



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

QUANTIFIZIERUNG DES GEOHAZARDPOTENTIALS VON GLETSCHERSEEAEUSBRÜCHEN

121 S., 40 Abb., 4 Tab.

Verfasserin

Karin Putzlager, Bakk. rer. nat.

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (M.Sc.)

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Erdwissenschaften

Betreuerin / Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. Dr. Hermann Häusler

Wien, Jänner 2010

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	9
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	11
2 WISSENSCHAFTLICHER HINTERGRUND	13
2.1 AUFBAU UND DYNAMIK EINES GLETSCHERS	14
2.2 MASSENBILANZ / MASSENHAUSHALT EINES GLETSCHERS	15
2.3 GLETSCHERBEWEGUNG	17
2.4 GLETSCHERLÄNGENÄNDERUNGEN	19
2.5 GLETSCHERABLAGERUNGEN	20
2.6 KLASSIFIZIERUNG DER GLETSCHER	22
2.6.1 MORPHOLOGISCHE KLASSIFIZIERUNG DER GLETSCHER	22
2.6.2 DYNAMISCHE KLASSIFIZIERUNG DER GLETSCHER	23
2.6.3 THERMISCHE KLASSIFIZIERUNG DER GLETSCHER	23
2.6.4 ALPNER VERSUS ASIATISCHER GLETSCHERTYPUS	24
3 GLETSCHERGEFAHREN	24
3.1 LÄNGENÄNDERUNGEN	25
3.2 GLACIER SURGES	26
3.3 EISSTÜRZE	29
3.4 GLETSCHERHOCHWASSER UND GLOFs	29
4 GLOFs – GLACIER LAKE OUTBURST FLOODS	31
4.1 ENTSTEHUNG VON GLETSCHERSEEN	31
4.2 URSACHEN FÜR GLOFs	34
4.3 INTERNATIONALE BEISPIELE VON GLOFs	35
4.4 GLOF UND GLOBAL CHANGE	38
5 DISKURS ÜBER NATURGEFAHREN	40

5.1 RIsIKOANALYSE VERSUS GEFAHRENANALYSE (<i>BEGRIFFSDEFINITIONEN NACH KIENHOLZ, 1998, HOLLENSTEIN, 1997, BORTER, 1999, AUS KÖNIGSEDER, 2006</i>)	41
5.2 ARTEN DER GEFAHRENBEURTEILUNG (VERÄNDERT NACH „ARTEN DER RIsIKOANALYSE“ VON SCHAUMANN, 2007, 2009)	43
5.2.1 QUANTITATIVE GEFAHRENBEURTEILUNG	43
5.2.2 SEMIQUANTITATIVE GEFAHRENBEURTEILUNG	43
5.2.3 QUALITATIVE GEFAHRENBEURTEILUNG	43
 <u>6 METHODIK ZUR HAZARDBEURTEILUNG AUSBRUCHSGEFÄHRDETER GLETSCHERSEEN</u>	 <u>44</u>
 6.1 GEFAHRENERKENNUNG UND DOKUMENTATION	 45
6.1.1 PARAMETER I: VORBEREITENDE PROZESSE	45
6.1.2 PARAMETER II: DIREKTE AUSLÖSEMECHANISMEN	46
6.1.3 PARAMETER III: DAS SEESYSTEM	47
6.1.4 PARAMETER IV: WEITERE GRUNDLEGENDE PARAMETER	47
6.2 SEMIQUANTITATIVE BEURTEILUNG DER EINZELPARAMETER	48
6.2.1 SEMIQUANTITATIVE BEWERTUNG VON FLÄCHEN UND VOLUMINA	50
6.2.2 SEMIQUANTITATIVE BEWERTUNG VON ENTSCHEIDUNGSFRAGEN	50
6.3 QUANTITATIVE GESAMTBEURTEILUNG DER PARAMETER	51
 <u>7 ANSATZ EINER QUANTITATIVEN BEURTEILUNG AM BEISPIEL DES LUGGYE TSHO (OST-LUNANA / NW-BHUTAN)</u>	 <u>53</u>
 7.1 ALLGEMEINE GEOLOGIE UND HYDROLOGIE VON BHUTAN	 54
7.2 GEOLOGISCHER ÜBERBLICK DES REGION OST-LUNANA	57
7.3 INVENTARISIERUNG DER GLETSCHER UND GLETSCHERSEEN OST-LUNANAS	61
7.4 DATENERHEBUNG FÜR DEN LUGGYE TSHO (OST-LUNANA)	62
7.5 SEMIQUANTITATIVE BEURTEILUNG DER EINZELPARAMETER UND GEFAHRENQUELLEN DES LUGGYE TSHO (OST-LUNANA)	66
7.5.1 BEURTEILUNGSPARAMETER I: STADIUM DER SEEENTWICKLUNG	68
7.5.2 BEURTEILUNGSPARAMETER II: GRÖÖE DES GLETSCHEREINZUGSGEBIETES	69
7.5.3 BEURTEILUNGSPARAMETER III: DEBRISBEDECKUNG DES GLETSCHERS	71
7.5.4 BEURTEILUNGSPARAMETER IV: HINWEISE AUF PALÄO-GLOF	72
7.5.5 BEURTEILUNGSPARAMETER V: GLOF VON OROGRAPHISCH HÖHER GELEGENEM SEE	74

7.5.6	BEURTEILUNGSPARAMETER VI: TEIL EINER SEENKETTE	77
7.5.7	BEURTEILUNGSPARAMETER VII: SEEABFLUSS – OUTLET	78
7.5.8	BEURTEILUNGSPARAMETER VIII / IX: LINKE UND RECHTE LATERALMORÄNE	82
7.5.9	BEURTEILUNGSPARAMETER X: ANWESENHEIT VON TOTEISKÖRPERN	84
8	<u>GESAMTBEURTEILUNG DER EINZELERGEBNISSE</u>	87
9	<u>DEFINITIONEN (QUELLE: UNISDR 2009) UND ABKÜRZUNGEN</u>	91
	<u>DANKSAGUNG</u>	95
	<u>ANHANG 1</u>	97
	<u>ANHANG 2</u>	105
	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	107
	<u>TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u>	113
	<u>ABSTRACT</u>	117
	<u>CURRICULUM VITAE</u>	119

Vorwort

Die Bedrohung des Menschen durch Geohazards, speziell durch Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs) in Hochgebirgsregionen wie Bhutan, hat innerhalb der letzten Jahrzehnte aufgrund der globalen Erwärmung, an Bedeutung zugenommen. Bis zum Jahr 2100 wird eine Erwärmung von 1,1 bis 6,4 °C erwartet (IPCC, 2007).

Zur Verhinderung gefährlicher Folgen des Climate Change, wie verstärkte Gletscherschmelze und ein Anstieg des Meeresspiegels, fand im Dezember 2009 die „United Nations Climate Change Conference“ in Kopenhagen statt. Im Rahmen internationaler Tagungen der „European Geosciences Union“ (EGU) werden außerdem die Themen Kryosphäre und GLOFs in speziellen sessions immer häufiger vorgetragen, sowie deren wichtiger Zusammenhang mit dem Climate Change hervorgehoben. Es seien an dieser Stelle folgende sessions der EGU 2009 in Wien erwähnt: „Glacial Lake Outburst Floods: current issues – future concerns“ (Convener: Reynolds, Huggel, Quincey), „Climate change impacts on glaciers, permafrost and related hazards“ (Convener: Huggel, Käab, Schneider, Raup), „Education and communications to students, government officials and to the public in cryospheric sciences“ (Convener: De Jong). Zahlreiche workshops auf nationaler und internationaler Ebene, wie der „Glacier Hazard Workshop“ an der Universität für Bodenkultur, Wien 2009, sowie der internationale workshop „Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) in Central Asia“ in Bishkek, haben das Hauptaugenmerk vor allem auf die gefährlichen Gletscherseeausbrüche in Hochgebirgsregionen gelegt. Das Ziel, Gefahrenquellen zu beurteilen, sowie das Risikopotential zu reduzieren, steht hier im Vordergrund.

Im Zuge der vorliegenden Masterarbeit wurde selbstständig ein Konzept entwickelt, welches zunächst eine semiquantitative Bewertung einzelner Auslösemechanismen von Gletscherseeausbrüchen erlaubt, um anschließend das Gesamtsystem „Gletschersee“ nach seinem Gefahrenpotential beurteilen zu können.

1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit

Die Gefahr eines Ausbruches von Gletscherseen ist ein weltweites Phänomen in vergletscherten Hochgebirgsregionen, das in Folge der regionalen Erwärmung an Bedeutung zunimmt (HÄUSLER, 2002). Durch das Abschmelzen von Gletschern bilden sich glaziale Seen hinter Moränen oder Eisdämmen, welche instabil werden und durchbrechen können. Dadurch können in nur wenigen Stunden riesige Wasser- und Schuttmengen freigesetzt werden und katastrophale Überflutungen talabwärts hervorrufen.

Die Schäden, welche noch hunderte von Kilometern entfernt auftreten, sind verheerend für Menschen, Besitztümer, Landwirtschaft und Infrastruktur. Deshalb ist es von besonderer Wichtigkeit, das globale Inventar an Gletscherseen nach ihrem Gefährdungspotential zu klassifizieren und Veränderungen zu überwachen.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird versucht, ein Konzept der quantitativen Gefahrenbeurteilung potentieller Gletscherseeausbrüche zu erstellen, wichtige Einflussparameter zu erfassen und zu beurteilen, sowie dieses Konzept auf regionaler Ebene an einem Gletschersee in NW-Bhutan anzuwenden.

Die einzelnen Kapitel sind aufbauend verfasst. Angefangen von den wissenschaftlichen Grundlagen des Systems Gletscher, über die Gefahren, die von Gletschern ausgehen, wird das Hauptaugenmerk auf die Gefahr von GLOFs (Glacier Lake Outburst Floods) gelegt, um nach einem Gefahrendiskurs auf die Vorgehensweise bei der Beurteilung von Gletscherseeausbrüchen zu lenken. Die Erkennung und Erfassung der einzelnen Einflussparameter stellt ein zentrales Kapitel der Arbeit dar, auf welches das Konzept der Gefahrenbeurteilung, welche am Beispiel des Luggye Tsho Gletschersees in NW-Bhutan angewendet wird, basiert.

Folgende Gliederung soll einen Überblick über die Struktur der Arbeit bieten:

	FRAGESTELLUNG	UNTERSUCHUNGSASPEKTE
Zusammenfassung		
1. Kapitel Einleitung	Welche sind die Hintergründe und Ziele dieser Arbeit?	
2. Kapitel System Gletscher – Wissenschaftlicher Hintergrund	Wie funktioniert ein Gletscher und nach welchen Kriterien werden Gletscher eingeteilt?	➤ Aufbau und Dynamik eines Gletschers ➤ Gletscherablagerungen ➤ Klassifizierung von Gletschern
3. Kapitel Gletschergefahren	Welche Gefahren gehen allgemein von Gletschern aus?	➤ Gletscherlängenänderungen ➤ Glacier Surges ➤ Eisstürze ➤ Gletscherhochwasser und GLOFs
4. Kapitel GLOFs – Glacier Lake Outburst Floods	Wie und wo entstehen GLOFs und in welchem Zusammenhang stehen GLOFs mit dem Global Change?	➤ Bildung von Gletscherseen ➤ Ursachen für GLOFs ➤ Internationale Beispiele ➤ GLOF und Global Change
5. Kapitel Diskurs über Naturgefahren	Wie wird Gefahr definiert und worin besteht der Unterschied zum Risiko? Was ist eine Gefahrenanalyse und welche Arten der Gefahrenbeurteilung hinsichtlich Naturgefahren gibt es?	➤ Definitionen und Gefahrterminologie ➤ Gefahrenanalyse als Teil der Risikoanalyse ➤ Quantitative, semiquantitative und qualitative Gefahrenbeurteilung im Bereich Naturgefahren
6. Kapitel Methodik zur Hazardbeurteilung ausbruchsgefährdeter Gletscherseen	Wie ist die primäre Vorgehensweise bei der Beurteilung von Gletscherseeausbrüchen? Welche Parameter fließen mit ein? Welche Wirkung können die einzelnen Parameter aufeinander haben? Wie kann ich das Gesamtsystem quantitativ nach der Gefährdung beurteilen?	➤ Gefahrenerkennung und Dokumentation ➤ Systembeurteilung Erfassung der einzelnen Einflussparameter und ihre Wirkung aufeinander, sowie Einbeziehung zukünftiger Entwicklungen und zeitlicher Veränderungen der Naturfaktoren ➤ Numerisches Konzept zur Gefahrenbeurteilung ausbruchsgefährdeter Gletscherseen

7. Kapitel Ansatz einer quantitativen Beurteilung am Beispiel des Luggye Tsho (Ost-Lunana / NW- Bhutan)	Findet das Modell der quantitativen Ansatzbeurteilung für potentiell gefährliche Gletscherseen auch geeignete Anwendung in der Natur? In welche Gefahrenklasse kann der Luggye Tsho eingestuft werden?	➤ Regionalgeologischer, und hydrogeologischer Überblick von Bhutan und Ost-Lunana ➤ Inventar an Gletschern und Gletscherseen in Ost-Lunana ➤ Semiquantitative Beurteilung und Auswertung der einzelnen Parameter und Gefahrenquellen des Luggye Tsho
8. Kapitel Gesamtbeurteilung der Einzelergebnisse und Fazit	Welche Fragen können mit der Arbeit beantwortet werden? Welcher weitere Forschungsbedarf ist notwendig?	➤ Gesamtbeurteilung der Einflussparameter für den Luggye Tsho ➤ Diskussion der Ergebnisse ➤ Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf ➤ Schlussfolgerungen
Definitionen, Anhang, Verzeichnisse, Dank- sagung, Abstract, CV		

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die Erstellung einer numerischen Gefahrenbeurteilung hinsichtlich Gletscherseeausbrüchen, die es zulässt, die Gefährdung einzelner Parameter des Systems Gletschersee zunächst semiquantitativ zu bestimmen, um anschließend in einer Gesamtbeurteilung quantitativ bewertet werden zu können. Es sollen dadurch für die zukünftige Erkennung und Beurteilung von Gefahren, die von Gletscherseen ausgehen, gezieltere Ergebnisse erlangt werden, um den möglichen Konsequenzen und Folgen rascher entgegenwirken und somit die Umwelt besser schützen zu können.

2 Wissenschaftlicher Hintergrund

Im 2. Kapitel der Masterarbeit wird das System Gletscher, angefangen von seinem Aufbau und seiner Dynamik, über seine Veränderungen, bis hin zu seinen Ablagerungsformen, beschrieben. Es soll einen umfassenden Überblick über den wissenschaftlichen Hintergrund dieser Arbeit bieten, um ein besseres Verständnis für die folgenden Kapitel zu erlangen. Das Kapitel 2 „Wissenschaftlicher Hintergrund“

besteht hauptsächlich aus einer detaillierten Literaturzusammenfassung, speziell von EHLERS (1994), BENN & EVANS (1998), Mc KNIGHT & HESS (2008) und WINKLER (2009).

2.1 Aufbau und Dynamik eines Gletschers

Die Entstehung und Entwicklung von Gletschern ist davon abhängig, ob die Menge an Schnee, welche im Winter gefallen ist, größer ist, als die Menge, die im Sommer abschmilzt. Unter dem Gewicht des Neuschnees im Folgewinter wird die alte Schneedecke zusammengepresst. Unter diesem Druck wird aus Altschnee Firn, später erfolgt die Umwandlung zu Eis. Es muss somit die Grundbedingung erfüllt sein, dass eine ausreichende Niederschlagsmenge vorhanden ist, die im darauffolgenden Winter die Gesamtmenge an Schnee erhöht. Dies ist wiederum abhängig von den klimatischen und topographischen Faktoren.

Klimatisch gesehen ist der wichtigste Faktor die Menge an Energie, welche zum Schmelzen von Eis benötigt wird, was wiederum in den meisten Gebieten in engem Zusammenhang mit der Lufttemperatur steht. Niedrige Temperaturen sind eine Grundvoraussetzung, wobei die Höhe der Sommertemperaturen die entscheidendere Rolle spielt. Sie bestimmt den Anteil der Niederschlagssummen, der dem Gletscher als Schmelzwasser entzogen wird (EHLERS, 1994). Topographische Faktoren sind das lokale Gefälle und die Anwesenheit von Tiefenwässern am Gletscherrand (BENN & EVANS, 1998).

Abbildung 2-1 Zeigt die Hauptkomponenten eines vereinfachten Gletschersystems. Der Eintrag von Masse und Energie erfolgt in Form von Niederschlag, Gesteinsschutt, Gravitation, Sonneneinstrahlung, sowie Geothermalwärme. Der Austrag erfolgt in Form von Wasserdampf, Wasser, Eis, Gesteinsschutt und Wärme. Masse und Energie durchlaufen das System unzählige Male, mit zwischenzeitlichen Perioden der Speicherung innerhalb oder unterhalb des Gletschers (BENN & EVANS, 1998, S. 4).

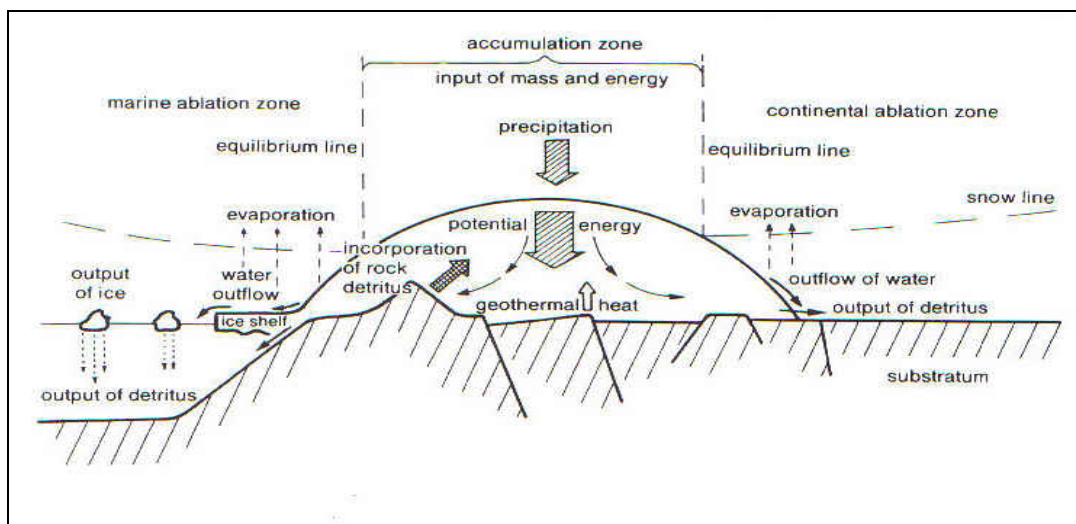


Abb. 2-1: Idealisierter Querschnitt durch eine Eiskappe, dargestellt als System (nach BRODZIKOWSKI und VAN LOON, 1991, aus BENN & EVANS, 1998, S. 4, Fig. 1.1).

2.2 Massenbilanz / Massenhaushalt eines Gletschers

Gletscher sind natürliche Systeme, deren Masse einer beständigen Veränderung unterliegt, welche durch das Klima gesteuert wird (WINKLER, 2009). Die Massenbilanz bzw. der Massenhaushalt eines Gletschers reflektiert das Klima der Region, in der sich der Gletscher befindet. Der Begriff Massenbilanz ist ein wichtiges Bindeglied zwischen klimatischen Einträgen und dem Gletscherverhalten, welches es erlaubt, den Vorstoß oder Rückzug vieler Gletscher aufgrund regionaler oder globaler Klimaänderungen besser zu verstehen (BENN & EVANS, 1998).

Die Massenbilanz bzw. der Massenhaushalt eines Gletschers ist definiert als die Differenz zwischen Gewinn und Verlust, welche über eine spezifische Zeitperiode, normalerweise ein Kalender- oder Bilanzjahr, gemessen wird (BENN & EVANS, 1998, S. 74 ff).

Akkumulation und Ablation stellen innerhalb des Massenhaushaltes eines Gletschers die zentralen Größen dar.

Akkumulation

Akkumulation bezeichnet zusammenfassend den Massengewinn eines Gletschers. Vor allem der winterliche Schneefall, Schnee- und Eislawinen, sowie windverdrifteter

Schnee tragen hierzu bei (WINKLER, 2009). Akkumulation erfolgt im kälteren, höher gelegenen Nährgebiet.

Ablation

Der Begriff Ablation bezeichnet den Massenverlust eines Gletschers. Darunter wird primär das Abschmelzen von Schnee, Firn und Eis verstanden. Massenverlust kann aber auch aus einem negativen Saldo der Winddrift von Schnee, oder aus Abgängen von Schnee- und Eislawinen resultieren. Direkte Sublimation und Evaporation können zusätzlich zum Massenverlust beitragen. Die Kalbung, das heißt das Abbrechen von Eisbergen an im Meer oder Binnenseen endenden Gletscherzungen, nimmt eine Sonderform der Ablation ein.

Die Ablation erfolgt im niedriger gelegenen, relativ wärmeren Zehrgebiet des Gletschers.

Gleichgewichtslinie

Die Grenze zwischen Akkumulationsgebiet und Ablationsgebiet bildet die Gleichgewichtslinie, auch ELA (equilibrium line altitude) genannt. An der Gleichgewichtslinie herrscht exaktes Gleichgewicht der jährlichen Gesamtakkumulation und der jährlichen Gesamtablation. Die Positionierung der Gleichgewichtslinie wird vom lokalen und regionalen Klima, besonders von Niederschlag und Lufttemperatur, sowie von der Topographie bestimmt (BENN & EVANS, 1998).

Die Gleichgewichtslinie wandert im Jahresverlauf, da sich das Verhältnis zwischen Akkumulation und Ablation verändert. Aus dem Verhältnis lässt sich ableiten, ob der Gletscher vorstößt oder sich zurückzieht. Ist die Akkumulation größer als die Ablation, stößt der Gletscher vor. Ist die Ablation größer, als die Akkumulation, zieht sich der Gletscher zurück.

Abbildung 2-2 bietet einen schematischen Überblick über die räumliche Untergliederung beziehungsweise den Massenhaushalt eines Gletschers, mit seinen Hauptkomponenten Akkumulation, Ablation und Gleichgewichtslinie.

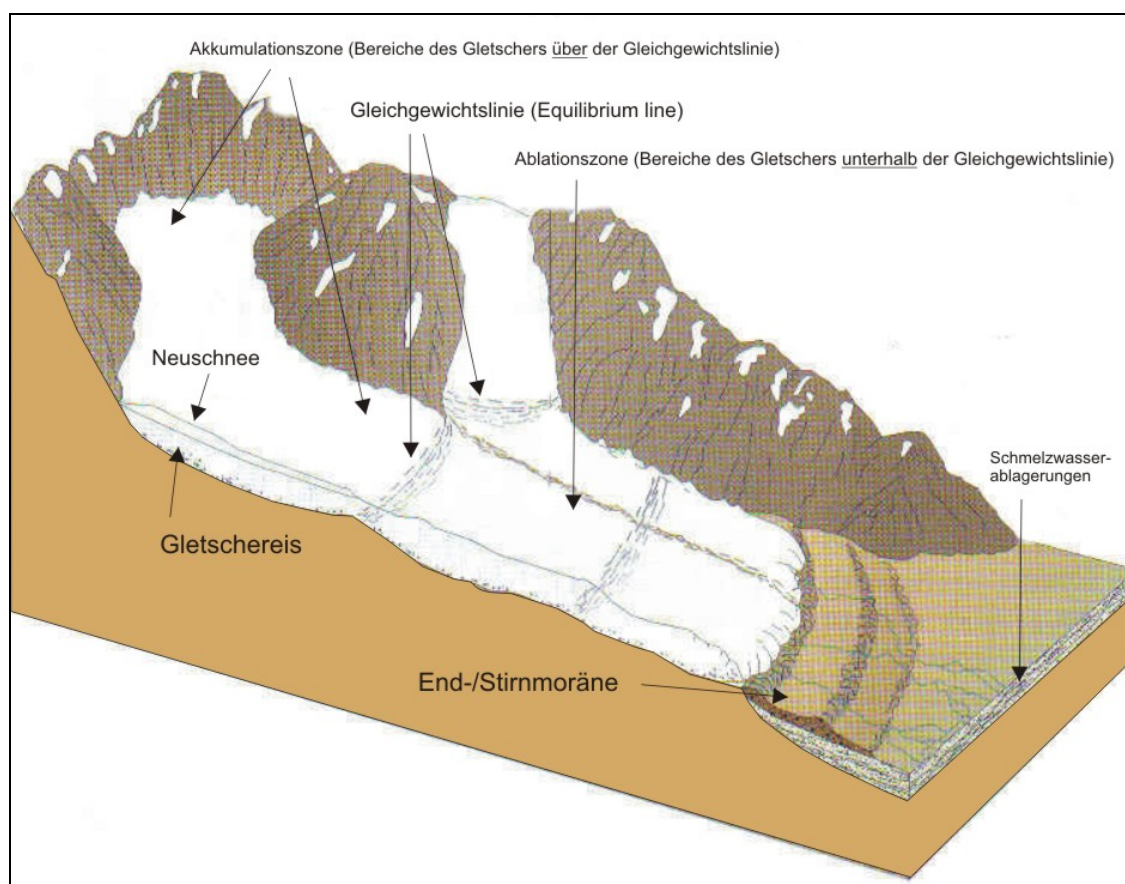


Abb. 2-2: Querschnitt durch einen Gletscher (verändert nach Mc KNIGHT & HESS, 2008)

Die jährliche Massenbilanz kann zusammenfassend als die Summe aus jährlicher Akkumulation und jährlicher Ablation, welche die Gesamtbeträge (Bruttobeträge) der Masse, die über ein Kalender- oder Bilanzjahr gewonnen oder verloren geht, dargestellt werden (BENN & EVANS, 1998, S. 75).

2.3 Gletscherbewegung

Ein Gletscher ist ein dynamisches System, welches durch aktive Eisbewegung charakterisiert ist. Die Bewegung eines Gletschers entsteht einerseits aus dem Ungleichgewicht zwischen dem von Massenüberschuss dominierten höher gelegenen Bereichen eines Gletschers und den tieferen Gletscherarealen, in denen Massenverlust eine wesentliche Rolle spielt, andererseits aus der Gravitation, welche eine Bewegung der Eiskristalle bewirkt (WINKLER, 2009).

Die Gletscherbewegung setzt sich generell aus den beiden folgenden Hauptkomponenten zusammen:

Deformationsfließen oder interne Deformation

Diese Form der Eisbewegung leitet sich ausschließlich aus den physikalischen Eigenschaften der Eiskristalle des Gletschereises ab und ist unabhängig von den klimatischen Rahmenbedingungen und den Untergrundverhältnissen am Gletscherbett. Nach dem Fließgesetz von Glen (Abbildung 2-3) entsteht eine Bewegung, wenn durch das Massenungleichgewicht zwischen den unterschiedlichen Teilen des Gletschers und die resultierende Neigung der Eisoberfläche, zusammen mit der vorhandenen Eismächtigkeit, eine Schubkraft oberhalb des Schwellenwertes von 50 kPa entsteht (WINKLER, 2009, S. 23). Die interne Deformation nimmt von unten nach oben und vom Rand zur Mitte hin zu.

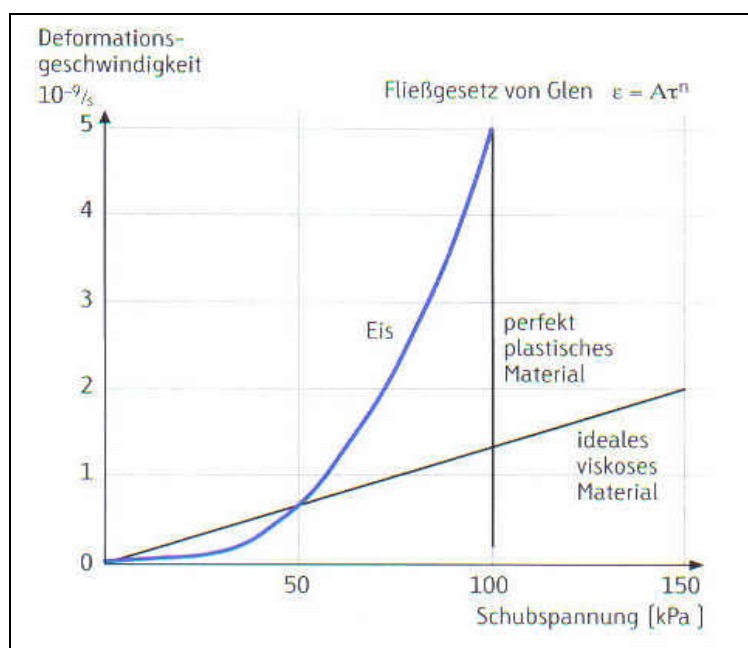


Abb. 2-3: Beziehung zwischen Schubspannung und Deformationsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien (verändert nach PATERSON, 1994, aus WINKLER, 2009, S. 23, Abb. 3.1).

Basales Gleiten

Jene Bewegungskomponente tritt nur bei warmbasaler Gletscherbasis auf. Das Eis befindet sich am Druckschmelzpunkt, wodurch ein dünner Schmelzwasserfilm

entsteht, auf dem der Gletscher gleiten kann. Deformationsfließen und basales Gleiten ergeben die Gesamtbewegung eines Gletschers.

Eine zusätzliche Bewegungskomponente von Gletschern mit warmbasaler Basis ist die Gletscherbewegung durch Deformation subglazialer Sedimente. Besteht das Gletscherbett aus ungefrorenem Lockermaterial, kann der Gletscher in diesem Fall zusätzlich durch Deformation der unterlagernden Sedimente in die vorgegebene Eisflussrichtung gleiten (WINKLER, 2009, S. 23 ff).

Deformationsfließen versus Gletschervorstoß

Ein fließender Gletscher ist nicht unbedingt ein vorstoßender Gletscher. Das Eis eines Gletschers fließt, so lange dieser existiert. Das muss nicht bedeuten, dass das äußerste Ende eines Gletschers vorstößt. Das Gletschereis bewegt sich kontinuierlich aufgrund des Deformationsfließens vorwärts. Ein Gletschervorstoß wiederum ist abhängig vom Verhältnis zwischen Akkumulation und Ablation. Sogar bei einem Gletscherrückzug existiert ein Fließverhalten des Eises (Mc KNIGHT & HESS, 2008, S. 564).

Abbildung 2-4 veranschaulicht, dass die Gletscherfront im Rückzug ist, das Eis bewegt sich jedoch vorwärts.

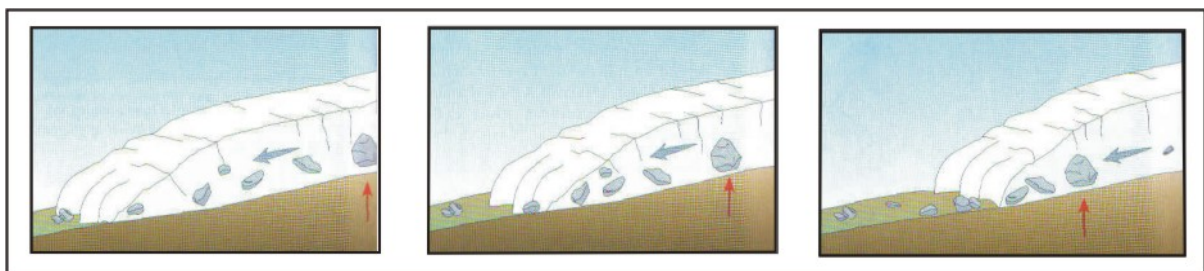


Abb. 2-4: Gletscherfließen eines Gletschers im Rückzug (verändert nach Mc KNIGHT & HESS, 2008, S. 564, Figure 19-13)

2.4 Gletscherlängenänderungen

Jährliche Akkumulation und Ablation eines Gletschers sind selten im Gleichgewicht. Folglich kommt es über das Jahr zu Nettogewinnen oder Nettoverlusten der Masse. Wenn eine negative oder positive Nettomassenbilanz über viele Jahre erhalten

bleibt, erfährt der Gletscher signifikante Massenhaushaltsänderungen. Er reagiert auf jene Änderungen mit Schwankungen, die sich in Vorstößen oder Rückzügen des Gletschers äußern. Es handelt sich um Positionsänderungen der Gletscherfront bzw. der Gletscherzunge.

Vorstoß oder Rückzug der Gletscherzunge als Reaktion auf Änderungen der Massenbilanz tritt allerdings mit Verzögerung ein, was wiederum von der Rate des Massendurchsatzes, der Gletschergeometrie und anderen Faktoren abhängt (BENN & EVANS, 1998). Die Verzögerung, welche gletscherspezifisch und somit individuell ist, wird als Reaktionszeit (terminus response time) bezeichnet (WINKLER, 2009).

Die Reaktionszeit (terminus response time) ist die reale, empirisch ermittelte Verzögerung zwischen einem bedeutenden Massenbilanzimpuls und der zugehörigen Reaktion der Gletscherfront (nach JÓHANNESSON et al., 1989, OERLEMANS, 2007, aus WINKLER, 2009, S. 58).

Unterschiedliche Gletscherfrontpositionen können auf unterschiedliche Reaktionszeiten zurückzuführen sein. Diese stellen verzögerte Gletscherfrontreaktionen dar, nicht aber regionale und lokale Unterschiede in der Klimaentwicklung. Eine mächtige Debrisbedeckung des Gletschers kann die Verzögerung noch erheblich verstärken. Nach WINKLER (2009) können kurzfristige Massenänderungen an der Gletscherfrontposition träge reagierender Gletscher unbemerkt bleiben, während an benachbarten reaktionsschnellen Gletschern die Auswirkungen fast unmittelbar in Erscheinung treten.

2.5 Gletscherablagerungen

Der Gletscher nimmt Gesteinsbruchstücke aus dem Untergrund auf und schleppt diese an seiner Sohle mit. Dieses Material verformt nicht nur den Untergrund, sondern wird auch selbst bearbeitet.

Die Ablagerungen der Gletscher werden als Moränen bezeichnet. Sie bestehen aus einem schlecht sortierten Gemisch aus Ton, Schluff, Sand, Kies und Steinen. Für die

Oberflächenformen steht der Begriff „Moräne“, für das Sediment sollte der Begriff „Moränenmaterial“ verwendet werden (EHLERS, 1994).

Grundmoräne

Während des Materialtransportes wird dieses stark beansprucht, wobei eine große Menge an feinkörnigem Material entsteht. Wenn dieses Material an der Sohle des Gletschers bereits während des Druckschmelzens zur Ablagerung kommt, ist das Endprodukt eine Grundmoräne (VAN HUSEN, 1987). Durch die hohen Drucke am Gletschergrund wird das Gesteinsmaterial kräftig durchgearbeitet. Dadurch entsteht feinstes Gesteinsmehl. Die Grundmoräne ist somit eine schichtungslose, feinstoffreiche Ablagerung mit hoher Lagerungsdichte, bei der große und kleinere Komponenten ohne jegliche Ordnung nebeneinander liegen (VAN HUSEN, 1987).

End- und Lateralmoränen

An den seitlichen Gletschergrenzen befinden sich die Lateralmoränen, frontal die Endmoränen. Letztere markieren die Haltestadien der Gletscher. Da diese Ablagerungen nicht von Eis bedeckt waren, weisen sie eine wesentlich lockerere Lagerung auf als die Grundmoräne (VAN HUSEN, 1987).

Bei den Endmoränen wird zwischen „thrust moraines“ und „push moraines“ unterschieden (BENN & EVANS, 1998, S. 538, 539).

„*Thrust moraines*“ (Stauchendmoränen im engeren Sinne; *thrust* = *Aufstauchung*) entstehen ausschließlich durch glazitektonische Prozesse, im Zuge von Vorstößen der Gletscherfront. Dies erfordert wiederum an der äußeren Gletscherzunge eine kaltbasale Gletscherbasis und Permafrost im proglazialen Areal. „*Push moraines*“ (Stauchendmoränen im weitesten Sinne; *push* = *Aufpressung*) entstehen an vorstoßenden Gletscherfronten, in Arealen ohne Permafrost. Voraussetzung hier ist eine warmbasale Gletscherbasis. An der Gletscherfront kommt es durch den Druck des vorstoßenden Eises zu einer Aufpressung des ungefrorenen Lockermaterials (WINKLER, 2009, 133 ff).

Lateralmoränen sind primär mächtige Wälle an Hochgebirgsgletschern, welche die Gletscheroberfläche um mehrere Dekameter bis 150 – 200 m überragen. Sie werden als „Lateralmoränen alpinen Typs“ bezeichnet und entstehen durch den Prozess des

„*dumping*“ (passive Ablagerung) supraglazialer Debris an den lateralen Gletschergrenzen (WINKLER, 2009, S. 135).

Eiskern- und Ablationsmoränen

Eiskernmoränen besitzen einen permanenten Eiskern aus Gletschereis, welcher einen vom aktiven Gletscher abgetrennten Eiskomplex darstellt. Durch das Ausschmelzen von Debris an der Gletscheroberfläche kommt es zur Bildung von supraglazialen Moränen und „*ablation moraines*“ (WINKLER, 2009, S. 143 ff).

2.6 Klassifizierung der Gletscher

Gletscher können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Im Folgenden werden die Vergletscherungstypen nach morphologischen, dynamischen und thermalen Gesichtspunkten dargestellt. Weiters wird der Unterschied zwischen dem alpinen und asiatischen Gletschertypus erläutert.

2.6.1 Morphologische Klassifizierung der Gletscher

Nach WILHELM (1975) haben HEIM (1885) und HESS (1904) die Gletscher zunächst in einen alpinen, skandinavischen und grönländischen Vergletscherungstyp eingeteilt, wobei die Grundform einer dem Relief untergeordneten bzw. dem Relief übergeordneten Vergletscherung entspricht. Jene morphologische Klassifizierung hat FLINT (1971) in drei Hauptkategorien – *cirque glaciers* (Deckgletscher), *valley glaciers* (Talgletscher) und *ice sheets* (Inlandeismassen) - und zwei Zwischenkategorien – *piedmont glaciers* und *mountain ice sheets* - unterteilt (RITTER et al., 1995).

Dem Relief untergeordnet sind somit Gletscher, die dem Talverlauf folgen, die Talgletscher. Dem Relief übergeordnete Gletscher überragen das Relief weitgehend und bewegen sich selbstständig. Dazu zählen das Inlandeis, Eisschilde und als Sonderform die Plateaugletscher.

2.6.2 Dynamische Klassifizierung der Gletscher

Eine gebräuchliche, prozessorientierte Unterteilung ist die dynamische Klassifizierung in aktive, passive und „tote“ Gletscher. Charakteristisch für aktive Gletscher sind hohe Bewegungsraten des Eises von der Akkumulationszone bis hin zum Terminus. „Passiv“ steht für geringe Eisbewegungsraten und Toteis zeigt kein internes Fließen (RITTER et al., 1995).

2.6.3 Thermische Klassifizierung der Gletscher

WILHELM (1975) beschreibt in seinem Buch eine weitere Unterteilung, nach völlig anderen Gesichtspunkten. Es ist dies die thermische Klassifizierung von Gletschern nach AHLMANN (1935). Er gliedert in temperierte, hochpolare und subpolare Gletscher.

Grundlage für die thermische Klassifizierung sind die thermalen Verhältnisse an der Gletscherbasis.

Temperierte Gletscher (warmbasal)

Die Temperaturen an der Basis jener Gletscher befinden sich ganzjährig um den Druckschmelzpunkt (0°C). Dadurch wird basales Gleiten möglich.

Hochpolare Gletscher (kaltbasal)

Hochpolare Gletscher sind am Bett festgefroren. Die Temperaturen befinden sich unterhalb des Druckschmelzpunktes und es kommt ganzjährig zu keinem Abfluss (WILHELM, 1975). Die Bewegung erfolgt nur durch interne Verformung des Eises, das basale Gleiten entfällt.

Subpolare Gletscher (polythermal)

Polythermale Gletscher haben sowohl warm- als auch kaltbasale Teile. Das Eis im Akkumulationsgebiet ist meist warm, die Basis warmbasal. Im niedriger gelegenen Ablationsgebiet herrscht kaltes Eis vor, die Basis ist kaltbasal. Aufgrund dieser Temperaturverteilung und folglich Behinderung des Massentransfers, besteht vermutlich vor allem hier die Gefahr von *glacier surges* (Kapitel 3.2).

2.6.4 Alpiner versus asiatischer Gletschertypus

Da der Fokus der Arbeit vor allem auf Gletschern und Gletscherseen im Raum Zentralasiens liegt, sollen an dieser Stelle die reliefbedingten Unterschiede der Gletscherformen in den Alpen und den asiatischen Hochgebirgen beschrieben werden. Die Literatur ist der Diplomarbeit von MEYER (2001, S. 19 – 25) entnommen.

Bei dem alpidischen Gletschertypus handelt es sich um Firnmuldengletscher. Aufgrund der Ruhephasen und der Bildung von Paläoflächen im Zuge der tektonischen Hebung des alpidischen Orogens, sind jene Verflachungszonen heute als Firnbecken das Nährgebiet der Gletscher.

Im Gegensatz dazu ist das junge Himalayagebirge aufgrund der relativ raschen Hebung durch ein ausgeprägtes, steiles Relief, durch tiefe Zertalung und das Fehlen von großen Firnsammelbecken charakterisiert. Die Gletscher werden vor allem durch Lawinen aus steilen Fels- und Firnwänden genährt. Dem alpinen Firnmuldengletscher steht der asiatische Firnkesselgletscher gegenüber. Weitere Charakteristika der asiatischen Gletscher sind die mächtigen Obermoränen, welche in Form von Schutt aus den steilen Karwänden geliefert werden, sowie die beachtlichen Kare, die im Himalaya besonders tief eingeschnitten sind.

Eine entscheidende Rolle für das Verhalten der Gletscher spielt der Monsun, welcher im Frontbereich des Himalayagebirges das Klima steuert. In Monsungebieten regelt die Massenbilanz des Sommers den Gletscherhaushalt. In diesem Fall wird von einem „Sommer Akkumulations Typ“ gesprochen (BENN & EVANS, 1998). Den feuchten Sommern mit ausgeprägten Niederschlagsmaxima stehen kalte und trockene Winter gegenüber. Sowohl Akkumulation, als auch Ablation treten mehr oder weniger gleichzeitig während des Sommers auf.

3 Gletschergefahren

Gletscher spielen eine bedeutende Rolle als Wasserspeicher im Wasserhaushalt, sowie für den Tourismus. Jedoch bringen Gletscher in Hochgebirgsregionen

zahlreiche Gefahren mit sich. Sowohl das Gefahren- als auch das Risikopotential ist enorm hoch. Neben Längenänderungen und Eisabstürzen zählen Ausbrüche glazialer Hochgebirgsseen zu den massivsten Bedrohungen für die darunter gelegenen Täler. Jene direkten Gefahren, die Gletscher bergen, können durch andere Naturgefahren, wie Erdbeben oder Bergstürze, ausgelöst werden. Sie können auch im kombinierten Sinne Rückkoppelungsmechanismen hervorbringen (Abb. 3-1).

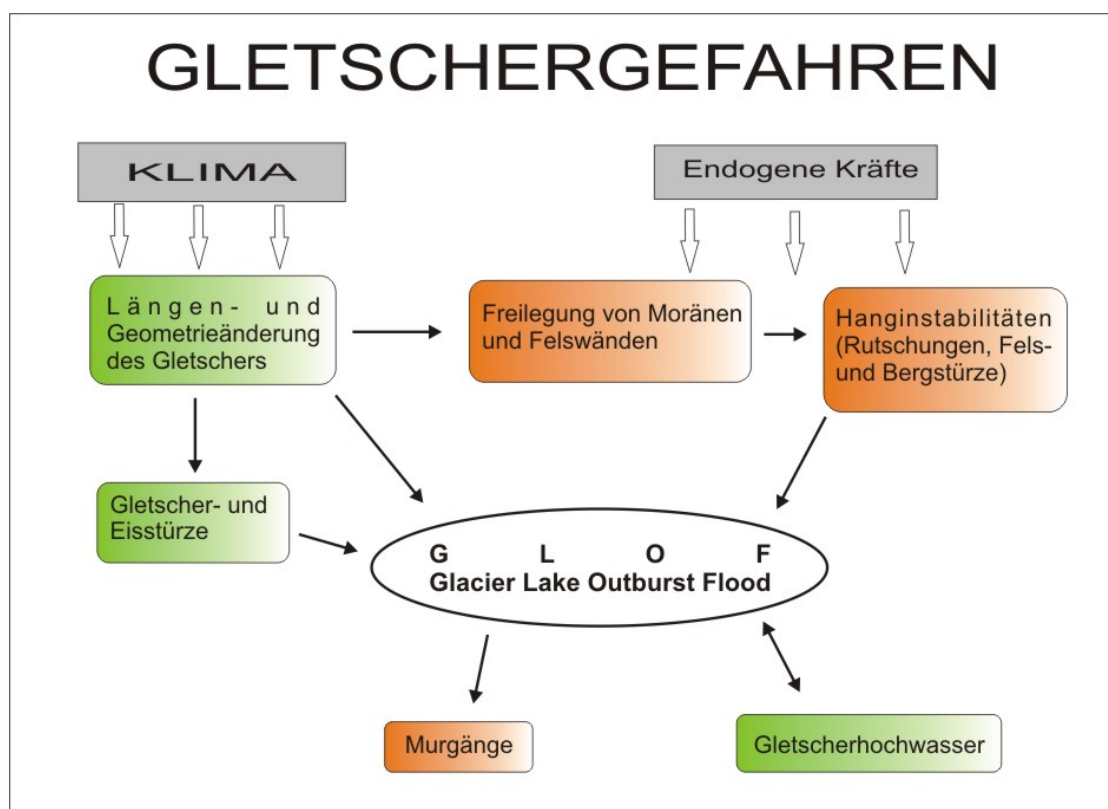


Abb. 3-1: Gletschergefahren

Die in Abbildung 3-1 beschriebenen Gletschergefahren können auf direktem Weg oder durch Prozesskombination GLOFs – Glacier Lake Outburst Floods – auslösen (siehe Kapitel 3.4).

3.1 Längenänderungen

Gletschervorstöße und Gletscherrückzüge können als direkte Gefahren eine schädigende Wirkung auf Bauwerke im Bereich des Gletscherrandes haben. Sie bilden jedoch auch die wichtigste Ursache für Eisabstürze und Gletscherhochwasser.

Große Katastrophen haben sich während Vorstoßphasen ereignet, wobei dem Begriff „glacier surges“ eine wesentliche Rolle zukommt. Es handelt sich um zeitlich begrenzte, extreme Steigerungen der Eisgeschwindigkeit (WINKLER, 2009). Da sie eine Sonderstellung bei den Gletscherlängenänderungen einnehmen, werden sie als Gletschergefahren in einem eigenen Kapitel behandelt (siehe Kapitel 3.2).

Zur Zeit befinden wir uns in einem klimatischen Optimum und die Gletscher ziehen sich weltweit mehrheitlich zurück. Es wird davon ausgegangen, dass eine Erwärmung bis 2100 sicher stattfinden wird, am wahrscheinlichsten um etwa 3°C (BÖHM, 2007).

Durch Gletscherrückzug werden Sedimentbette der Gletscher freigelegt und das Material kann im Zuge eines Gletscherhochwassers als verheerender Murgang abtransportiert werden. Des Weiteren werden bei einem Gletscherrückzug Moränen und Felswände freigelegt. Dies wiederum bietet die Voraussetzung für Hanginstabilitäten, wie Rutschungen, Fels- und Bergstürze. Durch den Rückzug der Gletscherzunge über eine Steilstufe kann es zu gefährlichen Eisabstürzen kommen (z.B. Rhonegletscher, 1941) (www.glaciology.ethz.ch).

Gletscherveränderungen können anhand von Messreihen oder rein visuell beurteilt werden. Die Zunge eines vorstoßenden Gletschers weist ein konvexes, parabelförmiges Längsprofil auf. Beim Gletscherrückzug zerfällt diese, und es sammelt sich Schutt (Debris) auf der Gletscheroberfläche an. Jene debrisbedeckten Zungenteile können als Toteis vom Gletscher abgetrennt werden (www.glaciology.ethz.ch).

3.2 Glacier Surges

Eine bedeutende Rolle sowohl als direkte, als auch indirekte Gletschergefahr kommt den „glacier surges“ zu.

Ein surge ist ein sehr rasanter Vorstoß eines Gletschers, welcher Monate bis einige Jahre dauern kann. Er steht nicht in Verbindung mit Änderungen der Massenbilanz (HOOKE, 1998). Die Fließgeschwindigkeit des Eises kann während eines surges um

das Zehn- bis Hundertfache des normalen Wertes ansteigen (EHLERS, 1994). Glacier surges zeigen ein periodisches Auftreten. Die Zeitdauer zwischen den einzelnen surges ist von Gletscher zu Gletscher verschieden und kann zwischen 10 und 100 Jahren liegen (WINKLER, 2009). Die Ruhephasen dauern erheblich länger als die surge-Phasen selbst.

Der Beginn eines glacier surges wird durch eine Zunahme der Eismächtigkeit und einer Verdickung der oberen Gletscherbereiche angekündigt. Unmittelbar vor dem surge sind eine Veränderung der Oberflächenstruktur des Gletschers, sowie die Zunahme der Gletscherspalten erkennbar (WINKLER, 2009).

Surging glaciers erfahren charakteristische Änderungen in ihrer Morphologie und ihrem Verhalten während eines Surgezyklus (nach BENN & EVANS, 1998):

- I. Die Phase der schnellen Bewegung wird als „Surge- oder aktive Phase“ bezeichnet. Während dieser Phase wird das Eis sehr schnell von den oberen Bereichen des Gletschers (Reservoirbereich) hinunter zur Gletscherzunge befördert. Die Surgephase endet mit einem rapiden, dramatischen Vorstoß der Gletscherfront, was wiederum, zusammen mit der Ausdünnung des oberen Reservoirs, eine Reduktion des gesamten Gletschergradienten bewirkt.
- II. Die Periode des langsamen Fließens zwischen den surges ist die „Ruhephase“. Während der Ruhephase wird Eis in der Reservoirzone gebildet, die Gletscherzunge stagniert und wird in situ abgetragen.
- III. Aufgrund der Massenzunahme in den oberen Bereichen des Gletschers und des Massenverlustes nahe der Gletscherzunge, kommt es zu einer Steigerung des gesamten Gletschergradienten, was sich fortsetzt, bis der nächste Surgezyklus wieder einsetzt.

Die exakten Ursachen eines glacier surges sind teilweise unklar. WINKLER (2009) stellt zwei Theorien gegenüber, wobei in beiden Theorien dem Massenungleichgewicht in Akkumulations- und Ablationsgebiet und dem Schmelzwasser die entscheidenden Rollen zukommen:

„Der kontinuierliche Massentransfer durch laminaren Eisfluss wird bei surging glaciers während der Ruhephasen höchstwahrscheinlich behindert. Die tatsächliche Eisgeschwindigkeit liegt unterhalb der theoretisch notwendigen Bilanzgeschwindigkeit, sodass sich das Ungleichgewicht sukzessive immer weiter verstärkt. Parallel erhöht sich der Oberflächengradient der Eisoberfläche. Als Folge steigen Schubkraft und Druck an der Gletscherbasis. Dies kann dazu führen, dass die subglazialen Schmelzwasserkanäle zusammengepresst werden oder gänzlich verschwinden. Die Schmelzwasserdrainage an der Gletscherbasis wird dann aufgestaut. Oberhalb einer unbekannten Schwelle fließt nun das Wasser nicht mehr in den verbliebenen Kanälen ab, sondern flächenhaft. So wird schlagartig die Friktion verringert, ein schnelles basales Gleiten ist die unmittelbare Konsequenz.“ (WINKLER, 2009, S. 28).

Alternativ dazu existiert die Vorstellung, dass eine gesteigerte Deformation subglazialer Sedimente für einen surge verantwortlich sei. Voraussetzung für den Anstieg des Druckes auf das Gletscherbett ist hier ebenfalls ein Massenungleichgewicht, sowie ein erhöhter Oberflächengradient. Durch das Schließen der subglazialen Schmelzwasserkanäle, versickert das Schmelzwasser verstärkt in den subglazialen Lockersedimenten, woraufhin diese im wassergesättigten Zustand leicht deformierbar sind.

Dies erklärt das konzentrierte Auftreten von surging glaciers in subpolaren Regionen. Viele Gletscher in diesen Regionen sind polythermal, was den Massentransfer und den Abfluss von Schmelzwasser erschwert.

Polare Gletscher, welche überall an ihrem Grund gefroren sind, wurden noch nie als surging glaciers verzeichnet. Es gibt außerdem Anzeichen, dass surging glaciers und „nicht-surging-glaciers“, die innerhalb einer Region vorkommen, deutlich unterschiedliche Geometrien aufweisen (BENN & EVANS, 1998).

In den Gletscherregionen der Erde sind surging glaciers nicht überall gleichmäßig verteilt. Jedoch besteht die Tendenz der Anhäufung in bestimmten Gebieten. Surging

glaciers kommen vor allem in folgenden Regionen der Erde vor (BENN & EVANS, 1998, S. 170):

Im NW Nord-Amerikas: Alaska, Yukon, British Columbia

Nordatlantikregion: Svalbard, Island

Westasien: Pamir

Des Weiteren kommen surging glaciers in Grönland, auf Ellesmere Island und Axel Heiberg Island (Arctic Canada), sowie im Kaukasus, Tien Shan, im Karakorum und den Anden vor.

3.3 Eisstürze

Große Eisstürze ($> 1 \text{ Mio. m}^3$) ereignen sich ausschließlich bei steilem Gelände (50% oder mehr). Große Gefahr besteht bei der Bildung von Eislawinen, wenn das Schadenspotential innerhalb des Prozessraumes liegt (www.glaciology.ethz.ch).

Eislawinen können dramatische Folgen in Kombination mit anderen Gefahrenarten haben. Das Risiko für größere Eisabbrüche wird durch die Interaktion mit seismischer Aktivität oder geothermalen Wärmeflüssen erhöht (FLUBACHER, 2007).

3.4 Gletscherhochwasser und GLOFs

Die größte Gletschergefahr für den Menschen geht nicht vom Eis des Gletschers selbst aus, sondern von seinem Schmelzwasser (WINKLER, 2009). Die Gefahr eines Ausbruches von Gletscherseen zählt in Hochgebirgsregionen, wie Bhutan und Kirgisien, zu den schlimmsten Bedrohungen für die darunter liegenden Täler.

Bei einem Ausbruch solcher Seen, werden innerhalb kurzer Zeit Millionen m^3 an Schmelzwasser freigesetzt, wobei wasserreiche Muren entstehen, die international als GLOFs – Glacier Lake Outburst Floods – bezeichnet werden. Durch die Aufnahme von Schlamm und Geröll handelt es sich um hochturbulente „debris flows“ mit hohen Geschwindigkeiten, welche die Täler bis zu 100 km stromabwärts verwüsten können (HANISCH, 2000).

Die Abkürzung GLOFs steht für Glacier Lake Outburst Floods, also Fluten, die durch den Ausbruch von Gletscherseen entstehen, welche hinter natürlichen Dämmen innerhalb, auf, oder am Rande von Gletschern aufgestaut werden (nach HORSTMANN, 2004, S. 2)

Die Bezeichnung GLOF wandelt sich von dem ursprünglich isländischen Ausdruck „jökulhlaup“ (wörtlich: „Gletscherlauf“) ab, welcher für katastrophale Schmelzwasserausbrüche als Resultat von subglazialen Vulkanausbrüchen steht (HAMBREY, ALEAN, 2004).

4 GLOFs – Glacier Lake Outburst Floods

4.1 Entstehung von Gletscherseen

Gletscherseen können auf unterschiedliche Weise entstehen und ausbrechen. Abbildung 4-1 gibt einen Überblick über verschiedene Kategorien von Gletscherseen.

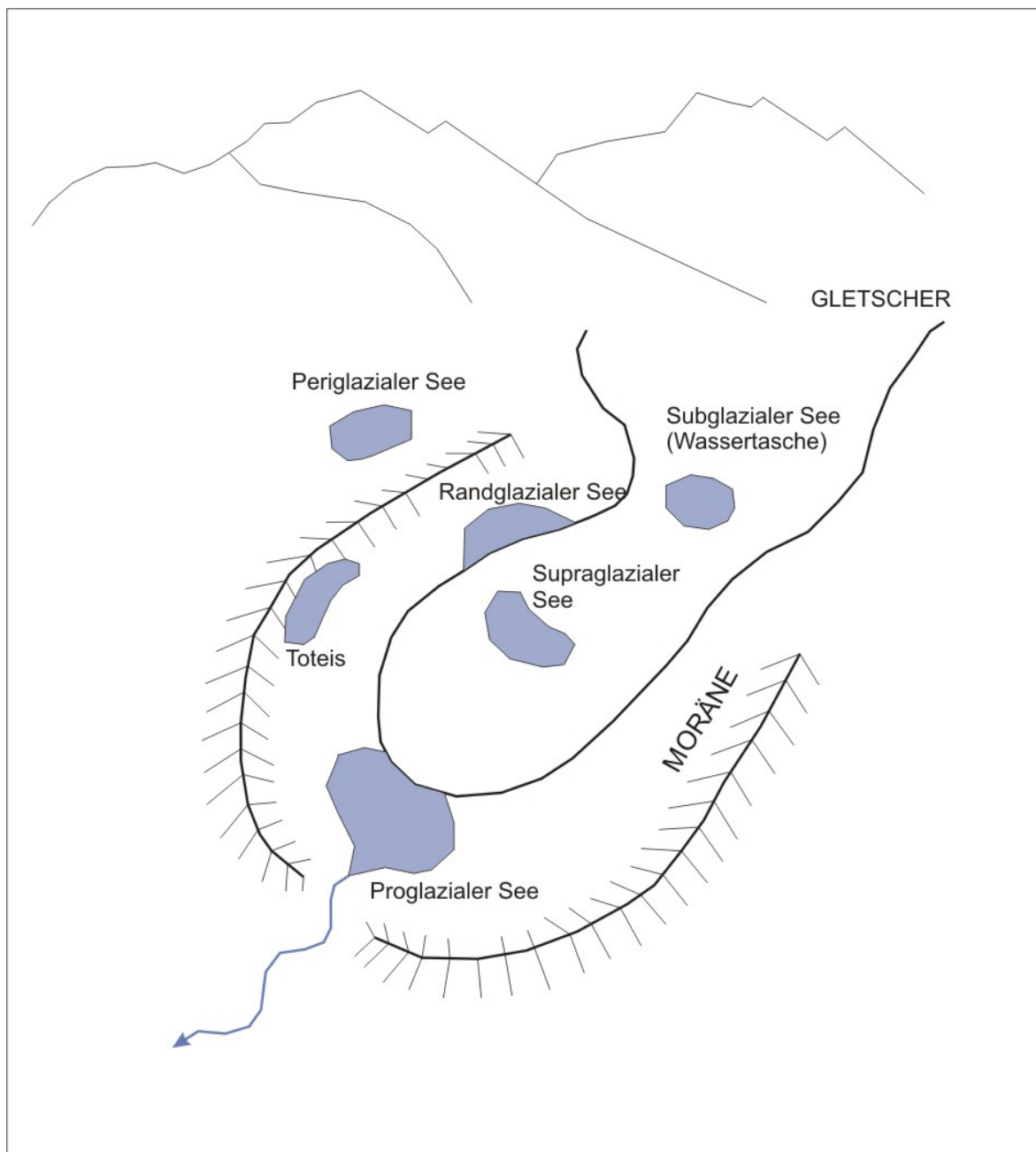


Abb. 4-1: Glaziale Wasserreservoirs (verändert nach www.glaciology.ethz.ch).

Arten von Gletscherseen:

- Proglaziale Moränenseen (gestaut durch eine Stirnmoräne)
- Supraglaziale Seen (in einer Depression auf der Gletscheroberfläche)
- Randglaziale Seen (vom Gletschereis gestaut)
- Periglaziale Seen (gestaut durch Toteis oder Permafrosteis)

Neben den Gletscherseen gibt es als glaziales Wasserreservoir die subglazialen Seen, auch Wassertaschen genannt. Im Unterschied zu Gletscherseen handelt es sich um größere Wasseransammlungen innerhalb des Gletschers, welche der visuellen Beobachtung entzogen sind.

Abbildung 4-2 zeigt die schematische Rekonstruktion der Bildung eines Gletschersees von einem moränengedämmten Gletscher, nach HÄUSLER (2002):

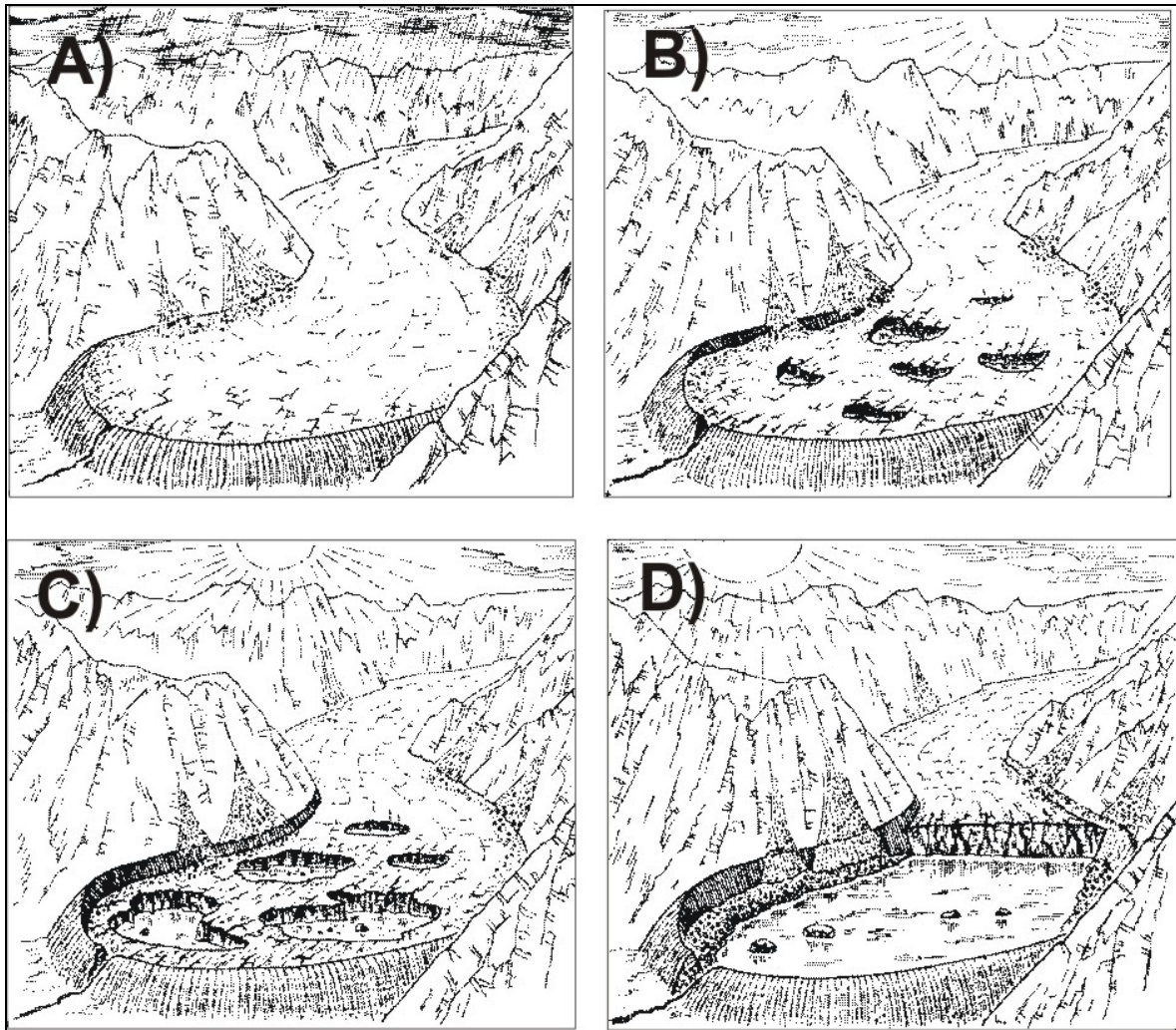


Abb. 4-2: Stadien der Bildung eines Gletschersees von einem moränengedämmten Gletscher (nach HÄUSLER, 2002).

- A.** Zunächst kommt es zu einem Abschmelzen des moränengedämmten Gletschers in der Ablationszone.
- B.** Anschließend bilden sich wenige, flache Seen.
- C.** Weiters werden immer mehr größere, tiefere supraglaziale Seen gebildet.
- D.** Schlussendlich entsteht ein proglazialer Gletschersee, welcher, beeinflusst von verschiedenen Faktoren und Parametern, jederzeit ausbrechen und verheerende Folgen mit sich bringen kann.

Das größte Ausbruchspotential besteht, wenn nach Erreichen des Stadiums D der Gletscher bis in eine hängende Position abschmilzt, es zu Eisstürzen oder

Hanginstabilitäten kommt, und jene Triggereffekte eine Flutwelle in dem Gletschersee erzeugen (HÄUSLER, 2002).

4.2 Ursachen für GLOFs

Der Ausbruch eines Gletschersees kann durch Eis- oder Steinlawinen, das Brechen des Moränendammes aufgrund des Abschmelzens von eingelagertem Eis, durch Erdbeben, dem plötzlichen Zufluss von Wasser in den See und viele weitere Mechanismen ausgelöst werden. Die Ausbruchsmechanismen variieren entsprechend der morphologischen Lage der Seen. Da Gletscher starke Reaktionen aufweisen, sind GLOFs eng mit Klimaänderungen verknüpft.

Nach HÄUSLER (2002) sind vier verschiedene Möglichkeiten bekannt, wie es in einem vergletscherten Gebiet plötzlich zu einer raschen Entleerung eines natürlich gedämmten Sees kommen kann:

- Bruch einer Endmoräne, die während des Abschmelzens eines Gletschers einen See aufstaut (moraine-dammed-lake)
- Ausbruch eines durch Gletschereis abgedämmten Sees (ice-dammed-lake)
- Ausbruch eines Randsees (marginal lake)
- Ausbruch einer Wassertasche im Untergrund eines Gletschers (sub-glacial-lake)

Eisgestaute Seen entleeren sich meist durch progressive Erweiterung von subglazialen Kanälen, seltener durch mechanischen Bruch von Eistrümmerdämmen.

Moränendämme hingegen werden bei hohem Wasserstand und Überfließen durch eine Kombination von rückschreitender Erosion, Piping und Böschungsinstabilität erodiert (HAEBERLI, 1993). GLOFs entstehen meist bei der Erosion von Moränendämmen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Wasser- und Schuttmengen können sie verheerende Ausmaße annehmen. Die Entleerung moränengedämmter Seen erfolgt generell durch den rapiden Einschnitt des ausströmenden Wassers in die Sedimentbarriere (Abb. 4-3). Ist dies erst einmal erfolgt, kann der Wasserfluss durch den Auslass die Erosion beschleunigen und den

Auslass selbst erweitern (BENN & EVANS, 1998). Dies wiederum resultiert in einer rasanten Abgabe großer Mengen von Sedimentbeladenem Wasser, den sogenannten „debris-flows“. Auslösende Hintergrundmechanismen können Wellen sein, die durch Gletscherkalbung oder Eislawinen hervorgerufen werden, oder der Anstieg des Wasserspiegels aufgrund eines Gletschervorstoßes (BENN & EVANS, 1998).

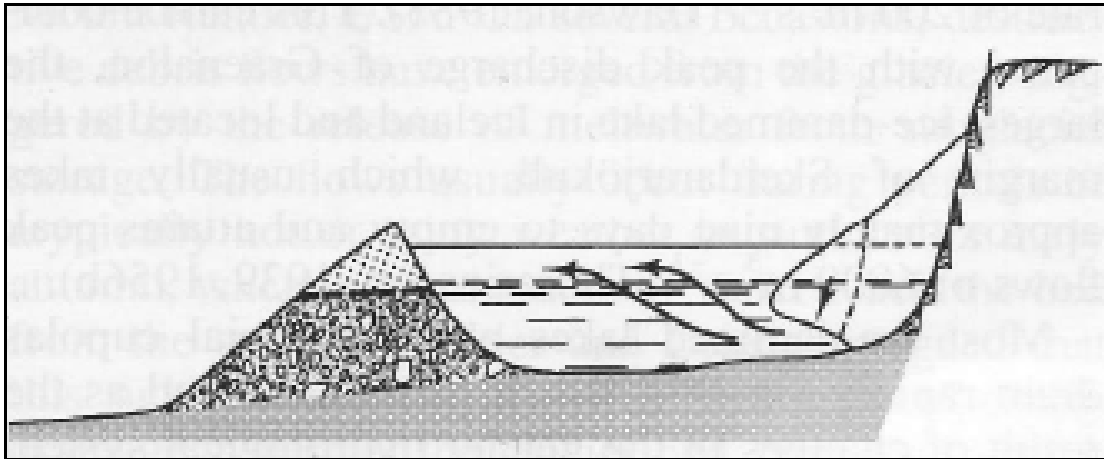


Abb. 4-3: Dambruchmechanismen eines moränengedämmten Sees (verändert nach LLIBOUTRY et al., 1977, aus BENN & EVANS, 1998).

4.3 Internationale Beispiele von GLOFs

GLOFs findet man global verbreitet auf allen Kontinenten mit Gletschern und Vergletscherungen. Auf den folgenden beiden Abbildungen soll die globale Verbreitung von Gletschern (Abb. 4-4) und Gletscherseen (Abb. 4-5) dieser Erde im Überblick veranschaulicht werden.

Des Weiteren werden in Tabelle 4-1 ausgewählte internationale Beispiele von Gletscherseeausbrüchen moränengedämmter, eisgedämmter, randglazialer und subglazialer Seen versehen mit dem entsprechenden Literaturnachweis, dargestellt

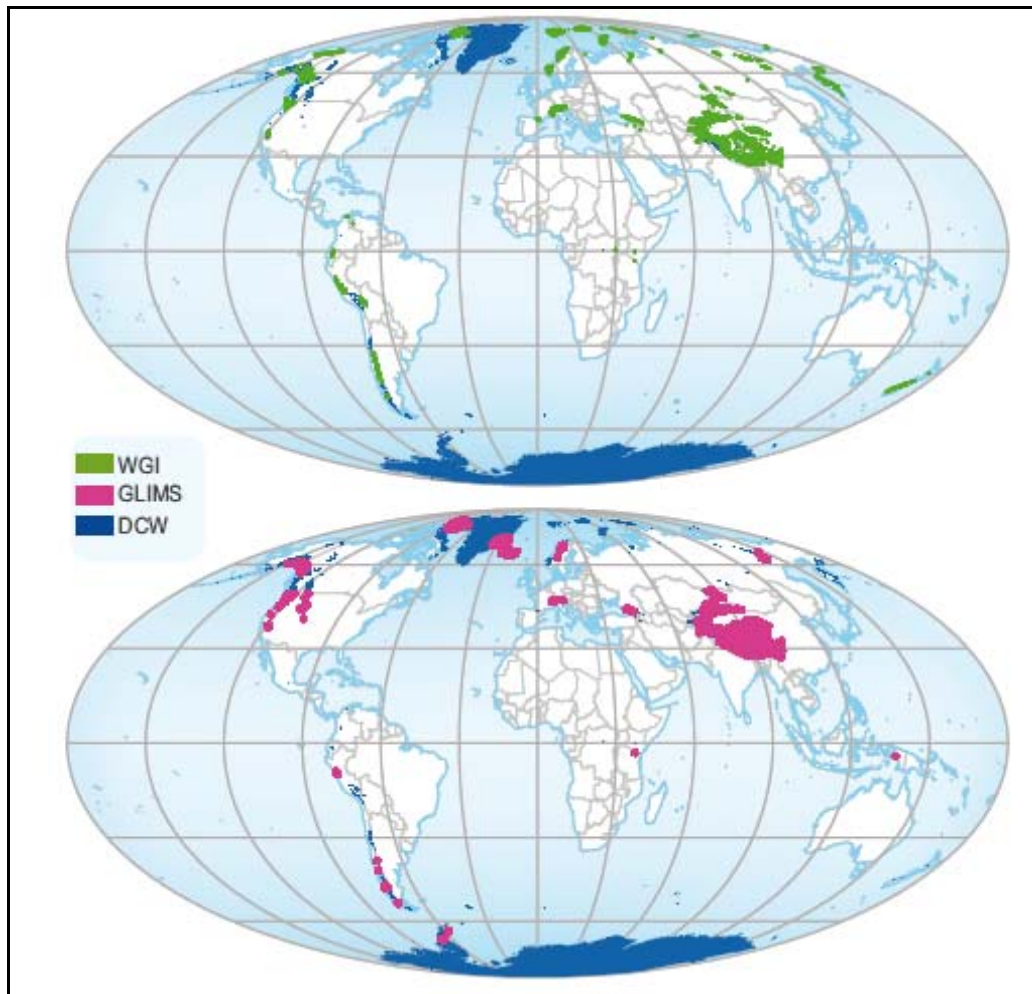


Abb. 4-4: Globales Gletscherinventar. Daten von WGI, GLIMS, DCW (Quelle: www.grid.unep.ch)

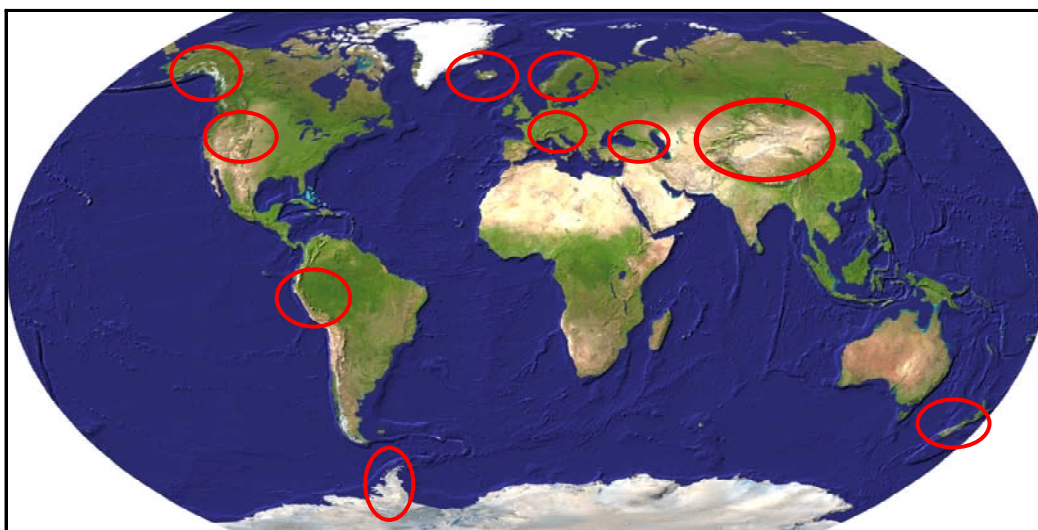


Abb. 4-5: Globale Verbreitung von Gletscherseen (Quelle Weltkarte: www.tonko.info)

Gletschersee	Klassifizierung	Region	Datum des Ausbruches	Literaturnachweis
Tarina I Lake	M	Bhutan	1956	NORBU (1999)
Nostetuko Lake	M	Canada (BC)	1983	BENN & EVANS (1998)
Dig Tsho	M	Nepal (Dudh Koshi river basin)	04. Aug 85	nach YAMADA (1998), aus RANA et al. (2000)
Chubung	M	Nepal (Tama Koshi river basin)	12. Jul 91	nach YAMADA (1998), aus RANA et al. (2000)
Sirwolte Lake	M	Schweiz	1993	HUGGEL et al. (2002)
Luggye Tsho	M	Bhutan	07. Okt 94	NORBU (1999)
Tam Pokhari	M	Nepal (Khumbu Gebiet)	Sep 98	HANISCH (2000)
Sabai Tsho	M	Nepal (Dudh Koshi river basin)	03. Sep 98	nach YAMADA (1998), aus RANA et al. (2000)
Missoula	I	USA (Montana)	Pleistozän	nach BAKER and COSTA (1997), aus HERGET (2005)
Nedre Glåmsjø	I	Norwegen	Pleistozän	nach BERTHLING and SOLLID (1999), aus HERGET (2005)
Kjölur	I	Island	9500 yr B.P.	nach TÓMASSON (2002), aus HERGET (2005)
Lake Alsek	I	Canada	ca. 1850	nach CLAGUE and EVANS (1994), aus HERGET (2005)
Chong Kumdan (Shyo)	I	Indien	1929	nach HEWITT (1982), aus HERGET (2005)
Graenalon	I	Island	1935, 1939	nach THORARINSSON (1939), aus HERGET (2005)
Lake George	I	USA (Alaska)	1958, 1959, 1960, 1961,	nach FAHNENSTOCK and BRADLEY (1973), aus HERGET (2005)
Van Cleve Lake	I	USA (Alaska)	1965	nach WALDER and COSTA (1996), aus HERGET (2005)
Laguna Parón	R	Peru (Cordillera Blanca)	1951	HAMBREY & ALEAN (2004)
Lake Russell	R	Alaska (Hubbard Glacier)	1986	U.S. Geological Survey
Grimsvötn	S	Island	~Alle 6 Jahre (Lahar)	BENN & EVANS (1998)

Tab. 4-1: Internationale Beispiele für GLOFs von moränengedämmten (M), eisgedämmten (I), randglazialen (R) und subglazialen Seen.

Bei Gletscherseeausbrüchen handelt es sich um kein neues Phänomen, jedoch hat sich mit dem weltweiten Rückzug der Gletscher und den steigenden Temperaturen die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens in vielen Gebirgsregionen erhöht.

4.4 GLOF und Global Change

Der weltweite Rückgang von Gebirgsgletschern, der seit Mitte des 19. Jahrhunderts zu beobachten ist, stellt eines der sichersten Anzeichen für den globalen Klimawandel dar. Gebirgsgletscher gelten deshalb als Schlüsselindikatoren für Klimaänderungen und dienen als eine Art „globales Fieberthermometer“. Alleine die Alpengletscher haben bis in die 1970er Jahre etwa ein Drittel ihrer Fläche und die Hälfte ihrer Masse eingebüßt (BÖHM, R. et al., 2007).

Abbildung 4-6 zeigt den Schwund des Triftgletschers (Schweiz) innerhalb nur eines Jahres. Die Folge des Rückzuges ist die Bildung eines proglazialen Sees.



Abb. 4-6: Rückzug des Triftgletschers (Schweiz) und Bildung eines proglazialen Sees (Quelle: www.swissedu.ch).

Auf die Gletscher des Himalaya-Gebirgszuges hat der Klimawandel unterschiedliche Auswirkungen. Im Gegensatz zu den Gletschern der Alpen, weisen die Gletscher in den Hochgebirgsregionen des Himalaya-Hauptkammes beträchtliche Längen von mehreren Zehner-Kilometern auf.

Studien belegen, dass sich die meisten Talgletscher im Stadium des Rückzuges befinden (Abb. 4-7). Vertikaländerungen bis zu 100 m konnten während der letzten 50 Jahre dokumentiert werden, mit Rückzugsraten von 50 m pro Jahr. Belege zeigen, dass Gletscher in rezenter Zeit viel schneller schmelzen. Wenn sich dieser aktuelle Trend fortsetzt, werden die meisten kleineren Gletscher bis zum Jahr 2050 verschwunden sein. Durch den Rückzug der Gletscher werden Gletscherseen geformt. Viele von Ihnen sind in der Himalaya-Region in Höhen von über 4500 m verzeichnet. Durch den Anstieg der Wassermenge in diesen Seen kommt es zwangsläufig zu einer unvorhergesehenen Entleerung der Seen und GLOFs sind die katastrophale Folge (ICIMOD, 2008).

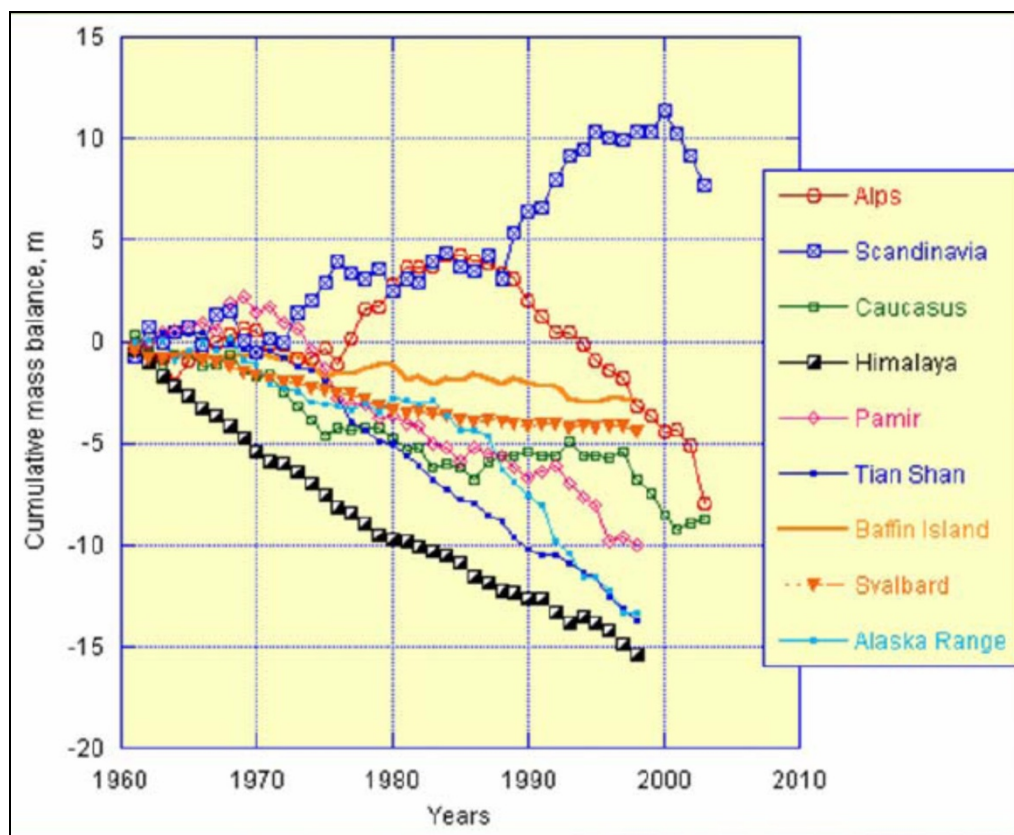


Abb. 4-7: Einfluss des Klimawandels auf die Kryosphäre (verändert nach DYURGEROV, M.B. & MEIER, M.F., 2005)

Gegenüber dem globalen Trend sind Ende des 20. Jahrhunderts in einigen maritimen Gebirgsregionen der Erde Gletscher infolge eines Eismassenwachstums vorgestoßen (WINKLER, 2009). In den maritimen Gletscherregionen Westnorwegens und den Southern Alps (Neuseeland) konnten Parallelen in Bezug auf die Massenbilanzen des Jostedalsbre (Plateaugletscher, Norwegen) und des Franz-Josephs-Gletschers (Neuseeland) gezogen werden (WINKLER, 2003).

Die Gletscher reagieren sehr sensibel auf Veränderungen des Niederschlags. Vor dem Hintergrund einer prognostizierten globalen Erderwärmung kann hier die Aussage gemacht werden, dass in einem solchen Szenario ein Gletschermassenwachstum die logische Folge für diese maritimen Gletscherregionen darstellen würde. Dies kann durch auftretende Verstärkung der zyklonalen Aktivität und zonalen Zirkulation in der Westwindzone der nord- und südhemisphärischen Mittelbreiten begründet werden. Dadurch werden die Niederschläge ansteigen und die Gletscher können durch gesteigerte, vor allem winterliche Akkumulation, an Masse gewinnen, wobei auch in den resultierenden kühlen, feuchten Sommern die Ablation herabgesetzt wird (WINKLER, 2003).

5 Diskurs über Naturgefahren

Naturereignisse, wie Rutschungen, Lawinen, debris flows oder GLOFs bedrohen immer wieder die Sicherheit von Menschen und Gütern in Hochgebirgsregionen. Solche Ereignisse können innerhalb von sehr kurzer Zeit zu erheblichen Schäden führen oder das Auftreten anderer Prozesse nachhaltig beeinflussen.

GLOFs sind kein neues Naturphänomen, jedoch hat sich die Häufigkeit des Auftretens von GLOFs in Hochgebirgsregionen aufgrund der globalen Erwärmung drastisch erhöht. Des Weiteren hat die Tatsache, dass Naturgefahren die menschliche Nutzwelt heute mit größerem Impact erfassen, zum Teil anthropogene Gründe. Zunehmendes Bevölkerungswachstum führt zu expandierender Landnutzung, weshalb sich die Bevölkerung vermehrt an Stellen angesiedelt hat, an denen auch die Gefährdung durch Naturgewalten sehr hoch ist (BOLLINGER, 1993).

Basis für den strukturierten Umgang mit Naturgefahren und –risiken sind sorgfältige Analysen, Beurteilungen und die regelmäßige Überwachung und Aktualisierung der Daten.

Die folgenden Kapitel sind ein erster Versuch einer quantitativen Gefahrenbeurteilung am Beispiel des Luggye-Gletschersees, der nach seinem letzten Ausbruch, am 7. Oktober 1994 in Nordwest-Bhutan zahlreiche Schäden verursacht hat (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, LEBER et al., 2002, MOOL, 2001, etc.). Die Beurteilung beruht auf Daten, welche nach intensiver Literaturrecherche aus verschiedenen Quellen, wie technical reports, entnommen wurden. Auf die Quellen wird in den einzelnen Kapiteln noch im Speziellen eingegangen. Da die letzte Expedition des austro-bhutanesischen Spezialistentams in die Gletscherregion Ost-Lunanas im Jahre 2002/2003 stattgefunden hat und somit die Datensätze nicht mehr den aktuellsten Stand haben, ist eine weitere Expedition in naher Zukunft von dringender Notwendigkeit, um neue Messungen vor Ort durchzuführen, die gewonnenen Daten zu verarbeiten und in die Gefahrenbeurteilung mit einzubeziehen.

5.1 Risikoanalyse versus Gefahrenanalyse (*Begriffsdefinitionen nach Kienholz, 1998, Hollenstein, 1997, Borter, 1999, aus KÖNIGSEDER, 2006*)

Im Folgenden wird der Unterschied zwischen Risiko und Gefahr näher erläutert, um auch an dieser Stelle noch einmal hervorzuheben, dass es sich bei dieser Arbeit um eine Gefahrenbeurteilung handelt, welche ein wichtiges Glied der Gefahrenanalyse einer Risikoanalyse darstellt und die das mögliche Schadenpotential außer Acht lässt. Die Begriffsdefinitionen stammen aus der Diplomarbeit von KÖNIGSEDER, 2006, welche von der „Terminologie des Risikomanagements – Das Risikokzept bei Naturgefahren“ handelt.

Unter **Risiko** wird im engeren Sinne die Funktion der Wahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und des möglichen Schadensausmaßes (Tragweite des Schadens) verstanden. Das Risiko wird ausgedrückt als das Produkt aus Gefahr und Schadenpotential.

Unter **Gefahr** wird der Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden entstehen kann, bzw. die Möglichkeit des Eintritts eines schadensverursachenden gefährlichen Prozesses verstanden.

Die Risikoanalyse (= Risikoabschätzung) ist ein Verfahren, das dazu dient, ein Risiko hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes zu charakterisieren und zu quantifizieren (Abb. 5-1).

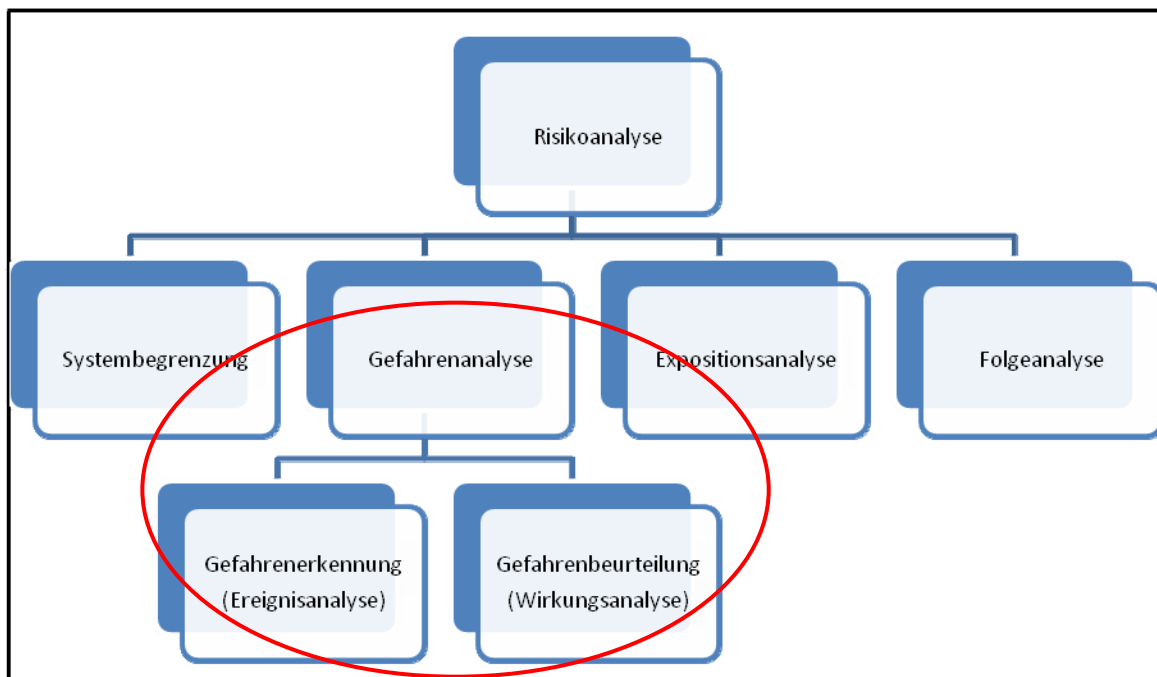


Abb. 5-1: Konzept der Risikoanalyse mit Fokus auf die Gefahrenanalyse (verändert nach KÖNIGSEDER, 2006).

Bei der **Gefahrenanalyse** (= Gefahrenabschätzung) handelt es sich um ein Verfahren, welches dazu dient, mögliche Gefahren zu identifizieren und lokalisieren, sowie Art, Ausdehnung und Grad der Gefährdung zu bestimmen (Abb. 5-1). Sie umfasst die Gefahrenerkennung (Ereignisanalyse) und Gefahrenbeurteilung (Wirkungsanalyse). Im Rahmen der Ereignisanalyse werden Gefahren identifiziert und lokalisiert. Die Wirkungsanalyse oder Gefahrenbeurteilung liefert Informationen über Art, Ausdehnung und Grad der Gefährdung. Ein wichtiger Bestandteil der Wirkungsanalyse ist die Gefahrendokumentation, in der die Analyseergebnisse in Gefahrenkarten dargestellt werden.

5.2 Arten der Gefahrenbeurteilung (verändert nach „Arten der Risikoanalyse“ von SCHAUMANN, 2007, 2009)

5.2.1 Quantitative Gefahrenbeurteilung

Eine quantitative Beurteilung erfolgt numerisch und basiert auf Entscheidungstheorien und Statistiken. Mit ihr wird versucht, Entscheidungen und Vorhersagen zu treffen. Das Problem einer quantitativen Beurteilung besteht in der Quantifizierung der einzelnen Parameter. Da die Methode der Entscheidungstheorie zu Grunde liegt, kann eine falsche Quantifizierung zu einem komplett falschen Ergebnis führen. Ein weiteres Problem liegt in der Annahme der Existenz einer Zeitstabilitätshypothese, bei der Vergangenheitswerte in die Zukunft übernommen werden, da Parameter, die in Zukunft eintreten können, quantifiziert werden müssen.

5.2.2 Semiquantitative Gefahrenbeurteilung

Semiquantitative Beurteilungen bedienen sich an Ergebnissen der Vergangenheit und vergleichen diese mit der Gegenwart. Durch Punktevergabe werden die Antworten auf die Fragestellungen quantifiziert und vergleichbar gemacht. Die Schwierigkeit besteht oft in der Darstellung der Einflussfaktoren einzelner Parameter. Auch hier ist es wichtig, die zukünftigen Veränderungen der Umwelt und die sich daraus neu entwickelnden Bedrohungen zu betrachten.

5.2.3 Qualitative Gefahrenbeurteilung

Das Hauptziel der qualitativen Beurteilungsmethode ist die Kontrolle der gegenwärtigen Gefahren, nicht aber die konkrete Voraussage von potentiellen Gefahren in naher Zukunft.

Für die in dieser Masterarbeit dargestellte Ansatzbeurteilung eines potentiell gefährdeten Gletschersees in Bhutan wurden die Aspekte einer semiquantitativen Beurteilung miteinbezogen und erstmals versucht, ein Modell für eine quantitative Gefahrenbeurteilung am Beispiel des Luggye Tsho zu erstellen, ohne dabei die wichtige Fragestellung außer Acht zu lassen, wie sich die potentielle Gefahr in Zukunft entwickeln und verändern wird.

6 Methodik zur Hazardbeurteilung ausbruchsgefährdeter Gletscherseen

Die Kriterien zur Identifizierung potentiell gefährlicher Gletscherseen basieren auf Felduntersuchungen, Zeitreihenanalysen, geomorphologischen und geotechnischen Charakteristika des Sees und seiner Umgebung, der Stabilität oder Instabilität des Dammes, der topographischen Lage und vielen weiteren Gegebenheiten (MOOL et al., 2001).

Entscheidend bei der Gefahrenbeurteilung ist allerdings nicht nur, ob ein See eine potentielle Gefahr birgt, sondern wie hoch die zukünftige Ausbruchsfahr des entsprechenden Gletschersees tatsächlich ist. Bisherige Beurteilungskriterien haben sich auf Flächenkartierungen aus Zeitreihenanalysen konzentriert. Die Änderung der Seefläche in Bezug auf die Gletscherlängenänderung spielte hierbei die tragende Rolle (z.B. AGETA et al., 1999).

Vorangegangene Arbeiten und Publikationen, welche sich mit der Beurteilung von Geohazards beschäftigen, sind unter anderem HUGGEL et al. (2004), sowie WEGMANN et al. (2004). Der Fokus liegt hier auf dem Risikokzept, welches sowohl Eintrittswahrscheinlichkeit, als auch Schadensausmaß miteinbezieht. Einen wesentlichen Beitrag zur Identifizierung und Überwachung potentiell ausbruchsgefährdeter Gletscherseen in Nord Tien Shan leisten BOLCH, et al (2009) mit dem Einsatz von Fernerkundung und GIS. Die Analyse des Gefahrenpotentials basiert hier auf der Kombination verschiedener, ausgewerteter Bestimmungsgrößen, wie Gletscherlängenänderungen und Hanganalysen.

Anstoß für die vorliegende Masterarbeit war die Idee, ein Konzept zu entwickeln, welches das Ziel anstrebt, einen beliebigen Gletschersee rein nach seinem Gefährdungspotential zu beurteilen. Dabei sollen zunächst die einfließenden Einzelparameter bestimmt und nach vorgegebenen Prinzipien durch Punktevergabe semiquantitativ bewertet werden. Im Anschluss fließen die einzelnen Parameter in eine quantitative Gesamtbeurteilung des Systems Gletschersee mit ein, welche es als resumé erlaubt, den beurteilten Gletschersee in eine Gefahrenklasse einzustufen.

Das 6. Kapitel befasst sich mit der Gefahrenerkennung und Dokumentation, sowie mit der Systembeurteilung als Ganzes. Nach der Erfassung der Einzelparameter, wird das Konzept deren Beurteilung detailliert erläutert. Die Vorhersage zukünftiger Entwicklungen aufgrund von Veränderungen der Naturfaktoren, sowie die Klärung der Frage, wie das Gesamtsystem Gletschersee quantitativ nach seiner Gefährdung beurteilt werden kann, bilden den Abschluss dieses Kapitels und die Grundlagen für Kapitel 7.

6.1 Gefahrenerkennung und Dokumentation

„Bei der Beurteilung von Naturgefahren geht es um eine objektive, naturwissenschaftlich fundierte Abklärung und Diagnose bzw. Abschätzung von möglichen gefährlichen Prozessen.“ (HEINIMANN et al., 1998, S. 39).

Daher ist es wichtig, alle wesentlichen Parameter, welche zur Gefahr des Ausbruches eines Gletschersees innerhalb eines bestimmten Systems beitragen, zunächst zu erkennen und zu dokumentieren. Die vorangehende geographische Abgrenzung des Systems ist hierzu unerlässlich.

Innerhalb des Systems Gletschersee seien dies die in den Kapiteln 6.1.1 – 6.1.6, systematisch ausgewählten Parameter.

6.1.1 Parameter I: Vorbereitende Prozesse

- Interne Kräfte (Erdbeben, Vulkane)
- Klima
- Negative Massenbilanz des Gletschers
- Schmelzen des Eises, viel Niederschlag → Anstieg des Seewasserspiegels

Bei „Parameter I“ handelt es sich um vorbereitende Prozesse, welche eine tragende Rolle bei der Bildung von Gletscherseen spielen. Der Parameter „Klima“ hat eine wesentliche Bedeutung in Bezug auf den Rückzug der Gletscher. Kommt es zu einem Schmelzen des Gletschereises oder unvorhergesehen zu viel Niederschlag,

kann das einen Anstieg des Seewasserspiegels bewirken und in weiterer Folge verantwortlich für einen GLOF sein. Das Klima steuert somit den gesamten Gletscherhaushalt, sowie das Verhalten eines Gletschers. Des Weiteren sind es interne Kräfte, wie Erdbeben, welche vor allem in stark tektonisch beanspruchten Regionen unvorhergesehen in verschiedenen Stärken auftreten und eine Flutwelle erzeugen.

6.1.2 Parameter II: Direkte Auslösemechanismen

Langsame Prozesse:

- Schmelzen des Eises einer eisgedämmten Moräne
- Hangkriechen → Blockierung des outlets

Die direkten Auslösemechanismen, welche unter „Parameter II“ zusammengefasst werden, sind jene, durch die nach einer länger andauernden Zeitspanne oder plötzlich und unvorhergesehen ein GLOF ausgelöst werden kann. Das Schmelzen von Eiskernen innerhalb des Moränendamms kann eine destabilisierende Wirkung ausüben und einen Dammbruch hervorrufen. Durch das Hangkriechen eines instabilen Moränendamms kann der outlet des Gletschersees blockiert werden. Ansteigender Seewasserspiegel und blockierter outlet können zu einem Überlaufen des Sees und somit zu einem GLOF führen.

Schnelle Prozesse („trigger-Mechanismen“):

- Brechen des Damms → Flutwelle
- Felssturz, Eissturz, Gletscherkalben
- Ausbruch eines höher gelegenen Sees

Speziell bei den schnellen Prozessen seien „trigger-Mechanismen“, wie Felsstürze oder Eisstürze hervorzuheben, die eine Flutwelle im See und wiederum folglich einen GLOF verursachen können. Der Dammbruch oder Überlauf eines höher gelegenen Sees kann Auswirkungen auf einen orographisch niedriger gelegenen See haben, was wiederum aus einer Kettenreaktion heraus einen GLOF verursachen kann.

6.1.3 Parameter III: Das Seesystem

Einfaches Seesystem:

- Moränengedämmter See
- Eisgedämmter See
- See, gedämmt durch Massenbewegung bzw. Erosionssee

Komplexes Seesystem:

- Eis- und moränengedämmter See
- Kette von Gletscherseen

Die Kategorie „Parameter III“ konzentriert sich speziell auf die Art des Seesystems. Es ist wichtig, einen Überblick zu schaffen, ob es sich um ein einfaches Seesystem oder ein komplexes System, zusammengesetzt aus mehreren Seen, handelt. Die Klassifizierung der Art des Seesystems stellt eine grundlegende Voraussetzung für die Gefahreneinstufung dar.

6.1.4 Parameter IV: Weitere grundlegende Parameter

- Größe des Gletschereinzugsgebietes
- Hinweise auf Paläo-GLOF
- See-Abfluss
- Toteiskörper in Stirnmoräne
- Allgemein vorhandene Toteiskörper
- Anwesenheit von Moränenquellen
- Debris-Bedeckung des Gletschers

Unter „Parameter IV“ sind alle weiteren wichtigen Parameter zusammengefasst, die in die Gefahrenbeurteilung mit einfließen sollen.

Dies sind die Grundbausteine für ein erstes Konzept einer Beurteilung, welches den Großteil an Parametern, die in dem System Gletschersee mitwirken, zusammenfasst und einen gemeinsamen Nenner ausgibt. Anhand der Abbildung 6-1 soll dies graphisch dargestellt werden.

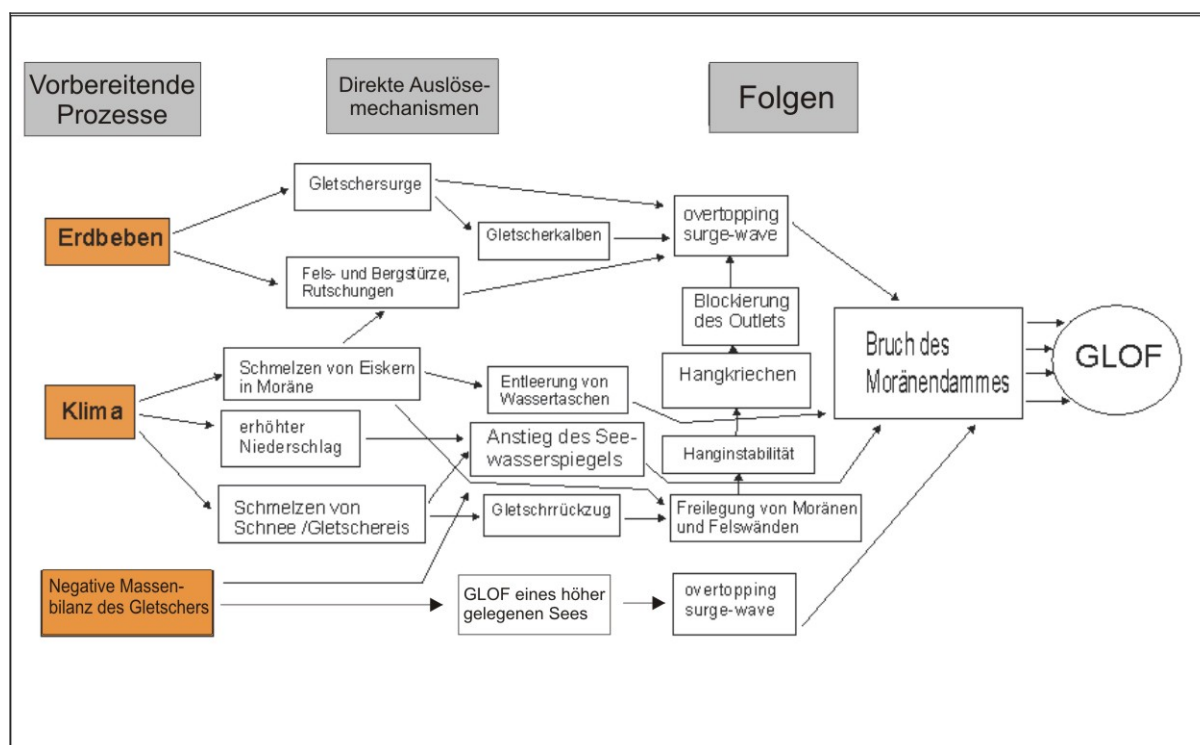


Abb. 6-1: Diagramm der Auslösemechanismen für GLOFs, zur Quantifizierung des Gefahrenpotentials.

6.2 Semiquantitative Beurteilung der Einzelparameter

„Eine sachlich richtige Gefahrenbeurteilung erfordert, dass die verschiedenen Gefahrenprozesse primär je einzeln analysiert und beurteilt werden. In Bereichen, in welchen verschiedene Prozesse wirksam sind, ist es jedoch ebenso wichtig, dass die gegenseitige Beeinflussung der Prozesse und das Gesamtsystem aller Prozesse analysiert werden.“ (HEINIMANN et al., 1998, S. 44).

Die ersten Gedanken, für ein Konzept einer quantitativen Beurteilung lagen darin, die für einen speziellen Gletschersee individuell ausgewerteten Parameter in einer Tabelle zusammenzufassen und für jeden einzelnen Parameter, auf semiquantitativer Ebene, eine Anzahl an Punkten zwischen 0 und 6 zu vergeben, wobei 0 für „keine Gefahr“ und 6 für „sehr große Gefahr“ steht. Mit Hilfe eines Gefahrenbalkens, der eine Farbskalierung von Grün nach Rot aufweist, soll dies zusätzlich visuell hervorgehoben werden (Abb. 6-2). 0 – 2 zeigt den grünen Gefahrenbereich, der für „geringes Gefahrenpotential“ steht, 2 – 4 zeigt den orangenen Gefahrenbereich, der für „mittleres Gefahrenpotential“ steht und der rote Bereich, welcher von 4 – 6 reicht, stellt „hohes Gefahrenpotential“ dar.

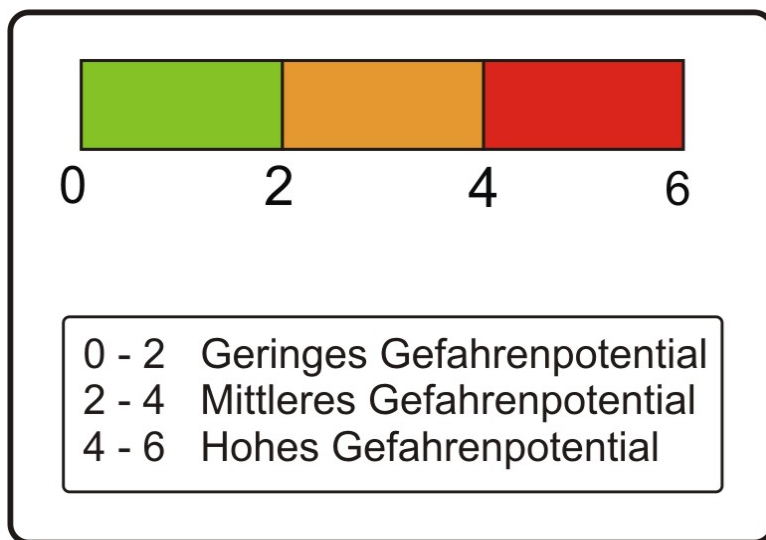


Abb. 6-2: Gefahrenbalken zur Klassifizierung des Gefahrenpotentials

Die Punktevergabe auf die Einzelparameter darf nicht wahllos erfolgen. Es muss eine klar definierte Begründung für die Punktevergabe vorliegen. Dies soll für jeden Parameter durch eine sinnvolle Quantifizierung durchgeführt werden.

Aus den Parametern I – IV werden folgende Parameter für die Gefahrenbeurteilung von Gletscherseen gewählt und zunächst semiquantitativ bewertet:

- Stadium der Seeentwicklung
- Gletscher-Einzugsgebiet
- Hinweise von Paläo-GLOF
- Ausbruch eines höher gelegenen Sees
- Teil einer Kette von Gletscherseen
- See-Abfluss (Outlet)
- Zusammensetzung der Moränen moränengedämmter Seen
- Vorhandene Toteiskörper
- Anwesenheit von Moränenquellen
- Debris-Bedeckung des Gletschers

6.2.1 Semiquantitative Bewertung von Flächen und Volumina

Bei der Auswertung und Beurteilung von Flächen oder Volumina ist es zunächst erforderlich abzugrenzen, ob eine Betrachtung auf globaler oder regionaler Ebene vorliegt. Weiters muss erhoben werden, ob für die Bewertung eines bestimmten Gletschers oder Gletschersees auch die erforderlichen Daten aller zu vergleichenden Gletscher oder -seen vorliegen. Anschließend können die Daten ausgewertet und das zu untersuchende Teilsystem in Größenklassen eingeteilt werden. Dies soll am Beispiel „Stadium der Seeentwicklung“ veranschaulicht werden.

z.B.: $xxx\text{ m}^2 - xxx\text{ m}^2 = \text{kleiner See}$

$xxx\text{ m}^2 - xxx\text{ m}^2 = \text{mittelgroßer See}$

$xxx\text{ m}^2 - xxx\text{ m}^2 = \text{großer See}$

Anhand einer nicht linearen Formel werden dann zum Beispiel für kleine Seen 0 – 1 Punkte vergeben, für mittelgroße Seen 2 - 3 Punkte und große Seen, werden aufgrund Ihrer Mächtigkeit nochmals in drei Größenklassen unterteilt und erhalten 4 - 6 Punkte.

Das Gletschereinzugsgebiet, die Breite des See-Abflusses, sowie die Moränenmächtigkeit und die Debris-Bedeckung sind ebenfalls anhand einer Größe definiert und können somit, wie das Seevolumen oder die Seefläche, berechnet und quantifiziert werden.

6.2.2 Semiquantitative Bewertung von Entscheidungsfragen

Bei Fragestellungen, die mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten sind, fällt die Bewertung schwieriger aus, als bei Fragestellungen, die sich anhand von Zahlen, welche als Datensätze vorliegen, beantworten lassen.

Hierzu zählen Fragestellungen, wie:

- Gibt es Hinweise auf Paläo-GLOFs des zu untersuchenden Sees?
- Kam es bereits zu einem Ausbruch eines höher gelegenen Sees?
- Ist der zu untersuchende See ein Teil einer Seenkette?

Als Beispiel sei hier die Frage nach den Hinweisen auf Paläo-GLOFs erwähnt, wobei folgende Einteilung zur Begründung der Gefahrenstufe verwendet werden kann:

- | | |
|--|----------|
| - See bekanntlich noch nie ausgebrochen (kleiner See): | 0 Punkte |
| - See bekanntlich noch nie ausgebrochen (großer See): | 1 Punkt |
| - Letzter Seeausbruch > 200 Jahre: | 2 Punkte |
| - Letzter Seeausbruch zwischen 100 – 200 Jahren (v.a.): | 3 Punkte |
| - See innerhalb der letzten 100 Jahre 1x ausgebrochen: | 4 Punkte |
| - See innerhalb der letzten 100 Jahre mehrmals ausgebrochen: | 5 Punkte |
| - See bricht periodisch aus: | 6 Punkte |

Besonderes Augenmerk kommt hier der Dokumentation historischer Ereignisse zu. Erwiesene Erscheinungen, sowie erwiesene Prozesse, d.h. Erscheinungen, die an einer betreffenden Stelle eindeutig identifizierbar sind, sowie Prozesse, die an einer betreffenden Stelle erwiesenermaßen gewirkt und Spuren hinterlassen haben oder durch Aufzeichnungen und Zeugenaussagen dokumentiert sind, können als „Blick in die Vergangenheit“ Hinweise für zukünftige Ereignisse bieten (HEINIMANN et al., 1998, S. 47).

6.3 Quantitative Gesamtbeurteilung der Parameter

Nach der Auswertung und Beurteilung der Einzelparameter, werden diese in einer Tabelle zusammengefasst und somit die Gefahr, welche das Gesamtsystem Gletschersee in sich birgt, beurteilt.

Die **Beurteilungstabelle** gliedert sich in folgende Spalten:

- Beurteilungskriterien
- Prozessbeurteilung
- Gefahrenpotential
- Bewertung / Punkte

Abbildung 6-3 zeigt einen Ausschnitt aus der Beurteilungstabelle des Luggye Tsho Gletschersees. In den Zeilen der Tabelle werden die einzelnen Beurteilungskriterien, mit Römischen Ziffern versehen, eingetragen und entsprechend der vorhandenen Daten, nach ihrer Gefährdung bewertet.

	Beurteilungskriterien	Prozessbeurteilung	Gefahrenpotential	Bewertung/Punkte
I	Stadium der Seeentwicklung	Proglazialer See; Große Fläche	Hoch	5
II	Gletscher-Einzugsgebiet	Großes Einzugsgebiet	Hoch	5
	...	...	...	...
Punkte gesamt:				40

Abb. 6-3: Ausschnitt aus der Gefahrenbeurteilungstabelle des Luggye Tsho

Die Gesamtpunktezahl soll in einem ersten Schritt eine Vorstellung davon geben, wie das Gefahrenpotential des betrachteten Seesystems eingestuft werden kann.

Ausschlaggebend hierfür ist die Ereignisanalyse, in der die Gefahren erkannt und lokalisiert werden. Die quantitative Beurteilung unterliegt der Entscheidungstheorie (SCHAUMANN, 2007, 2009). Eine fachlich korrekte Interpretation der Messdaten ist daher Grundvoraussetzung.

Im nachstehenden Großkapitel 7 wird die in Kapitel 6 theoretisch beschriebene Methodik zur Hazardbeurteilung ausbruchsgefährdeter Gletscherseen, am Beispiel des Luggye Tsho (Tsho = See) in Ost-Lunana, NW-Bhutan, praktisch angewandt.

7 Ansatz einer quantitativen Beurteilung am Beispiel des Luggye Tsho (Ost-Lunana / NW-Bhutan)

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich speziell mit dem ausbruchsgefährdeten, moränengedämmten Luggye-Gletschersee in Ost-Lunana / NW-Bhutan. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die geologische Situation Bhutans geboten, wobei das Hauptaugenmerk auf die Gletscherregion NW-Bhutans, insbesondere Ost-Lunana fällt.

Der Fokus in diesem Großkapitel liegt auf der Gefahrenbeurteilung des Luggye-Gletschersees. Die wichtigsten Beurteilungskriterien wurden überlegt und zusammengefasst, Daten durch Literaturrecherche gesammelt und in einem ersten Versuch interpretiert und ausgewertet.

Im Zuge der vorliegenden Masterarbeit wird an die gewonnenen Daten aus dem „Austrian Development Cooperation Project“ (fünfjähriges Projekt der Österreichischen Entwicklungszusammenarbeit) angeknüpft, wobei diese verwertet und in die quantitative Ansatzbeurteilung des Gefahrenpotentials des Luggye Tsho Gletschersees miteinbezogen werden. Die Daten stammen vor allem aus dem Technical Report für den Luggye Tsho, von LEBER & HÄUSLER et al. (2000) und dem Final Report des GLOF Mitigation Project für den Pho Chuu – Eastern Branch 2000 – 2002, von LEBER et al. (2002) aus dem ICIMOD-Bericht „Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods. Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region“, von MOOL et al., 2001, und der unveröffentlichten Diplomarbeit „Zur Hydrogeologie von Moränenquellen und Modellierung von Schmelz- / Niederschlags- und Abflussprozessen in Nord-Bhutan (Himalaya), von PAYER (2006).

Da im Rahmen der mehrjährigen Forschungsarbeiten in Lunana die Untergrundverhältnisse detailliert untersucht wurden, stehen für die semiquantitative Beurteilung der Einzelparameter (Kap. 7.5) viel mehr Entscheidungskriterien zur Verfügung, als dies üblicherweise in der regionalen Dokumentation von Gletschern und Gletscherseen (z.B. MOOL et al., 2001) der Fall ist.

Nach einer detaillierten Analyse der Daten, werden diese in der Beurteilungstabelle zusammengefasst und interpretiert. Das Ergebnis bietet eine erste Vorstellung über das gegenwärtige Gefahrenpotential des Luggye-Gletschersees.

7.1 Allgemeine Geologie und Hydrologie von Bhutan

Bhutan liegt im östlichen Himalayagebirge zwischen 26°45' und 28°10' nördlicher Breite und 88°45' und 92°10' östlicher Länge (MOOL, et al., 2001). Nur rund 30 % des Landes sind geologisch kartiert (Abb. 7-1).

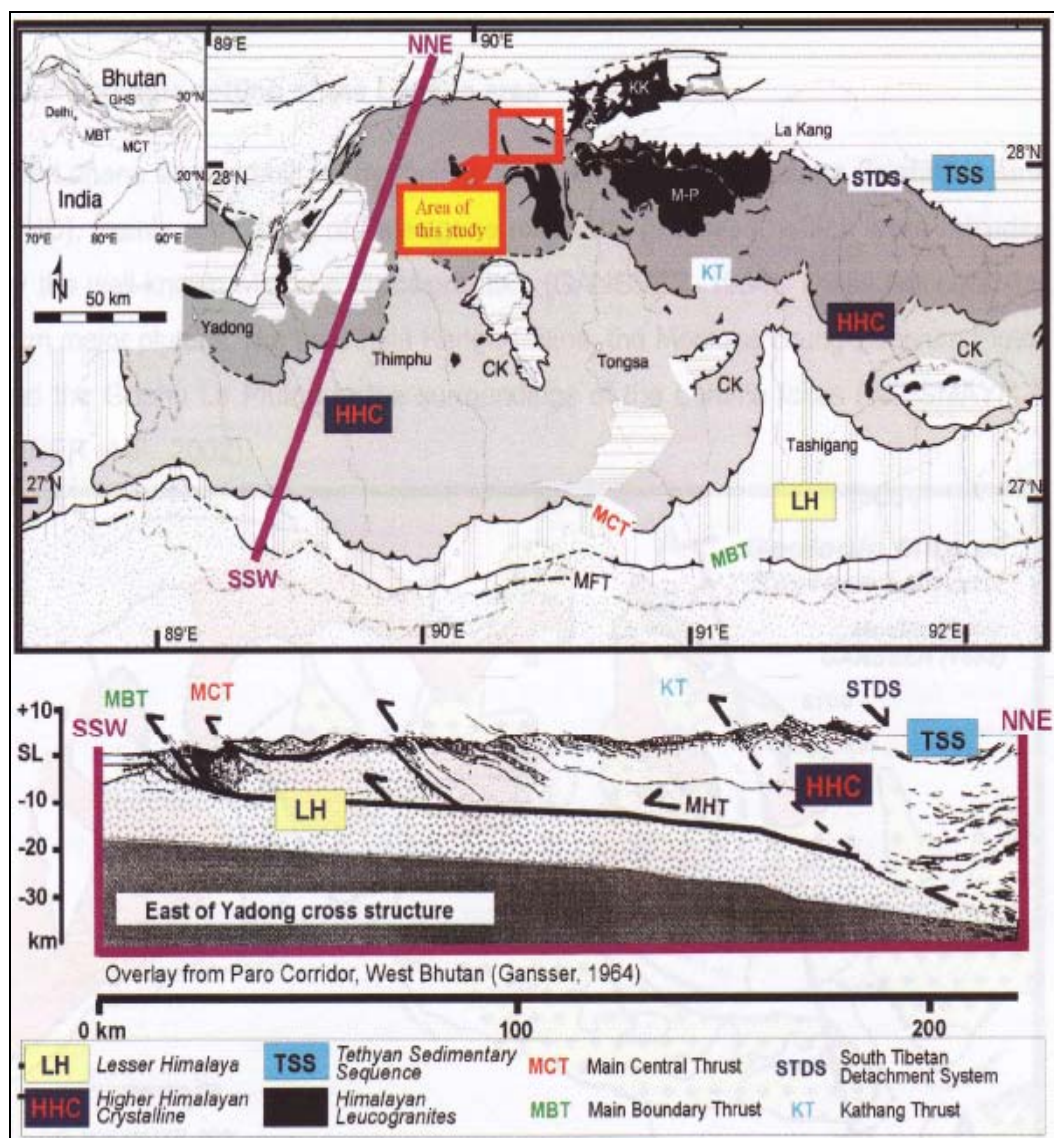


Abb. 7-1: Geologische Karte von Bhutan (nach GRUJIC www.geologie.uni-freiburg.de, aus LEBER et al., 2002, S. 24, Figure 3.2.1).

Die folgenden 4 geotektonischen Einheiten können unterschieden werden (nach MEYER, 2001):

Die Siwalik Molasse (im SE von Bhutan)

Es handelt sich um mächtige, gut geschichtete Ton- und Sandsteine, sowie Konglomerate. Die Siwalik Molasse wird entlang der tektonisch aktiven Main Frontal Thrust (MFT) auf das quartäre Vorland aufgeschoben.

Der Lesser Himalaya

Die aufgeschlossenen präkambrischen Sedimente beinhalten Schiefer, Dolomite und 1000 Meter mächtige Quarzit-Serien. Die südliche Abgrenzung zur Siwalik Molasse ist durch die Main Boundary Thrust (MBT) gegeben, wobei die Molassesedimente überschoben werden.

Das Higher Himalaya Crystalline (HHC)

Der Lesser Himalaya wird im Norden von dem Higher Himalaya Crystalline über die Main Central Thrust (MCT) überschoben. Der Hauptbestand ist aus Granat-Biotit-Gneisen mit Einschaltungen von Metasedimenten aufgebaut. Die von Migmatiten abstammenden Granite weisen Bildungsalter von 2300 bis 20 Mio. Jahre auf. Jüngere Leukogranite mit Alter von 10 bis 15 Mio. Jahren sind als posttektonisches Ereignis zu interpretieren und beschränken sich auf die nördliche Hälfte des HHC. In Ost-Lunana sind fast ausschließlich migmatische Gneise und Leukogranite vertreten. Die South Tibetan Detachment Zone (STDZ) ist eine Abschiebung im Norden des HHC, welche die Grenze zum Tibet Himalaya mit seinen Tethys Sedimenten bildet.

Die Tethys Sedimente

Sie sind entlang der Grenze zu Tibet verteilt und enthalten fossilführende Trias, Jura und Kreide, überwiegend Karbonate. Das Liegende besteht aus Marmoren und Phylliten. Nach GANSSER (1983) sind jene Tethysvorkommen auch in den steilen Südwänden der Table Mountains Ost-Lunanas aufgeschlossen.

Bhutan liegt an der Südflanke des Ostabschnittes des Himalaya-Hauptkammes und ist in drei physiogeographische Zonen gegliedert: das südliche Vorland, kleiner

Himalaya und der große Himalaya. Ein auffallendes Charakteristikum der Bhutan Himalayas ist der abrupte Höhenanstieg von Süden nach Norden, im Gegensatz zu den anderen Abschnitten der Himalayakette.

Das Flusssystem von Bhutan kann in 6 Flussbecken gegliedert werden (nach MOOL et al., 2001, S. 6), wobei diese als eigenständige Flusssysteme mit ihren individuellen Haupteinzugsgebieten von Norden nach Süden fließen (Abb. 7-2). Auszuschließen sind hier die Flüsse Amo Chhu und Kuri Chhu, welche von Süden nach Norden fließen, sowie die Flüsse des Northern Basin, welche ebenfalls von Süden nach Norden fließen und auf der Karte (Abb. 7-2) nicht eingezeichnet sind.

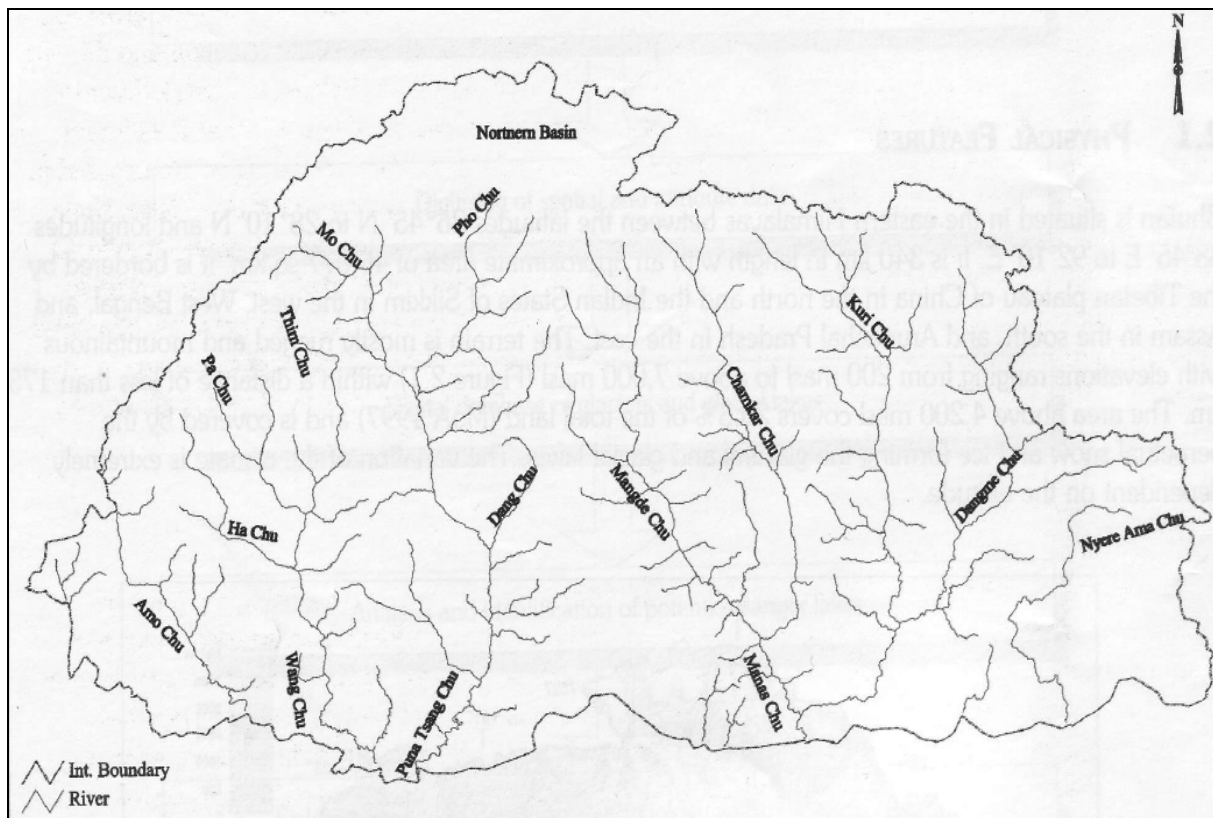


Abb. 7-2: Die Hauptflüsse Bhutans (MOOL et al., 2001, S. 6, Figure 2.2).

Abbildung 7-3 zeigt ein Profil des Pho Chhu Flusses, welcher gemeinsam mit dem Mo Chhu Fluss das Puna Tshang Chhu Becken geformt hat, in welchem das Untersuchungsgebiet Lunana liegt. „Chhu“ bedeutet Fluss auf Dzongkha, der Nationalsprache Bhutans.

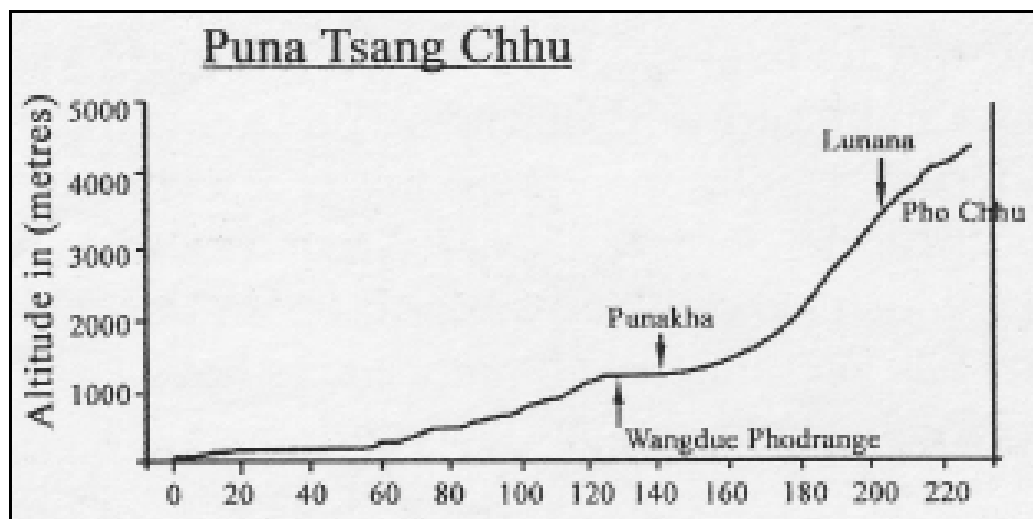


Abb. 7-3: Profil des Pho Chhu Flusses (verändert nach MOOL et al., 2001, S. 8, Figure 2.3).

7.2 Geologischer Überblick des Region Ost-Lunana

Lunana befindet sich im Nordwesten von Bhutan und gehört zum Distrikt Gasa. Die Hochgebirgsregion mit ihren zahlreichen Gletschern wird von dem Pho Chhu Fluss entwässert. Innerhalb des Gebietes haben sich eine Reihe von Gletschern und Gletscherseen entlang der Nordflanke der High-Himalayan-Gebirgskette entwickelt, welche in einem NE-SW-gerichteten Tal verlaufen (Abb. 7-4). Dieses wurde durch tektonische Prozesse geformt und hat seine endgültige Morphologie durch glaziale Aktivitäten und postglaziale Massenbewegungen erhalten (LEBER, 2005).

Die Hauptgletscher, sowie die Gletscherseen mit dem höchsten Gefährdungspotential der Region Ost-Lunana sind in Abbildung 7-5 dargestellt. Die individuellen Bezeichnungen wurden nach einer Kartierung des Geological Survey of Bhutan im Jahr 1999 vergeben. Tabelle 7-1 (verändert nach MEYER, 2001) und Tabelle 7-2 (nach NORBU, 1999, MOOL et al., 2001) geben des Weiteren einen anschaulichen Überblick über das Inventar an Gletschern und ausbruchsgefährdeten Gletscherseen in Ost-Lunana.

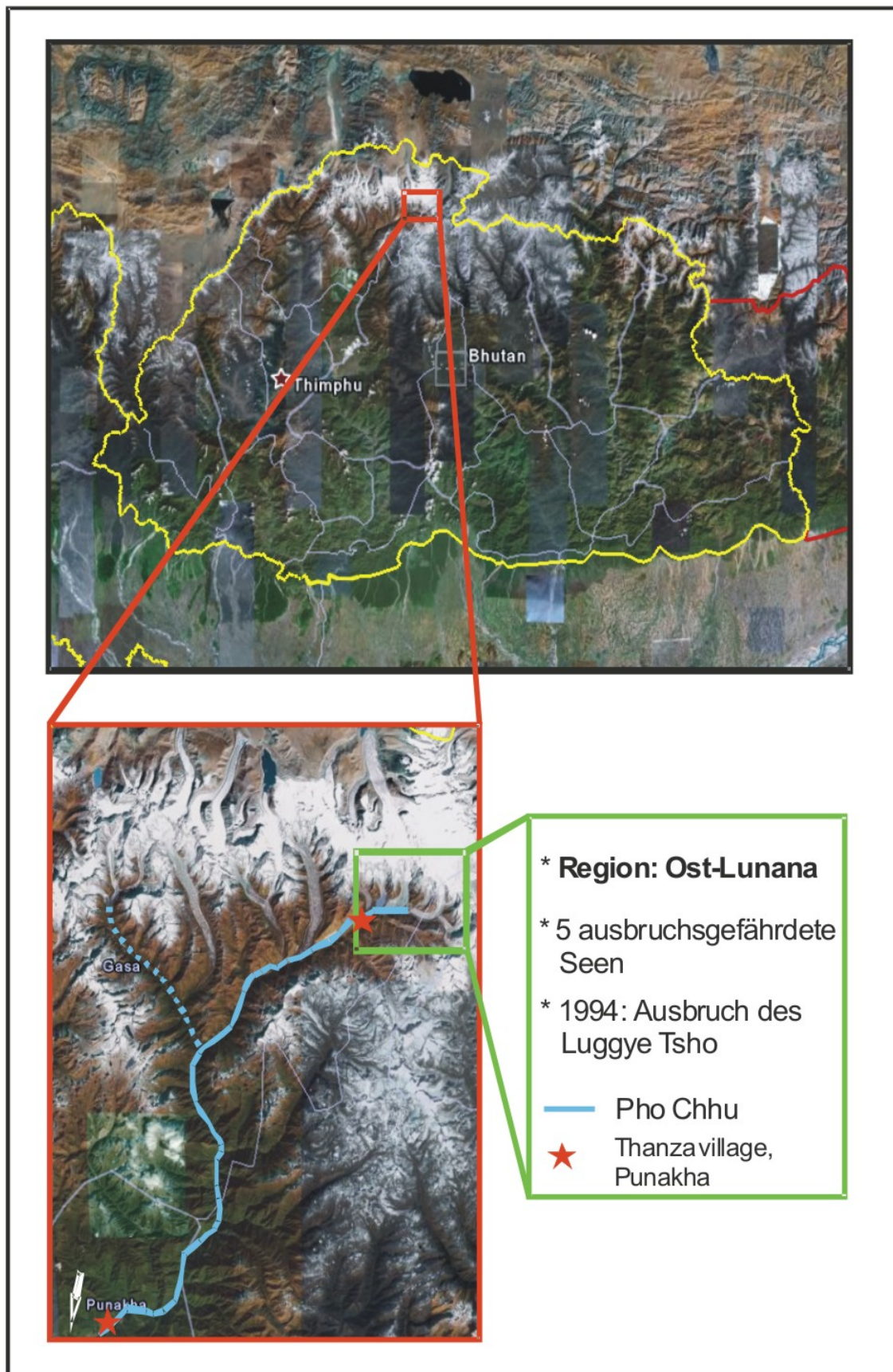


Abb. 7-4: Die Region Ost-Lunana im Überblick.

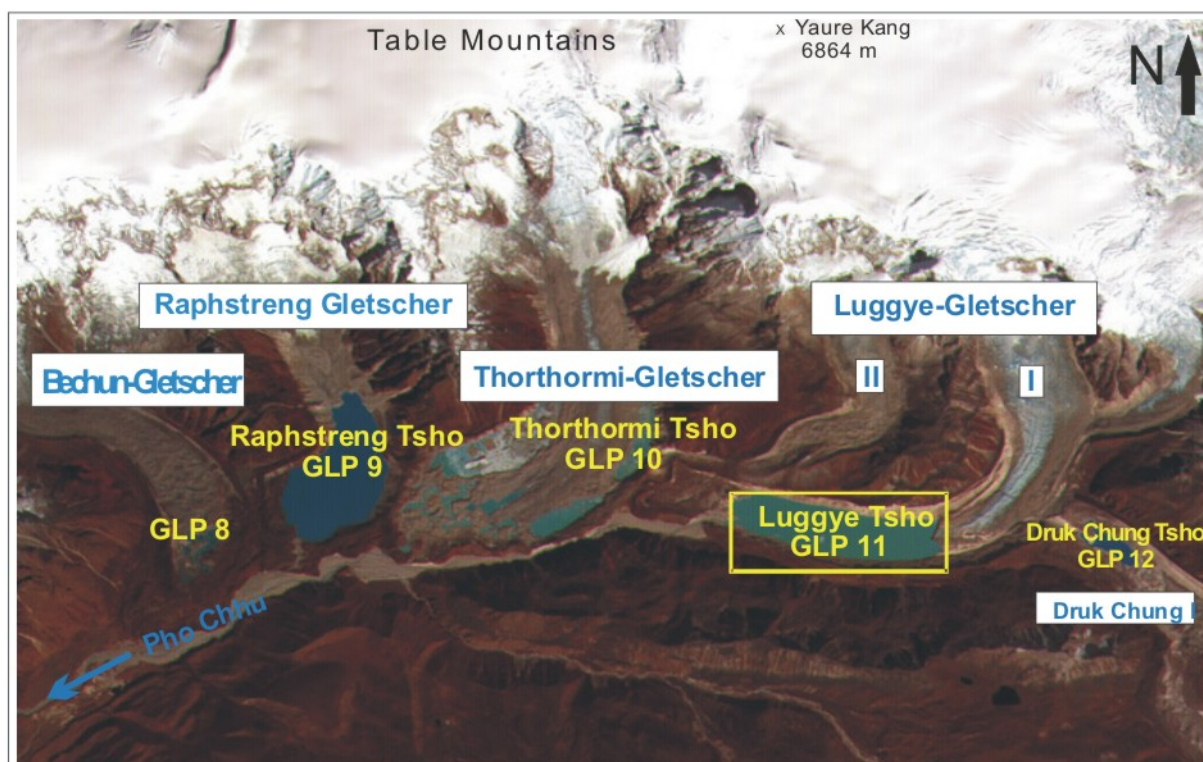


Abb. 7-5: Die Gletscher und Gletscherseen von Ost-Lunana. Die Signaturen GLP 8 – GLP 12 wurden 1999 vom Geological Survey of Bhutan (GSB) vergeben (GLP = Glacier Lake Phovally).

Gletscher von W nach E	Gletschertyp	Länge (km)	Gletschergröße (km ²)	Schuttbedeckung (%-Anteil an Gletschergröße)	Firnfläche (%-Anteil an Gletschergröße)
Bechun	Hängegletscher	5,04	6,4	42%	34%
Raphstreng	Hängegletscher	2,2	2,2	23%	7%
Thorthormi	Firnstromgletscher	6,7	8,1	50%	38%
Luggye I	Firnstromgletscher	8,7	8,3	18%	61%
Luggye II	Hängegletscher	3,03	2,2	36%	18%
Druk Chung I	Firnkesselgletscher	5,03	5,7	19%	26%

Tab. 7-1: Gletscherparameter für die Gletscher Ost-Lunanas (verändert nach MEYER, 2001, S. 28, Tabelle 3.1).

Seename / Nummer	Gletscher	Höhenlage (müA)	Typ	Fläche	Anmerkung
Bechung Tsho / GLP 8	Bechung	4260	supraglazial	44,194 m²	kleiner See
Raphstreng Tsho / GLP 9	Raphstreng	4360	moränen-gedämmt	145,949 m²	gefährlicher See; kontrollierte Entwässerung hat Seespiegel um 4 m reduziert
Thorthormi Tsho / GLP 10	Thorthormi	4450	moränen-gedämmt (lateral)	0,30 km x 0,06 km	gefährlicher, wachsender Gletschersee in einer Gruppe mehrerer Seen
Luggye Tsho / GLP 11	Luggye	4600	moränen-gedämmt	769,800 m²	direkt mit Gletscher verbunden, Endmoräne hat Eiskern, Ausbruch am 7. Oktober 1994
Drukchong Tsho / GLP 12	Drukchung I	4650	supraglazial	innerhalb einer Gruppe von Wasserkörpern, die sich über 0,75 km erstreckt	2,25 km östlich des Luggye Tsho; mitverantwortlich für den Ausbruch des Luggye Tsho 1994

Tab. 7-2: Gletscherseen Ost-Lunanas mit hohem Gefahrenpotential (nach NORBU, 1999, MOOL et al., 2001).

7.3 Inventarisierung der Gletscher und Gletscherseen Ost-Lunanas

Die relativ rasche Hebung des Himalayas vor 50 Millionen Jahren führte zu einem ausgeprägten, steilen Relief, wobei das junge Gebirge durch eine tiefe Zertalung und das Fehlen von Firnsammelbecken charakterisiert wird (MEYER, 2001). Die Gletschertypen Lunanas können wie folgt unterteilt werden:

- Firnkesselgletscher
- Lawinenkesselgletscher
- Firnstromgletscher
- Hängegletscher

Die Gletscher Lunanas können allgemein als Kargletscher angesprochen werden, welche sich im Stadium des Rückzuges befinden. Insgesamt existieren 677 Gletscher in Bhutan, davon beträchtliche 154 im Pho Chhu Becken (MOOL et al., 2001).

In Bhutan sind 2674 Gletscherseen erfasst, von denen 562 Seen mit Gletschern in direktem Zusammenhang stehen. Gletscherseeausbrüche sind in erster Linie aus Lunana, dem Einzugsgebiet des Pho Chhu bekannt. Verheerende Ausbrüche ereigneten sich in den Jahren 1957, 1960 und 1994 (MOOL et al., 2001).

Je enger der See mit dem Gletscher in Kontakt ist, desto mehr Gefahrenpotential ist für einen Ausbruch vorhanden. 174 erfasste Seen befinden sich auf Distanzen zum Gletscher von weniger als 50 m. Die Gletscherseen im Pho Chhu Becken Ost-Lunanas können in supraglaziale Seen, endmoränengedämmte Seen, lateralmoränengedämmte Seen und glaziale Erosionsseen unterteilt werden (Abb. 7-6).

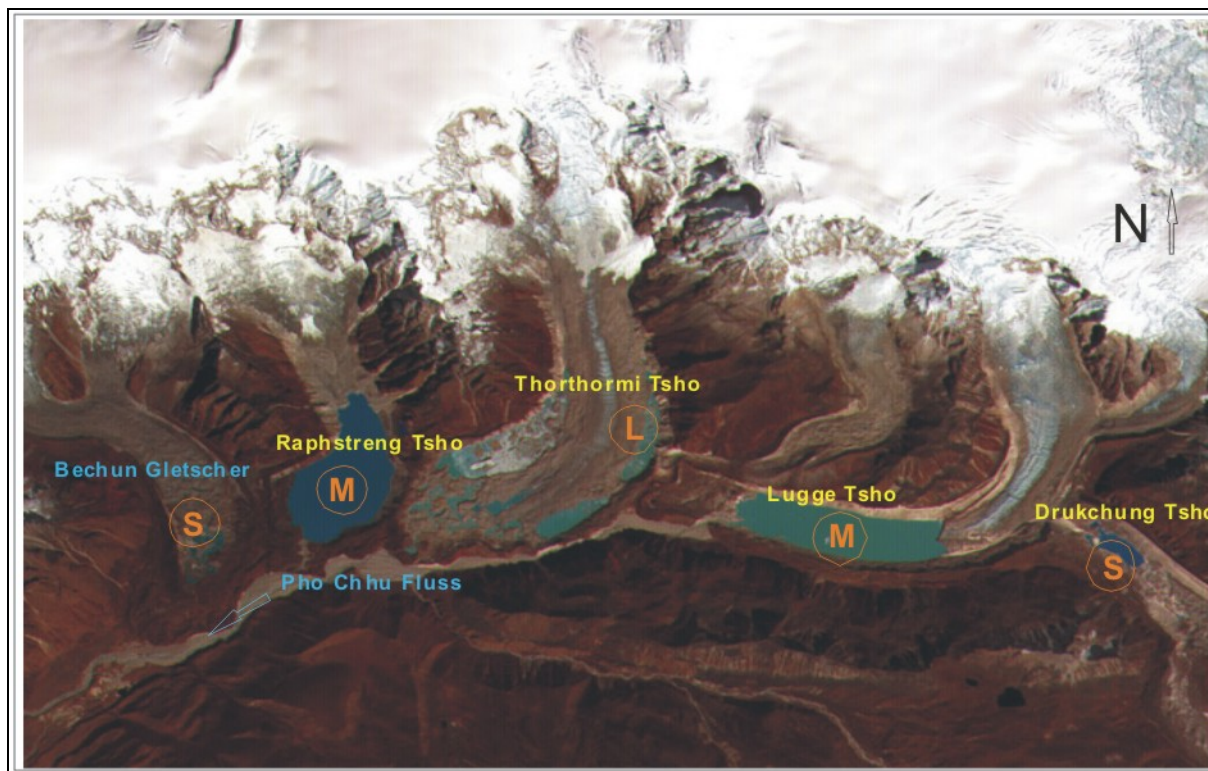


Abb. 7-6: Die Region Lunana im Pho Chhu Becken mit den verschiedenen Seetypen. S – Supraglazialer See, M – Endmoränengedämmter See, L – Lateralmoränengedämmter See (Bezeichnungen nach MOOL et al, 2001)

Augusto Gansser untersuchte 1967, im Zuge seiner Bhutan-Expeditionen in den 1960er und 1970er Jahren, als Erster das Phänomen von GLOFs in der Region Lunana und verwies darauf, dass es von großer Notwendigkeit ist, Messungen vorzunehmen, um die Gefahr und das Risiko von Gletscherseeausbrüchen in dieser Hochgebirgsregion zu minimieren. Der Gletscherseeausbruch des Lugge Tsho am 7. Oktober 1994, mit seinen katastrophalen Auswirkungen, war Anlass zu der österreichisch-bhutanesischen Kooperation, um künftige Ausbrüche moränengedämmter Gletscherseen in Nordbhotan im Rahmen eines fünfjährigen Projektes (1999 – 2003), unter der Leitung von Dr. Hermann Häusler, zu verhindern und vorherzusehen.

7.4 Datenerhebung für den Lugge Tsho (Ost-Lunana)

Im Nachstehenden wurden allgemeine Daten und Aussagen über den Lugge Tsho vor allem aus NORBU (1999), MEYER (2001), MOOL et al. (2001) und LEBER (2005) entnommen. Die Felddaten, die detailliert behandelt und interpretiert wurden,

stammen aus den technical und final reports des fünfjährigen ADC-Projektes (Austrian Development Cooperation) zur Verringerung des Ausbruchsriskos von Gletscherseen in der Lunana-Region, speziell aus LEBER & HÄUSLER et al. (2000) und LEBER et al. (2002), sowie aus der unveröffentlichten Diplomarbeit zur Hydrogeologie und Hydrologie in Lunana (Bhutan / Himalaya), von PAYER (2006).

Das Tal Lunana (Abbildung 7-7), mit seinen zahlreichen berühmten Gletschern, ist mit einer Höhenlage von 4200 m das am höchstgelegenste besiedelte Gebiet Bhutans und befindet sich im Einzugsgebiet des Pho Chhu Flusses (NORBU, 1999).

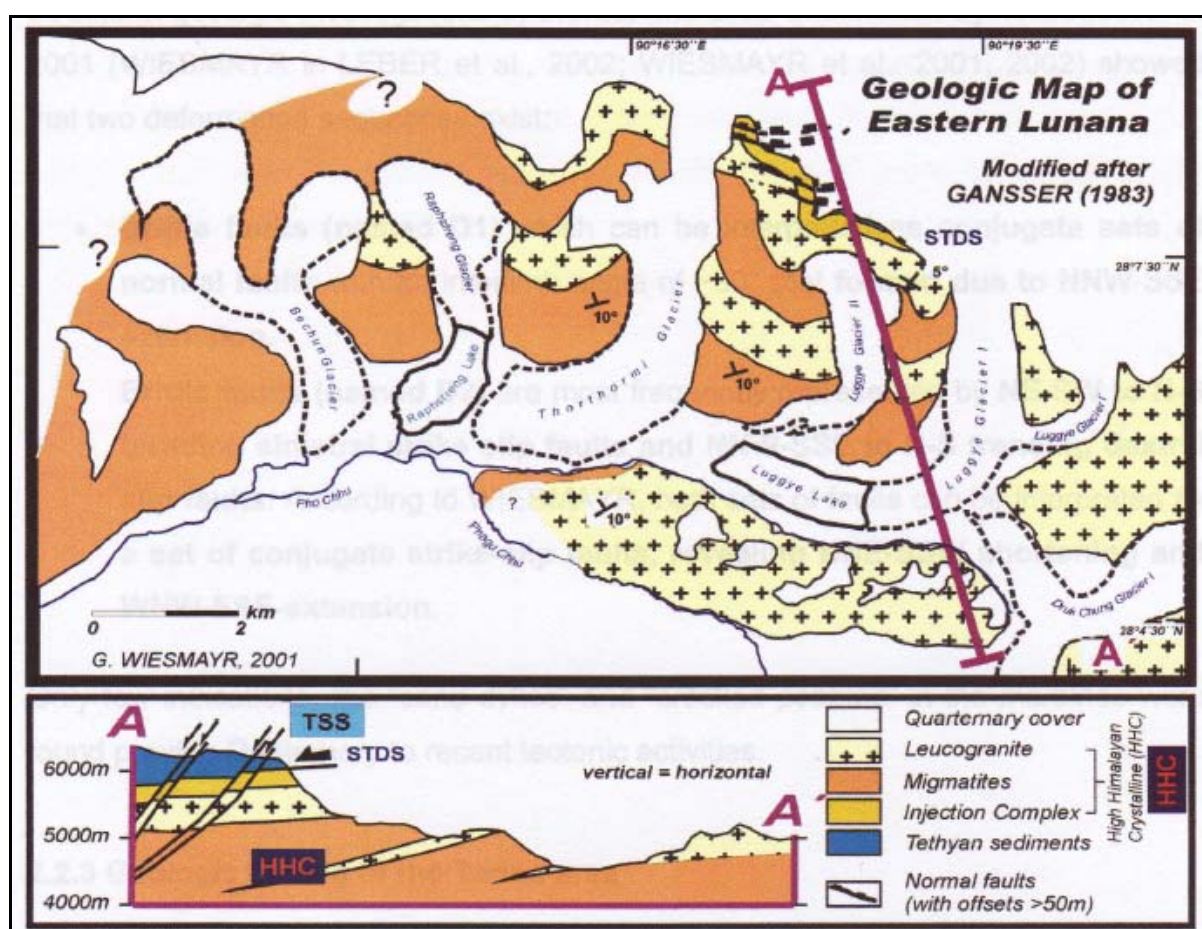


Abb. 7-7: Geologische Karte von Ost-Lunana (verändert nach GANSSER, 1983, aus LEBER et al., 2002, S. 25, Figure 3.2.2).

Südöstlich des Thorthormi-Gletschersees befindet sich der rechteckig geformte proglaziale See namens Luggye Tsho (Abb. 7-8). Der obere südöstliche Rand des Sees steht in direktem Kontakt mit der Gletscherzunge des Luggye Gletschers. Der Luggye Tsho hat innerhalb der letzten 3 bis 4 Dekaden ein sehr schnelles Wachstum

erlebt. Allgemeine Daten zum Luggye Tsho können aus Abb. 7-8 entnommen werden.

Der Luggye Tsho wird von mächtigen, bis zu 90 m hohen Stirn- und Lateralmoränen umgeben. Der Bereich zwischen dem heutigen See und der Endmoräne wird charakterisiert durch eine speziell gewellte Oberflächenmorphologie. Diese ist auf schmelzendes Toteis und damit verbundene Hangrutschungs-, sowie auf Kriechprozesse zurückzuführen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000).

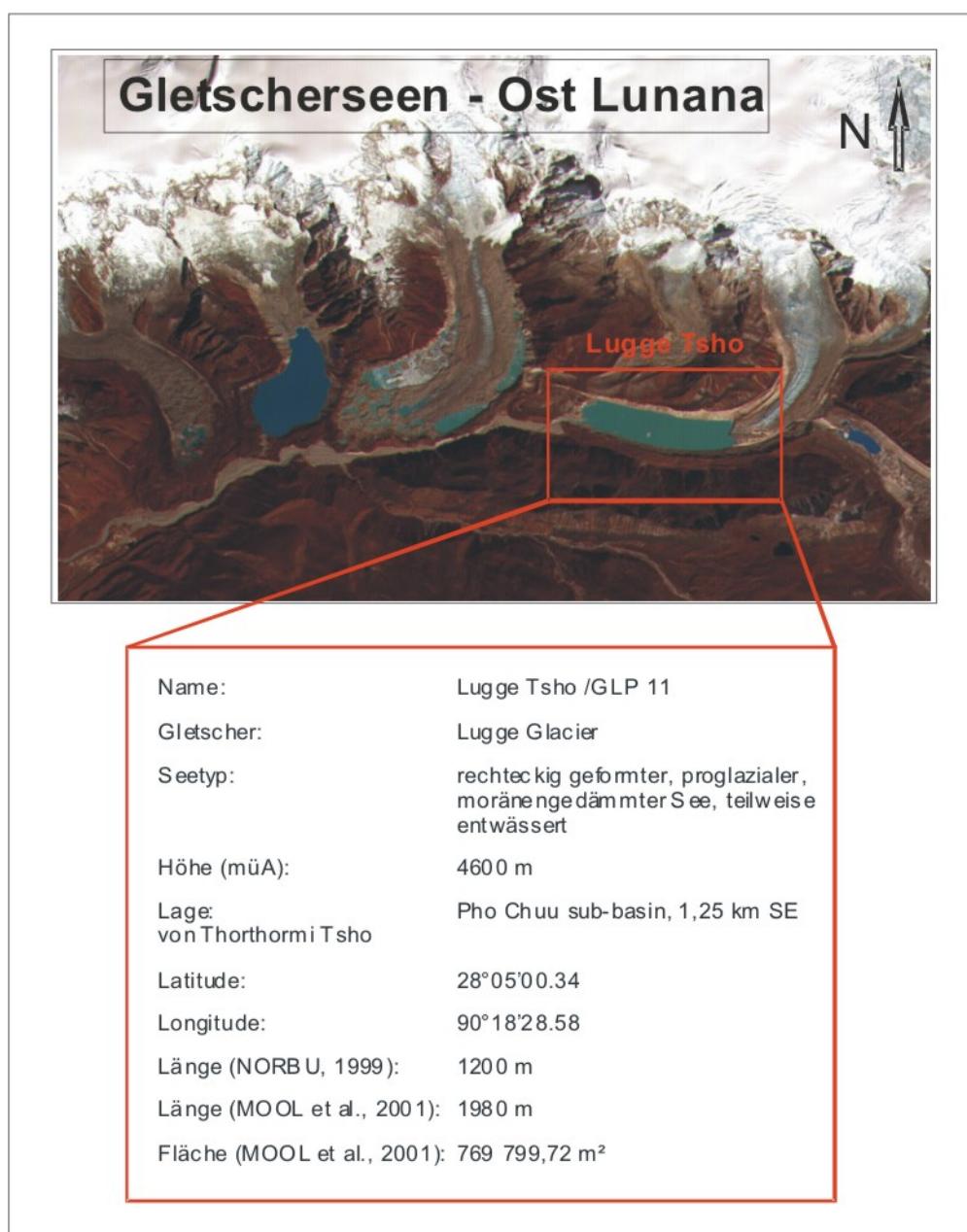


Abb. 7-8: Allgemeine Daten zum Luggye Tsho in Ost-Lunana (Daten aus NORBU, 1999, MOOL et al., 2001).

Am 6. Oktober brach der Luggye Tsho durch seine linke Seitenmoräne und richtete talabwärts verheerende Schäden an. Laut Augenzeugen war der GLOF eine bis zu 10 m hohe Flutwelle mit mitgeführtem Blockwerk und Baumstämmen. Die Flut erreichte 7 Stunden nach dem Ausbruch, in den frühen Morgenstunden des 7. Oktobers 1994, Punakha und forderte 23 Menschenleben. Aus dem Hydrographen des GLOF-Ereignisses ist zu entnehmen, dass die Flut auf ihrem Weg in das Tal nicht an Zerstörungskraft verlor (Abb. 7-9).

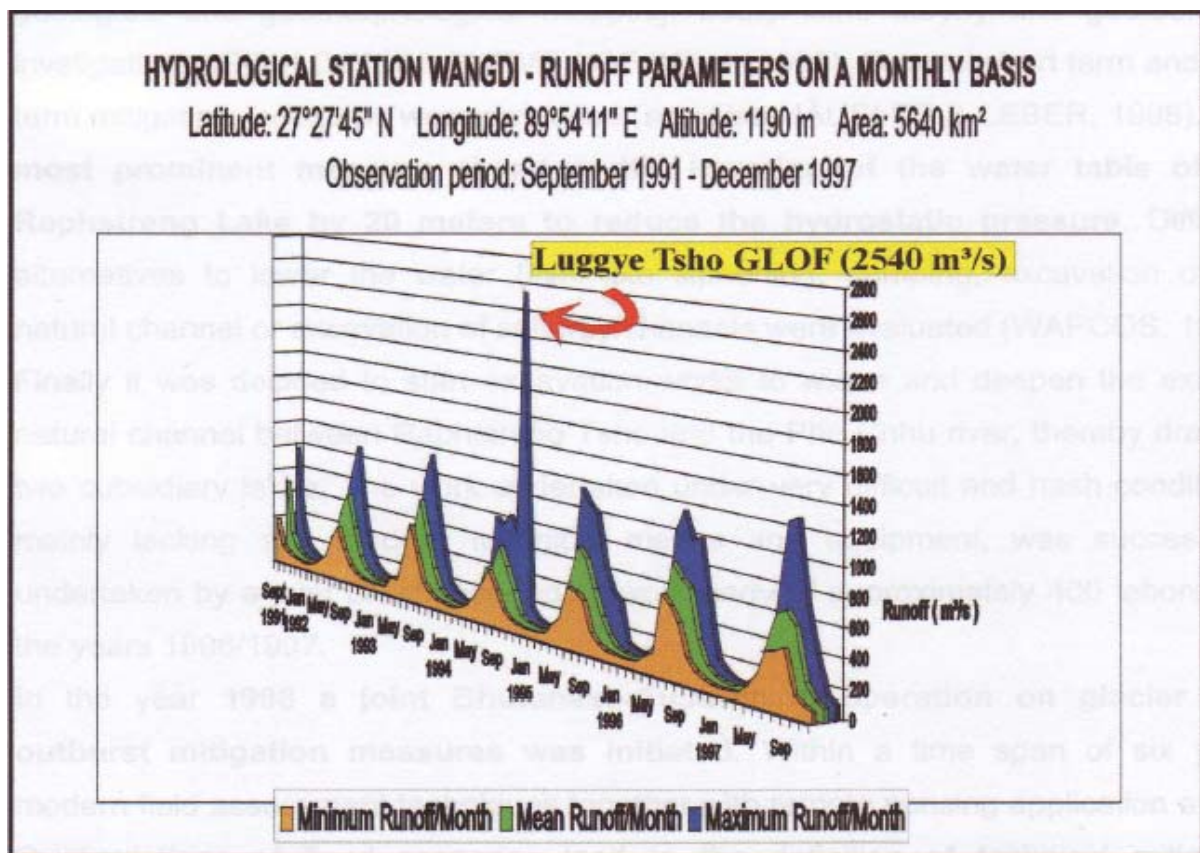


Abb. 7-9: Abflussaufzeichnungen des Hydrographen der hydrologischen Station Wangdi Phodrang (Pho Chhu) für die Jahre 1991 – 1997 (LEBER, 2005).

Die exakten Ursachen solcher Gletscherseeausbrüche sind nicht immer völlig geklärt und auch nach einem Ausbruch ist eine kontinuierliche Überwachung erforderlich, um einem neuerlichen Ausbruch entgegenzuwirken.

7.5 Semiquantitative Beurteilung der Einzelparameter und Gefahrenquellen des Luggye Tsho (Ost-Lunana)

In Kapitel 6 wurde die Methodik zur Hazardbeurteilung ausbruchsgefährdeter Gletscherseen allgemein erläutert. Diese soll nun am Beispiel des Luggye Tsho detailliert behandelt und angewandt werden.

Die auszuwertenden Daten werden auf regionaler Ebene begrenzt. Im vorliegenden Fall des Luggye Tsho handelt es sich um alle inventarisierten Gletscherseen im Pho Chhu Einzugsgebiet (Abb. 7-10), sowie die 9 wichtigsten Gletscher des Pho Chhu Einzugsgebietes, von Westen nach Osten, der Rilo, der Chozo, der Bechun, der Raphstreng, der Thorthormi, der Luggye I, der Luggye II, der Druk Chung I und der Druk Chung II Gletscher.

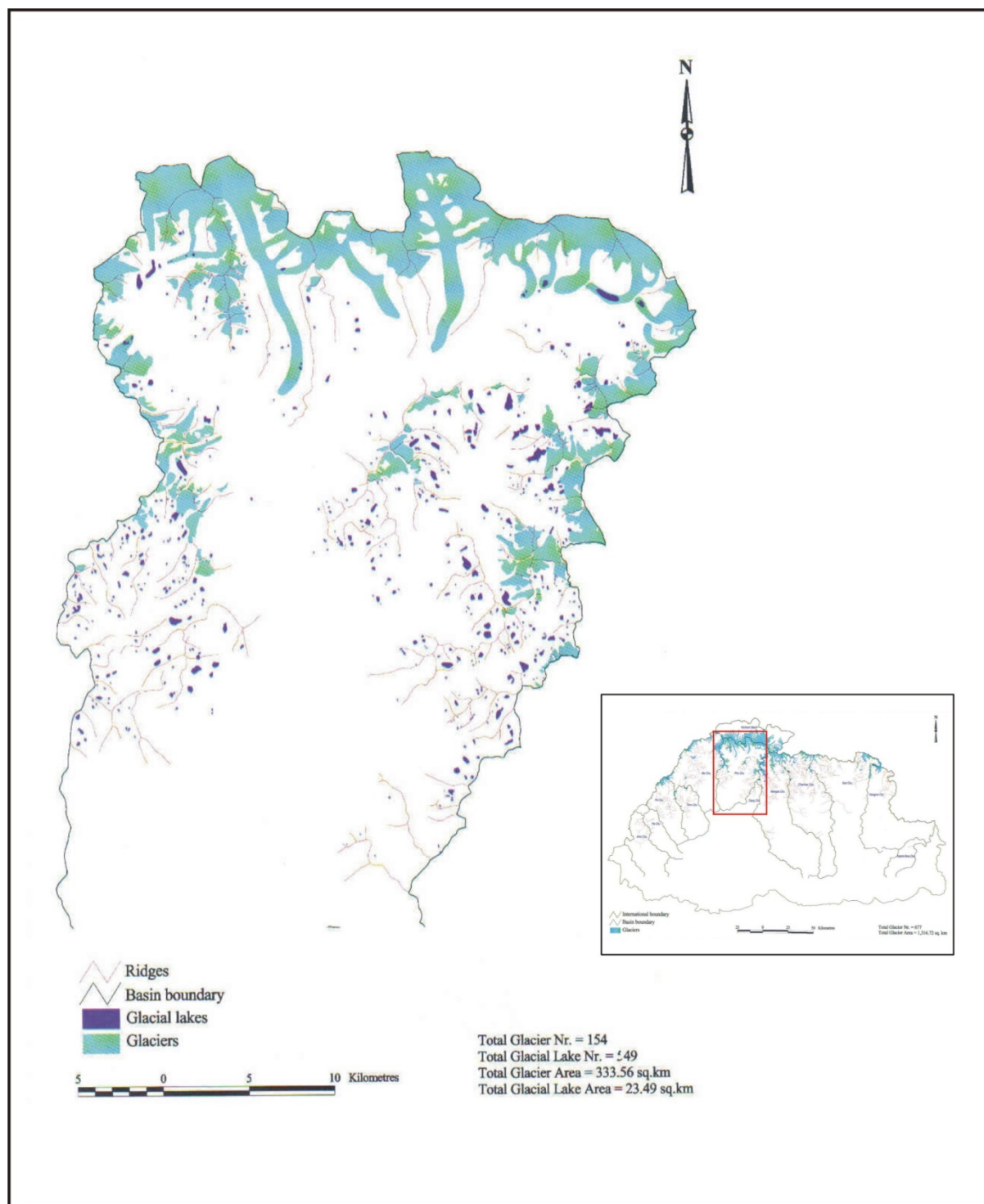


Abb. 7-10: Gletscher und Gletscherseen des Pho Chhu Einzugsgebietes (verändert nach MOOL, 2001, S. 54, Figure 7.5).

An dieser Stelle sei noch einmal zu erwähnen, dass die auszuwertenden Daten nicht von eigener Geländebegehung, sondern aus Berichten, assessment reports und unveröffentlichten Diplomarbeiten von MOOL et al. (2001), LEBER & HÄUSLER et al., 2000, 2002, sowie MEYER (2001), LEBER (2005) und PAYER (2006) stammen.

7.5.1 Beurteilungsparameter I: Stadium der Seeentwicklung

Das Pho-Chhu-Einzugsgebiet umfasst 549 Gletscherseen, wobei ihre Flächen von 1065,17 m² bis 769799,72 m² variieren (siehe Anhang 1). Aufgrund unzureichender Daten hinsichtlich der Tiefe der einzelnen Seen und somit der Seevolumina im Pho-Chhu-Einzugsgebiet, bezieht sich der Parameter „Stadium der Seeentwicklung“ ausschließlich auf die Größe der aus Fernerkundungsdaten bemessenen Seeflächen.

Die Punktevergabe für das Gefahrenpotential aufgrund der Seefläche erfolgt nach folgenden Kriterien (Abb. 7-11):

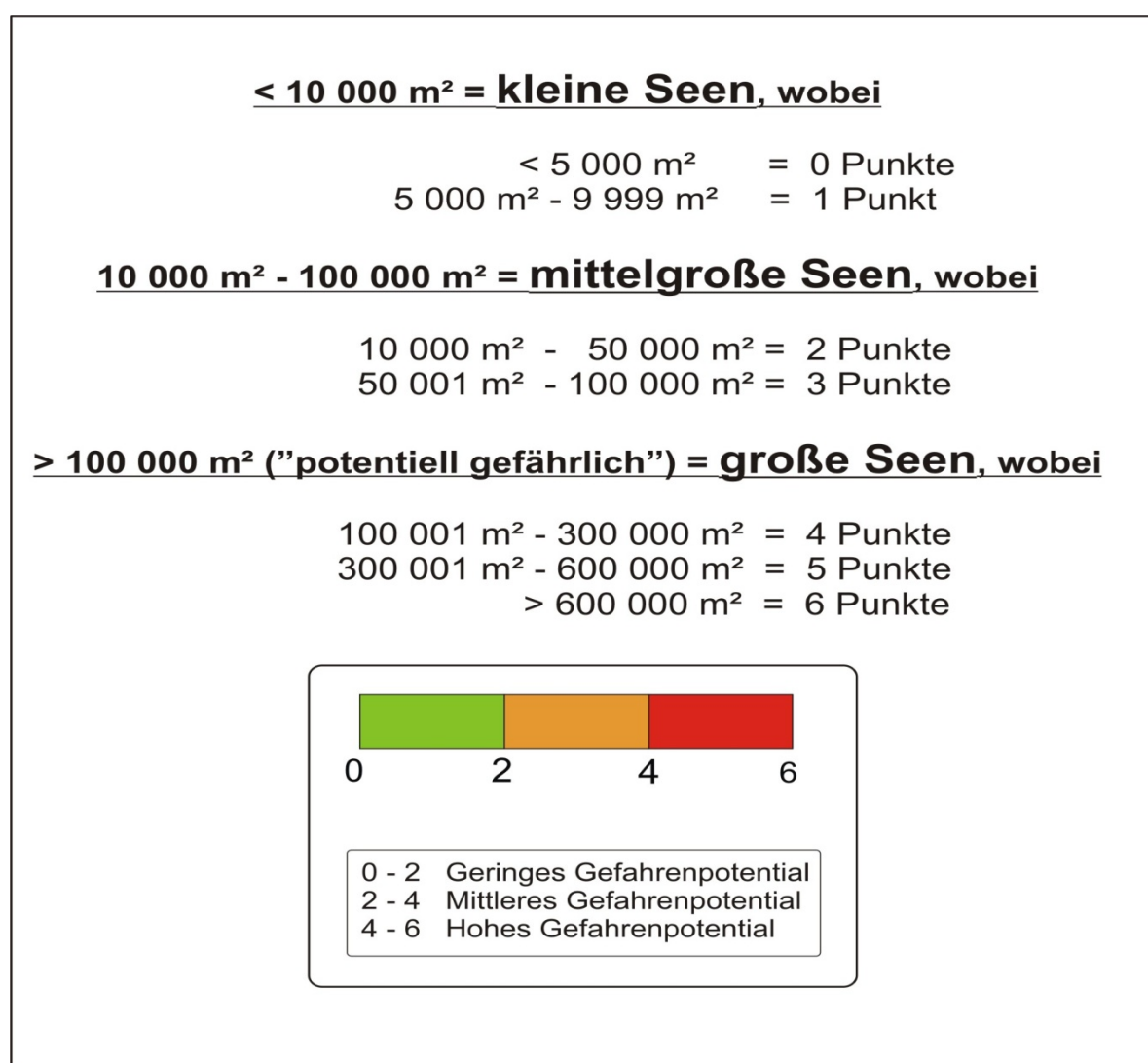


Abb. 7-11: Semiquantitative Bewertung der Seefläche.

Der Luggye Tsho fällt mit einer Fläche von 769799,72 m² (siehe Anhang 1, Pho_gl210, nach MOOL, 2001) unter die „potentiell gefährlichen“ großen Seen und erhält somit 6 Punkte, was für hohes Gefahrenpotential steht.

Stadium der Seentwicklung → 769799,72 m² → 6 Punkte → hohes Gefahrenpotential

7.5.2 Beurteilungsparameter II: Größe des Gletschereinzugsgebietes

Die Gletschereinzugsgebiete der Gletscher Ost-Lunanas errechnen sich aus der Fläche der Karwände, zu welcher die Firnfläche addiert wird. Die Daten stammen aus MEYER (2001) und sind in Anhang 2 ersichtlich, sowie in Abbildung 7-12 anschaulich dargestellt. Die Parameter der Gletscher Ost-Lunanas wurden von MEYER (2001) aus Satellitenbilddaten (panchromatische IRS 1D Szene mit 5 m Auflösung, aus dem Jahr 1999) und mit Hilfe topographischer Karten (Indian Survey, 1986, Maßstab 1:50 000) erhoben.

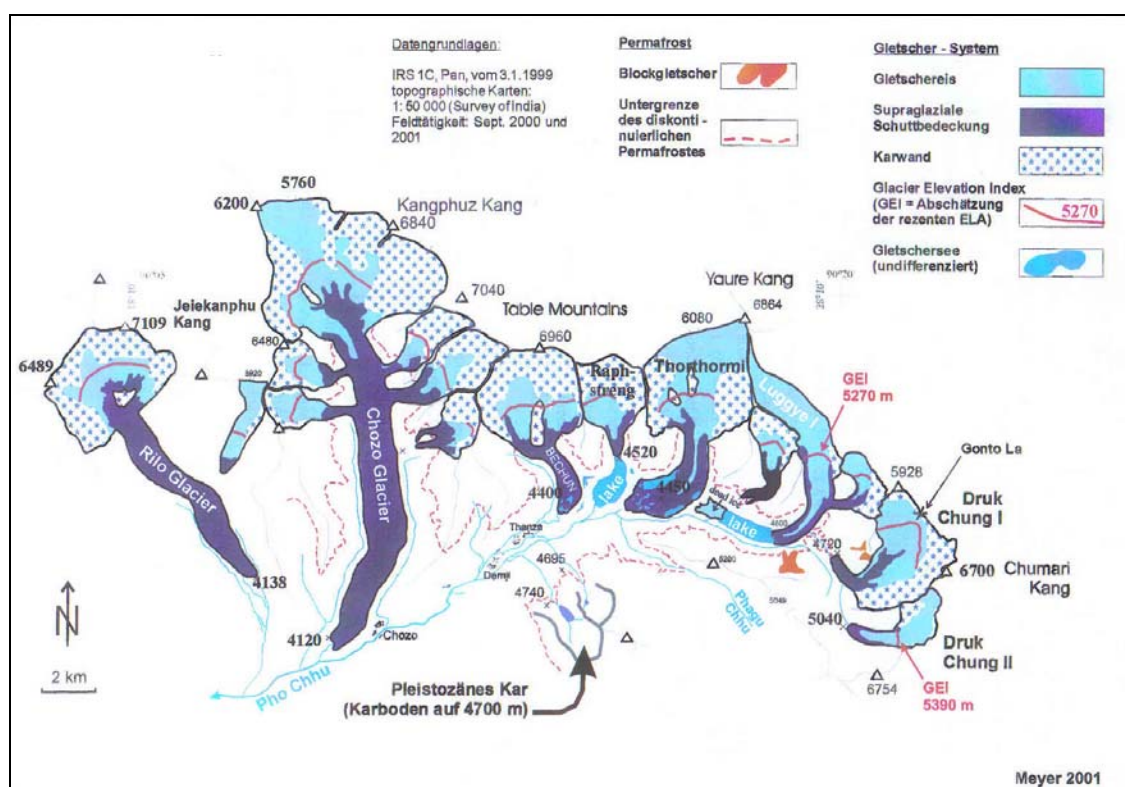


Abb. 7-12: Die Gletscher Ost-Lunanas (MEYER, 2001, S. 30, Abb. 3.6).

Die Flächen der Gletschereinzugsgebiete reichen von 2 km² bis 24,5 km² und werden wie folgt klassifiziert (Abb. 7-13):

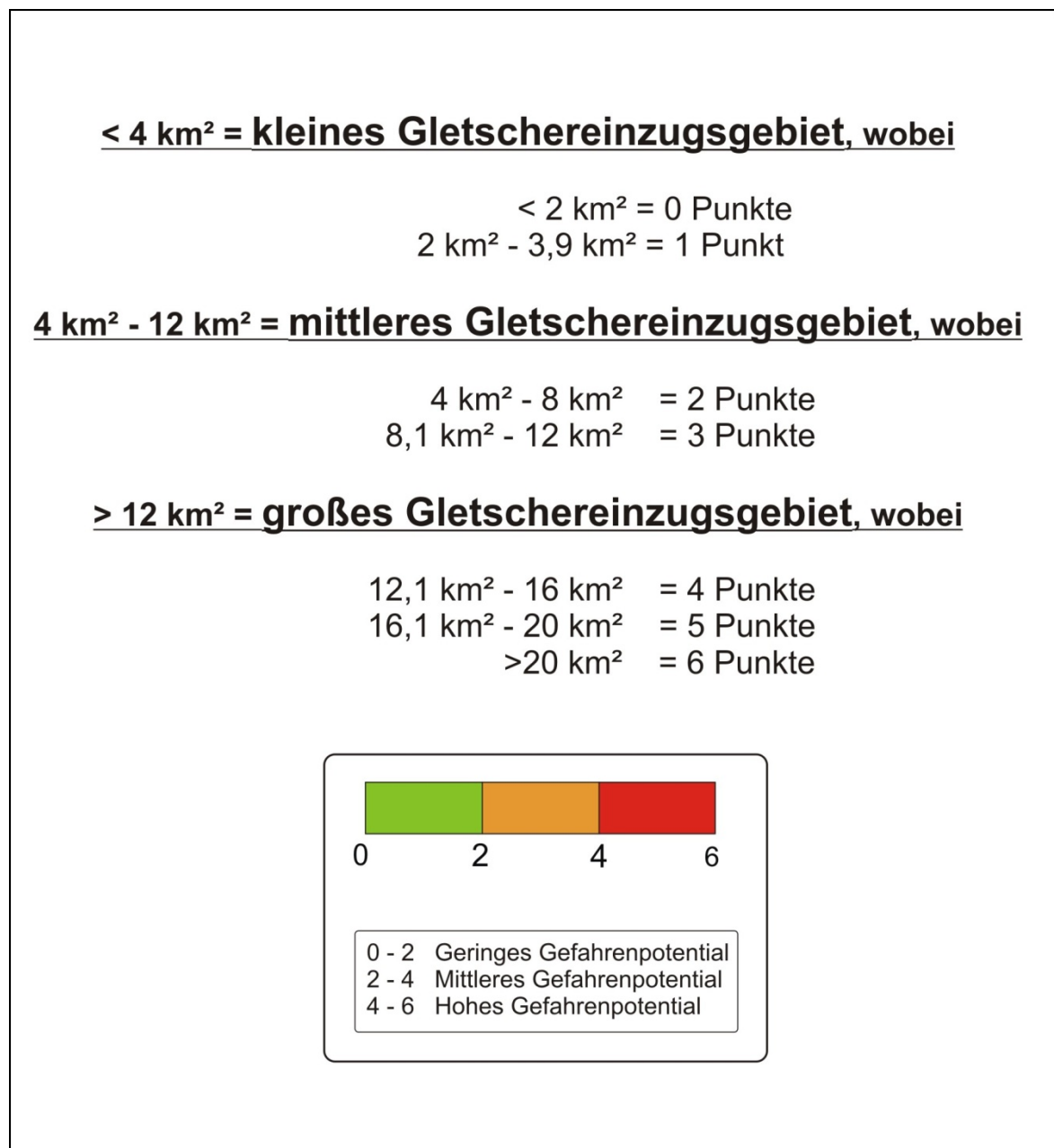


Abb. 7-13: Semiquantitative Beurteilung des Gletschereinzugsgebietes.

Das Gletschereinzugsgebiet des Luggye I Gletschers, welcher den zugehörigen Gletscher zum Luggye Tsho darstellt, hat eine Fläche von 6,3 km² und fällt somit in die Kategorie der mittleren Gletschereinzugsgebiete. Da das Flächenmaß eher gering ausfällt, erhält es 2 Punkte und birgt somit geringes bis mittleres Gefahrenpotential (Tendenz zum mittleren Gefahrenpotential).

**Gletschereinzugsgebiet → 6,3 km² → mittleres Gletschereinzugsgebiet → 2
Punkte → mittleres Gefahrenpotential**

7.5.3 Beurteilungsparameter III: Debrisbedeckung des Gletschers

Die supraglaziale Schutt- bzw. Debrisbedeckung konzentriert sich vor allem auf die flachen Zungenbereiche der Gletscher (Abb. 7-12), die Firnflächen, welche Gletscherflächen oberhalb der Gleichgewichtslinie darstellen (exklusive den Karwänden), sind schuttfrei (MEYER, 2001).

In Anhang 2 sind die Flächen der Schuttbedeckung in km², sowie als %-Anteil an der Gletschergröße angegeben. Für eine quantitative Bewertung ist es sinnvoll, die %-Anteile an der Gletschergröße heranzuziehen, da die Flächen der Schuttbedeckung im Verhältnis zu der Gletscherfläche stark variieren. Die Anteile der Schuttbedeckung an der Gletschergröße reichen von 18 % bis 63 %. Der Luggye I Gletscher, welcher in den Luggye Tsho entwässert, hat bei einer Größe von 8,3 km², mit 1,5 km² eine Schuttbedeckung von 18% (siehe Anhang 2). Diese beträgt weniger als ein Viertel seiner Gesamtgröße und fällt somit eher geringmächtig aus.

Die semiquantitative Beurteilung der vorhandenen Daten kann aus Abbildung 7-14 entnommen werden:

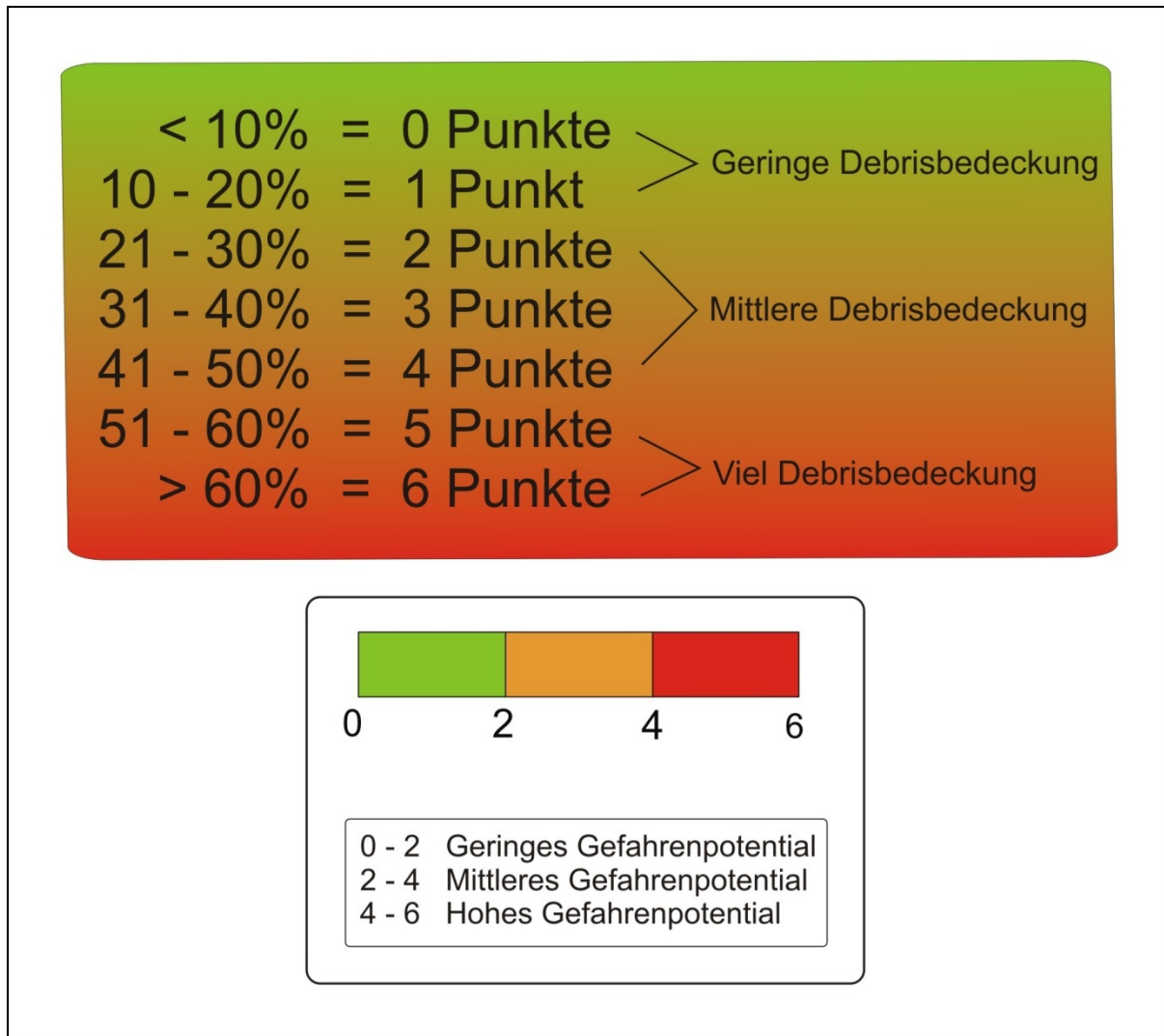


Abb. 7-14: Semiquantitative Beurteilung der Schutt- bzw. Debrisbedeckung des Gletschers.

Luggye I Gletscher → 18 % → geringe Debrisbedeckung → 1 Punkt → geringes Gefahrenpotential

7.5.4 Beurteilungsparameter IV: Hinweise auf Paläo-GLOF

Gletscherseeausbrüche in Bhutan sind in erster Linie aus Lunana bekannt. In dieser Region sind die größten und ausbruchsgefährdetsten Gletscherseen anzutreffen, welche bei einem möglichen Ausbruch das dicht besiedelte Punakhatal durch Hochwasser und Flutwellen gefährden (MEYER, 2001).

GLOF-Ereignisse Lunanas in der Vergangenheit (nach MOOL, 2001):

GLOF 1957: Der GLOF hatte Auswirkungen auf das Punakha-Wangdue Tal und zerstörte Teile von Punakha Dzong. GANSSE (1970) brachte die Flut mit dem Ausbruch des Tarina Tsho, West-Lunana, in Verbindung.

GLOF 1960: Die Flut zerstörte Teile von Punakha Dzong im Zuge des Ausbruches mehrerer Seen in Ost-Lunana. Laut Augenzeugenberichten hat das Ereignis fünf Tage andauert, jedoch gibt es keine weiteren Aufzeichnungen darüber.

GLOF des Luggye Tsho 1994: Der GLOF vom 7. Oktober 1994 kostete zahlreiche Menschenleben, brachte Armut in das Punakha-Wangdue Tal und zerstörte Teile von Dzongchung von Punakha Dzong (Abbildung 7-15).

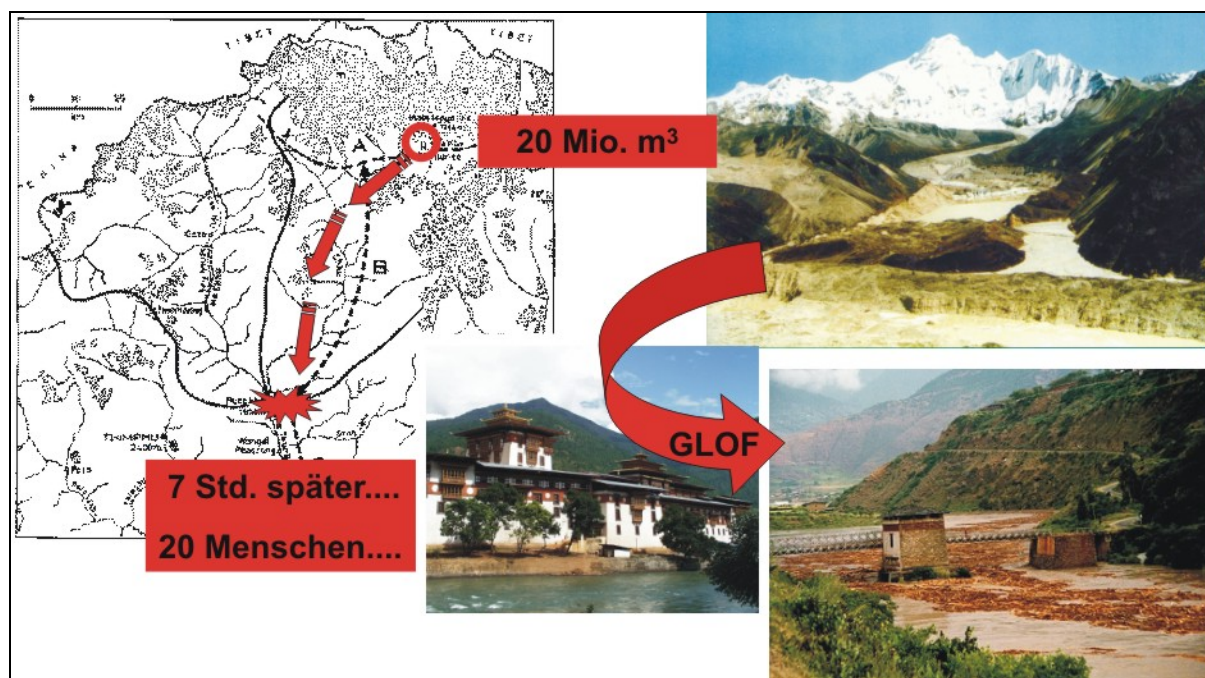


Abb. 7-15: Luggye Tsho GLOF (Bhutan / Lunana), 7. Oktober, 1994.

Bei der Beurteilung hinsichtlich Paläo-GLOF-Ereignissen, welche sich nicht in Form von Zahlen, sondern als Ereignisfrage ermitteln lässt, kann wie bereits in Kapitel 6.2.2 beschrieben, folgende Einteilung zur Begründung der Gefahrenstufe verwendet werden (Abb. 7-16):

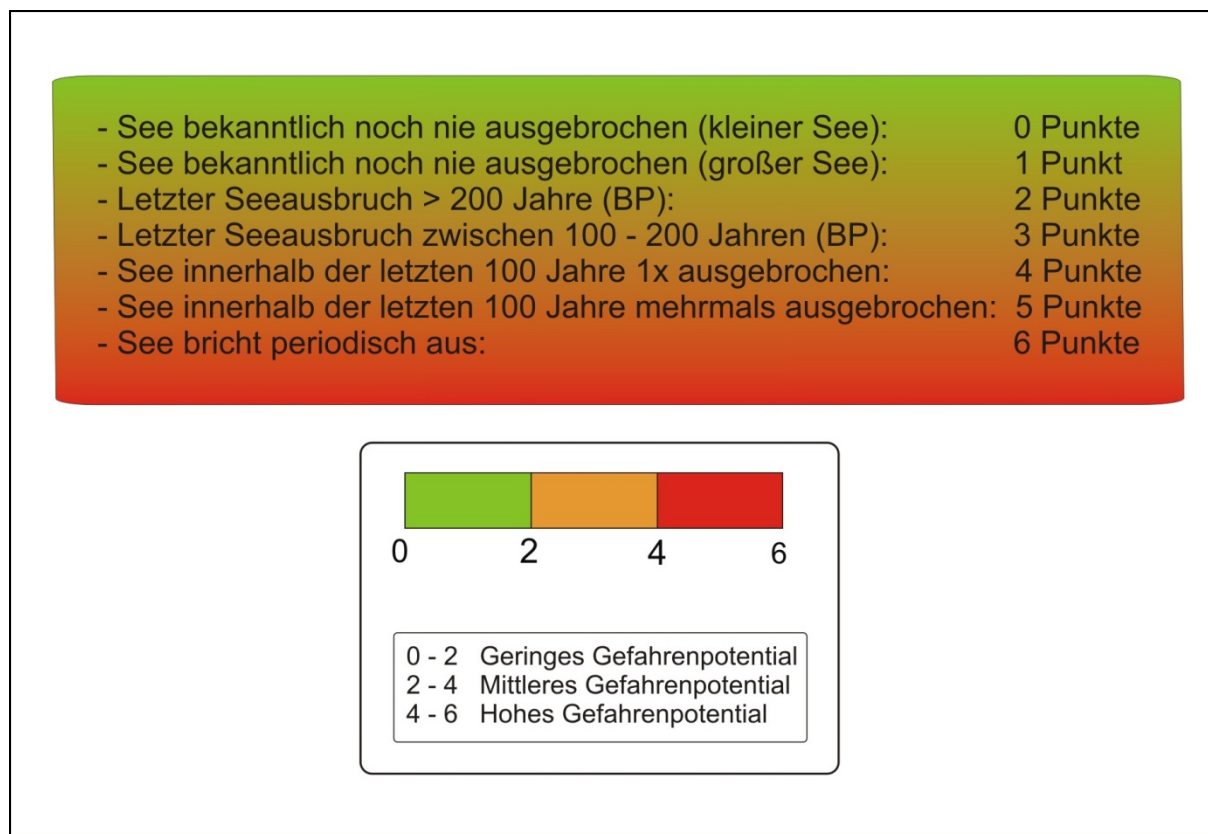


Abb. 7-16: Semiquantitative Beurteilung des Parameters "Hinweise auf Paläo-GLOF".

Der Luggye Tsho ist in den letzten 100 Jahren mindestens einmal ausgebrochen (7. Oktober 1994). 1960 erfolgte bereits ein GLOF-Ereignis durch den Ausbruch mehrerer Seen in Ost-Lunana. Da dieses Ereignis nur durch Augenzeugenberichten belegt ist, ist nicht auszuschließen, dass auch hier der Luggye-Gletschersee beteiligt war. Aufgrund dieser Annahme birgt der Luggye Tsho mit 5 Punkten ein hohes Gefahrenpotential.

Hinweise auf Paläo-GLOF → Ja, 1994, vielleicht 1960? → 5 Punkte → hohes Gefahrenpotential

7.5.5 Beurteilungsparameter V: GLOF von orographisch höher gelegenem See

Feldstudien des austro-bhutanesischen Forscherteams im Sommer 2000, zusammen mit Auswertungen von Satellitenbilddaten, haben ergeben, dass ein möglicher Ausbruch des orographisch höher gelegenen Druk Chung Tsho der Auslöser für den Ausbruch des Luggye Tsho 1994 war (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 12). Im

Zuge der Neubewertung des 1994-Luggye-Tsho-GLOF von LEBER & HÄUSLER et al., 2000, konnte festgestellt werden, dass während des Ausbruches des Druk Chung Tsho die plötzliche Einwirkung von 1,3 Millionen m³ an hoch konzentriertem, wassergesättigtem Moränenmaterial, eine enorme Surgewelle an der Front des Luggye Gletschers erzeugte. Dieser Impakt kann für die drei großen Flutwellen verantwortlich sein, welche den Luggye outlet durchbrochen und den Luggye-GLOF 1994 verursacht haben.

Abbildung 7-17 zeigt den Druk Chung Tsho im September 2000, sowie einen Vergleich von zwei Satellitenbilddaufnahmen des Gletschersees in den Jahren 1989 und 1999. Die SPOT PAN Szene aus dem Jahr 1989 zeigt eine signifikant höhere Seeuferlinie als die IRS-1D Szene, aufgenommen im Jahr 1999. Die rot gepunktete Linie, sowie die Pfeile des linken Bildes markieren die Seeuferlinie des Sees, vor seinem Ausbruch 1994 (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 16).

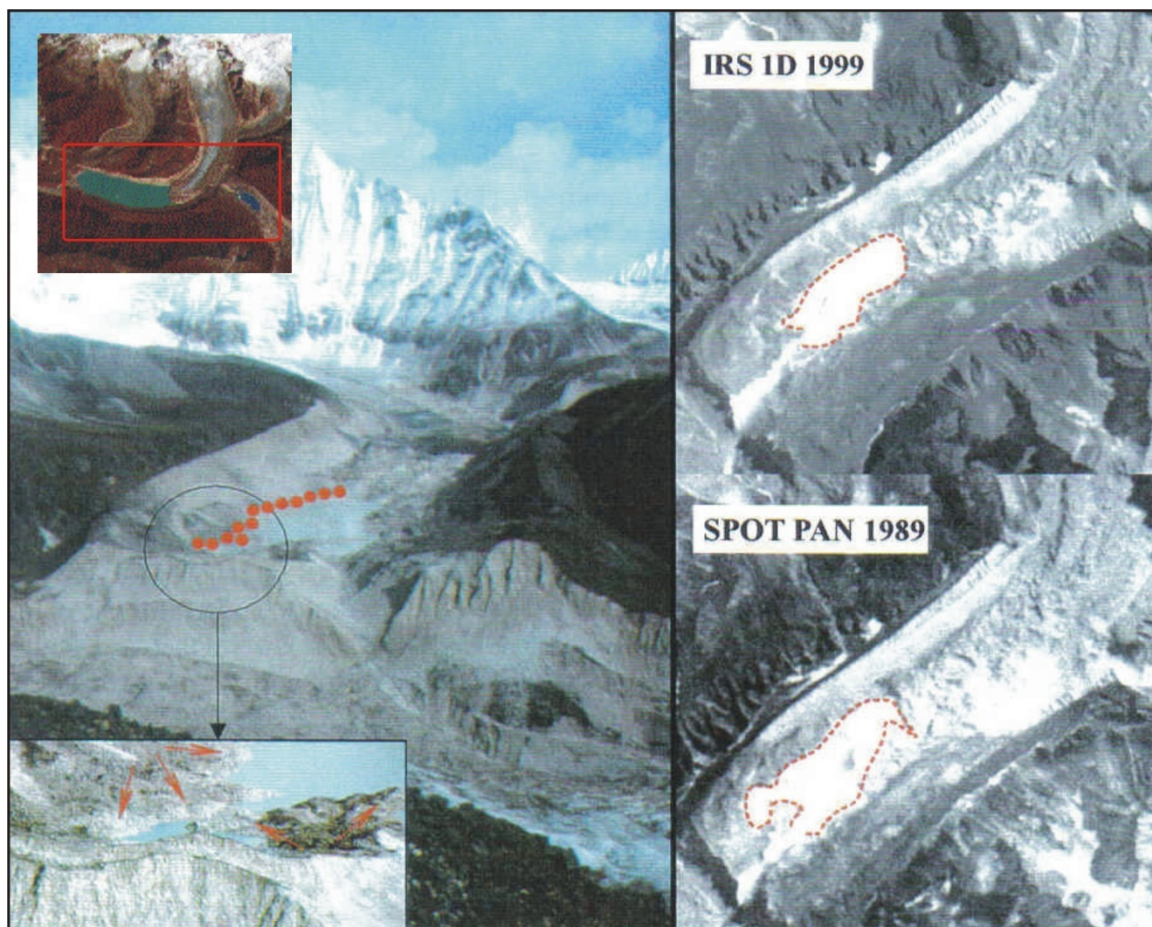


Abb. 7-17: Blick auf den Druk Chung Gletscher mit einem Teil seines 500 x 250 m großen Gletschersees, September 2000 (verändert nach LEBER & HÄUSLER et al., 2000).

Die Frage, ob im Bereich des Luggye Tsho ein orographisch höher gelegener Gletschersee vorhanden ist, welcher einen sogenannten „trigger-Effekt“ auf den Luggye Tsho haben kann, lässt sich somit eindeutig mit „ja“ beantworten.

Die Bewertung erfolgt, bei der Fragestellung nach einem höher gelegenen See, nicht auf regionaler, sondern individueller Ebene. Dies bedeutet, dass bei der Beurteilung nicht das komplette Inventar an Gletscherseen einer Region zusammengefasst, in Gruppen geteilt und bewertet wird, sondern der Fokus nur auf den speziell zu bewertenden See gelegt wird. Die Punktevergabe für die Gefahrenstufe fällt in diesem Fall folgendermaßen aus (Abb. 7-18):

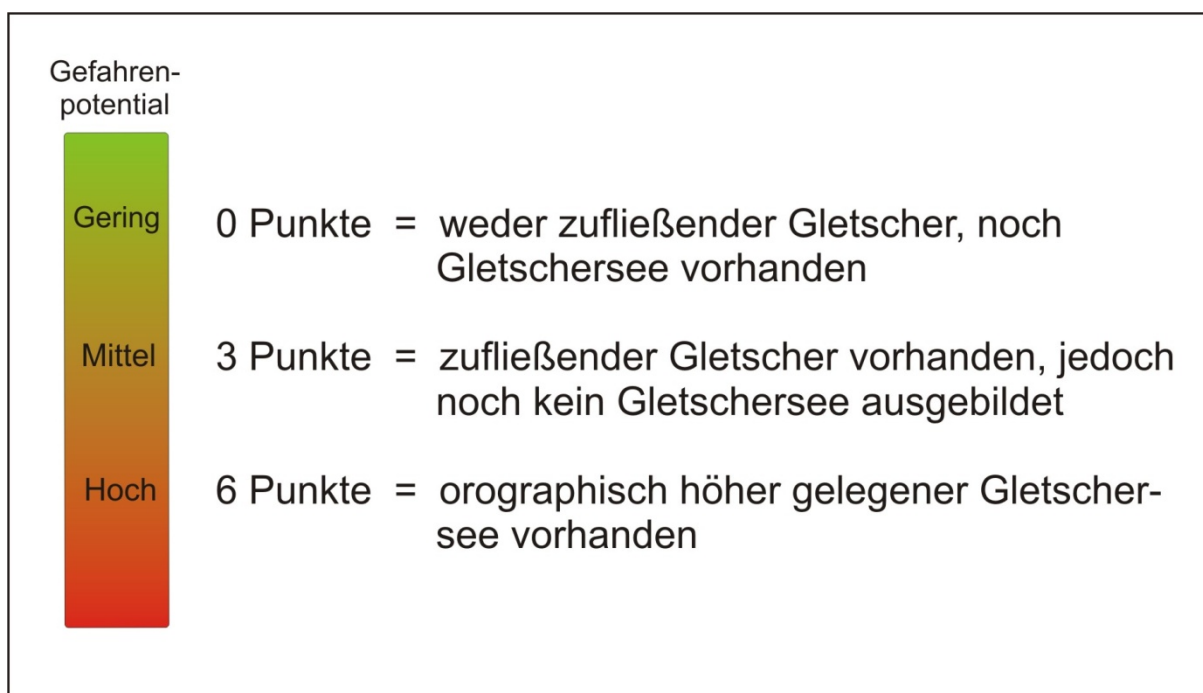


Abb. 7-18: Semiquantitative Beurteilung des Parameters „GLOF von orographisch höher gelegenen See“.

Für den Luggye Tsho bedeutet dies die Vergabe von 6 Punkten. Er erhält hinsichtlich des Parameters „GLOF von orographisch höher gelegenen See“ die Gefahrenstufe „Hoch“.

GLOF von orographisch höher gelegenen See → ja, Druk Chung Tsho → 6 Punkte → hohes Gefahrenpotential

7.5.6 Beurteilungsparameter VI: Teil einer Seenkette

Der Beurteilungsparameter VI „Teil einer Seenkette“ wirft wieder eine „ja/nein-Frage“ auf. Mit einem Blick auf Abbildung 7-19 beantwortet sich die Frage von selbst:

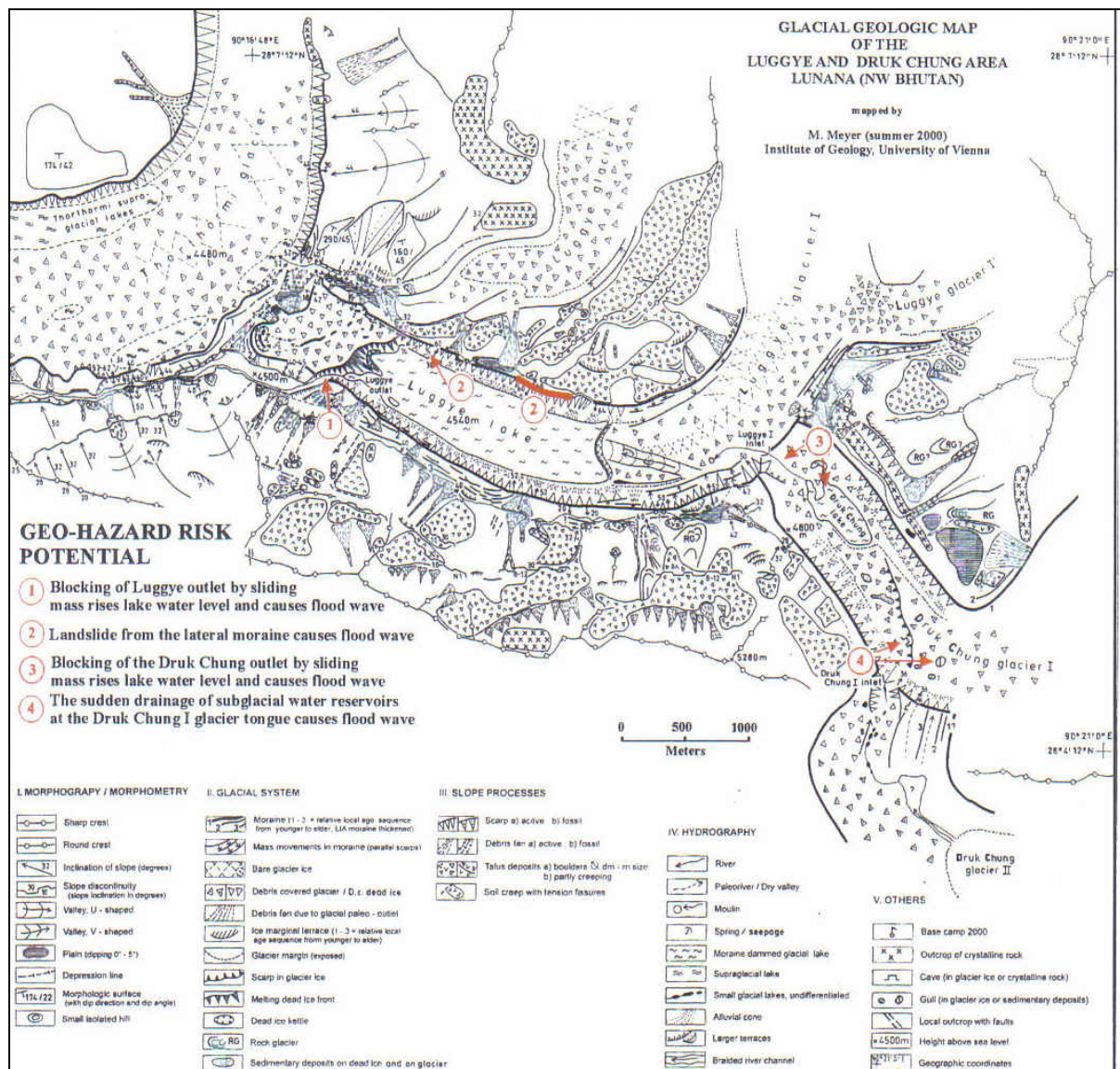


Abb. 7-19: Glazialgeologische Karte des Luggye und Druk Chung Gebietes, Lunana (NW Bhutan) mit den GLOF-Risikopotentialen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 22, Fig. 4.1.1).

Der Luggye-Gletschersee ist Teil einer Seenkette in Ost-Lunana (NW-Bhutan), wobei jene Seen das größte Gefahrenpotential aller inventarisierten Gletscherseen Bhutans (MOOL et al., 2001) für einen Ausbruch bergen. Gemeinsam mit den supraglazialen Gletscherseen des Thorthormi Gletschers im Westen und dem orographisch höher

gelegenen Druk Chung Tsho im Osten, sowie den subglazialen Wasserreservoirs des Druk Chung I Gletschers (LEBER & HÄUSLER et al., 2000), bildet der Luggye Tsho eine zusammenhängende Kette an Seen, welche durch bestimmte „trigger-Mechanismen“ in einem „worst case scenario“ ausbrechen können.

Erläuterung der möglichen „trigger-Mechanismen“ 4 – 1 (Abb. 7-19):

- 4) Drainage subglazialer Wasserreservoirs in der Gletscherzunge des Druk Chung I.
- 3) Blockierung des Druk Chung outlet durch Massenbewegung (Rutschung) lässt den Seewasserspiegel ansteigen und verursacht eine Flutwelle.
- 2) Rutschung am Innenhang der Lateralmoräne kann Flutwelle verursachen.
- 1) Blockierung des Luggye outlets durch rutschende Massen lässt Seewasserspiegel steigen und kann Flutwelle verursachen.

Das „worst case scenario“, nach LEBER & HÄUSLER et al., 2000, beschreibt als mögliche zukünftige Prognose eine Kettenreaktion, wobei alle 4 beschriebenen „trigger-Mechanismen“ aufeinander einwirken.

Aufgrund der Tatsache, dass der Luggye Tsho Teil einer Seenkette ist, dieser bereits bei seinem letzten Ausbruch 1994 unter Einwirkung der Drainage des Druk Chung Tsho eine verheerende Flutwelle hervorgerufen hat, und des weiteren Modellrechnungen für verschiedene Szenarien angestellt wurden (siehe LEBER & HÄUSLER et al., 2000, LEBER et al., 2002), kann das Gefahrenpotential, bezogen auf den Parameter „Teil einer Seenkette“ als „hoch“ eingestuft werden.

Teil einer Seenkette → ja → 6 Punkte → hohes Gefahrenpotential

7.5.7 Beurteilungsparameter VII: Seeabfluss – Outlet

Der Luggye Tsho wurde im Zuge einer Feldstudie im Jahr 2000 hinsichtlich seines Abflusskanals detailliert untersucht (LEBER & HÄUSLER et al., 2000).

Dies ermöglicht im Zuge der vorliegenden Masterarbeit eine direkte semiquantitative Beurteilung des Gefahrenpotentials durch den Luggye Tsho Outlet (Abb. 7-20). Für eine vergleichende Quantifizierung müssen sowohl die durchschnittlichen jährlichen Abflussraten aller inventarisierten Gletscherseen, als auch deren durchschnittliche Outlet-Breiten bekannt sein. Durch diese Erkenntnis wird an dieser Stelle wiederum die Wichtigkeit der direkten Arbeit im Gelände hervorgehoben. Erst durch detaillierte Feldmessungen können die Datenbanken ergänzt und genauere Beurteilungen ermöglicht werden.

Die Entwässerung des Luggye Tsho erfolgt durch den Bereich der linkslateralen Seitenmoräne, über einen Abflusskanal (Outlet) am südwestlichen Seeende. PAYER (2006) beschreibt den Kanal durch sein vom GLOF 1994 geprägtes, charakteristisches, U-förmiges Profil.

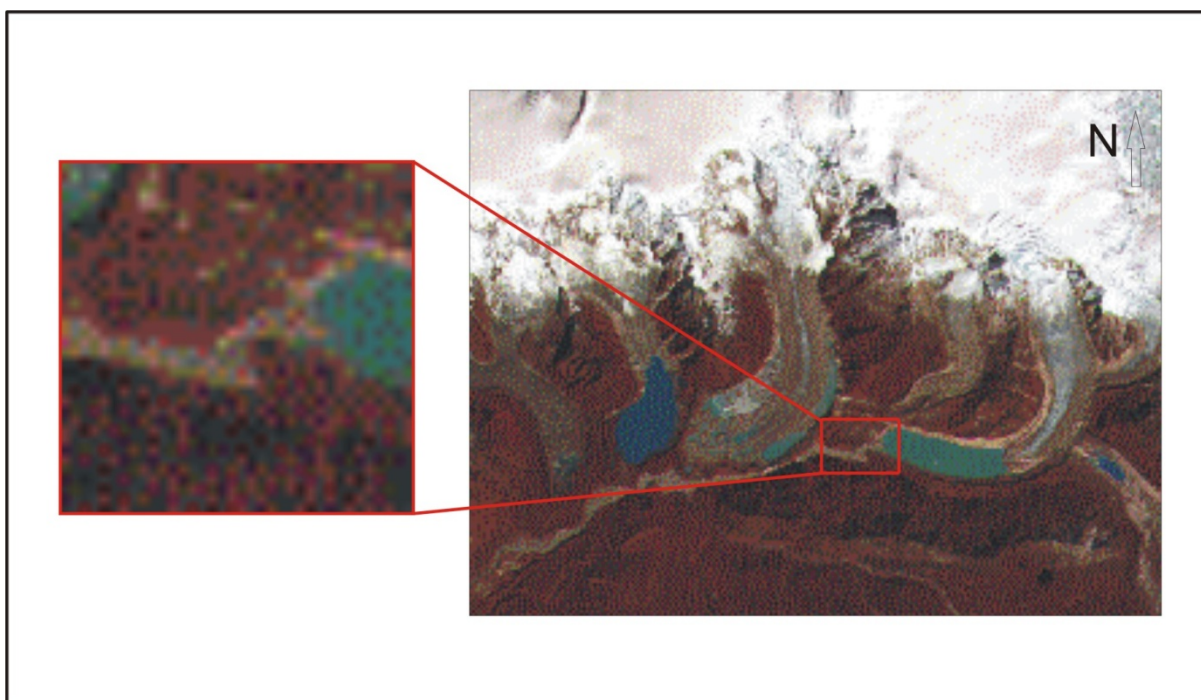


Abb. 7-20: Luggye Tsho Abflusskanal (Outlet).

Die Breite des Kanals variiert von 6,2 m – 16,2 m, mit einer durchschnittlichen Breite von 12 m (LEBER et al., 2002, S. 85). Er kann in 4 Abschnitte mit verschiedenen morphologischen Charakteristika eingeteilt werden (siehe LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 39 ff).

LEBER & HÄUSLER et al. (2000) berechneten für den Luggye Tsho Outlet einen durchschnittlichen jährlichen Abfluss von $4,8 \text{ m}^3/\text{sec}$ (Abb. 7-21).

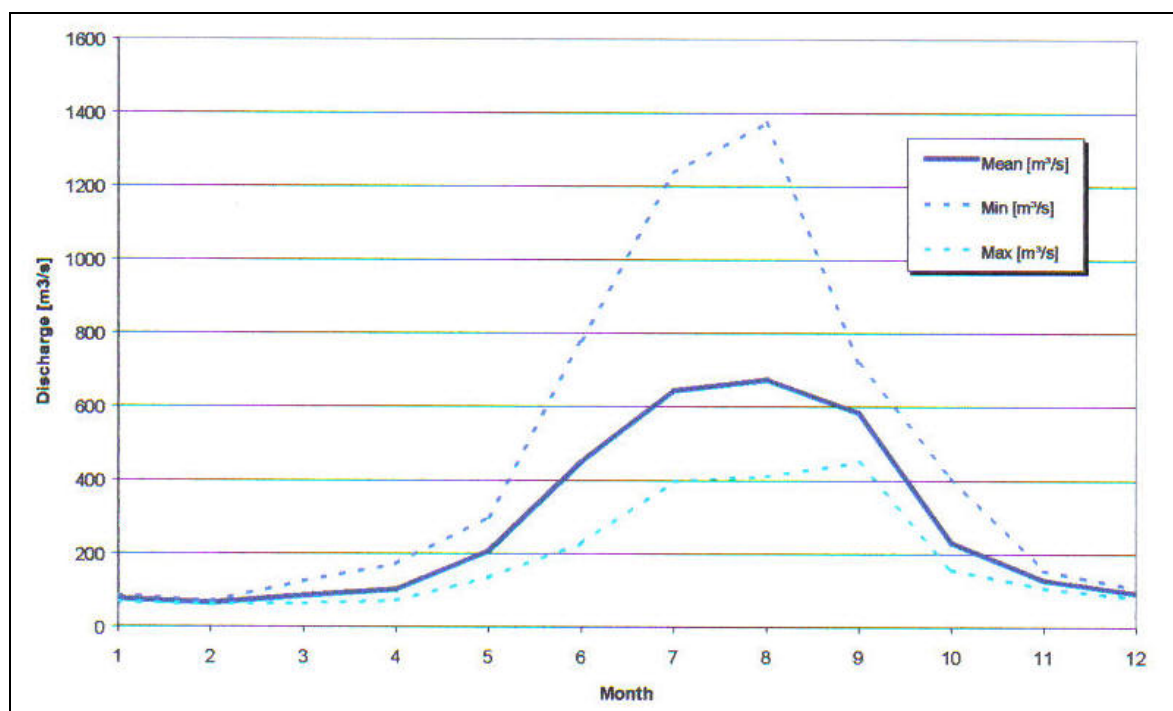


Abb. 7-21: Durchschnittlicher monatlicher Abfluss, gemessen bei der Station Wangdi Phodrang, 1997 – 1999 (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 35, Fig. 5.3.3).

Die übersteilte linke Lateralmoräne im Bereich des Abflusskanals ist seit dem Einschnitt durch den GLOF 1994 sehr instabil. Stabilitätsberechnungen zeigen, dass dieser Bereich das größte Risiko für eine plötzliche Massenbewegung birgt, welche den Outlet blockieren kann (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 55).

Dammbruchsimulationen, welche im Zuge der Feldstudie von LEGER & HÄUSLER et al., (2000) durchgeführt wurden, zeigen, dass ein erneuter GLOF mit einem Spitzenabfluss von $100 \text{ m}^3/\text{sec}$ einen wesentlich geringeren Impact, und zwar nur 8 – 10 % des Ausmaßes des GLOF 1994, auf die Täler flussabwärts hätte.

Nach LEGER et al. (2002) zeigt der Abflusskanal im Vergleich zu den Messungen im Jahr 2000 (LEBER & HÄUSLER et al., 2000) keine signifikanten Änderungen durch Erosion oder Aggradation. Weiters können in einem Vergleich zum Jahr 2000 das Flussbett des Kanals, sowie die Seitenhänge als stabil eingestuft werden –

ausschließlich der orographisch höchste rechte Seitenhang zeigt Rutschungen in Folge von Schmelzprozessen des eingelagerten Eises (LEBER et al., 2002, S. 84).

Die Bewertung kann nach folgenden Kriterien erfolgen (Abb. 7-22):

Punkte		Gefahrenpotential
0	Breiter Abfluss, stabiles Flussbett	Niedrig
2	Schmaler Abfluss, stabiles Flussbett	Mittel
4	Breiter Abfluss, instabiles Flussbett, instabile Seitenhänge	Mittel
6	Schmaler Abfluss, instabiles Flussbett, instabile Seitenhänge	Hoch

Abb. 7-22: Semiquantitative Bewertung des Abflusskanals (Outlet).

Luggye Tsho Outlet → relativ breiter Abflusskanal mit durchschnittlich 12 m → Flussbett und Seitenhänge stabil → nur orographisch höchster rechter Seitenhang zeigt Rutschung → bei einem Spitzenabfluss von 100 m³/sec geringer Impact → 1 Punkt → geringes Gefahrenpotential

7.5.8 Beurteilungsparameter VIII / IX: Linke und rechte Lateralmoräne

Die Beurteilungskriterien für das Gefahrenpotential der Lateralmoränen basieren auf den Untersuchungen von LEBER & HÄUSLER et al. (2000). Zusammenfassend werden in dem Technical Report für die linke und rechte Lateralmoräne des Luggye Tsho folgende Aussagen getroffen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 27 ff):

Rechte Lateralmoräne

Geomorphologische Kartierungen belegen aktive Böschungen an der rechten Lateralmoräne des Luggye Tsho, nahe der Gletscherzunge. Da es sich in diesem Bereich um einen Steilhang handelt, kann eine mächtige Massenbewegung in den Luggye Tsho, eine gewaltige Flutwelle erzeugen.

Die Hangstabilität der rechten Lateralmoräne wurde unter anderem nach der Methode von BISHOP (1955) berechnet (Abb. 7-23). Der Graph zeigt einen Sicherheitsfaktor von 1.1, wonach die Moräne nach den internationalen Standards als instabil bewertet werden kann. Nach den Beurteilungskriterien der vorliegenden Arbeit kann die rechte Lateralmoräne somit mit 6 Punkten in die Gefahrenklasse „hohes Gefahrenpotential“ eingestuft werden.

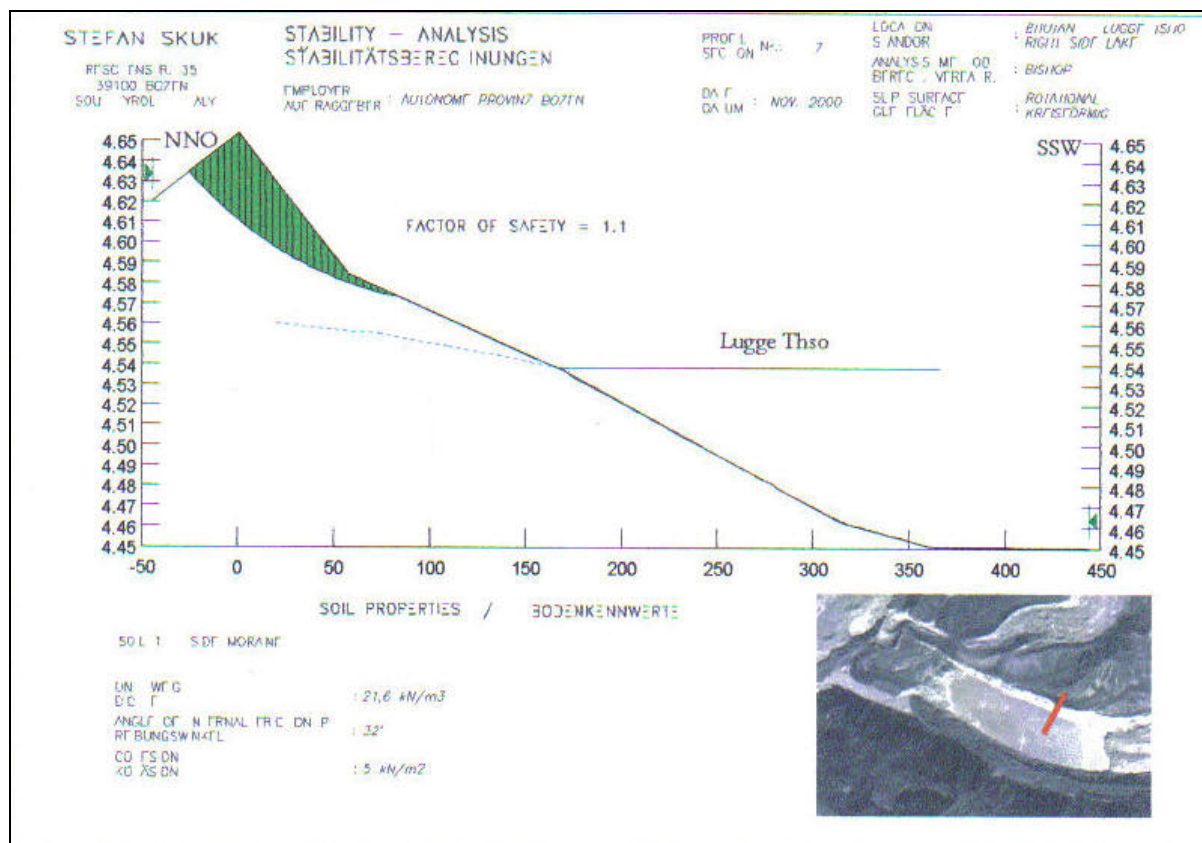


Abb. 7-23: "SLOPE 2-D"-Graph für die Stabilität der rechten Lateralmoräne des Luggye Tsho (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 29, Fig. 5.1.2).

Linke Lateralmoräne

PAYER (2006) beschreibt an den Außenseiten der seeindämmenden End- und Lateralmoränen in Ost-Lunana zahlreiche Quellen mit unterschiedlichen Schüttungen, von wenigen l/sec bis zu mehreren m³/sec (PAYER, 2006, S. 60 ff). Diese Quellen werden auch als „Seepages“ bezeichnet.

Die Moränenquellen lassen sich in vier Hauptgruppen A – D einteilen (siehe PAYER, 2006, S. 79 ff), wobei für den Luggye Tsho den Moränenquellen der Gruppe C große Bedeutung zukommt.

„Durch Aufweichungsprozesse und Erosion kann der obere Teil der Moräne als Massenrutschung in den Luggye See gleiten und stellt lokal ein großes, insgesamt für einen Gletscherseeausbruch des Luggye Gletschersees aber geringes Gefährdungspotential dar.“ (PAYER, 2006, S. 65).

**Einstufung der linken Lateralmoräne in die Gefahrenstufe „geringe Gefahr“ mit
1 Punkt.**

7.5.9 Beurteilungsparameter X: Anwesenheit von Toteiskörpern

Hinsichtlich der Moränenstabilität / -instabilität wurden im Bereich des Luggye Tsho 5 geoelektrische Profile gemessen (Abb. 7-24).

Die Messungen ergaben, dass große Bereiche des rechten Seitenhanges des Abflusskanals von einem mehr als 60 m dicken zusammenhängenden Toteiskörper, der von mehr als 20 m Moränenschutt bedeckt ist, unterlagert wird (LEBER et al., 2002, S. 70).

Abbildung 7-24 lässt erkennen, dass vor allem im Bereich der Stirnmoräne ein mächtiger, zusammenhängender Toteiskörper vorhanden ist (profile 3), die rechte Lateralmoräne des Sees von kleineren isolierten Toteislinsen unterlagert ist (profile 4) und im Bereich des linken Seitenhanges des Outlets keine Toteiskörper existieren (profile 2).

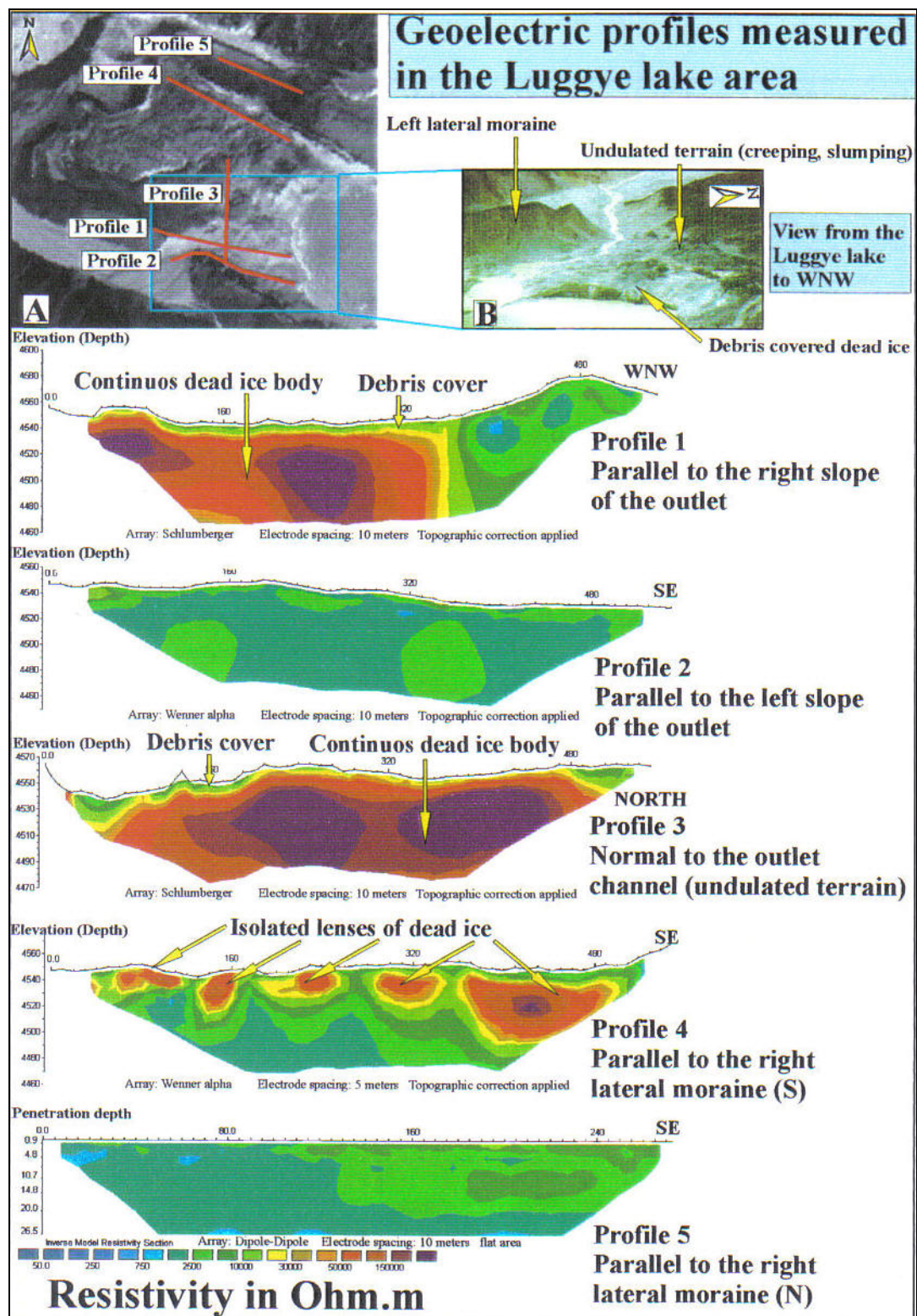


Abb. 7-24: Geophysikalische Messungen im Bereich des Luggye Tsho Outlet (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 34, Figure 5.3.2).

Im Zuge des Abschmelzens des Toteiskörpers unterhalb des orographisch rechten Seitenhanges des Luggye Tsho Outlets, kann es zu Rutschungs- und Kriechprozessen mit berechneten Raten von 10 cm/Tag kommen. Für einen Abfluss

im Outletbereich von 2,0 – 3,5 m³/sec würde das eingetragene Sedimentmaterial abtransportiert werden und somit keine Blockierung des Outlets entstehen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 3).

Eine Betrachtung von Profil 3 lässt darauf schließen, dass ein Abschmelzen des zusammenhängenden Toteiskörpers in diesem Stirnbereich ein höheres Gefahrenpotential mit sich trägt.

Zusammenfassend kann das Gefahrenpotential für den Luggye Tsho hinsichtlich der vorhandenen Toteiskörper innerhalb seiner Moränen als mittel bis hoch eingestuft werden. Aufgrund der besonderen Gefährdung durch den zusammenhängenden Toteiskörper im Stirnbereich fällt das endgültige Ergebnis von 5 Punkten in die Kategorie „hohes Gefahrenpotential“.

8 Gesamtbeurteilung der Einzelergebnisse

Ost-Lunana ist Heimat der größten Gletscherseen des Königreiches Bhutan und birgt somit ein sehr hohes Gefahrenpotential hinsichtlich Gletscherseeausbrüchen. Durch die Auswertung und semiquantitative Beurteilung von einzelnen Parametern, welche auslösende Mechanismen für einen GLOF darstellen können, ist eine quantitative Gesamtbeurteilung des Systems Gletschersee möglich.

Zusammenfassend konnten in Bezug auf eine quantitative Ansatzbeurteilung für den Luggye Tsho folgende Ergebnisse im Einzelnen erzielt werden:

- In einer Gegenüberstellung mit 549 inventarisierten Gletscherseen im Pho-Chhu-Einzugsgebiet fällt der Luggye Tsho mit einer Fläche von 769799,72 m² in die Kategorie der „potentiell gefährlichen“ großen Seen in Bhutan und birgt mit 6 vergebenen Punkten hohes Gefahrenpotential hinsichtlich eines Gletscherseeausbruches.
- Das Gletschereinzugsgebiet des Luggye I Gletschers, welcher in den Luggye Tsho entwässert, hat mit einer Fläche von 6,3 km² Tendenz zu mittlerem Gefahrenpotential und erhält 2 Punkte. In Bezug auf die Gletschergröße hat der Luggye I Gletscher eine Schuttbedeckung von 18%. Dies ist weniger als ein Viertel der Gesamtgröße, weshalb die Beurteilung hinsichtlich der Debrisbedeckung mit 1 Punkt auf ein niedriges Gefahrenpotential hindeutet.
- In Bezug auf GLOF-Ereignisse in der Vergangenheit, sowie mögliche GLOF-Ereignisse von Nachbarseen, lässt sich der Luggye-Tsho, aufgrund seines verheerenden Ausbruches am 7. Oktober 1994, in Folge einer Kettenreaktion durch den orographisch höher gelegenen Druk Chung Tsho, in die höchste Gefahrenklasse einstufen.
- Aufgrund seines relativ breiten Abflusskanals, würde ein GLOF mit einem Spitzenabfluss von 100 m³/sec geringe Auswirkungen auf die Täler flussabwärts haben (LEBER & HÄUSLER et al., 2000). Zwar zeigt der

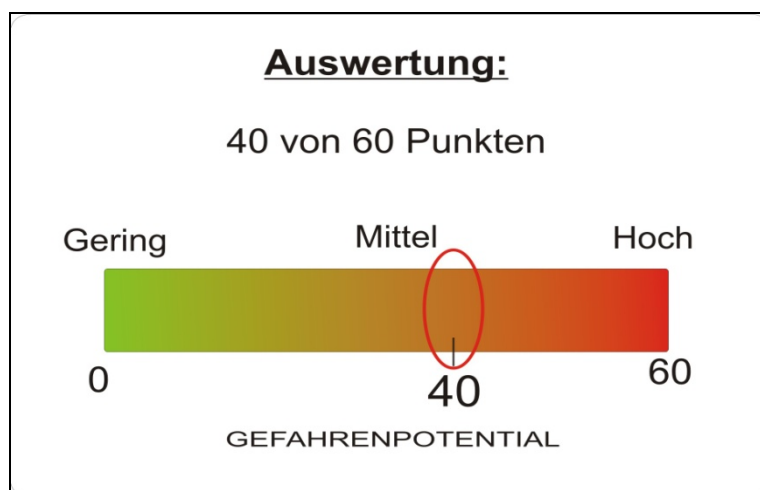
orographisch höchste rechte Seitenhang im Outletbereich Rutschungen in Folge von Schmelzprozessen (LEBER et al., 2002), jedoch können das Flussbett und die Seitenhänge generell als stabil eingestuft und der Luggye Tsho Outlet mit 1 Punkt mit geringem Gefahrenpotential klassifiziert werden.

- Geophysikalische Messungen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, LEBER et al., 2002) lassen einen zusammenhängenden Toteiskörper vor allem im Bereich der Stirnmoräne erkennen, was dem Kriterium „Anwesenheit von Toteiskörpern“ ein hohes Gefahrenpotential mit 5 Punkten zuweist. Rutschungsprozesse innerhalb der rechten Lateralmoräne, welche den Luggye Tsho umrahmt, geben den Anstoß für die Vergabe von 6 Punkten hinsichtlich des Gefahrenpotentials. Die linke Lateralmoräne birgt lediglich 2 ungefährliche Moränenquellen, weshalb das Gefahrenpotential gering ausfällt.

Die Gesamtbeurteilung der Einzelparameter ist in Tabelle 8-1 dargestellt und fällt wie folgt aus:

	Beurteilungs-kriterien	Prozessbeurteilung	Gefahren-potential	Bewertung / Punkte
I	Stadium der See-entwicklung (Fläche)	Proglazialer See, große Fläche, (großes Volumen)	Hoch	6
II	Gletscher-Einzugsgebiet	Mittelgroßes Einzugsgebiet	Mittel	2
III	Debrisbedeckung des Gletschers	Geringe Debrisbedeckung	Gering	1
IV	Hinweise auf Paläo-GLOF	Ja, Ausbruch 1994	Hoch	6
V	GLOF von höher gelegenem See	Ja, Druk Chung Tsho	Hoch	6
VI	Teil einer Seenkette	Ja	Hoch	6
VII	See-Abflusskanal (Outlet)	Breiter Abflusskanal	Gering	1
VIII	Rechte Lateralmoräne	Instabil, Abrisskanten	Hoch	6
IX	Linke Lateralmoräne	Ungefährliche Moränenquellen	Gering	1
X	Toteiskörper	Zusammenhängender Toteiskörper in Stirn- moräne	Hoch	5
			Punkte gesamt:	40

Tab. 8-1: Quantitative Gesamtbeurteilung des Gefahrenpotentials eines moränengedämmten Gletschersees am Beispiel des Luggye Tsho (Ost-Lunana)



Mit insgesamt 40 vergebenen Punkten kann der Luggye Tsho in den orangenen Gefahrenbereich eingestuft werden und birgt somit mittleres bis hohes Gefahrenpotential.

Die im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelte quantitative Beurteilung potentiell ausbruchsgefährdeter Gletscherseen hat am Beispiel des Luggye Tsho erstmals theoretische Anwendung gefunden. Für zukünftige Anwendungen ist es wichtig, das Konzept zu erweitern und Ansätze zu entwickeln, wie Änderungen der einzelnen Umweltfaktoren am Effizientesten in der Gesamtbewertung verarbeitet werden können.

Die Auswirkungen des Climate Change während der vergangenen Jahrzehnte auf Gletscher in Hochgebirgsregionen werden durch das vermehrte Auftreten von verheerenden Gletscherseeausbrüchen direkt spürbar. So lange sich Gletscher im Rückzugsstadium befinden und Gletscherseen an Größe und Volumen zunehmen, wird die Gefahr von Gletscherseeausbrüchen anwesend sein.

Es ist daher wichtig, das Inventar an Gletscherseen sowohl auf regionaler, sowie auf globaler Ebene, mit Messdaten zu ergänzen, um das Gefahrenpotential von Gletscherseen eindeutiger quantifizieren und klassifizieren zu können. Durch zukünftige Expeditionen kann ausfindig gemacht werden, ob Gletscherseen regelmäßiges monitoring und präventive bautechnische Maßnahmen benötigen, um GLOFs zu verhindern. Vor allem in unzugänglichen Gebieten ist der Einsatz von Fernerkundungsdaten für eine regelmäßige Beobachtung und Überwachung notwendig. Mit Hilfe der quantitativen Beurteilung für potentiell ausbruchsgefährdete Gletscherseen soll ein erster Ansatz in Richtung Konzeption getan sein, um Gletscherseen auf regionaler Ebene nach ihrer Gefährdung klassifizieren zu können und somit dem Ziel, Gletscherseeausbrüche besser vorhersehen, mindern, oder sogar verhindern zu können, einen Schritt näher zu sein.

9 Definitionen (Quelle: UNISDR 2009) und Abkürzungen

Die unter Anführungszeichen gesetzten Definitionen wurden wörtlich aus den Konzepten zur Gefahrenminderung der „United Nations International Strategy for Disaster Reduction“ (UNISDR, 2009), sowie der vorangegangenen Version (UNISDR, 2007) zitiert. Die UNISDR vergleicht zum Teil Definitionen aus dem „4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC, 2007), sowie der „United Nations Framework Convention on Climate Change“ (UNFCCC).

Climate Change

“(a) The Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC) defines climate change as: ‘a change in the state of the climate that can be identified (e.g., by using statistical tests) by changes in the mean and/or the variability of its properties, and that persists for an extended period, typically decades or longer. Climate change may be due to natural internal processes or external forcings or to persistent anthropogenic changes in the composition of the atmosphere or in land use’.”

“(b) The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) defines climate change as ‘a change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity that alters the composition of the global atmosphere and which is in addition to natural climate variability observed over comparable time periods’.”

Geological hazard

“Geological process or phenomenon that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage.”

“Comment: Geological hazards include internal earth processes, such as earthquakes, volcanic activity and emissions, and related geophysical processes such as mass movements, landslides, rockslides, surface collapses, and debris or mud flows. Hydrometeorological factors are important contributors to some of these processes. Tsunamis are difficult to categorize; although they are triggered by

undersea earthquakes and other geological events, they are essentially an oceanic process that is manifested as a coastal water-related hazard.”

Geographic Information System – GIS (UNISDR, 2007)

“Analysis that combine relational database with spatial interpretation and outputs often in form of maps. A more elaborate definition is that of computer programmes for capturing, storing, checking, integrating, analyzing and displaying data about the earth that is spatially referenced. Geographical information systems are increasingly being utilized for hazard and vulnerability mapping and analysis, as well as for the application of disaster risk management measures.”

GLOF

= Glacier Lake Outburst Flood (auch: Glacial Lake Outburst Flood)

Greenhouse gas (GHG)

“Gaseous constituents of the atmosphere, both natural and anthropogenic, that absorb and emit radiation of thermal infrared radiation emitted by the Earth's surface, the atmosphere itself, and by clouds.”

“Comment: This is the definition of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The main greenhouse gases (GHG) are water vapour, carbon dioxide, nitrous oxide, methane and ozone.”

Hazard

“A dangerous phenomenon, substance, human activity or condition that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage.”

“Comment: The hazards of concern to disaster risk reduction as stated in footnote 3 of the Hyogo Framework are ‘... hazards of natural origin and related environmental and technological hazards and risks.’ Such hazards arise from a variety of geological, meteorological, hydrological, oceanic, biological, and technological sources, sometimes acting in combination. In technical settings, hazards are described

quantitatively by the likely frequency of occurrence of different intensities for different areas, as determined from historical data or scientific analysis.”

Hazard analysis (UNISDR, 2007)

“Identification, studies and monitoring of any hazard to determine its potential, origin, characteristics and behavior.”

Mitigation

“The lessening or limitation of the adverse impacts of hazards and related disasters.”

Natural hazards

“Natural process or phenomenon that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage.”

“Comment: Natural hazards are a sub-set of all hazards. The term is used to describe actual hazard events as well as the latent hazard conditions that may give rise to future events. Natural hazard events can be characterized by their magnitude or intensity, speed of onset, duration, and area of extent. For example, earthquakes have short durations and usually affect a relatively small region, whereas droughts are slow to develop and fade away and often affect large regions. In some cases hazards may be coupled, as in the flood caused by a hurricane or the tsunami that is created by an earthquake.”

Risk

“The combination of the probability of an event and its negative consequences.”

“Comment: This definition closely follows the definition of the ISO/IEC Guide 73. The word “risk” has two distinctive connotations: in popular usage the emphasis is usually placed on the concept of chance or possibility, such as in “the risk of an accident”; whereas in technical settings the emphasis is usually placed on the consequences, in terms of “potential losses” for some particular cause, place and period. It can be noted that people do not necessarily share the same perceptions of the significance and underlying causes of different risks.”

Risk assessment/analysis

“A methodology to determine the nature and extent of risk by analysing potential hazards and evaluating existing conditions of vulnerability that together could potentially harm exposed people, property, services, livelihoods and the environment on which they depend.”

Vulnerability

“The characteristics and circumstances of a community, system or asset that make it susceptible to the damaging effects of a hazard.”

Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei Ao. Univ.-Prof. Dr. Hermann Häusler für seine großartige Betreuung während meiner Masterarbeit und einzigartige Unterstützung im Laufe meines gesamten Studiums bedanken. Als Mentor ist er mir in den letzten Jahren immer gerne zur Seite gestanden und hat es mir ermöglicht, meinen Kindheitstraum, im Bereich der Geohazardforschung zu arbeiten, zu verwirklichen. – Danke Hermann für dein Vertrauen in meine Fähigkeiten!

Ein Dankeschön gebührt an dieser Stelle auch Dr. Marcel Frehner, der mir hinsichtlich der Quantifizierung im Naturgefahrenbereich hilfreiche fachliche Unterstützung geboten hat.

Besonderer Dank geht an meine großartige Familie, vor allem an meine Eltern, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg mit den wichtigsten Mitteln unterstützt haben: eine große Portion Liebe, jede Menge Geborgenheit und viel Geduld und Verständnis. Vielen Dank, ich liebe euch.

An meine Freunde, Studienkollegen, Verwandten und Nachbarn auch ein großes Dankeschön für die vielen motivierenden Worte und fröhlichen Zeiten, die wir neben meinem Studium miteinander verbracht haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Martinskeller-Familie, die für meine Entwicklung in den letzten Jahren von großer Bedeutung war und weiterhin eine wertvolle Bereicherung in meinem Leben darstellen wird.

Und ich danke Gott dafür, dass er mir die Kraft und Ausdauer gegeben hat, Arbeit, Studium und Privates unter einen Hut zu bekommen und dies immer mit einem Lächeln im Gesicht und viel Freude zu meistern.

Anhang 1

In Anhang 1 sind die inventarisierten Gletscherseen im Pho Chhu Basin aufsteigend nach ihrer Fläche aufgelistet. Die Daten wurden aus MOOL et al. (2001, S. 174 – 187) entnommen. Insgesamt sind im Pho Chhu Basin 549 Gletscherseen verzeichnet. Ihre Flächen reichen von 1065,17 m² bis 769799,72 m².

Lake Number	Total Area
Pho_gl 515	1065,17
Pho_gl 516	1517,56
Pho_gl 510	1562,79
Pho_gl 103	1571,02
Pho_gl 296	1636,82
Pho_gl 470	1731,41
Pho_gl 244	2072,76
Pho_gl 436	2105,66
Pho_gl 472	2105,66
Pho_gl 451	2138,56
Pho_gl 311	2146,79
Pho_gl 317	2146,79
Pho_gl 508	2155,01
Pho_gl 497	2212,59
Pho_gl 509	2237,26
Pho_gl 522	2303,07
Pho_gl 539	2364,75
Pho_gl 343	2574,5
Pho_gl 524	2590,95
Pho_gl 514	2632,08
Pho_gl 408	2640,3
Pho_gl 282	2689,65
Pho_gl 251	2714,33
Pho_gl 349	2726,67
Pho_gl 498	2755,45
Pho_gl 431	2903,51
Pho_gl 456	2919,96
Pho_gl 100	2944,63
Pho_gl 315	2961,08

Pho_gl 304	3660,23
Pho_gl 168	3676,68
Pho_gl 476	3721,92
Pho_gl 351	3771,27
Pho_gl 473	3841,18
Pho_gl 511	3849,41
Pho_gl 475	3853,52
Pho_gl 548	4030,37
Pho_gl 44	4096,17
Pho_gl 40	4116,73
Pho_gl 273	4141,41
Pho_gl 468	4174,31
Pho_gl 346	4182,53
Pho_gl 490	4194,87
Pho_gl 260	4203,09
Pho_gl 341	4211,32
Pho_gl 298	4248,33
Pho_gl 426	4252,45
Pho_gl 459	4314,14
Pho_gl 443	4322,36
Pho_gl 421	4338,81
Pho_gl 449	4363,49
Pho_gl 367	4384,05
Pho_gl 31	4408,73
Pho_gl 376	4441,63
Pho_gl 295	4532,1
Pho_gl 405	4597,91
Pho_gl 517	4602,02
Pho_gl 496	4606,13

Pho_gl 336	2961,08
Pho_gl 549	2969,31
Pho_gl 167	2977,53
Pho_gl 71	2981,65
Pho_gl 413	2989,87
Pho_gl 442	2993,99
Pho_gl 350	3002,21
Pho_gl 238	3018,66
Pho_gl 281	3076,24
Pho_gl 342	3109,14
Pho_gl 505	3142,04
Pho_gl 355	3150,26
Pho_gl 398	3166,72
Pho_gl 271	3183,17
Pho_gl 452	3191,39
Pho_gl 450	3195,5
Pho_gl 279	3232,52
Pho_gl 513	3261,31
Pho_gl 469	3314,77
Pho_gl 259	3322,99
Pho_gl 9	3335,33
Pho_gl 352	3392,91
Pho_gl 410	3417,59
Pho_gl 195	3528,63
Pho_gl 11	3565,64
Pho_gl 58	3577,98
Pho_gl 435	5469,78
Pho_gl 278	5502,68
Pho_gl 297	5510,91
Pho_gl 545	5510,91
Pho_gl 378	5523,25
Pho_gl 394	5535,58
Pho_gl 389	5568,48
Pho_gl 422	5613,72
Pho_gl 392	5634,29
Pho_gl 19	5683,64
Pho_gl 386	5737,1
Pho_gl 547	5897,49
Pho_gl 484	5913,94

Pho_gl 73	4647,26
Pho_gl 35	4667,82
Pho_gl 401	4713,06
Pho_gl 347	4729,51
Pho_gl 417	4754,19
Pho_gl 68	4758,3
Pho_gl 194	4770,64
Pho_gl 525	4795,31
Pho_gl 294	4799,42
Pho_gl 467	4836,44
Pho_gl 403	4865,23
Pho_gl 284	4869,34
Pho_gl 137	4935,14
Pho_gl 185	5000,94
Pho_gl 32	5009,17
Pho_gl 48	5033,84
Pho_gl 92	5033,84
Pho_gl 300	5161,33
Pho_gl 307	5223,02
Pho_gl 434	5223,02
Pho_gl 90	5247,7
Pho_gl 14	5284,71
Pho_gl 387	5358,74
Pho_gl 518	5362,85
Pho_gl 166	5366,97
Pho_gl 338	5445,11
Pho_gl 63	7727,61
Pho_gl 377	7731,72
Pho_gl 125	7768,73
Pho_gl 316	7772,85
Pho_gl 383	7896,23
Pho_gl 109	7920,9
Pho_gl 218	7920,9
Pho_gl 458	7982,59
Pho_gl 65	7990,82
Pho_gl 69	8003,15
Pho_gl 332	8011,38
Pho_gl 126	8369,18
Pho_gl 249	8451,43

Pho_gl 493	5913,94
Pho_gl 348	5918,06
Pho_gl 370	5946,84
Pho_gl 427	5975,63
Pho_gl 67	5992,08
Pho_gl 117	6041,43
Pho_gl 7	6078,45
Pho_gl 303	6103,12
Pho_gl 20	6119,57
Pho_gl 288	6185,38
Pho_gl 255	6205,94
Pho_gl 187	6428,02
Pho_gl 227	6448,58
Pho_gl 39	6510,27
Pho_gl 369	6555,51
Pho_gl 388	6576,08
Pho_gl 380	6584,3
Pho_gl 339	6645,99
Pho_gl 192	6695,34
Pho_gl 104	6740,58
Pho_gl 437	6794,04
Pho_gl 228	6818,72
Pho_gl 264	6818,72
Pho_gl 41	6905,08
Pho_gl 226	6942,1
Pho_gl 219	7012,01
Pho_gl 28	7036,69
Pho_gl 447	7114,83
Pho_gl 155	7139,5
Pho_gl 253	7205,31
Pho_gl 198	7266,99
Pho_gl 404	7279,33
Pho_gl 91	7320,46
Pho_gl 483	7332,8
Pho_gl 114	7345,13
Pho_gl 184	7456,18
Pho_gl 13	7468,51
Pho_gl 224	7468,51
Pho_gl 366	7497,3

Pho_gl 385	8451,43
Pho_gl 55	8471,99
Pho_gl 88	8476,1
Pho_gl 142	8537,79
Pho_gl 5	8578,92
Pho_gl 93	8652,95
Pho_gl 245	8768,1
Pho_gl 214	8854,47
Pho_gl 186	8858,58
Pho_gl 286	8916,15
Pho_gl 406	8940,83
Pho_gl 292	9027,2
Pho_gl 101	9117,67
Pho_gl 141	9212,26
Pho_gl 124	9261,61
Pho_gl 215	9269,84
Pho_gl 488	9278,06
Pho_gl 270	9323,3
Pho_gl 110	9335,64
Pho_gl 154	9335,64
Pho_gl 471	9364,43
Pho_gl 16	9389,11
Pho_gl 499	9413,78
Pho_gl 136	9446,68
Pho_gl 129	9467,25
Pho_gl 354	9475,47
Pho_gl 193	9681,1
Pho_gl 118	9796,25
Pho_gl 169	9804,48
Pho_gl 254	9812,71
Pho_gl 520	9812,71
Pho_gl 487	9862,06
Pho_gl 243	9923,75
Pho_gl 455	9936,08
Pho_gl 318	9960,76
Pho_gl 353	10001,89
Pho_gl 461	10088,25
Pho_gl 18	10232,19
Pho_gl 190	10256,87

Pho_gl 57	7526,09
Pho_gl 507	7575,44
Pho_gl 36	7649,47
Pho_gl 232	7665,92
Pho_gl 86	10487,17
Pho_gl 87	10487,17
Pho_gl 75	10499,51
Pho_gl 274	10499,51
Pho_gl 147	10536,53
Pho_gl 344	10721,59
Pho_gl 480	10803,85
Pho_gl 78	10820,3
Pho_gl 248	10820,3
Pho_gl 382	10824,41
Pho_gl 543	10894,32
Pho_gl 340	10939,56
Pho_gl 287	10947,79
Pho_gl 15	11071,17
Pho_gl 179	11132,86
Pho_gl 448	11227,45
Pho_gl 246	11243,9
Pho_gl 464	11260,35
Pho_gl 501	11280,91
Pho_gl 252	11289,13
Pho_gl 240	11322,04
Pho_gl 424	11437,19
Pho_gl 414	11474,2
Pho_gl 182	11482,43
Pho_gl 428	11482,43
Pho_gl 390	11564,68
Pho_gl 512	11704,51
Pho_gl 99	11774,42
Pho_gl 231	11811,44
Pho_gl 128	11889,58
Pho_gl 212	12058,19
Pho_gl 371	12280,28
Pho_gl 423	12288,5
Pho_gl 478	12304,95
Pho_gl 96	12354,3

Pho_gl 158	10293,88
Pho_gl 523	10297,99
Pho_gl 266	10404,92
Pho_gl 541	10433,71
Pho_gl 52	14550,44
Pho_gl 440	14566,89
Pho_gl 441	14686,16
Pho_gl 8	14821,87
Pho_gl 170	14912,35
Pho_gl 173	14920,58
Pho_gl 532	14969,93
Pho_gl 430	15039,84
Pho_gl 151	15068,63
Pho_gl 544	15076,86
Pho_gl 82	15117,98
Pho_gl 269	15163,22
Pho_gl 107	15183,78
Pho_gl 133	15348,29
Pho_gl 207	15463,44
Pho_gl 256	15590,93
Pho_gl 47	15767,77
Pho_gl 460	15780,11
Pho_gl 213	15845,91
Pho_gl 189	15850,03
Pho_gl 66	16191,37
Pho_gl 357	16355,88
Pho_gl 502	16401,12
Pho_gl 89	16499,82
Pho_gl 121	16565,62
Pho_gl 54	16627,31
Pho_gl 479	17030,35
Pho_gl 310	17071,47
Pho_gl 418	17178,4
Pho_gl 492	17198,97
Pho_gl 205	17433,38
Pho_gl 482	17725,38
Pho_gl 375	17803,52
Pho_gl 293	17873,44
Pho_gl 191	17951,57

Pho_gl 177	12383,09
Pho_gl 175	12403,65
Pho_gl 542	12465,34
Pho_gl 504	12518,81
Pho_gl 396	12613,4
Pho_gl 10	12905,39
Pho_gl 150	12934,18
Pho_gl 200	12995,87
Pho_gl 519	13160,38
Pho_gl 358	13230,29
Pho_gl 306	13254,97
Pho_gl 156	13324,88
Pho_gl 135	13489,38
Pho_gl 102	13571,64
Pho_gl 500	13785,93
Pho_gl 26	14052,81
Pho_gl 98	14279,01
Pho_gl 546	14295,46
Pho_gl 122	14377,71
Pho_gl 181	14439,4
Pho_gl 12	14525,76
Pho_gl 503	20776,94
Pho_gl 74	21385,61
Pho_gl 275	21385,61
Pho_gl 106	21500,76
Pho_gl 202	21574,79
Pho_gl 24	21648,82
Pho_gl 113	21809,21
Pho_gl 267	21924,36
Pho_gl 221	21986,05
Pho_gl 540	22097,09
Pho_gl 314	22134,11
Pho_gl 27	22228,7
Pho_gl 425	22681,08
Pho_gl 457	22730,44
Pho_gl 149	22927,84
Pho_gl 359	23211,61
Pho_gl 6	23417,24
Pho_gl 362	23524,17

Pho_gl 474	18087,29
Pho_gl 45	18153,09
Pho_gl 79	18161,32
Pho_gl 285	18223,01
Pho_gl 250	18371,06
Pho_gl 178	18408,08
Pho_gl 80	18473,88
Pho_gl 85	18589,03
Pho_gl 146	18683,62
Pho_gl 25	18708,3
Pho_gl 208	18798,77
Pho_gl 56	18819,34
Pho_gl 374	19131,9
Pho_gl 61	19185,36
Pho_gl 112	19288,18
Pho_gl 42	19366,32
Pho_gl 174	19440,34
Pho_gl 60	19588,4
Pho_gl 140	19740,56
Pho_gl 312	19744,68
Pho_gl 363	20332,78
Pho_gl 197	34944,91
Pho_gl 77	35278,03
Pho_gl 30	35450,76
Pho_gl 180	35467,21
Pho_gl 419	35565,91
Pho_gl 258	35639,94
Pho_gl 289	35816,78
Pho_gl 399	35985,4
Pho_gl 283	36001,85
Pho_gl 411	36557,06
Pho_gl 62	36635,2
Pho_gl 400	36688,66
Pho_gl 325	37457,72
Pho_gl 536	38370,72
Pho_gl 171	38642,15
Pho_gl 446	38930,04
Pho_gl 108	39201,47
Pho_gl 145	39851,26

Pho_gl 454	23606,42
Pho_gl 242	24145,18
Pho_gl 81	24206,87
Pho_gl 229	24243,88
Pho_gl 115	25235,02
Pho_gl 368	25559,92
Pho_gl 1	26205,6
Pho_gl 364	26838,94
Pho_gl 43	27381,81
Pho_gl 432	27385,92
Pho_gl 160	27480,51
Pho_gl 37	27501,07
Pho_gl 223	27830,08
Pho_gl 534	27961,69
Pho_gl 235	28253,68
Pho_gl 291	28335,93
Pho_gl 527	28685,51
Pho_gl 183	28693,73
Pho_gl 305	28956,94
Pho_gl 372	29170,79
Pho_gl 94	29331,19
Pho_gl 83	29446,34
Pho_gl 481	30285,31
Pho_gl 466	30355,23
Pho_gl 463	30807,62
Pho_gl 439	30951,56
Pho_gl 537	30972,12
Pho_gl 326	31856,33
Pho_gl 453	31926,25
Pho_gl 528	32279,93
Pho_gl 46	32325,17
Pho_gl 415	32448,55
Pho_gl 331	32670,63
Pho_gl 23	32900,94
Pho_gl 152	33262,85
Pho_gl 172	33521,94
Pho_gl 188	34019,57
Pho_gl 485	34508,97
Pho_gl 506	61179,3

Pho_gl 165	41249,55
Pho_gl 495	41685,49
Pho_gl 21	41874,67
Pho_gl 462	42191,34
Pho_gl 465	42224,24
Pho_gl 299	43129,02
Pho_gl 139	43207,16
Pho_gl 206	44194,19
Pho_gl 176	45362,17
Pho_gl 261	45493,77
Pho_gl 531	45974,95
Pho_gl 51	46661,76
Pho_gl 196	46892,06
Pho_gl 356	48298,58
Pho_gl 50	48438,41
Pho_gl 393	48701,61
Pho_gl 216	49297,94
Pho_gl 162	49779,12
Pho_gl 280	49951,85
Pho_gl 489	50132,81
Pho_gl 111	51699,71
Pho_gl 329	51777,85
Pho_gl 272	52053,4
Pho_gl 38	53566,84
Pho_gl 263	53858,84
Pho_gl 433	54015,12
Pho_gl 276	54603,22
Pho_gl 319	55660,16
Pho_gl 76	55799,99
Pho_gl 22	55898,7
Pho_gl 2	56137,23
Pho_gl 97	56203,03
Pho_gl 379	56906,29
Pho_gl 70	57379,24
Pho_gl 49	58859,78
Pho_gl 222	59258,7
Pho_gl 120	59460,22
Pho_gl 123	60689,89
Pho_gl 265	133791,67

Pho_gl 526	61742,72
Pho_gl 34	63309,63
Pho_gl 203	64185,62
Pho_gl 301	64946,45
Pho_gl 131	65361,83
Pho_gl 134	68302,35
Pho_gl 395	68762,96
Pho_gl 239	69322,28
Pho_gl 420	70103,68
Pho_gl 257	70675,33
Pho_gl 365	73089,44
Pho_gl 53	73278,62
Pho_gl 444	73352,64
Pho_gl 143	75306,14
Pho_gl 17	75680,38
Pho_gl 320	76120,43
Pho_gl 345	76548,15
Pho_gl 477	76860,71
Pho_gl 4	78300,12
Pho_gl 217	78674,37
Pho_gl 494	78686,71
Pho_gl 277	79961,62
Pho_gl 530	80294,74
Pho_gl 199	80348,21
Pho_gl 241	80743,02
Pho_gl 324	81269,43
Pho_gl 201	81335,23
Pho_gl 161	81359,91
Pho_gl 33	82684,17
Pho_gl 204	83202,36
Pho_gl 59	83662,97
Pho_gl 220	86048,29
Pho_gl 360	86204,57
Pho_gl 262	88556,99
Pho_gl 3	88622,79
Pho_gl 321	90189,7
Pho_gl 225	92653,16
Pho_gl 309	93064,42
Pho_gl 157	93726,55

Pho_gl 409	136596,47
Pho_gl 268	136699,29
Pho_gl 335	138151,04
Pho_gl 159	139475,31
Pho_gl 211	141975,78
Pho_gl 486	142868,21
Pho_gl 119	145788,17
Pho_gl 209	145948,56
Pho_gl 127	149119,39
Pho_gl 533	150320,28
Pho_gl 535	155259,53
Pho_gl 116	157019,73
Pho_gl 373	157583,16
Pho_gl 233	159141,84
Pho_gl 138	160104,19
Pho_gl 412	160174,11
Pho_gl 130	160186,45
Pho_gl 230	161876,73
Pho_gl 402	166408,84
Pho_gl 153	167436,99
Pho_gl 521	173132,97
Pho_gl 308	181337,64
Pho_gl 328	186367,37
Pho_gl 29	189406,59
Pho_gl 381	190274,35
Pho_gl 333	200189,88
Pho_gl 327	209628,33
Pho_gl 84	214078,18
Pho_gl 361	215941,2
Pho_gl 313	222134,8
Pho_gl 302	239909,53
Pho_gl 416	240542,88
Pho_gl 334	242874,73
Pho_gl 164	280550,42
Pho_gl 429	281348,27
Pho_gl 132	290786,72
Pho_gl 491	315672,17
Pho_gl 163	369572,13
Pho_gl 105	383279,49

Pho_gl 95	96268,15
Pho_gl 529	96765,77
Pho_gl 438	98369,69
Pho_gl 144	98579,44
Pho_gl 290	99685,73
Pho_gl 407	102379,5
Pho_gl 72	104666,11
Pho_gl 247	108935,01
Pho_gl 445	110403,21
Pho_gl 237	114026,43
Pho_gl 234	114367,78
Pho_gl 538	115276,66
Pho_gl 322	117131,45
Pho_gl 323	117670,21
Pho_gl 384	125253,87
Pho_gl 64	127162,13

Pho_gl 397	436916,24
Pho_gl 148	454510,02
Pho_gl 391	455024,1
Pho_gl 236	468690,32
Pho_gl 330	543737,37
Pho_gl 337	723672,6
Pho_gl 210 (Luggye)	769799,72

Anhang 2

Gletscher von W nach E	Gletscher- größe km ²	Karwände (km ²)	Gesamtareal (km ²)	Firnfläche (km ²)	Gletschereinzugs- gebiet km ²	Schuttbedeckung km ² / %-Anteil an Gletschergröße
Rilo	11,9	6,6	18,5	1,3	7,9	7,6 (63%)
Chozo	33,7	17,3	51,07	7,2	24,5	16,1 (48%)
Bechun	6,4	5,2	11,7	2,2	7,4	2,7 (42%)
Raphstreng	2,2	3,2	5,4	0,16	3,36	0,5 (23%)
Thorthormi	8,1	5,8	13,9	3,07	8,87	4,03 (50%)
Luggye I	8,3	1,2	9,5	5,1	6,3	1,5 (18%)
Luggye II	2,2	1,3	3,5	0,4	1,7	0,8 (36%)
Druk Chung I	5,7	3,8	9,5	1,5	5,3	1,1 (19%)
Druk Chung II	2,5	0,6	3,1	1,4	2	0,8 (32%)
Anhang 2: Gletscherparameter der Gletscher Ost-Lunanas (Quelle: MEYER, 2001, S. 28)						

Literaturverzeichnis

AGETA, Y., IWATA, S. (1999): The Assessment of Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) in Bhutan. Report of Japan – Bhutan Joint Research 1998. Japan/Bhutan: Institute of Hydrospheric –Atmospheric Sciences of Nagoya University, Department of Geography of Tokyo Metropolitan University, and Geological Survey of Bhutan, 161 S.

BENN, D.I. & EVANS, D.J.A. (1998): *Glaciers & Glaciation*. London (Arnold), 734 S.

BÖHM, R. et al. (2007): Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. ZAMG (Wien), 111 S.

BOLLINGER, D. (1993): Erfassung, Darstellung und Beurteilung von Naturgefahren – Sinn und Zweck. In: Oddsson, B. (1996), editor, *ETH Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften: „Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse“*, S. 55, ETH Zürich.

CHARLESWORTH, J.K. (1957): *The quaternary era. With special reference to its glaciation*. Band 1, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 591 S.

CLAGUE, J.J. and EVANS, S.G. (2000): A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews* 19 (2000), pp. 1763–1783.

DYURGEROV, M.B. & MEIER, M.F. (2005): *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot*. Occasional Paper 58. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, Colorado. 117 p.

EHLERS, J. (1994): *Allgemeine und historische Quartärgeologie*. 290 S., 176 Abb., Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).

FLUBACHER, M (2007): Dokumentation weltweiter historischer Gletscherkatastrophen. GIS-basierte Inventarisierung, Web-Aufbereitung und Analyse der Ereignisse. Diplomarbeit, Geographisches Institut Universität Zürich.

GANSSE, A. (1970): Lunana, the Peaks, Glaciers and Lakes of Northern Bhutan. The Mountain World, Swiss Foundation of Alp. Res. (Zürich), p. 117 – 131.

GANSSE, A. (1983): Geology of the Bhutan Himalaya. Birkhäuser Verlag (Basel), 181 S.

GHEORGHE, A., GMÜNDER, F. K. (1994): Methoden der Sicherheits- und Risikoanalyse. In: Oddsson, B. (1996), editor, ETH Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften: „Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse“, S. 55, ETH Zürich.

HAEBERLI, W. (1993): Gletscherschwund, Permafrostdegradation und periglaziale Murgänge im hochalpinen Bereich. In: Oddsson, B. (1996), editor, ETH Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften: „Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse“, S. 55, ETH Zürich.

HAMBREY, M. & ALEAN, J. (2004): Glaciers. 2. Auflage, Cambridge (University Press), 376 S.

HANISCH, J. (2000): Risikomanagement für die Gletscherseen Nepals. Tagungspublikation, Bd. 1, S. 171 – 180 (Int. Symposium, Interpraevent 2000 – Villach/Österreich).

HÄUSLER, H. (2002): Untersuchung von Gletschersee-Ausbrüchen im Bhutan-Himalaya. In: Schwaighofer, B., Schneider J.F. (2004), Hrsg., Mitteilungen IAG BOKU, Reihe: Angewandte Geowissenschaften, Heft 14, Baugeologisches Seminar, Vorträge 2002 – 2004, S. 19 – 42. Wien.

HEINIMANN, H.R. et al. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Eine risikoorientierte Betrachtungsweise. Umweltmaterialien Nr. 85, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 247 S.

HERGET, J. (2005): Reconstruction of Pleistocene Ice-Dammed Lake Outburst Floods in the Altai Mountains, Siberia. The geological Society of America (Special Paper 386).

HUGGEL, C., KÄÄB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, P., PAUL, F. (2002): Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. In: Canadian Geotechnical Journal, Volume 39, Number 2, p. 316 – 330 (NRC Canada).

HUGGEL, C., HAEBERLI, W., KÄÄB, A., BIERI, D., RICHARDSON, S. (2004): An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. In: Canadian Geotechnical Journal, Volume 41, p. 1068 – 1083 (NRC Canada).

IPCC (2007): Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (University Press), 996 S.

KÄÄB, A., HUGGEL, C., PAUL, F. (2000): Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. Tagungspublikation, Bd. 1, S. 49 - 60 (Int. Symposium, Interpraevent 2000 – Villach/Österreich).

KIENHOLZ, H. et al. (2006): Dokumentation von Naturereignissen – Feldanleitung. In: Alpensignale 4, Hrsg.: Plattform der Alpenkonvention (PLANALP), Innsbruck.

KÖNIGSEDER, A.-M. (2006): Terminologie des Risikomanagements. Das Risikokonzept bei Naturgefahren. 119 S. Diplomarbeit zur Erlangung des Magistergrades der Philosophie aus der Studienrichtung Übersetzen. Universität Wien.

LEBER, D. (2005): Qualitative Hazard Assessment of Glaciers and Glacier Lakes in Northwestern Bhutan based on Remote Sensing and Engineering Geophysics. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften an der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Mathematik (Institut für geologische Wissenschaften – Geologie) der Universität Wien. 103 p., 32 fig., 5 tab.

LEBER, D., HÄUSLER, H., BRAUNER, M., SKUK, S., MEYER, M., PAYER, T., PLATZER, R., SCHWARZ, P., FRIEDRICH, M. & WIESMAYR, G. (2000): Technical Report Luggye Tsho Outburst Flood Mitigation Project, Lunana, Bhutan. Vienna, Institute of Geology, University of Vienna, 28 Fig., 17 Tab., 71 p.

LEBER, D., HÄUSLER H., BRAUNER, M., WANGDA, D., MEYER, M., WIESMAYR, G., PLATZER, K., SCHWARZ, P., VOLLSINGER, S., TOBGAY, KARMA, KUENZA, K., NORBU, P., GYENDEN, L., CHHETRI, I.K., GURUNG, D.R., PHUNTSHO, T. Und IKEMOTO, M. (2002): Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) Mitigation Project, Pho Chhu-Eastern Branch (Thanza-Lhedi; 2000 – 2002), Lunana, Bhutan. – Final report; Vienna / Thimphu; Institute of Geology / University of Vienna, Geological Survey of Bhutan, 189 p., 66 Fig., 46 Tab., 4 Maps.

MEYER, M. (2001): Glazialgeologie und holozäne Gletscherschwankungen in Ost-Lunana (Bhutan-Himalaya). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Fakultät für Grund- und Integrativwissenschaften der Universität Wien, 107 S., 47 Abb., 2 Tab., 1 geomorphologisch-quartärgeologische Karte 1:5000, Wien.

MC KNIGHT, T.L., HESS, D. (2008): Physical Geography. A Landscape Appreciation. (9th Edition).

MOOL, P., WANGDA, D., BAJRACHARYA, S.R., KUNZANG, K., GURUNG, D.R., JOSHI, S.P. (2001): Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods. Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region: Bhutan. 227 S., Annex 1-2, (ICIMOD, MENRIS), Kathmandu.

NORBU, P. (1999): Glaciers and Glacier Lakes in Bhutan (Volume 1). Geological Survey of Bhutan, Ministry of Trade and Industry, Thimpu (June 1999).

PATERSON, W.S.B. (1994): The physics of glaciers. 3. Auflage, Oxford (Pergamon), 480 S.

RANA, B., SHRESTHA, A.B., REYNOLDS, J.N., ARYAL, R., POKHREL, A.P., BUDHATHOKI, K.P. (2000): Hazard assessment of the Tsho Rolpa Glacier Lake and ongoing remediation measures. In: Journal of Nepal Geological Society, 2000, Vol. 22, pp. 563 – 570.

RICKENMANN, D. (1994): Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung. In: Oddsson, B. (1996), editor, ETH Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften: „Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse“, S. 55, ETH Zürich

RITTER, D.F., KOCHER, R.C., MILLER, J.R. (1995): Process Geomorphology. Third Edition, Wm. C. Brown Publishers, 546 S.

SCHINDLER, C. M. (1993): Einführung in die Grundtypen von Instabilität. In: Oddsson, B. (1996), editor, ETH Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften: „Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse“, S. 7, ETH Zürich

VAN HUSEN, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. Geologische Bundesanstalt (1987), 24 Seiten.

WAKONIGG, H. (2007): Klima im Wandel. Lit. Verlag GmbH & Co. KG Wien, Lit. Verlag Dr. W. Hopf, 188 S.

WEGMANN, M. et al. (2004): Partizipatives Verfahren zum Risikomanagement bei Naturgefahren. Angewendet für Gletschergefahren. Tagungspublikation, Bd. IX, S. 297 – 308 (Int. Symposium, Interpraevent 2004 – Riva/Trient).

WILHELM, F. (1975): Schnee- und Gletscherkunde. 375 S., 58 Abb., 156 Fig., 71 Tab.

WINKLER, S. (2003): Zufall oder Zusammenhang? Parallelen zwischen der aktuellen Gletscher- und Klimadynamik in Norwegen und Neuseeland. In: NORDEN 15 – Beiträge zur geographischen Nordeuropaforschung (Hrsg. Lindemann, R. et al., Bremen 2003). S. 103 – 120.

WINKLER, S. (2009): Gletscher und ihre Landschaften. Eine illustrierte Einführung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft (Darmstadt), 183 S.

Internet:

www.germanwatch.org

Das Abschmelzen der Gletscher. Gletschersee-Ausbrüche in Nepal und der Schweiz.

www.glaciology.ethz.ch

Gletschergefahren

www.grid.unep.ch

United Nations Environment Programme
(Karte: Globales Gletscherinventar)

www.icimod.org

International Centre for Integrated Mountain Development
Glaciers and Glacial Lakes – Indicators of Global Climate Change (2008)
(Abbildung: Impact on Cryosphere)

http://neespi.org/web-content/meetings/Bishkek_2009/Bolch.pdf

BOLCH et al. (2009): Using remote sensing and GIS to identify and monitor potentially dangerous glacial lakes in northern Tien Shan.

www.sicherheitskultur.at

Informationssicherheit und das Eisbergprinzip (SCHAUMANN, S., 2007, 2009)

www.swissedu.ch

Bildvergleich: Rückzug des Triftgletschers, Schweiz (2002/2003)

www.tonko.info

Weltkarte: Globale Verbreitung von Gletscherseen

www.unisdr.org/publications

UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction (2007, 2009)

www.wgms.ch

World Glacier Monitoring Service

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Idealisierter Querschnitt durch eine Eiskappe, dargestellt als System (nach BRODZIKOWSKI und VAN LOON, 1991, aus BENN & EVANS, 1998, S. 4, Fig. 1.1).	15
Abb. 2-2: Querschnitt durch einen Gletscher (verändert nach Mc KNIGHT & HESS, 2008)	17
Abb. 2-3: Beziehung zwischen Schubspannung und Deformationsgeschwindigkeit für verschiedene Materialien (verändert nach PATERSON, 1994, aus WINKLER, 2009, S. 23, Abb. 3.1).....	18
Abb. 2-4: Gletscherfließen eines Gletschers im Rückzug (verändert nach Mc KNIGHT & HESS, 2008, S. 564, Figure 19-13).....	19
Abb. 3-1: Gletschergefahren.....	25
Abb. 4-1: Glaziale Wasserreservoirs (verändert nach www.glaciology.ethz.ch).	31
Abb. 4-2: Stadien der Bildung eines Gletschersees von einem moränengedämmten Gletscher (nach HÄUSLER, 2002).	33
Abb. 4-3: Dambruchmechanismen eines moränengedämmten Sees (verändert nach LLIBOUTRY et al., 1977, aus BENN & EVANS, 1998).....	35
Abb. 4-4: Globales Gletscherinventar. Daten von WGI, GLIMS, DCW (Quelle: www.grid.unep.ch).....	36
Abb. 4-5: Globale Verbreitung von Gletscherseen (Quelle Weltkarte: www.tonko.info)	36
Abb. 4-6: Rückzug des Triftgletschers (Schweiz) und Bildung eines proglazialen Sees (Quelle: www.swissedu.ch).	38
Abb. 4-7: Einfluss des Klimawandels auf die Kryosphäre (verändert nach DYURGEROV, M.B. & MEIER, M.F., 2005).....	39
Abb. 5-1: Konzept der Risikoanalyse mit Fokus auf die Gefahrenanalyse (verändert nach KÖNIGSEDER, 2006).....	42
Abb. 6-1: Diagramm der Auslösemechanismen für GLOFs, zur Quantifizierung des Gefahrenpotentials.	48
Abb. 6-2: Gefahrenbalken zur Klassifizierung des Gefahrenpotentials.....	49
Abb. 6-3: Ausschnitt aus der Gefahrenbeurteilungstabelle des Luggye Tsho	52

Abb. 7-1: Geologische Karte von Bhutan (nach GRUJIC www.geologie.uni-freiburg.de , aus LEBER et al., 2002, S. 24, Figure 3.2.1).....	54
Abb. 7-2: Die Hauptflüsse Bhutans (MOOL et al., 2001, S. 6, Figure 2.2).....	56
Abb. 7-3: Profil des Pho Chhu Flusses (verändert nach MOOL et al., 2001, S. 8, Figure 2.3).	57
Abb. 7-4: Die Region Ost-Lunana im Überblick.	58
Abb. 7-5: Die Gletscher und Gletscherseen von Ost-Lunana. Die Signaturen GLP 8 – GLP 12 wurden 1999 vom Geological Survey of Bhutan (GSB) vergeben (GLP = Glacier Lake Pho-valley).	59
Abb. 7-6: Die Region Lunana im Pho Chhu Becken mit den verschiedenen Seetypen. S – Supraglazialer See, M – Endmoränengedämmter See, L – Lateralmoränengedämmter See (Bezeichnungen nach MOOL et al, 2001)	62
Abb. 7-7: Geologische Karte von Ost-Lunana (verändert nach GANSSER, 1983, aus LEBER et al., 2002, S. 25, Figure 3.2.2).	63
Abb. 7-8: Allgemeine Daten zum Luggye Tsho in Ost-Lunana (Daten aus NORBU, 1999, MOOL et al., 2001).	64
Abb. 7-9: Abflussaufzeichnungen des Hydrographen der hydrologischen Station Wangdi Phodrang (Pho Chhu) für die Jahre 1991 – 1997 (LEBER, 2005).....	65
Abb. 7-10: Gletscher und Gletscherseen des Pho Chhu Einzugsgebietes (verändert nach MOOL, 2001, S. 54, Figure 7.5).....	67
Abb. 7-11: Semiquantitative Bewertung der Seefläche.	68
Abb. 7-12: Die Gletscher Ost-Lunanas (MEYER, 2001, S. 30, Abb. 3.6).	69
Abb. 7-13: Semiquantitative Beurteilung des Gletschereinzugsgebietes.....	70
Abb. 7-14: Semiquantitative Beurteilung der Schutt- bzw. Debrisbedeckung des Gletschers.	72
Abb. 7-15: Luggye Tsho GLOF (Bhutan / Lunana), 7. Oktober, 1994.	73
Abb. 7-16: Semiquantitative Beurteilung des Parameters “Hinweise auf Paläo-GLOF”.	74
Abb. 7-17: Blick auf den Druk Chung Gletscher mit einem Teil seines 500 x 250 m großen Gletschersees, September 2000 (verändert nach LEBER & HÄUSLER et al., 2000).	75
Abb. 7-18: Semiquantitative Beurteilung des Parameters “GLOF von orographisch höher gelegenen See”.	76

Abb. 7-19: Glazialgeologische Karte des Luggye und Druk Chung Gebietes, Lunana (NW Bhutan) mit den GLOF-Risikopotentialen (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 22, Fig. 4.1.1).....	77
Abb. 7-20: Luggye Tsho Abflusskanal (Outlet).	79
Abb. 7-21: Durchschnittlicher monatlicher Abfluss, gemessen bei der Station Wangdi Phodrang, 1997 – 1999 (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 35, Fig. 5.3.3)...	80
Abb. 7-22: Semiquantitative Bewertung des Abflusskanals (Outlet).....	81
Abb. 7-23: "SLOPE 2-D"-Graph für die Stabilität der rechten Lateralmoräne des Luggye Tsho (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 29, Fig. 5.1.2).	83
Abb. 7-24: Geophysikalische Messungen im Bereich des Luggye Tsho Outlet (LEBER & HÄUSLER et al., 2000, S. 34, Figure 5.3.2).....	85
 Tab. 4-1: Internationale Beispiele für GLOFs von moränengedämmten (M), eisgedämmten (I), randglazialen (R) und subglazialen Seen.	37
Tab. 7-1: Gletscherparameter für die Gletscher Ost-Lunanas (verändert nach MEYER, 2001, S. 28, Tabelle 3.1).....	59
Tab. 7-2: Gletscherseen Ost-Lunanas mit hohem Gefahrenpotential (nach NORBU, 1999, MOOL et al., 2001).....	60
Tab. 8-1: Quantitative Gesamtbeurteilung des Gefahrenpotentials eines moränengedämmten Gletschersees am Beispiel des Luggye Tsho (Ost-Lunana)	89

Abstract

Glaciers are sensitive to temperature fluctuations accompanying climate change on our planet. In response of the general global warming, the glaciers in high mountainous regions are in a state of steady retreat, often leaving behind a chain of lakes. Those lakes pose environmental hazards, due to Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs). The main objective of this master thesis was to describe the glacier as a system in detail with all its potentially hazards, followed by the purpose to create a concept to quantify the geohazard capability of GLOFs. At the outset individual parameters, which can be described as potential outburst-mechanisms, were defined and quantified by a score system. The concept was first applied on the Luggye glacier lake in eastern Lunana (NW-Bhutan) followed by a quantitative joint hazard assessment of the entire parameters. Out of a maximum of 60 points the Luggye glacier lake scored 40 during the assessment. According to the measurements the Luggye Tsho can be assessed as medium to highly dangerous. In order to prevent future flood destruction due to the impact of glacier lake outbursts in the Himalayan mountains as well as on a world scale, regular monitoring and hazard assessment is of particular importance.

Gletscher sind die stillen Zeugen für das wandelnde Klima unseres Planeten. Vor allem in Hochgebirgsregionen drohen durch den starken Gletscherrückzug proglazial gebildete Seen auszubrechen und verheerende GLOFs (Glacier Lake Outburst Floods) zu erzeugen. Die Zielsetzung der vorliegenden Masterarbeit war es, das System Gletscher mit seinen Gefahren detailliert zu beschreiben und anschließend ein Konzept zur Quantifizierung des Geohazardpotentials von Gletscherseeausbrüchen zu erstellen. Die einzelnen Parameter, welche Auslösemechanismen für Ausbrüche moränengedämmter Gletscherseen darstellen, wurden zunächst definiert und beschrieben, sowie mit Hilfe eines Punktesystems semiquantitativ beurteilt. Am Beispiel des Luggye-Gletschersees in Ost-Lunana (NW-Bhutan) wurde das hier erstellte Konzept erstmals angewendet und anschließend wurde der Gletschersee innerhalb einer Gesamtbeurteilung der Einzelparameter nach seinem Gefahrenpotential quantifiziert. Im Falle des Luggye Tsho ergeben sich bei der Bewertung 40 von 60 erreichbaren Punkten, wonach jener Gletschersee einem mittleren bis hohen Gefahrenpotential zugeordnet werden kann. Sowohl für

Gletscherseen des Himalaya-Gebirgszuges, als auch auf globaler Ebene, ist es wichtig, deren Veränderung regelmäßig zu überwachen und diese nach ihrer Gefährdung zu klassifizieren, um in Zukunft Gletscherseeausbrüche besser vorhersagen und das Risikopotential reduzieren zu können.

Karin Putzlager

Kalvarienbergstraße 7

7100 Neusiedl am See

Telefon: 0650 / 762 15 64

Email: karinputzlager@hotmail.com



Curriculum Vitae

PERSÖNLICHE DATEN

Familienstand:	ledig
Staatsangehörigkeit:	Österreich
Geburtsdatum:	28.08.1982
Geburtsort:	Kittsee (Burgenland)

SCHULBILDUNG UND STUDIUM

Schulische Ausbildung:	röm.-kath. Volksschule Neusiedl am See (1988 – 1992) Gymnasium Neusiedl am See (1992 – 1996) Höhere Lehranstalt für Wirtschaftliche Berufe, Neusiedl am See (1996 – 2001) Matura mit ausgezeichnetem Erfolg (2001)
Universitäre Ausbildung:	Lehramtsstudium Geographie und Spanisch, Universität Wien (2001 – 2003)

Bakkalaureatsstudium Erdwissenschaften,
Universität Wien (Oktober 2003 – März
2008), Schwerpunkt: Geologie
Masterstudium Erdwissenschaften,
Universität Wien (März 2008 – Jänner
2010), Schwerpunkt: Angewandte- und
Umweltgeowissenschaften

BERUFSERFAHRUNG

Seit 2002:	„Martinskeller-Diskotheek“ Tätigkeit: Barkeeper
Seit 2006:	„Cards & Systems EDV Dienstleistungs GmbH“ Tätigkeit: Datenerfassung Seit 2008: Callcenteragent für die ÖBB- VORTEILScard Tätigkeit: Kundenbetreuung via Telefon, Email-Service, Betreuung von Pressekunden
August 2009:	„zweischrittweiter – event & consulting“, 1050 Wien Tätigkeit: Bodenprofilbeschreibung für den Weinwanderweg Gols

BESONDERE KENNTNISSE

Sprachen:	Englisch Sehr gute Kenntnisse in Wort und Schrift
------------------	--

Französisch, Spanisch

Schulkenntnisse in Wort und Schrift

EDV:

Microsoft Office (Word, Excel, Power Point)

Gute Kenntnisse: Modflow, PhreeqC

Versiert im Umgang mit Corel Draw, ArcGIS, ArcView, ERDAS Imagine, GOCAD, Tectonics

WEITERE QUALIFIKATIONEN UND KENNTNISSE

- Inlands- und Auslandsexkursionen im Zuge des Studiums (u.a. Südtirol, Schweiz, Kanarische Inseln)
- 3 Hydrogeologische Praktika im Rahmen des Studiums (Rammkernsondierung, hydrochemische Probennahmen, Pumpversuche, Slug- und Bailtests, Abflussmessungen, etc.)
- Teilnahme am Kurs „Erkundungsverfahren in der Hydrogeologie“
- Teilnahme am hydrodynamischen Modellierungskurs „Modflow“ und hydrochemischen Modellierungskurs „PhreeqC“
- Teilnahme an einem Weiterbildungsseminar für Telefonisten
- 1997: Jungschargruppenleiter „Katholische Jungschar – Neusiedl am See“
- Poster PANGEO: KOPECNY, HEISCHMANN, RANK, HÄUSLER, PAPESCH, PUTZLAGER: *Different types of carstified aquifer systems along the Leithagebirge (Northern Burgenland, Austria).*