Lufttemperatur und Sonnenenergie vorherrschend sind, da bei MTD 3M, der ebenfalls auf der Seitenmoräne des Nogzumba Gletschers liegt, eine Entkoppelung stattgefunden hat und gefrorener Untergrund angezeigt wird, obwohl er auf einer geringeren Seehöhe liegt.

Im Teilgebiet 6 sind alle Standortcharakteristika vertreten, haben eine niedrige BTS und die Abweichung ist gering. Daraus wird geschlossen, dass durchgehend Permafrost vorliegt, da alle MTD einheitlich die gleiche BTS anzeigen und diese um mind. $1,9\text{ °C}$ unter dem Schwellenwert von -3 °C nach HAEBERLI (1973) liegen.

BTS Messungen sind ebenfalls Proxy für den thermalen Zustand des Untergrundes nach HAEBERLI (1973). Da sie ein technisches Mittel sind um Temperaturwerte zu erhalten, sind sie überall am Boden applizierbar, sofern die dafür notwendige technische Ausrüstung vorhanden ist. Sie geben den genauen Temperaturwert des Untergrundes an, was bedeutet, dass durch die empirische Klassifizierung nach HAEBERLI (1973) der Untergrund in drei thermale Klassen eingeteilt werden kann. Durch den Einsatz von MTD sind diese Messungen

über einen ganzen Winter vorhanden. BTS Messungen erlauben eine genaue thermale Analyse des Untergrundes und ermöglichen die Aussage JA/NEIN/MÖGLICH für Permafrost an jedem gemessenen Standort.

8.3 Permafrostverbreitung

Die Darstellung der Permafrostverbreitung im Untersuchungsgebiet baut auf den jeweiligen Input-Variablen auf. Wie in Kapitel 5 erklärt, ist die Modellierung eine räumliche Inter- und Extrapolation dieser Einflussgrößen, was bedeutet, dass Ergebnisse und Diskussion stark von einander abweichen können.

Deswegen werden in den nächsten beiden Unterkapiteln die Zielsetzung:

- Anwendung zweier verschiedener Methoden zur Modellierung der rezenten Permafrostverbreitung

diskutiert. Es ist unterteilt in das tatsächliche Ergebnis der rezenten Permafrostverbreitung und der Erörterung des Einflusses zweier verschiedener Methoden zur Modellierung von Permafrost zu verwenden.

Im Kapitel 8.3.3 wird die Zielsetzung:

- Erstellung von Permafrostszenarien bei Temperaturänderung

diskutiert, da sie, als Szenario einer zukünftigen Entwicklung, auf der Modellierung der rezenten Permafrostverbreitung aufbaut.

8.3.1 Rezenter Permafrost

Blockgletscherindikator:

Die Permafrostverbreitungsmodellierung (vgl. Diagramm 6) nach BARSCH (1978) hat nur vier Expositionskategorien, worauf die Permafrostverteilung allein nach der Seehöhe aufgetragen werden kann. Man erkennt, dass in Nordexposition Permafrost weiter nach unten reicht, während er in den anderen Expositionen weiter oben anzutreffen ist. In Westexposition ist die Permafrostverbreitung etwas niedriger als in Ostexposition. In Nordexposition bewirkt die verminderte Einstrahlung günstigere Lagen für Permafrost als in Südexposition. Diese Verteilung ist mit Erkenntnissen aus den Alpen (HAEBERLI, 1975) vergleichbar, wo auch in Nordexposition die Permafrostgrenze weiter nach unten reicht als in den anderen Expositionsklassen.

Im Untersuchungsgebiet ist flächenmäßig sehr wenig Permafrost vorhanden (vgl. Diagramm 7 und Abbildung 25). Das liegt an den Blockgletschern, die als Input-Variablen die Permafrostverbreitung bestimmen. In Teilgebiet 1 kommt nur ein reliktscher Blockgletscher vor, deshalb wäre es unwahrscheinlich, dass hier Permafrost angezeigt wird. Nur die Spitzen auf der Nordseite können Permafrost beinhalten, ansonsten liegt das Teilgebiet zu niedrig.

Teilgebiet 2 könnte nach Höhe und Exposition Permafrost beinhalten, jedoch ist es durch den Gletscher komplett ausgefüllt. Der prozentuelle Unterschied der Permafrostverbreitung zu Teilgebiet 1 kann mit der Höhe des Teilgebiets erklärt werden. Die Permafrostverbreitung am Talboden in diesem Teilgebiet wird erst dann relevant, wenn der Gletscher abgeschmolzen ist. Trotzdem ist es wahrscheinlich, dass Seitenwände, die in den Permafrostbereich hineinragen, dauerhaft gefroren sind, weil sie den tiefen Temperaturen permanent ausgesetzt sind.

In Teilgebiet 3 kommen Blockgletscher vor und der Anteil der Fläche mit Permafrost wahrscheinlich liegt bei knapp 50 %. Das Teilgebiet hat zwei Ebenen, die auf stark unterschiedlichen Höhen liegen. Im unteren Bereich ist die Fläche komplett permafrostfrei, während im oberen Bereich Permafrost in einigen Lagen auftritt. In diesen Bereichen sind auch kleinere Gletscher anzutreffen, wodurch die Permafrostverbreitung minimiert werden könnte. Das Tälchen liegt ungefähr auf Höhe der unteren Ebene und ist bis auf einen kleinen Bereich permafrostfrei.

In Teilgebiet 4 liegen am Nordhang zwei Blockgletscher, wobei einer eindeutig und der Zweite zur Hälfte im permafrostfreien Bereich liegt. Das liegt an der Höhenlage dieser Blockgletscher und an den Blockgletschern in Teilgebiet 5. Die daraus gemittelte Permafrostverbreitung am Nordhang richtet sich verstärkt nach der höheren Anzahl an Blockgletschern im Teilgebiet 5 und deren durchschnittlicher Seehöhe. Das Teilgebiet hat nur einen kleinen Anteil an Nordexposition, daher gewichtet sich die flächenmäßige Verbreitung vermehrt nach den anderen Expositionen, die aber alle eine Permafrostverbreitung auf einer höheren Lage verzeichnen.

Teilgebiet 5 und 6 liegen schon so hoch, dass über 50 % der Fläche Permafrost aufweisen kann.

BTS-Indikator:

Die höchste Korrelation der direkten Einstrahlungswerte mit der BTS liegt im Jänner 2010 vor. Für die gebräuchliche Vorgehensweise nach KELLER (1994) ist jedoch die direkte Einstrahlung im Sommer als Input-Variable vorgesehen. Die direkte Einstrahlung im Sommer korrelierte aber nicht signifikant mit der BTS, weswegen sie nicht verwendbar ist. Trotzdem ist die Verwendung der Einstrahlungswerte im Jänner problematisch, da Mitte Februar der BTS-Zeitraum ist. Das könnte bedeuten, dass die Schneedecke den Boden unzureichend vor Sonnenenergie isoliert hat und deshalb teilweise die Einstrahlungsenergie im Jänner im Untergrund gemessen wurde. Dadurch konnte die hohe Korrelation mit den BTS-Werten entstehen. Das muss jedoch nicht unbedingt bedeuten, dass das langjährige Temperaturregime des Untergrundes maßgeblich im Monat Jänner beeinflusst wird.

Für die anderen Monate bzw. den Zeitraum der Sommermonate, war die Signifikanz unzureichend oder nur eine sehr niedrige Korrelation vorhanden. Das bedeutet, dass die Monsunzeit und die damit verbundene starke Bewölkung einen höheren Einfluss auf das Temperaturregime im Hinblick auf die Einstrahlung hat, als die Wintermonate, die meist wolkenlos und klar verlaufen. Entweder wird deswegen das Temperaturregime des Untergrundes durch die Einstrahlung in den Wintermonaten, trotz der Albedo durch eine Schneedecke geprägt, oder die BTS-MTD-Methode und anschließende Permafrostmodellierung nach JULIAN und CHUECA (2007) ist im Himalajagebirge nicht anwendbar.

Die flächenmäßige Verteilung der BTS Modellierung zeigt viel Permafrost und wenige permafrostfreie Flächen (vgl. Diagramm 8 und Abbildung 26). Der Anteil von permafrostfreien Flächen liegt zumeist um die 10 %. Das liegt an der Modellierung, bei der im niedergelegenen Teilgebiet 1 schon tiefe Temperaturen ($< -5\text{ °C}$) gemessen worden sind. Nur vereinzelt sind hohe Temperaturen ($> -2\text{ °C}$) gemessen worden. Dementsprechend ist die gesamte Permafrostverteilung vermehrt mit tiefen Temperaturen modelliert. Diese Inputwerte auf die Fläche aufgetragen ergeben eine hohe Permafrostverbreitung. Die Fläche „Permafrost unwahrscheinlich“ bleibt bis auf Teilgebiet 6 unverändert, da Talbodenflächen zumeist tief liegen und aufgrund der Trogformen (ZEPP, 2004) der prozentuelle Anteil der permafrostfreien Fläche in den Seitentälern gleich bleibt. Das liegt daran, dass die Seitenwände weniger planare Fläche aufweisen als der tief liegende Talboden. Anders verhält es sich bei der Fläche „Permafrost möglich“, die in den kleinen Ebenen der Tälchen der Teilgebiete auftritt. Sie nimmt ab, sobald die Temperatur in den Ebenen der Tälchen den kleinen Bereich von -3 bis -2 °C unterschreiten. Dieser Temperaturbereich ist abhängig von Höhe und Einstrahlung nach den Vorgaben der Input-Variablen. Solange die Ebenen der Tälchen im Grenzbereich zwischen diskontinuierlichem und kontinuierlichem Permafrost liegen, ist der prozentuelle Anteil der Kategorie "Permafrost möglich" sehr hoch. Sobald der Grenzbereich nicht mehr im Höhenbereich der Tälchen liegt, liegt er zumeist in steilem Gelände, was bedeutet, dass die planare Fläche vermindert ist und so kein großer prozentueller Anteil mehr möglich ist. In Teilgebiet 5 ist er knapp noch vorhanden, während im Teilgebiet 6 schon der gesamte Bereich inklusive Talboden unter -3 °C liegt.

8.3.2 Vergleich der beiden Modellierungsmethoden und -ergebnisse

Die Permafrostverbreitung wurde durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Modellierungsmethoden berechnet, beide sollten gleiche Ergebnisse liefern. Deswegen werden in diesem Unterkapitel sowohl die Methodik als auch die Ergebnisse vergleichend diskutiert.

Methoden:

Beide Methoden haben nur wenige Input-Variablen für die flächenhafte Modellierung:

- Blockgletscherindikator: Höhenlage und Exposition der Blockgletscher
- BTS-Indikator: Höhenlage und direkte Einstrahlung am MTD-Standort

Bei den Standorten der jeweiligen Indikatoren werden diese beiden Variablen mit dem Vorkommen von Permafrost in Beziehung gesetzt. Dabei wird sowohl für den Blockgletscherstandort als auch für den MTD-Standort, die zugehörige Höhenlage und die Exposition bzw. direkte Einstrahlung ermittelt. Die Auswirkung der beiden Indikatoren auf die Permafrostverbreitungsmodellierung wurde in den vorherigen Unterkapiteln (8.1 und 8.2) diskutiert.

Die Höhenlage ist bei beiden Methoden eine wichtige Input-Variable, wobei sie bei den Blockgletscherflächen einen Mittelwert und bei den MTD-Standorten einen exakten Wert darstellt. Die Höhe ist ein grober Proxy für die vertikale Änderung der MAAT im Gebirge, die entsprechend dem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten zu- und abnimmt. Das Untersuchungsgebiet liegt in den mittleren Breiten, somit kann von Gebirgspermafrost gesprochen werden, bei dem es eine untere Begrenzung des Permafrosts aufgrund von sehr hoher MAAT gibt. Sobald eine gewisse Höhe über bzw. unterschritten wird, ist Permafrost flächendeckend vorhanden bzw. nicht anzutreffen. Das macht die Höhe zu einer absoluten Variablen in der Permafrostmodellierung, da nicht bei allen Höhenwerten Permafrost vorkommen kann, obwohl Exposition bzw. Einstrahlungswerte einen günstigen Permafrostbereich anzeigen.

Beide Methoden verwenden einen Proxy für die Sonnenenergie, die den jeweiligen Standorten zur Verfügung steht und der für die flächenhafte Modellierung geeignet ist. Für die Blockgletschermodellierung ist es die Exposition, eingeteilt in vier Klassen, und für die BTS-Modellierung ist es die durch ArcGIS berechnete direkte Einstrahlung.

Die Exposition ist ein vereinfachtes Mittel um die Menge der Einstrahlung abzuschätzen. In dieser Arbeit wurde sie für die Blockgletschermethode in vier Klassen eingeteilt. Sie könnte noch weiter unterteilt werden, was eine genauere Abschätzung der Permafrostverbreitung nach Exposition ermöglichen würde. Trotzdem wäre die

Einstrahlungsberechnung immer noch genauer als Expositionskategorien, selbst bei sehr vielen Kategorien, da die Einstrahlungsberechnung Abschattungseffekte mit einbezieht. Das bedeutet, dass ein Südhang, der in einem engem schluchtartigem Tal liegt, trotz der Südlage weniger Sonnenenergie erhält, als ein zu allen anderen Seiten offen liegender Nordhang. Zusätzlich können bei der Einstrahlungsberechnung verschiedene Zeiträume innerhalb eines Jahres berechnet und dessen Werte zur Modellierung verwendet werden (JULIAN und CHUECA, 2007).

Dieser Proxy ist bei der Blockgletschermodellierung als relative Variable zu sehen, da prinzipiell bei allen Expositionen bzw. Einstrahlungswerten Permafrost vorkommen könnte.

Die beiden Methoden unterscheiden sich stark in ihrer Kompliziertheit, sowohl bei den Variablen als auch beim Modellierungsverfahren.

Die Variable Höhenlage ist für beide Methoden gleich, während der Proxy Sonnenenergie für die Blockgletscher-Methode einfacher ist.

Das Verfahren der Permafrostmodellierung in der BTS-Methode ist durch die Erstellung einer Regressionsgleichung weitaus komplizierter. Erstens wird der Einstrahlungsmonat durch eine Korrelationsberechnung mit den BTS-Werten bestimmt und zweitens wird der genaue Zusammenhang zwischen dem BTS-Indikator und den Variablen erst im Zuge der Analyse errechnet. Damit verbunden sind Unsicherheiten, die im Kapitel 7 aufgelistet sind. Beim BTS-Indikator sind die Unsicherheiten aufgrund des Wahrscheinlichkeitswerts, R^2 , der Regressionsgleichung gut abschätzbar, jedoch kann die Genauigkeit der BTS-Werte stark schwanken. Die Unsicherheiten sind beim Blockgletscherindikator gut abschätzbar, da die Methode einfach und die Blockgletscher ein robuster Indikator für Permafrost sind. Der Proxy BTS hätte erst dann die Robustheit eines Blockgletscherindikators, wenn er über mehrere tausend Jahre die Bodentemperatur aufzeichnete. Erst dann sind Witterungs- und Klimaänderungen, die im Zeitraum der Entstehung von Permafrost vorkommen, abschätzbar. Trotzdem ist es durch die BTS-Methode möglich auf die Mitteltemperatur rückzuschließen und damit Permafrostvorkommen abzuschätzen. Die BTS-Methode wurde in vielen Ländern der Welt eingesetzt, trotzdem wird darauf hingewiesen, dass sie in neuen Gebieten zuerst kalibriert werden muss (vgl. Kapitel 2). Beim Blockgletscherindikator ist keine Kalibrierung notwendig.

Daraus kann geschlossen werden, dass die einfachere Methode durch Blockgletscher der technisch komplizierteren BTS-Methode vorgezogen werden kann.

Ergebnisse:

Die Permafrostmodellierung mit ROGMOD stimmt mit den Ergebnissen von früheren Permafrostmodellierungen in dieser Region (JAKOB, 1992; BARSCH und JAKOB, 1998; ISHIKAWA ET AL., 2001; REGMI, 2008) überein. Jedoch wurden die Vorhergehenden Permafrostabschätzungen mit eben dieser Methode durchgeführt und in Bereichen von Blockgletschern durch geophysikalische Messungen überprüft. Das bedeutet, dass sie den Zusammenhang zwischen Blockgletscher und dem Vorhandensein von Permafrost überprüften, jedoch nicht die tatsächliche Untergrenze von Permafrost in dieser Region. Reliktische Blockgletscher zeigen den Permafrostbereich im Pleistozän an (BARSCH, 1996), wobei davon ausgegangen werden kann, dass jetzt kein Permafrost mehr vorhanden ist. In Teilgebiet 1 ist ein reliktscher Blockgletscher, die BTS-Messungen zeigen jedoch Permafrostverbreitung an. Das ist ein direkter Widerspruch zwischen den beiden Methoden, da auch die BTS eine erprobte Methode der Modellierung von Permafrost ist (HARRIS ET AL., 2009). Damit ist es wahrscheinlich, dass die Permafrostmodellierung nach ROGMOD die Permafrostverbreitung unterschätzt, während sie durch die BTS-Methode überschätzt wird.

Die meisten aufgenommenen Blockgletscher sind lobenförmig, was bedeutet, dass sie keine große Länge haben und daher auch keine große Höhendistanz überwunden haben. Trotzdem ist nach BARSCH (1978) die Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrost an der Stirnhöhe der Blockgletscher, da sie sich von Permafrost wegbewegen. Damit ist es möglich, dass diese Blockgletscher noch innerhalb des Permafrostbereichs verblieben sind und eine größere Ausdehnung möglich wäre, da sie noch nicht so lange gebildet worden sind. Dadurch würde die Permafrostverbreitung in ROGMOD unterschätzt werden.

Die BTS-Methode hat sehr viele Unsicherheiten, wie in Kapitel 7 aufgelistet. Es wurden in kleinräumiger Entfernung stark unterschiedliche BTS gemessen, deren mögliche Gründe in den vorhergehenden Unterkapiteln diskutiert wurden. Daraus ist ersichtlich, dass die auf BTS-Werten aufbauende Modellierung zu große Permafrostverbreitung anzeigt bzw. überschätzt.

Die tatsächliche Grenze des diskontinuierlichen Permafrost verläuft zwischen diesen beiden Abgrenzungen, wobei davon ausgegangen werden kann, dass sie näher der Grenze der ROGMOD Modellierung verläuft und nur in klimatischen Gunstlagen sich weiter der Modellierung mit BTS-Indikator annähert, da die Modellierung mit BTS-Indikator mit größeren Unsicherheiten behaftet ist, als die Modellierung mit Blockgletscherindikator.

8.3.3 Zukunftsszenarien

Beide Karten der Zukunftsszenarien verwenden die gleiche Temperaturänderung bis zum Jahre 2039 nach IPCC (2007a). Beide zeigen an, dass es zur Veränderung der Permafrostverbreitung kommen kann, wobei die Veränderung an den Zonengrenzen der Permafrostverbreitung sichtbar ist.

Nach GARDAZ (1997) ist die Basis von Permafrost unter Blockgletschern in den Wallisischen Alpen um die 30 Meter Tiefe und die Auftauschicht hat eine Mächtigkeit von ungefähr 5 Metern. Nach VONDERMÜHL ET AL. (2001) beträgt die Permafrostdicke unterhalb des Muragl Blockgletschers in den Schweizer Alpen 15 – 20 Meter. Das zeigt, dass Blockgletscher auch auf sehr dünnem Permafrost eine große Ausdehnung erreichen können. Weiters ist es wahrscheinlich, dass die Permafrostmächtigkeit in den angrenzenden Bereichen nicht sehr stark variiert. Durch die angenommene Temperaturänderung wird sich die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht im Untersuchungsgebiet erhöhen und bei Bereichen, wo eine Permafroständerung angezeigt wurde, könnte es zu einem Abschmelzen von gering mächtigem Permafrost kommen.

Die Veränderung der Mächtigkeit der jährlichen Auftauschicht ist vor allem in Gebirgsregionen relevant, da Material, das knapp unterhalb des Permafrostspiegels liegt nicht mehr ganzjährig gefroren verbleibt und deswegen nicht mehr fixiert ist. Dadurch könnte es im gesamten Gebiet, in dem Permafrost vorliegt vermehrt zu flachgründigen Rutschungen und Steinschlägen kommen. Auch in jenen Bereichen, wo eine Permafroständerung angezeigt wird, ist vermehrt mit Rutschungen und Steinschlägen zu rechnen.

Durch den Wegfall von Permafrost ändern sich zusätzlich die hydrologischen Eigenschaften des Untergrundes beträchtlich. Das bedeutet, dass Wasser viel tiefer eindringen kann und somit Rutschungen auch in größerer Tiefe möglich sind.

9 Perspektiven

Die Modellierung mittels Blockgletschern kann nur durch eine Erweiterung des Untersuchungsgebiets verbessert werden. Dadurch könnten weitere Blockgletscher analysiert und Expositionsschritte unter 90° ermöglicht werden. Genauere Analysen der Blockgletscher sind nur möglich, wenn die Datengrundlage, vor allem das DEM und dessen Derivate genauer werden und dann könnte auch die tatsächliche Stirnhöhe der Blockgletscher ermittelt werden. Eine Ermittlung der Stirnhöhe im Feld würde noch immer den Übertragungsfehler auf ein DEM, durch das die Modellierung erfolgt, beinhalten. Trotzdem könnte hier die Stirnhöhe sowohl im Feld ermittelt, als auch von einem genaueren DEM abgeleitet werden, was weitere Vergleichsmöglichkeiten bietet. Das Blockgletscherinventar beinhaltet die Klassifizierung nach BARSCH (1996), was bedeutet, dass diese Attribute in anderen Arbeiten weiterverwendet werden können.

Die Messung der BTS könnte in den folgenden Jahren an unterschiedlichen Stellen nochmals durchgeführt werden. Die Messstellendichte kann erhöht werden, indem entweder nur einzelne Bereiche mit der vorhandenen Anzahl von MTD gemessen werden, oder die Gesamtanzahl der MTD im Untersuchungsgebiet erhöht wird. Weiters wäre eine zusätzliche Messung der Schneedeckenhöhe an jedem MTD-Standort ratsam. Dadurch könnte die Modellierung stark verbessert werden.

Da die beiden Permafrostverbreitungskarten stark unterschiedliche Ergebnisse zeigen und mit einer Verbesserung der angewendeten Modellierungen diese Unterschiede beibehalten werden würden, ist es empfehlenswert, Permafrost durch eine weitere Methode zu untersuchen. Dabei können auch die MTD weiterverwendet werden.

Eine andere mögliche Methode, die auf Messwerte von Bodentemperatur zurückgreift und damit eine Weiterverwendung der MTD ermöglicht, sind langjährige Bodentemperaturmessungen. Sobald eine Messreihe über ein volles Jahr vollzogen wird, kann die mittlere jährliche Temperatur der Bodenoberfläche festgestellt und daraus Permafrostverbreitung errechnet werden (HEGGEM ET AL., 2006). Die Schneedecke an diesen Stellen muss bei dieser Methode keine Mindesthöhe erreichen, wodurch die Messung der Schneedeckenhöhe wegfällt und die Aufnahme dadurch unabhängig vom Wetter im Messzeitraum wird.

Zusätzlich können einige MTD auch in verschiedenen Tiefen angebracht werden, sodass die vertikale Temperaturleitfähigkeit im Untergrund punktuell festgestellt werden kann. Das würde die Anzahl der Input-Variablen erhöhen, wodurch in weiterer Folge prozess-orientierte Modellierungsansätze, wie in Kapitel 2 Stand der Forschung aufgelistet, ermöglicht werden.

Die Wassertemperatur bei Quellaustritten kann als Indiz für Permafrost verwendet werden (SCHROTT, 1999). Da die MTD wasserdicht sind, können sie auch dafür herangezogen werden. Weiters ist hier keine langjährige Messreihe notwendig.

Geophysikalische Prospektionsmethoden des Untergrundes können Permafrostvorkommen feststellen (HARRIS ET AL., 2009). Eine dieser Methoden im Untersuchungsgebiet anzuwenden, zum Beispiel im Tälchen des Teilgebiets 4, würde ein weiteres Indiz für oder gegen Permafrost geben. Die Ergebnisse könnten mit den beiden Modellierungen in dieser Arbeit verglichen werden und damit die für diesen Bereich treffsichere Methode ausgewählt werden. Dies müsste im Teilgebiet 1 wiederholt werden um festzustellen, ob Gunstlagen für Permafrost in geringer Seehöhe des Untersuchungsgebiets vorkommen können.

10 Zusammenfassung

Die Studie der rezenten und zukünftigen Permafrostverbreitung gilt als Pilotprojekt im Gebiet Gokyo im nepalesischen Himalajagebirge 20 km westlich des Mount Everests.

Permafrost ist langjährig gefrorener Untergrund, dessen oberste Schicht im Sommer auftaut und im Winter wieder gefriert. Die Tiefe dieser Auftauschicht ist sensibel gegenüber Klimaänderungen. Im Hochgebirge ist Permafrost zumeist unterhalb von vergletscherten Gebieten weit verbreitet, wobei Permafrost häufig auf Nordhängen und abgeschatteten Bereichen auftritt und sich grob in Höhenzonen nach Exposition einteilen lässt.

Die Permafrostverbreitung wurde mit Hilfe von zwei Methoden, die in den europäischen Alpen entwickelt worden sind, für Gokyo modelliert. Die eine geht davon aus, dass Blockgletscher, als natürlicher Indikator für Permafrost, die Untergrenze der Zone von diskontinuierlichem Permafrost anzeigen. Bei der anderen Methode wird die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) durch den Einsatz von kleinen Temperaturdatenloggern (MTD) gemessen und durch empirisch ermittelte Temperaturgrenzwerte mit dem Vorhandensein von Permafrost in Beziehung gesetzt. Diese Grenzwerte wurden auch in anderen Teilen der Welt angewandt, wobei ihre Gültigkeit diskutiert und keine maßgeblichen Revisionen vorgeschlagen wurden. Die Permafrostverbreitung wurde mit einer linearen Regression ermittelt, wobei die BTS die abhängige Variable ist, die Seehöhe und die direkte Sonneneinstrahlung im Jänner die unabhängigen Variablen sind.

Die zukünftige Permafrostverbreitung bezieht sich auf das Jahr 2039, wo der Temperaturanstieg direkt in Höhe durch den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten umgerechnet und von den Grenzwerten der Bodentemperatur abgezogen wurde.

Die Permafrostverbreitung zeigt, je nach verwendeter Methode zwei unterschiedliche Ergebnisse, wobei bei der Blockgletschermethode Permafrost sich nur in sehr hoch gelegenen Lagen befindet, bei der BTS Methode Permafrost bis knapp in den Talboden hinunter reicht. Die Grenze der Zone des diskontinuierlichen Permafrosts nach dem Blockgletscherindikator kann mit der Seehöhe nach Exposition wie folgt angegeben werden: Nord 5021, Ost 5201, Süd 5271 und West 5114 Meter Seehöhe. Die Untergrenze der Permafrostverteilung liegt im Permafrostszenario für 2039 wahrscheinlich um 188 Meter höher als im Jahre 2009.

Beim BTS-Indikator wird kontinuierlicher Permafrost auch in sehr geringen Höhen von 4782 Meter angezeigt.

Blockgletscher waren in Nordlage sehr zahlreich, wodurch hierfür ein repräsentativer Mittelwert errechnet werden konnte, was jedoch für die anderen Exposition nicht möglich war, hierfür nicht ausreichend Daten zur Verfügung standen. Bei der BTS war der Zeitraum der Messung sehr kurz, wodurch teilweise sehr tiefe Temperaturen gemessen wurden, die nicht dem Temperaturregime des Untergrundes entsprechen müssen.

Die Permafrostmodellierung zeigt zwei unterschiedliche Ergebnisse, wodurch weitere Untersuchungen nötig sind um zu entscheiden, ob die BTS Methode im Himalajabereich nicht angewendet werden kann oder ob die empirischen Grenzwerte aus den Alpen revidiert werden müssen. Dafür können sowohl MTD verwendet, als auch geophysikalische Messungen durchgeführt werden.

11 Literaturverzeichnis

BARSCH, D. (1978): Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. In: National Research Council of Canada (Hrsg.): 3rd International Conference on Permafrost, Proceedings. Edmonton. S. 349-352.

BARSCH, D. (1988): Rockglaciers. In: CLARK, M. J. (Hrsg.): Advances in periglacial geomorphology. S. 69-90.

BARSCH, D. und JAKOB, M. (1998): Mass transport by active rockglaciers in the Khumbu Himalaya. *Geomorphology* 26 S. 215-222

BARSCH, D. (1996): Rockglaciers Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Berlin.

BÄUMLER, R. (2004): Pedogenic studies in eastern Nepal - New aspects about the last glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23 S. 1777-1783

BHANDARI, B.B. und JOO, G.J. (Hrsg.) (2007): Himalayan Wetlands: Risks, Challenges and Opportunities. Changwon: Ramsar Wetlands Center Korea

BHUTIYANI, M. R., KALE, V. S., PAWAR, N. J. (2010): Climate change and the precipitation variations in the northwestern Himalaya: 1866-2006. *International Journal of Climatology* 30 S. 535-548

BRENNING, A., GRUBER, S., HOELZLE, M. (2005): Sampling and statistical analyses of BTS measurements. *Permafrost and Periglacial Processes* 16 S. 383-393

CEDERSTROM, D. J., JOHNSTON, P. M., SUBITZKY, S. (1953): Occurrence and development of ground water in permafrost regions. United States Geological Survey, circular 275, 30pp.

DAMM, B. und LANGER, M. (2006): Mapping and regionalisation of permafrost phenomena as a basis for natural hazard analyses in South Tyrol (Italy). *Mitteilungen der Osterreichischen Geographischen Gesellschaft* 295-314

EBOHON, B. und SCHROTT, L. (2008): Modeling Mountain Permafrost Distribution. A new Permafrost Map of Austria. Fairbanks, Proceedings of the ninth International Conference on Permafrost. S. 1-7

ETZELMÜLLER, B., HOELZLE, M., HEGGEM, E. S. F., ISAKSEN, K., MITTAZ, C., VONDER MÜHLL, D., DEGARD, R. S., HAEBERLI, W., SOLLID, J. L. (2001): Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55 S. 186-194

FERRIANS, O. J., KACHADOORIAN, R., GREENE, G. W. (1969): Permafrost and related engineering problems in Alaska.

FRENCH, H. M. (1996): *The periglacial environment*. Harlow. 2nd ed S.

FRENCH, H. M. (2007): *The periglacial environment*. Chichester. 3rd ed S.

FUCHS, S., KEILER, M., ZISCHG, A. (2001): Risikoanalyse Oberes Suldental, Vinschgau Konzepte und Methoden zur Erstellung eines Naturgefahrenhinweis-Informationssystem.

FUJI, Y. und HIGUCHI, K. (1976): Ground temperature and its relation to permafrost occurrences in the Khimbu Himal and Hidden Valley. *Seppyō* 38, S. 125 - 128

FRAUENFELDER, R. (1998): Permafrostuntersuchungen mit GIS. Eine Studie im Fletschhorngebiet. – *Mitteilungen der VAW-ETH Zürich* 158. S. 55-68.

GADEK, B. und KEDZIA, S. (2008): Winter ground surface temperature regimes in the zone of sporadic discontinuous permafrost, Tatra mountains (Poland and Slovakia). *Permafrost and Periglacial Processes* 19 S. 315-321

GARDAZ, J. (1997): Distribution of Mountain Permafrost, Fontanesses Basin, Valaisian Alps, Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 8 S. 101-105

GRUBER, S. und HOELZLE, M. (2001): Statistical modelling of mountain permafrost distribution: Local calibration and incorporation of remotely sensed data. *Permafrost and Periglacial Processes* 12 S. 69-77

GUGLIELMIN, M., ALDIGHIERI, B., TESTA, B. (2003): PERMACLIM: A model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observations. *Geomorphology* 51 S. 245-257

HAEBERLI, W. (1973): Die Basistemperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie* 9 S. 221-227

HAEBERLI, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass in Piz Grialetsch (GR). – *Mitteilungen der VAW-ETH Zürich* 17. 221 S.

HAEBERLI, W. (1978): Special aspects of high mountain permafrost methology and zonation in the alps. Edmonton, Permafrost, Proceedings of the third International Conference on Permafrost. S. 379-384

HAEBERLI, W., CHENG, G., GORBUNOV, A. P., HARRIS, S. A. (1993): Mountain permafrost and climatic change. *Permafrost & Periglacial Processes* 4 S. 165-174

HAEBERLI, W. und BURN, C. R. (2002): Natural hazards in forests: glacier and permafrost effects as related to climate change. IN: SIDLE, R. C. (Hrsg.): *Environmental Change and Geomorphic Hazards in Forests*. IUFRO Research Series 9, CABI Publishing, Wallingford, S. 167-202

HAMBREY, M. J., QUINCEY, D. J., GLASSER, N. F., REYNOLDS, J. M., RICHARDSON, S. J., CLEMMENS, S. (2008): Sedimentological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, Nepal. *Quaternary Science Reviews* 27 S. 2361-2389

HARRIS, C., HAEBERLI, W., VONDER MÜHLL, D., KING, L. (2001): Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: The PACE project in its global context. *Permafrost and Periglacial Processes* 12 S. 3-11

HARRIS, C., ARENSON, L. U., CHRISTIANSEN, H. H., ETZELMÜLLER, B., FRAUENFELDER, R., GRUBER, S., HAEBERLI, W., HAUCK, C., HOELZLE, M., HUMLUM, O., ISAKSEN, K., KÄÄB, A., KERN-LÜTSCHG, M. A., LEHNING, M., MATSUOKA, N., MURTON, J. B., NÖTZLI, J., PHILLIPS, M., ROSS, N., SEPPÄLÄ, M., SPRINGMAN, S. M., VONDER MÜHLL, D. (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92 S. 117-171

HAUCK, C. und VONDER MÜHLL, D. (2003): Evaluation of geophysical techniques for application in mountain permafrost studies. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 132 S. 161-190

HAUCK, C., ISAKSEN, K., VONDER MÜHLL, D., SOLLID, J. L. (2004): Geophysical surveys designed to delineate the altitudinal limit of mountain permafrost: An example from Jotunheimen, Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 15 S. 191-205

HEGGEM, E. S. F., ETZELMÜLLER, B., ANARMAA, S., SHARKHUU, N., GOULDEN, C. E., NANDINSETSEG, B. (2006): Spatial distribution of ground surface temperatures and active layer depths in the Hövsgöl area, northern Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes* 17 S. 357-369

HEGINBOTTOM, J. A. (2002): Permafrost mapping: A review. *Progress in Physical Geography* 26 S. 623-642

HOELZLE, M. (1992): Permafrost occurrence from BTS measurements and climatic parameters in the eastern Swiss Alps. *Permafrost & Periglacial Processes* 3 S. 143-147

HOELZLE, M., WEGMANN, M., KRUMMENACHER, B. (1999): Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: First experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 10 S. 113-124

HÖLLERMANN, P. W. (1983): Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe Studien aus europäischen und nordamerikanischen Hochgebirgen. *Bonner Geographische Abhandlungen* 67. 73 S.

IMHOF, M. (1996): PERM - ein Programm für die automatisierte Kartierung von Permafrost in den Schweizer Alpen.- IN: Haerberli, W., Hölzle, M., Dousse, J. P., Ehrler, C., Gardaz, J. M., Imhof, M., Keller, F., Kunz, P., Lugon, R. und Reynard, E.: *Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen.- vdf Hochschulverlag ETHZ, Zürich, S. 25-33.*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007a): *Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, PARRY, M.L., CANZIANI, O.F., PALUTIKOF, J.P., VANDERLINDEN, P.J. und HANSON, C.E. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge 976 S.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007b): *Climate change 2007. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, METZ, B., DAVIDSON, O.R., BOSCH, P.R., DAVE, R. und MEYER, L.A. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007c): *Climate change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M. und MILLER, H.L. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, 996 S.

ISHIKAWA, M. und HIRAKAWA, K. (2000): Mountain permafrost distribution based on BTS measurements and DC resistivity soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan. *Permafrost and Periglacial Processes* 11 S. 109-123

ISHIKAWA, M., WATANABE, T., NAKAMURA, N. (2001): Genetic differences of rock glaciers and the discontinuous mountain permafrost zone in Kanchanjunga Himal, Eastern Nepal. *Permafrost and Periglacial Processes* 12 S. 243-253

ISHIKAWA, M. (2003): Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology* 52 S. 105-120

JAKOB, M. (1992): Active rock glaciers and the lower limit of discontinuous alpine permafrost, Khumbu Himalaya, Nepal. *Permafrost & Periglacial Processes* 3 S. 253-256

JESSUP, M. J., COTTLE, J. M., SEARLE, M. P., LAW, R. D., NEWELL, D. L., TRACY, R. J., WATERS, D. J. (2008): P-T-t-D paths of Everest Series schist, Nepal. *Journal of Metamorphic Geology* 26 S. 717-739

JULIAN, A. und CHUECA, J. (2007): Permafrost distribution from BTS measurements (Sierra de Telera, central Pyrenees, Spain): Assessing the importance of solar radiation in a mid-elevation shaded mountainous area. *Permafrost and Periglacial Processes* 18 S. 137-149

KÄÄB, A. (2008): Remote sensing of permafrost-related problems and hazards. *Permafrost and Periglacial Processes* 19 S. 107-136

KELLER, F. (1992): Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO. *Permafrost & Periglacial Processes* 3 S. 133-138

KELLER, F. (1994): Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost eine Grundlagenstudie im Oberengadin. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich, Bd. 127, 145 S.*

KING, L., HERZ, T., HARTMANN, H., HOF, R., JIANG, T., KE, C., WEI, Z., LIU, J., YI, C. (2006): The PACE monitoring strategy: A concept for permafrost research in Qinghai-Tibet. *Quaternary International* 154-155 S. 149-157

KNEISEL, C. und KÄÄB, A. (2007): Mountain permafrost dynamics within a recently exposed glacier forefield inferred by a combined geomorphological, geophysical and photogrammetrical approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 S. 1797-1810

KUHLE, M. (1985): Permafrost and periglacial indicators on the Tibetan Plateau from the Himalaya Mountains in the south to the Quilian Shan in the north (28-40N). *Zeitschrift für Geomorphologie* 29 S. 183-192

LACHENBRUCH, A. (1968): Permafrost. In: R. W. FAIRBRIDGE (Hrsg.): *Encyclopedia of geomorphology*. New York. S. 833-838.

LAMBIEL, C. und PIERACCI, K. (2008): Permafrost distribution in talus slopes located within the alpine periglacial belt, Swiss alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 19 S. 293-304

LEWKOWICZ, A. G. und EDNIE, M. (2004): Probability mapping of mountain permafrost using the BTS method, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 15 S. 67-80

LEWKOWICZ, A. G. und BONNAVENTURE, P. P. (2008): Interchangeability of Mountain permafrost probability models, Northwest Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 19 S. 49-62

MULLER, S. (1945): Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. – United States Engineers Office, Strategic Engineering Study, Special Report No. 62. 136 S.

N, T. H. (1880): Temperature of the soil during winter. *Nature* 21 S. 523

NYENHUIS, M. (2006): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem.

PARK, J. H., DUAN, L., KIM, B., MITCHELL, M. J., SHIBATA, H. (2010): Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. *Environment International* 36 S. 212-225

REGMI, D. und WATANABE, T. (2005): Slow mass movement in the Kangchenjunga area, eastern Nepal Himalaya. *Island Arc* 14 S. 400-409

REGMI, D. (2008): Rock Glacier Distribution and the Lower Limit of Discontinuous Mountain Permafrost in the Nepal Himalaya. Fairbanks, Proceedings of the ninth International Conference on Permafrost. S. 1475-1480

RISEBOROUGH, D., SHIKLOMANOV, N., ETZELMÜLLER, B., GRUBER, S., MARCHENKO, S. (2008): Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes* 19 S. 137-156

SCHÖNWIESE, C. D. (2000): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin. 3., verb. und erw. Aufl S.

SCHÖNWIESE, C. D. (2003): *Klimatologie*. Stuttgart. 2., neu bearb. und aktual. Aufl S.

SCHROTT, L. (1999): Typische und atypische Permafrostvorkommen – Klimatische Bedingungen, geomorphologische Indikatoren und Prospektionsmethoden. – *Decheniana* 37. S. 13-26.

SEARLE, M. P. (1999): Extensional and compressional faults in the Everest Lhotse massif, Khumbu Himalaya, Nepal. *Journal of the Geological Society* 156 S. 227-240

SEARLE, M. P., SIMPSON, R. L., LAW, R. D., PARRISH, R. R., WATERS, D. J. (2003): The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal-South Tibet. *Journal of the Geological Society* 160 S. 345-366

STOCKER-MITTAZ, C., HOELZLE, M., HAEBERLI, W. (2002): Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data: A first step. *Permafrost and Periglacial Processes* 13 S. 271-282

STÖCKLIN, J. (1980): Geology of Nepal and its regional frame. *Journal of the Geological Society* 137 S. 1-34

THOMSON, A. und BREMNER, P. C. (1952): Permafrost drilling and soil-temperature measurements at resolute, cornwallis Island, Canada. *Nature* 170 S. 705-706

VONDERMÜHLL, D., VOROSMARTY, C. J., HAUCK, C., GUBLER, H. (2002): Mapping of mountain permafrost using geophysical methods. *Progress in Physical Geography* 26 S. 643-660

WAHRHAFTIG, C. und COX, A. (1959): Rock glaciers in the Alaska Range. – *Geological Society of America Bulletin* 70. S. 383-436.

ZEPP, H. (2004): *Geomorphologie eine Einführung*. Paderborn. 3., durchges. Aufl S.

12 Anhang

Florian Mayer

Guido-Fischergasse 17
 A-2620 St. Lorenzen
 Mobil 0664 / 78 50 722
 E-Mail: florian_mayer@aon.at

CURRICULUM VITAE

Persönliche Information	Staatsangehörigkeit: <i>Österreich</i> Geburtsdatum: <i>18. Jänner 1985</i> Familienstand: <i>ledig</i>												
Ausbildung	<table> <tr> <td>September 2006</td> <td>Abschluss des 1. Abschnitts des Studiums der Geographie</td> </tr> <tr> <td>Seit Oktober 2004</td> <td>Diplomstudium der Geographie an der Universität Wien</td> </tr> <tr> <td>Jän – Sept 2004</td> <td>Präsenzdienst abgeleistet</td> </tr> <tr> <td>May 2003</td> <td>Matura im Realgymnasium Neunkirchen</td> </tr> <tr> <td>1996 - 2003</td> <td>Realgymnasium Neunkirchen</td> </tr> <tr> <td>1991 - 1995</td> <td>Volksschule St. Lorenzen (Bezirk Neunkirchen)</td> </tr> </table>	September 2006	Abschluss des 1. Abschnitts des Studiums der Geographie	Seit Oktober 2004	Diplomstudium der Geographie an der Universität Wien	Jän – Sept 2004	Präsenzdienst abgeleistet	May 2003	Matura im Realgymnasium Neunkirchen	1996 - 2003	Realgymnasium Neunkirchen	1991 - 1995	Volksschule St. Lorenzen (Bezirk Neunkirchen)
September 2006	Abschluss des 1. Abschnitts des Studiums der Geographie												
Seit Oktober 2004	Diplomstudium der Geographie an der Universität Wien												
Jän – Sept 2004	Präsenzdienst abgeleistet												
May 2003	Matura im Realgymnasium Neunkirchen												
1996 - 2003	Realgymnasium Neunkirchen												
1991 - 1995	Volksschule St. Lorenzen (Bezirk Neunkirchen)												
Studien-Schwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Geomorphologische Systeme • Quartärforschung und Paläobodenforschung • Geoinformation und Visualisierung • Südost- und Südasienforschung 												
Außerschulische Ausbildung	<table> <tr> <td>Juni 2007</td> <td>Projekt Management Austria erfolgreiche Zertifizierung von PM Basics</td> </tr> <tr> <td>Juli 1999</td> <td>2 OMV Computerkurse (4 Wochen)</td> </tr> <tr> <td>Juli 1998</td> <td>2 OMV Computerkurse (4 Wochen)</td> </tr> </table>	Juni 2007	Projekt Management Austria erfolgreiche Zertifizierung von PM Basics	Juli 1999	2 OMV Computerkurse (4 Wochen)	Juli 1998	2 OMV Computerkurse (4 Wochen)						
Juni 2007	Projekt Management Austria erfolgreiche Zertifizierung von PM Basics												
Juli 1999	2 OMV Computerkurse (4 Wochen)												
Juli 1998	2 OMV Computerkurse (4 Wochen)												
Berufserfahrung	<table> <tr> <td>September 2008</td> <td>Ferialpraxis in der Abteilung Exploration & Produktion der OMV Solutions GmbH</td> </tr> <tr> <td>Juli 2006 - 07</td> <td>Ferialpraxis in der Abteilung Operations & Maintenance der OMV Gas GmbH für je ein Monat</td> </tr> <tr> <td>August 2005</td> <td>Ferialpraxis in der Abteilung CCI-NET der OMV Solutions GmbH</td> </tr> <tr> <td>Juli 2001 - 03</td> <td>Ferialpraxis in der Abteilung für Telekommunikation und Netzwerke der OMV AG für je ein Monat</td> </tr> </table>	September 2008	Ferialpraxis in der Abteilung Exploration & Produktion der OMV Solutions GmbH	Juli 2006 - 07	Ferialpraxis in der Abteilung Operations & Maintenance der OMV Gas GmbH für je ein Monat	August 2005	Ferialpraxis in der Abteilung CCI-NET der OMV Solutions GmbH	Juli 2001 - 03	Ferialpraxis in der Abteilung für Telekommunikation und Netzwerke der OMV AG für je ein Monat				
September 2008	Ferialpraxis in der Abteilung Exploration & Produktion der OMV Solutions GmbH												
Juli 2006 - 07	Ferialpraxis in der Abteilung Operations & Maintenance der OMV Gas GmbH für je ein Monat												
August 2005	Ferialpraxis in der Abteilung CCI-NET der OMV Solutions GmbH												
Juli 2001 - 03	Ferialpraxis in der Abteilung für Telekommunikation und Netzwerke der OMV AG für je ein Monat												

Computerkenntnisse	ArcMap
	ArcInfo
	ArcView
	Manifold Systems
	Macromedia Director
	Internet Anwendungen
	Msoffice Anwendungen
	Unix (Linux) Grundkenntnisse
Fremdsprachen	Englisch in Wort und Schrift
	Spanisch (Maturaniveau)
Interessen	Rechnungsprüfer des Tauchclubs BonAir von 2005 - 2008
	Hobbies: Tauchen: PADI Rescue Diver
	Kampfsport: Judo 1. Kyu
	Studienaufenthalte: China
	Nepal
	Frankreich
Auslandsaufenthalte: Australien	