
Dokumentation weltweiter historischer Gletscherkatastrophen

**GIS-basierte Inventarisierung, Web-Aufbereitung
und Analyse der Ereignisse**



Diplomarbeit von Melanie Flubacher

Ausgeführt unter der Leitung von
Prof. Dr. Andreas Käab (Universität Oslo)
Dr. Michael Zemp (Universität Zürich)
Dr. Christian Huggel (Universität Zürich)

Fakultätsvertreter
Prof. Dr. Wilfried Haeberli

Januar 2007
Geographisches Institut
Universität Zürich

Vorwort

Schon zu Beginn des Studiums war mein Interesse für die Physische Geographie am grössten. Vor allem die Tatsache, dass die Umwelt ständigen Veränderungen unterworfen ist, faszinierte mich. Die Glaziologie widerspiegelt diesen Aspekt sehr deutlich. Mit dem Verändern der Umweltbedingungen im glazialen und periglazialen Raum, ändert sich auch die Gefahrensituation. Um noch mehr über die Natur-, insbesondere Gletschergefahren, zu erfahren, die in diesen Zonen der Erde aktiv sind, entschied ich mich für dieses Thema meiner Diplomarbeit. Die Arbeit gestaltete sich sehr vielfältig und gab mir Einblicke in alle möglichen Bereiche des wissenschaftlichen Arbeitens. Diese reichen vom Sammeln der Daten, übers Speichern und Auswerten, bis zum Aufbereiten und anschaulichen Präsentieren der Ergebnisse.

An dieser Stelle möchte ich all jenen ganz herzlich danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und mich mit ihrem eigenen Interesse für diese Thematik immer wieder motiviert haben.

Immer Zeit für mich fand Michael Zemp. Er konnte mir selbst komplizierte Sachverhalte verständlich erklären. Dank ihm gelang es mir das Verständnis in den verschiedenen, für diese Arbeit notwendigen Bereichen, zu vertiefen.

Christian Huggel stand mir mit seinem Wissen über Gletschergefahren jederzeit zur Verfügung. Vielen Dank für die vielen kritischen Anmerkungen zu dieser Arbeit und die zahlreichen wichtigen Tipps.

Andreas Kääh hat sich trotz der grossen Distanz zwischen Oslo und Schaffhausen immer die Zeit genommen Teile dieser Arbeit durchzugehen und hilfreiche Rückmeldungen zu geben.

Prof. Dr. Wilfried Haeberli weckte bereits zu Beginn des Studiums mein Interesse an der Glaziologie, wodurch die Grundsteine zu dieser Arbeit schon früh gelegt wurden.

Schliesslich geht ein riesiges Dankeschön an meine Familie, die mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben und deren eigenes Interesse an dieser Thematik mich zusätzlich motiviert hat. Meinem Freund Lukas danke ich für sein riesiges Verständnis und die vielen aufmunternden Worte.

Schaffhausen, Januar 2007

Melanie Flubacher

Zusammenfassung

Die Erwärmung des Klimas in den letzten 150 Jahren hatte zur Folge, dass sich die Gebirgsgletscher weltweit zurückgezogen haben, ausserdem kam es zu einer Verschiebung der Permafrostgrenze in nördlichere bzw. höhere klimatische Gebiete. Damit ging auch eine Veränderung der Gefahrensituation in diesen Räumen der Erde einher. Im Sommer 2006 (während der Arbeit an dieser Dokumentation) zeigten verschiedene Ereignisse in den Schweizer Alpen, dass sowohl heute, als auch in Zukunft, immer wieder mit gefährlichen Situationen im glazialen und periglazialen Raum zu rechnen ist. Dabei kann es sich um Prozesse handeln, die in ihrer Form noch wenig bekannt sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, aufgrund bestehender und neu aufbereiteter Daten eine erste Dokumentation weltweiter Gletscherkatastrophen zu erstellen. Den Anstoss dazu lieferte die Arbeitsgruppe *Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ)*. Diese Arbeitsgruppe besteht aus Experten der *Commission of Cryospheric Sciences der International Union of Geodesy and Geophysics (UCCS)* und der *International Permafrost Association (IPA)*. GAPHAZ ist bestrebt, die internationale Kommunikation zwischen wissenschaftlichen Experten aus dem Bereich Gletscher- und Permafrostgefahren zu verbessern, wie auch den Transfer von Informationen zwischen wissenschaftlichen Experten und politischen Entscheidungsträgern zu erweitern. Daneben soll der Wissenstand dieses Forschungsgebietes aufgezeigt werden. Diesem Zweck dient auch die vorliegende Dokumentation. Sie soll eine erste Datenbasis für weltweite Gletscherkatastrophen schaffen.

In einem ersten Schritt werden relevante historische Gletscherkatastrophen aus aller Welt gesammelt, dokumentiert und in einem geeigneten Datenmodell gespeichert. Dabei werden folgende Gefahrentypen unterschieden: Gletscherlängenänderungen, Gletscherhochwasser, Eis- und Felslawinen sowie die Interaktion von Gletschern mit Vulkanismus oder Erdbeben. In einem zweiten Schritt wird gezeigt, welche Informationen aus den gesammelten Daten gewonnen werden können, welche Analysemöglichkeiten bestehen und wo die Grenzen dieser Datenstruktur liegen. Ein Fokus wird dabei auf Prozesskombinationen gelegt.

Die Analyse beschäftigt sich mit Fragen zur Verteilung der gesammelten Ereignisse über den Globus. Auch soll aufgezeigt werden, welche Prozesse und Prozesskombinationen im glazialen und periglazialen Raum aktiv sind. Weiter soll die Grösse der Ereignisse analysiert, wie auch das Schadensausmass abgeschätzt werden. Dabei zeigte sich, dass die Datengrundlage für die einzelnen Kontinente sehr unterschiedlich ist. So konnten für Europa vergleichsweise viele Ereignisse erfasst werden, während für Neuseeland oder Afrika nur wenige bzw. keine gefunden wurden. Die häufigste Gefahrenart in der Dokumentation stellen die Gletscherhochwasser dar. Den Prozesskombinationen muss bei der Betrachtung von Gletschergefahren eine wichtige Bedeutung zukommen. Sie führten in der Vergangenheit zu den verheerendsten Katastrophen.

In Zukunft sollen auch aktuelle Ereignisse in die Dokumentation aufgenommen werden. Ausserdem besteht die Möglichkeit bis anhin unbekannte Ereignisse zu integrieren. So kann unter Umständen erreicht werden, dass sich die Datengrundlagen für die verschiedenen Kontinente angleichen.

Inhalt

Vorwort	i
Zusammenfassung	iii
Inhalt	v
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzungen	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Wissenschaftlicher Hintergrund	5
2.1 Gletscherlängenänderungen	5
2.1.1 Gletschervorstoss	5
2.1.2 Gletscherrückzug	5
2.1.3 Gletschersurge	6
2.2 Gletscherhochwasser	6
2.2.1 Gletscherseeausbrüche	6
2.2.1.1 Ausbrüche von moränen-gestauten Seen	7
2.2.1.2 Ausbrüche von eisgestauten Seen	7
2.2.2 Wassertaschenausbrüche	8
2.3 Eislawinen	9
2.4 Felsstürze	10
2.5 Prozesskombinationen und Kettenreaktionen	10
2.6 Interaktion zwischen vulkanischer Aktivität und Erdbeben mit Gletscher	10
2.7 Permafrost	10
2.8 Dokumentationen von Gletscherkatastrophen	11
2.8.1 World Glacier Monitoring Service (WGMS)	11
2.8.2 GLACIORISK European Project	11
2.8.3 Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning System in Hindu Kush Himalayas	12
3 Grundlagen	13
3.1 Datengrundlagen	13

3.1.1	Dokumentationen historischer Gletscherkatastrophen	13
3.1.1.1	World Glacier Monitoring Service (WGMS)	13
3.1.1.2	Glacierhazards	14
3.1.1.3	Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning System in Hindu Kush Himalayas	15
3.1.1.4	GLACIORISK European Project	15
3.1.2	Wissenschaftliche Journals	15
3.1.3	Internet	16
3.2	Methodische Grundlagen	16
3.2.1	Datenbankmodelle	16
3.2.2	Software	17
4	Datenmodell	19
4.1	Anforderungen	19
4.2	Aufbau	19
4.2.1	Identifikation	20
4.2.2	Datum	21
4.2.3	Gefahrentyp	21
4.2.4	Ereignisbeschreibung	22
4.2.5	Ergänzende Informationen	23
4.3	Inhalt	23
4.3.1	Allgemein	23
4.3.2	Beispiele	24
4.3.2.1	Giétro Gletscher, CH	25
4.3.2.2	Tête Rousse Gletscher, FR	26
4.3.2.3	Allalingletscher, CH	27
4.3.2.4	Glaciar 511 (Huascarán), PE	28
4.3.2.5	Langmoche Gletscher, NP	29
4.3.2.6	Azufrado (Nevado del Ruiz), CO	30
4.3.2.7	Hubbard Gletscher, US	31
4.3.2.8	Brenvagletscher, IT	32
4.3.2.9	Kolka Gletscher, RU	33
4.4	Darstellung im GIS	34
5	Auswertung	37
5.1	Verteilung der Ereignisse über den Globus	37
5.2	Prozesse / Prozesskombinationen	39
5.3	Saisonalität von Gefahrentypen	40
5.4	Analyse der Ereignisgrößen	42
5.5	Schadensausmass	44
5.6	Permafrostabschätzung	47
5.6.1	Globale Permafrostabschätzung mit MAAT-Ansatz (1. Methode)	47
5.6.2	Exposition-Seehöhen-Abschätzung für alpinen Permafrost (2. Methode)	48
6	Diskussion	51
6.1	Grundlagen	51
6.2	Erstellen des Datenmodells	52
6.2.1	Erfasste Attribute	52
6.2.1.1	Lokalisierung der Ereignisse	54
6.2.1.2	Erfassen des Datums	54
6.2.1.3	Erfassen des Gefahrentyps	54
6.3	Auswertung	55
6.3.1	Verteilung der Ereignisse über den Globus	55

	6.3.2 Prozesse / Prozesskombinationen	56
	6.3.3 Saisonalität von Gefahrentypen	56
	6.3.4 Analyse der Ereignisgrößen	56
	6.3.5 Schadensausmass	57
	6.3.6 Permafrostabschätzung	57
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	61
8	Literatur	65
9	Anhang	71

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Erwärmungstendenz der Atmosphäre in den letzten 150 Jahren führte zu einem globalen Rückzug der Gebirgsgletscher (Hoelzle et al., 2003), sowie zu einer Verschiebung der Permafrostgrenze in höhere bzw. nördlichere klimatische Gebiete (IPCC, 2001). Damit ging eine Veränderung der Gefahrensituation im alpinen Lebensraum einher. Einerseits sind die Voraussetzungen für historisch wiederholt eingetretene Gefahrenprozesse nicht mehr überall gegeben. Andererseits konnten sich neue Gefahrenpotentiale ausbilden, etwa wenn sich ein Gletscher in eine Steilstufe zurückzieht, von wo sich gefährliche Eisabbrüche lösen können (Haeberli und Beniston, 1998). Da sich die Erwärmungstendenz, und somit auch der globale Gletscherrückzug, in naher Zukunft fortsetzen werden (Zemp et al., 2006), muss weiterhin mit dem Entstehen gefährlicher Situationen in den glazialen und periglazialen Räumen der Erde gerechnet werden. Durch die erhöhte Aktivität des Menschen in vielen Hochgebirgen, v. a. durch Tourismus und Siedlungsaktivität, geraten immer mehr Menschen in den Einflussbereich solcher Gletschergefahren.

Gletscherhochwasser stellen im Vergleich zu anderen Gletschergefahren die am weitreichendste Gefahr dar. Durch den Gletscherrückzug kommt es in verschiedenen Bereichen der Gletscher vermehrt zur Bildung von Seen, welche durch die vorgelagerte Moräne oder Teile des Gletschers gestaut werden. Kommt es zum Seeausbruch können weitreichende Flutwellen ausgelöst werden, welche nicht selten Menschenleben fordern oder Infrastrukturanlagen zerstören.

Weniger weitreichende Ereignisse sind Eislawinen. Sie können aber vor allem in dicht besiedelten Gebirgsregionen verheerende Auswirkungen haben (Alean, 1984; Haeberli et al., 1989). Die Veränderung der geometrischen, thermischen und hydrologischen Bedingungen im Gletscher bedingt durch den Temperaturanstieg, kann das Risiko für Eislawinen erhöhen. Ein weiteres Gefahrenpotential geht von Felswänden aus, die durch den Gletscherrückzug freigelegt wurden oder in denen sich der Permafrost aufwärmte. Die genannten Prozesse können die Stabilität der Felswände reduzieren, wodurch sich das Felssturzsrisiko erhöht (Fischer et al., 2006).

Auch Gletscherlängenänderungen können Schäden anrichten, etwa an Gebäuden in unmittelbarer Gletschernähe. Indirekte Folgen von Längenänderungen können Hochwasser oder Eisstürze sein. Eine spezielle Form von Längenänderungen stellt der Gletschersurge dar. Darunter sind sich periodisch

wiederholende, rasche Vorstösse eines Gletschers zu verstehen. Als direkte Folge davon kann das Überfahren von Installationen genannt werden.

Zerstörerische Auswirkungen können insbesondere auch Prozesskombinationen haben. Als Beispiel hierfür kann der Fall *Huascarán* genannt werden, wo am 31. März 1970 ein Starkbeben am Gipfel einen Fels-/Eissturz auslöste, der sich zu einem enormen Murgang entwickelte. 18'000 Menschen wurden Opfer dieser Katastrophe (Reynolds, 1992).

Verschiedene Studien beschäftigen sich mit Gletscher- und Permafrostkatastrophen der Vergangenheit und inventarisieren diese u. a. auch. So präsentiert die Internetseite www.glacierhazards.ch eine Datenbank über Gletscherkatastrophen der Schweiz. Das Projekt *GLACIORISK* der EU stellt auf dem Internet eine Datenbank historischer Gletscherkatastrophen in Europa zur Verfügung. Beide Studien konzentrieren sich dabei auf bestimmte Regionen der Erde.

Eine globale Dokumentation historischer Gletscherkatastrophen existiert bis heute nicht. Eine solche wäre aber wünschenswert, um die weltweite Bedeutung und Ausprägung solcher Ereignisse abzuschätzen und zu beurteilen. Dies ist auch ein wichtiges Anliegen der Arbeitsgruppe GAPHAZ (Glacier and Permafrost Hazards in Mountains), welche den Anstoss zu dieser Arbeit lieferte. Um die Dokumentation den interessierten Experten zugänglich zu machen, soll sie auf der Internetseite von GAPHAZ (<http://jern.uio.no/remotesensing>) erscheinen.

1.2 Zielsetzungen

In Anlehnung an die obigen Ausführungen wurden für die vorliegende Arbeit folgende Zielsetzungen definiert:

Die Arbeit stellt eine Dokumentation über Gletscherkatastrophen der jüngeren historischen Vergangenheit dar. In einer geeigneten Datenstruktur sollen verschiedene Parameter wie Reichweite, involvierte Volumen oder Schäden erfasst werden. Mit Hilfe eines einfachen Geographischen Informationssystems (GIS) sollen die Daten visualisiert und auf dem Internet für Experten zugänglich gemacht werden.

Die Arbeit soll ein möglichst breites Spektrum an Prozessen und Prozesskombinationen aufzeigen. Damit soll eine Grundlage für Experten geschaffen werden, die Wissenschaftler und Entscheidungsträger unterstützt, Gefahren in Gletscher- und Permafrostgebieten aufgrund ihrer weltweiten Bedeutung und Ausprägung objektiv zu beurteilen.

Entsprechend können folgende vier Teilziele definiert werden:

1. Sammeln und Aufbereiten von Informationen über historische Gletscherkatastrophen.
2. Aufbau eines geeigneten Datenmodells, um verschiedene Parameter (Reichweite, Volumen, Schäden etc.) der Ereignisse zu erfassen.
3. Analyse der gesammelten Ereignisse.
4. Visualisierung der Daten mit Hilfe eines GIS und zur Verfügung stellen der gesammelten Daten auf dem Internet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst folgende Inhalte: Zuerst werden in Kapitel 2 die verschiedenen Gefahrenarten in Zusammenhang mit Gletschern und Permafrost aufgezeigt. In Kapitel 3 finden sich Informationen über Datengrundlagen, sowie methodische Grundlagen. Anschliessend wird im 4. Kapitel erklärt, wie das Datenmodell aufgebaut ist und welche Ereignisse darin erfasst sind.

In Kapitel 5 wird eine Auswertung der Dokumentation vorgenommen, die im folgenden Kapitel diskutiert wird. Beendet wird die Arbeit durch zusammenfassende Schlussfolgerungen und einen Ausblick.

Kapitel 2

Wissenschaftlicher Hintergrund

2.1 Gletscherlängenänderungen

Neben der Änderung der Gletschergeometrie bilden Änderungen in der Gletscherlänge die wichtigste Ursache für Gletscherstürze und -hochwasser. Die Veränderung der Position eines Gletschers ist ein Prozess, der sich langsam vollzieht (Ausnahme: Gletschersurge) und welcher direkt meist keine katastrophalen Ereignisse auslöst. Gefährdet sind vorwiegend Bauwerke in unmittelbarer Gletschernähe, wie Staudämme, Wasserfassungen oder Seilbahnstationen. Katastrophal können sich eine Reihe von sekundären Gefahren auswirken, die durch Gletscherlängenänderungen entstehen. Wie solche Gefahren aussehen können, wird im Kapitel 2.1.1 erläutert. Gletscherlängenänderungen können drei verschiedenen Typen zugeordnet werden. Diesen entsprechen der stabile Gletschervorstoss, der Gletscherrückzug und der Gletschersurge.

2.1.1 Gletschervorstoss

Bei einem stabilen Gletschervorstoss überwiegt die Akkumulation die Ablation (Haeberli und Käab, 2004). Die Vorstosseschwindigkeit bewegt sich im normalen Bereich. Direkt gefährdet sind Installationen und Infrastrukturanlagen in unmittelbarer Gletschernähe, wie auch Land, das überfahren werden kann.

Stabile Gletschervorstöße können auch indirekte Folgen nach sich ziehen. Beispielsweise kann ein vorstossender Gletscher aus einem Seitental den Fluss im Haupttal aufstauen. Dahinter kann es zur Entstehung eines Sees kommen. Verschiedene Mechanismen können zum Ausbruch eines solchen Sees führen (vgl. dazu Kap. 2.2.1.2). Eine verheerende Flutwelle wäre eine mögliche Konsequenz (Richardson und Reynolds, 2000).

2.1.2 Gletscherrückzug

Im Gegensatz zum Gletschervorstoss überwiegt beim Gletscherrückzug die Schmelze den Eisnachschub. Ein Gletscherrückzug stellt direkt keine Gefahr dar. Jedoch können eine Reihe von sekundären Gefahren ausgelöst werden. Etwa wenn sich der Gletscher über eine Steilstufe zurückzieht. Das Risiko für die Auslösung von Eislawinen aus dieser Position wird dadurch erheblich erhöht. Auch werden

durch den Gletscherrückzug Felsflanken freigelegt, was zur Reduktion der Stabilität in den Wänden führt, wodurch das Risiko für Felsstürze erhöht wird.

Schmelzwasser vom Gletscher können zur Entstehung von Seen führen, die entweder durch die vorge-lagerte Moräne oder Teile des Gletschers gestaut werden. Von diesen Gletscherseen geht die Gefahr eines Ausbruchs aus (Richardson und Reynolds, 2000).

Auf die starke Erwärmung im 20. Jahrhundert reagieren bestimmte Gletscher nicht mehr mit einem Rückzug, sondern zerfallen regelrecht (Paul et al., 2004). Das heisst, die Gletscher dünnen im Zungenbereich extrem aus und es kommt vermehrt zu Toteisbildung.

2.1.3 Gletschersurge

Unter einem Gletschersurge versteht man die periodische Entleerung eines mittelfristig aufgebauten Eisreservoirs (Harrison und Post, 2003), was sich in raschen Vorstössen bemerkbar macht. Die Vorstosseschwindigkeit kann dabei um ein mehrfaches grösser sein als in normalen Vorstossphasen und 100 m oder mehr pro Tag betragen. Ein Anstieg der Höhe der Gletscheroberfläche und eine intensive Spaltenbildung begleiten normalerweise den Surge. Verschiedene Gletscher sind für Surges bekannt. Bei ihnen wiederholt sich dieser Prozess periodisch. Es scheint, als stünden die Surges nicht in Zusammenhang mit allgemeinen klimatischen Trends, was die Vorhersage schwierig macht (Richardson und Reynolds, 2000). Haeberli und Kääb (2004) stellt fest, dass die Wiederholdauer des Vorgangs mit dem Wiederaufbau des entleerten Reservoirs zusammenhängen dürfte. Neben den direkten Einflüssen von Gletschersurges (wie das Überfahren von Installationen oder Ackerland), kann ein solcher auch sekundäre Gefahren verursachen, wie dies auch bei stabilen Vorstössen der Fall ist.

2.2 Gletscherhochwasser

Gletscherhochwasser stellen im Vergleich zu anderen Gletschergefahren das grösste Gefahrenrisiko mit den am weitreichendsten Prozessräumen dar und können in allen vergletscherten Gebieten der Erde auftreten (Kääb et al., 2005; Haeberli und Kääb, 2004). Sie entstehen bei der plötzlichen Entleerung eines glazial gespeicherten Wasserreservoirs, welches sich im, auf, unter oder am Rand eines Gletschers befinden kann (Abb. 2.1).

In der Literatur findet man verschiedene Bezeichnungen für verschiedene Arten von Gletscherhochwasser. Der isländische Begriff *jökulhlaup* bezeichnete ursprünglich Gletscherfluten, welche auf Grund von subglazialen vulkanischen Eruptionen entstanden sind. Heute wird dieser Begriff auch allgemein für Gletscherhochwasser verwendet. Als *GLOF (Glacier Lake Outburst Flood)* werden Flutwellen bezeichnet, die aufgrund eines Gletscherseeausbruchs entstanden sind. Dieser Begriff wird vor allem für Gletscherhochwasser im Himalaja verwendet. Daneben existiert der Begriff *débaclé* aus dem Französischen, was eine Flutwelle aus einem proglazialen See meint. Das Gleiche versteht man heute unter *aluvion*. Dieser Begriff stammt aus dem Spanischen und bezeichnete ursprünglich katastrophale Schuttströme, wobei das auslösende Ereignis nicht definiert war (Liboutry et al., 1977).

Grundsätzlich lassen sich zwei Typen glazialer Wasserreservoirs differenzieren: Gletscherseen und Wassertaschen (Haeberli und Kääb, 2004).

2.2.1 Gletscherseeausbrüche

Gletscherseen können sich pro-, rand-, supra- oder periglazial bilden, d. h. sie sind für den Beobachter jederzeit sichtbar. Sie können entweder durch die vorgelagerte Moräne oder durch Eisdämme gestaut werden.

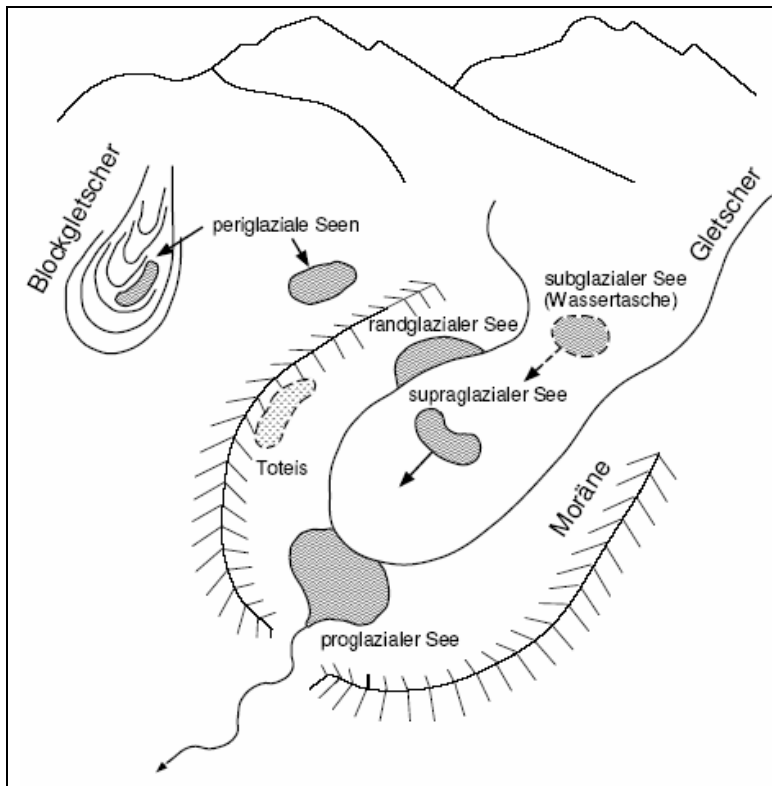


Abb. 2.1: Glaziale Wasserreservoirs (Quelle: Raymond et al. nach der Vorlesung "Gletscher im Umweltkontext" von W. Haeberli und A. Käab, 2004).

2.2.1.1 Ausbrüche von moränen-gestauten Seen

Proglaziale, moränen-gestaute Seen entstehen bevorzugt vor kurzen und steilen Gletschern. Das Gefälle erleichtert das Abführen des Schmelzwassers vom Gletscher, welches sich im Gletschervorfeld ansammeln kann. In diesem Fall wird das Wasser durch die Moräne gestaut, die aus unkonsolidiertem Lockergestein besteht und reliktsches Toteis enthalten kann (Richardson und Reynolds, 2000). Schmilzt dieses Eis reduziert sich die Stabilität der Moräne, Porosität und Wasserdurchlässigkeit nehmen zu (Raymond et al., 2003). Da die Moränen der 'Kleinen Eiszeit' (um 1850) sehr hoch werden können (im Himalaja bis zu 100 m), besteht die Möglichkeit, dass Gletscherseen Volumina zwischen $1 - 100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ erreichen und eine erhebliche Gefahr darstellen. Von solchen Gletschern lösen sich auch häufig Eislawinen. Diese können in den See stürzen und Schwallwellen bilden, was unter Umständen den Bruch des Damms verursachen kann (Richardson und Reynolds, 2000).

Brüche von schmalen, hohen Moränendämmen produzieren normalerweise grössere Spitzenabflüsse, als breite, niedere Dämme. Dämme, die einen grossen Sand- und Kiesanteil aufweisen haben die Tendenz schneller zu brechen und führen zu einem grösseren Spitzenabfluss als Dämme aus grobblockigem Sediment (Clague und Evans, 2000). Bei schmalen, stark porösen Moränendämmen besteht zusätzlich die Gefahr eines Seeausbruchs infolge progressiven Grundwasserabflusses (Raymond et al., 2003).

2.2.1.2 Ausbrüche von eisgestauten Seen

Lange Talgletscher reagieren auf eine negative Nettomassenbilanz kurzfristig (nicht aber langfristig) mit Ausdünnen, wobei die Position der Gletscherzunge ungefähr gleich bleibt. Schmelze an der Oberfläche des Gletschers kann zur Bildung kleiner supraglazialer Seen führen. Verhindert die Gletscherstruktur das Abfliessen dieser individuellen Seen, können sich diese mit der Zeit zu grösseren Seen verbinden. Einige der grössten Gletscherseen des Himalayas haben sich auf diese Weise gebildet (z.B. Tsho Rolpa, Nepal) (Richardson und Reynolds, 2000).

Gletscher die aus einem Seitental in ein Haupttal fließen und den dortigen Fluss aufstauen, bilden eine weitere Art von Eisdämmen (Mool, 2003). Auch Eisabbrüche können unter Umständen ein Tal verschliessen und den Bach aufstauen. 1818 führten Eisabbrüche des vorstossenden Glacier du Giétro in der Schweiz zur Bildung eines gewaltigen Eisdamms, welcher die Dranse staute. Hinter dem Eisdamm entstand ein See von ca. 30 Mio m³ Volumen. Trotz des Baus eines Abflusstollens brachen am 16. Juni 1818 20 Mio m³ Wasser aus und führten zu einem Hochwasser im Tal (Raymond et al., 2003).

Eisdämme können entweder plötzlich (mechanisch) oder progressiv (hydraulisch) brechen (Abb. 2.2). Zu einem plötzlichen Bruch kommt es, wenn der Damm aus gebrochenem Eis (Trümmer von Eislawinen, Surge-Gletscher) besteht. In diesem Fall wird der Wasserabfluss durch Eistrümmer gehemmt, wodurch sich innerhalb kurzer Zeit ein beträchtliches Wasservolumen ansammeln kann. Vor dem Ausbruch lässt sich deshalb eine deutliche Abflussreduktion im Gletscherbach beobachten. Bei einem mechanischen Bruch steigt der Wasserspiegel im Bach sehr schnell an (Haeberli, 2003).

Progressive oder hydraulische Brüche stellen den häufigsten Ausbruchmechanismus dar, aber nicht unbedingt den gefährlichsten. Sie treten bei kompakten Eisdämmen (Gletscher) auf. Haeberli (1983) stellt fest, dass das Schwimmgleichgewicht von Eis von der Wasser- und Eisdichte abhängig ist. Sobald der Seespiegel bis auf 10/11 der Eisdammmächtigkeit angestiegen ist, besteht Aufschwimmgefahr. Ist die Geometrie des Gletscherbettes und der Gletscheroberfläche bekannt, lässt sich die Aufschwimmgefahr für einen gegebenen Seespiegel berechnen (Clague und Evans, 1994). Nach dem Anheben des Gletschers erfolgt ein progressiver Grundwasserfluss am Gletscherbett. Die Entleerung des Sees ist von der Transportkapazität des subglazialen Kanals abhängig, welche zunächst durch die Schmelze ansteigt und mit der Zeit durch die Kontraktion des Kanals unter der Eisüberlast wieder abnimmt (Haeberli, 1983).

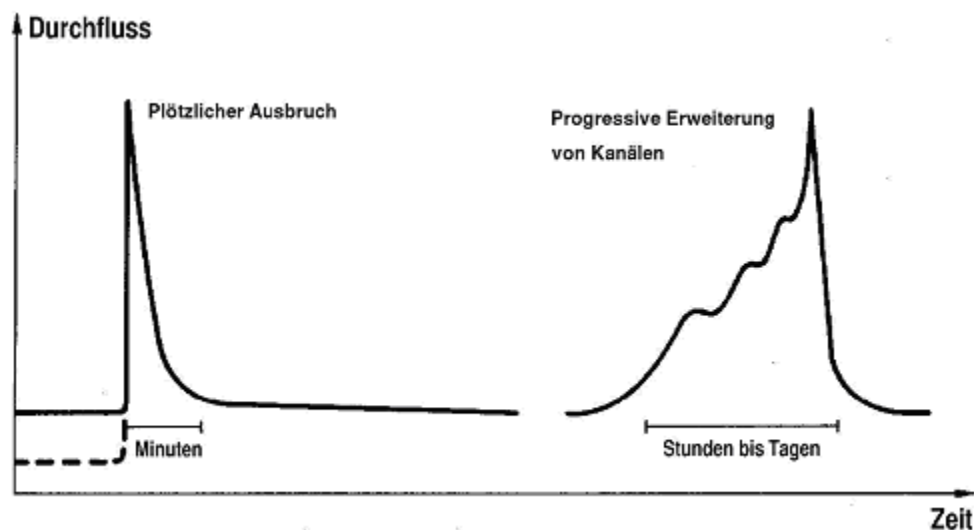


Abb. 2.2: Schematische Abflussganglinien im Bach nach einem mechanischen (links) und einem hydraulischen Bruch (rechts) eines Eisdamms (verändert nach Haeberli, 1983).

2.2.2 Wassertaschenausbrüche

Als Wassertaschen werden alle grösseren Wasseransammlungen in einem Gletscher bezeichnet, die der visuellen Beobachtung entzogen sind (Raymond et al., 2003). Daher sind Wassertaschenausbrüche meist überraschend und kaum vorhersehbar. Gewisse Gletscher sind allerdings für solche Ausbrüche bekannt (z.B. Glacier du Trient, Schweiz).

2.3 Eislawinen

Eislawinen stellen weniger weitreichende Gletschergefahren dar als Gletscherhochwasser. Sie können aber vor allem in dicht besiedelten Hochgebirgsräumen verheerende Auswirkungen haben. Dramatische Folgen können Eislawinen auch in Kombination mit anderen Gefahrenarten haben (vgl. dazu Kap. 2.2.1.1). Interaktion mit seismischer Aktivität oder geothermalen Wärmeflüssen erhöht das Risiko für grössere Eisabbrüche. Die zerstörerische Kraft solcher Interaktionen zeigte sich deutlich im Jahr 1970, als ein Erdbeben in Peru den Abbruch eines riesigen Eisvolumens bewirkte. Durch den entstandenen Schuttstrom kamen 18'000 Menschen ums Leben (Reynolds, 1992).

Eislawinen lösen sich ausschliesslich in steilem Gelände. Bei hochgelegenen Hängegletschern sind sie die normale Form der Ablation.

Alean (1984) verwendet die folgende Klassifizierung der Anrisszonen:

- I. Rampe
 - Ia. temperiertes (gleitendes) Eis
 - Ib. kaltes (angefrorenes) Eis

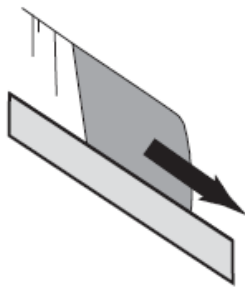


Abb. 2.3: Rampe: Eislawine löst sich über gleichmässig geneigter Bergflanke (Quelle: Huggel et al., 2004)

Beim Rampentyp (Abb. 2.3) löst sich die Eislawine über einer gleichmässig geneigten Bergflanke. Innerhalb dieses Typs wird zwischen Abbrüchen aus temperiertem Eis (Gletscher gleitet am Bett) und kaltem Eis (Gletscher ist am Bett angefroren) unterschieden. Eislawinen von temperierten Gletschern treten vorwiegend im Sommer und Herbst auf, wenn der Reibungswiderstand am Gletscherbett durch subglaziales Wasser erniedrigt und folglich die Gleitkomponente erhöht ist. Eisabbrüche von kalten Gletschern können sich jederzeit lösen. Bei diesem Typ können Eisvolumen von über einer Million m³ losbrechen.

- II. Kante
 - Absturz über Felsterrasse

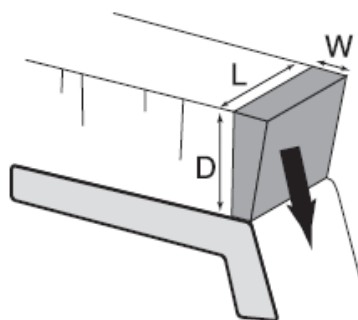


Abb. 2.4: Kante: Eislawine löst sich über einem deutlichen Felsvorsprung (Quelle: Huggel et al., 2004)

Beim Kantentyp (Abb. 2.4) löst sich die Eislawine über einem deutlichen Felsvorsprung. Das Eisvolumen bei diesem Typ hängt vom Eisnachschub ab und ist meistens von beschränkter Grösse ($\leq 10^5$ m³). Ihre Auslösung kann spontan während des ganzen Jahres erfolgen (Raymond et al., 2003). Zusätzlich kann noch ein dritter Typ unterschieden werden, die Eis-/ Felslawine. In der Natur kann zwischen den einzelnen Typen oft nicht klar differenziert werden, da der Übergang vom einen zum anderen Typ fließend ist.

2.4 Felsstürze

Der Gletscherrückzug und das Aufschmelzen des Permafrostes im Hochgebirge führen zu thermalen, hydrologischen, hydraulischen und mechanischen Veränderungen in den Felswänden. Diese Veränderungen können zu einem erhöhten Felssturzsrisiko aus solchen Wänden führen. Felsstürze können auch Teile des darüberliegenden Gletschers mitreißen (vgl. dazu Kap. 2.3). Stürzt die Felsmasse auf einen Gletscher kann die Fließgeschwindigkeit, infolge der verminderten Reibung, und somit auch die Reichweite erhöht werden.

Befindet sich das Schadenpotential in der Sturzbahn, stellen Felsstürze eine direkte Gefahr dar. Sie können aber auch indirekte Gefahren verursachen, etwa wenn Felspartien in einen See stürzen und dort eine Schwallwelle auslösen. Felsstürze, die bis ins Tal reichen, können Flüsse zu Seen aufstauen, von denen die Gefahr ausgeht, dass sie ausbrechen (Barla et al., 2000).

2.5 Prozesskombinationen und Kettenreaktionen

Gletscherhochwasser, Eislawinen und Gletscherlängenänderungen stellen ein erhebliches Gefahrenpotential für das Hochgebirge dar. Gleiche, wenn nicht noch grössere Bedeutung muss dabei den Kombinationen oder Kettenreaktionen dieser oder anderer Gefahrentypen zugerechnet werden (Kääb et al., 2005). Tatsächlich können die grössten bekannten Gletscherkatastrophen auf solche Kombinationen oder Kettenreaktionen zurückgeführt werden. Ein Beispiel ist das Stürzen einer Eis- oder Felslawine in einen natürlichen oder künstlichen See. Als Folge davon kann eine Schwallwelle entstehen, die zum Überlaufen oder Brechen des Damms und zu einer verheerenden Katastrophe im Tal führen kann (z.B. Langmoche Gletscher, 1985). Ein weiteres Beispiel ist auch eine Eislawine im Winter, deren Auslaufdistanz durch die stark reduzierte Reibung auf Schnee erhöht wird (Kääb et al., 2005).

2.6 Interaktion zwischen vulkanischer Aktivität und Erdbeben mit Gletscher

Prozesskombinationen zwischen tektonischer Aktivität und Gletscher führten in der Vergangenheit mitunter zu den zerstörerischsten Gletscherkatastrophen (z.B. Huascaran, 1970).

Grosse Gefahr geht von vergletscherten Vulkanen aus. Die erhöhte geothermische Aktivität, geometrische und mechanische Veränderungen, Ablagerungen von heissem, eruptivem Material oder Veränderungen der Albedo durch vulkanische Ascheablagerungen können beträchtliche Volumen an Eis und Schnee schmelzen und so zur Bildung von Lahars führen (Pierson et al., 1990). Dies zeigte sich deutlich 1985, als eine relativ kleine phreatische Eruption am Nevado del Ruiz in Kolumbien enorme Mengen Eis und Schnee schmolz. Daraus resultierten mehrere Lahars. Der grösste davon zerstörte die Stadt Armero, wo 23'000 Menschen ums Leben kamen. Insgesamt hatten die Schlammströme ein Volumen von 90 Mio m³ und einen berechneten Spitzenabfluss von 48'000 m³/s (Thouret, 1990).

Erdbeben können Gletscher oder Felsflanken destabilisieren und die Wahrscheinlichkeit für Eis- oder Felsabbrüche erhöhen (Woerd et al., 2004).

2.7 Permafrost

Als Permafrost wird Lithosphärenmaterial bezeichnet, das ganzjährig gefroren bleibt. Permafrost existiert überall dort, wo die Bodentemperatur über mehrere Jahre hinweg unter 0°C bleibt (IPCC, 2001). Ausgehend von der Formel:

$$\text{MAPT (Mean annual permafrost temperature)} \approx \text{MAAT (Mean annual air temperature)} + 3.5^\circ\text{C} \pm 3.5^\circ\text{C}$$

lässt sich ableiten, dass Permafrost bei einer MAAT zwischen 0 und -1°C diskontinuierlich, bei ca. -6°C bis -8°C kontinuierlich auftritt. Unter rund 20% der Landoberfläche der Erde findet man Permafrost, etwa die Hälfte davon liegt allerdings subglazial. Am stärksten betroffene Gebiete sind (in Prozent der Landfläche im Permafrost): Antarktis (100%), Grönland (99%), Russland (50%), Kanada (45%) und China (20%) (Haeberli et al, 2003).

Die Klimaänderung im 20. Jahrhundert führt auch zu ansteigenden Permafrosttemperaturen. Diese Veränderungen bewirken eine Verschiebung der Permafrostgrenze in nördlichere bzw. höhere klimatische Gebiete. Damit ging auch eine Veränderung der Gefahrensituation in diesen Regionen einher. Permafrost ist ein wichtiger Faktor der Stabilität von Felswänden. Durch das Auftauen des Permafrostes in solchen Wänden, können diese instabil werden und vermehrt zu Felsstürzen führen (Haeberli et al., 2003).

Permafrost spielt auch bei der Betrachtung der Stabilität von Hängegletschern eine wichtige Rolle. Befindet sich unter einem Gletscher Permafrost, findet praktisch kein Gleiten am Gletscherbett statt. Ändern sich die Permafrosttemperaturen unter solchen Gletschern, kann die Stabilität empfindlich gestört werden, was dramatische Folgen nach sich ziehen kann (Haeberli et al., 2003).

2.8 Dokumentationen von Gletscherkatastrophen

Bis heute existieren verschiedene Studien über Gletscherkatastrophen, welche solche unter anderem auch dokumentieren und inventarisieren. Im Folgenden werden eine Institution, sowie zwei Projekte vorgestellt, die sich mit dem Thema Gletschergefahren auseinandersetzen. Da diese auch als Datengrundlage verwendet wurden, wird auf den Aspekt der Gletschergefahren im Kapitel 3.1.1 noch ausführlicher eingegangen.

2.8.1 World Glacier Monitoring Service (WGMS)

Der *World Glacier Monitoring Service (WGMS)* wurde 1986 ins Leben gerufen, nachdem die beiden früheren Dienste *PSFG (Permanent Service on Fluctuations of Glaciers)* und *TTS/WGI (Temporal Technical Secretary/World Glacier Inventory)* zusammengeschlossen wurden. Die gegenwärtige Aufgabe des WGMS besteht darin, standardisierte Beobachtungen über Massen-, Volumen- und Längenänderungen von Gletschern zu sammeln, sowie statistische Informationen über die räumliche Verteilung von perennierendem Oberflächeneis zu erheben.

Durch das Sammeln von weltweit standardisierten Gletscherdaten will der WGMS einen Beitrag zum *Global Environment Monitoring System (GEMS/GTOS)* der *United Nations Environment Programme (UNEP)* und zum *International Hydrological Programme (IHP)* der *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO)* leisten.

So soll ein möglichst komplettes und ständig aktualisiertes Gletscherinventar entstehen. Eine wichtige Leistung des WGMS ist die Publikation des *Fluctuations of Glaciers (FoG)*, in welchem die Daten über die Gletscherveränderungen im Abstand von fünf Jahren gesammelt und publiziert werden. Seit der Ausgabe *FoG 1980 – 1985 (Vol. V)* werden im Kapitel `Special Events` ausserordentliche Ereignisse in Zusammenhang mit Gletschern aufgeführt, vor allem wenn diese Gletschergefahren oder drastische Veränderungen an Gletschern betreffen (www.wgms.ch).

2.8.2 GLACIORISK European Project

Das Projekt GLACIORISK wurde von der EU teilfinanziert. Involviert sind alle Staaten Europas, die nennenswerte Gletscherflächen innerhalb ihrer Grenzen aufweisen. Es sind dies: Frankreich, Island, Italien, Norwegen, Österreich und die Schweiz. Aus diesen sechs Ländern waren elf Institutionen beteiligt. Das Projekt GLACIORISK wurde 2001 gestartet und Ende 2003 fertiggestellt. Ziel des Projekts war es, jene Gletscher Europas, die in der Vergangenheit gefährliche Situationen verursacht haben, immer noch Gefährdungspotential aufweisen oder in Zukunft bedrohlich werden können, in einer Datenbank mit dem Namen GRIDATABASE zusammenzufassen. Das bisherige Wissen über

Gletscherrisiken basiert auf Erfahrungen aus der Vergangenheit. Dieser Zugang ist, auf Grund sich verändernder Umwelt- und Klimabedingungen, von beschränktem Nutzen. Aus diesen Überlegungen heraus, ist es für europäische Alpenländer wichtig, das Risiko, welches durch Gletscher entsteht, zu überprüfen und abzuschätzen (<http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>).

2.8.3 Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning System in Hindu Kush Himalayas

Das Projekt über Gletscher und Gletscherseen wurde 1999 vom *International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)* und vom *United Nation Environment Programme/Regional Resources Centre, Asia - Pacific (UNEP/RRC-AP)* initiiert. Das Hauptziel des zweijährigen Projektes besteht darin, ein operatives Frühwarnsystem für Gletscherseeausbrüche im Hindu Kush Himalaja zu erstellen. Die spezifischen Ziele umfassen das Inventarisieren bestehender Gletscherseen entlang des Hindu Kush Himalaja, die Überwachung von potentiell gefährlichen Seen, sowie das Erstellen eines betriebsbereiten Frühwarnmechanismus für Gletscherseeausbrüche. Das Projekt soll ständig aktualisierte Informationen über die gegenwärtige Situation der Gletscherseen liefern. Weiter soll vor Ort geprüft werden, welche Kapazitäten zur Prävention, zur Inventarisierung, zur Überwachung und Frühwarnung von GLOF-Ereignissen bestehen. Aufgrund dieser Erkenntnisse soll dann ein operatives Frühwarnsystem für Gletscherseeausbrüche eingesetzt werden. Das Hauptziel der beschriebenen Studie ist es, den Bewohnern der Himalaja-Region sichere und nachhaltige Lebensumstände zu gewährleisten. Dies soll u. a. durch ein verbessertes Verständnis der Umweltgefahren in Zusammenhang mit Gletscher und Gletscherseen erreicht werden.

Ein langfristiges Ziel der Studie ist das Erstellen eines Inventars sowie einer digitalen Datenbank über Gletscher und Gletscherseen. Weiter sollten Veränderungen bedingt durch die globale Erwärmung festgestellt und untersucht werden, wie diese Veränderungen Gletscherhochwasser oder andere Gletschergefahren beeinflussen (www.rrcap.unep.org/projects/glof.cfm).

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Datengrundlagen

Einen ersten Überblick über historische Gletscherkatastrophen geben W. Haeberli und A. Kääb (2004) in `Gletscher im Umweltkontext`. Im Teil `Gletscher als Naturgefahren` findet man Informationen zu den Gletschergefahren Hochwasser, Eisstürze und Längenänderungen. Zu jeder Gefahrenart werden Beispiele genannt und kurz erläutert. Die meisten der dort aufgeführten Ereignisse finden sich in der vorliegenden Dokumentation wieder. Als weiterführende Informationsquellen wurden vor allem bereits bestehende Inventare über Gletscherkatastrophen, Journals, Bücher und das Internet verwendet.

Aus den im Folgenden beschriebenen Quellen galt es, möglichst viele bedeutende Ereignisse zu extrahieren und sie in einer geeigneten Tabellenstruktur zu erfassen. Momentan sind in der Dokumentation 88 Ereignisse registriert. Diese Anzahl stellt eine erste Datenbasis dar und kann jederzeit, um neue Ereignisse ergänzt werden. Alle in der Literatur gefundenen Ereignisse wurden anhand einer Kriterienliste (Tab. 4.2, S. 23) geprüft und aufgenommen, wenn sie den Kriterien entsprochen haben. So wurde eine Einschränkung der Datenmenge auf die weltweit bedeutendsten Katastrophen erreicht. In einem weiteren Schritt der Arbeit wurde versucht, aus den verschiedenen Informationsquellen die nötigen Attributgrößen zu gewinnen, um so die Tabelle möglichst zu vervollständigen.

3.1.1 Dokumentationen historischer Gletscherkatastrophen

3.1.1.1 World Glacier Monitoring Service (WGMS)

Wie bereits in Kapitel 2.8.1 erwähnt, publiziert der WGMS alle fünf Jahre das *Fluctuations of Glaciers (FoG)*. Seit der Ausgabe *FoG 1980 – 1985 (Vol. V)* findet sich darin das Kapitel `Special Events`, wo ausserordentliche Ereignisse bestimmter Gletscher aufgelistet werden (Abb. 3.1). Gemäss WGMS sind das Ereignisse, die ein Risiko für die menschlichen Aktivitäten darstellen, wie etwa Gletschersurges, Gletscherseeausbrüche, Eislawinen oder Eruptionen eisbedeckter Vulkane. Die Ereignisse werden von sogenannten `National Correspondents` gemeldet. Anhand eines Datenblattes werden die nötigen Informationen über ein Ereignis zusammengetragen. Diese Datensammlung ist nicht umfassend. So fehlen Ereignisse, welche zum Zeitpunkt der Publikation den Autoren nicht bekannt waren oder solche die zu klein oder zu unbedeutend waren.

Um die Ereignisse auch digital zu erfassen, wurde zusätzlich eine Excel-Tabelle ausgearbeitet, in welche die National Correspondents ihre Beobachtungen eintragen können. Bis heute sind darin 85 Events beschrieben. Erfasst werden Attribute wie POLITICAL_UNIT, WGMS_ID, GLACIER_NAME, EVENT_DATE, EVENT_TYPE, EVENT_DESCRIPTION, DATA_SOURCE und REMARKS. Die genaue Bedeutung dieser Attribute wird in Kapitel 4 beschrieben (WGMS, 2005).

Grey and Maud (NZ711M2)	tectonic impact
T.J. Chinn, DSIR	
Rock Avalanches occurred on 2 May and 16 September 1992, Mount Fletcher, New Zealand. The southeastern face of Mount Fletcher (2450 m) in New Zealand's Southern Alps has been a regular source of rockfalls and rock avalanches for many decades. The pace of collapse quickened recently, with the occurrence of many rockfalls since about December 1991 and of two major rock avalanches at 2008 hrs, 2 May 1992, and 1515 hrs, 16 September 1992. The first rock avalanche, inspected on 5 May, removed a 250 m length of ridge immediately to the northeast of Mount Fletcher. A large rock buttress supporting a small glacier on the face also collapsed, indicating failure over the full height of the dome. The volume of this avalanche was 5–10 million m³. The second avalanche, inspected on 20 September, removed a longer section of ridge line extending to the northeast of the first to leave an ice-cliffed ridge line where it cut through the head of a small glacier. The ridge probably did not fail over the full height of the slope, and a smaller volume, perhaps 5 million m³, failed. It did, however, remobilize most of the earlier deposit, and thus had the greater deposit volume. Both avalanches blanketed the Maud Glacier with debris and entered a proglacial lake. References/most important data sources: McSaveney (1993).	

Abb. 3.1: Eintrag im Fluctuations of Glaciers 1990 – 1995 (Vol. VII).

3.1.1.2 Glacierhazards

Nach der Katastrophe am Allalingletscher 1965, wo eine Eislawine die Baustelle am Mattmarkstausee verschüttete, wurde begonnen Dokumentationen und Analysen über historische Gletscherkatastrophen zu erstellen und durchzuführen (Haeberli, 1983; Haeberli et al., 1989; Haeberli et al. 2006). Die seit daher gesammelten Daten sind in der Online-Datenbank *Glacierhazards* zusammengestellt. Die Ereignisse sind nach verschiedenen Suchkriterien geordnet und zuerst nach dem Namen des Gletschers sortiert. Es kann aber auch nach Zeitperioden, geographischer Region/Ort und verschiedenen quantitativen Grössen der Prozesse gesucht werden. Ebenso können Abfragen nach ganz bestimmten Suchbegriffen gestartet werden.

Der grundlegende Nutzen der gesammelten Daten dieser Datenbank liegt in deren Nutzung für die Herleitung oder Anpassung von empirischen Beziehungen von Gefahrenprozessen. Solchermassen hergeleitete empirische Beziehungen liefern Abschätzungen von Grösse und Auswirkungen von Gletschergefahren. Häufig werden dabei sogenannte `worst-case` Szenarien angewendet, um eine möglichst sichere, auf den schlimmsten Fall ausgerichtete Beurteilung zu erlangen (www.glacierhazards.ch).

3.1.1.3 Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning System in Hindu Kush Himalayas

Als Ergebnis dieses Projektes entstanden unter anderem vier Berichte (Lizong et al., 2003; Mool et al., 2001; Mool et al., 2003) über die Länder Nepal, Bhutan, Pakistan und Tibet mit dem Titel *Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs), Affected by Global Warming in the Mountains of Himalayan Region*. Darin wird die Situation der Gletscher und Gletscherseen in den betreffenden Ländern beschrieben. Beispielsweise wurden in Nepal 3`252 Gletscher und 2`323 Gletscherseen inventarisiert. Die Studie identifizierte zudem zwanzig potentiell gefährliche Gletscherseen.

Anhand von Zeugenberichten, Satellitenbildern, Flugbildern und topographischen Karten verschiedener Jahre konnten in Nepal verschiedene Gletscherhochwasser ausgemacht werden. Diese Hochwasser hatten flussabwärts eine zerstörerische Wirkung und führten zu physischen und sozioökonomischen Langzeitschäden in den betroffenen Regionen. Die ermittelten Gletscherhochwasser werden in den Berichten ausführlich beschrieben (Mool et al., 2003).

3.1.1.4 GLACIORISK European Project

Das Projekt GLACIORISK lancierte wissenschaftliche Untersuchungen über die Beobachtung von gefährlichen Gletschern und die Prävention zukünftiger Gletscherkatastrophen mit der Absicht Menschenleben zu retten und Schäden zu reduzieren. Ein wichtiges Ziel stellte die Entwicklung von Modellierungs- und Überwachungstechniken für potentielle Gletschergefahren dar.

Basierend auf einer sorgfältigen Analyse historischer Gletscherkatastrophen versuchte GLACIORISK die häufigsten Gefahrentypen zu identifizieren, sowie die glazialen und geomorphologischen Bedingungen zu untersuchen, welche zur Entstehung solcher Gefahrensituationen führen. Anhand dieser Untersuchungen lassen sich potentiell gefährliche Gletscher, sowie der relevante Gefahrentyp identifizieren. All diese Studien führten zum Aufbau des Inventars GRIDABASE. Dieses Inventar umfasst 672 Ereignisse aus sechs europäischen Ländern. Am meisten Ereignisse (276) sind aus der Schweiz bekannt. Mit 336 erfassten Gletscherhochwassern stellt dieser Gefahrentyp die grösste Gruppe dar. Die einzelnen Ereignisse sind in der Datenbank so aufgeführt, dass zuerst Angaben zum Gletscher gemacht werden. Anschliessend werden die Ereignisse chronologisch aufgelistet und beschrieben. Zum Schluss finden sich Informationen zu Opfer und Schäden, sowie Literaturangaben (<http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>).

3.1.2 Wissenschaftliche Journals

Wissenschaftliche Journals stellen eine wichtige Informationsgrundlage dar, um überhaupt auf aussergewöhnliche Ereignisse in Zusammenhang mit Gletschern aufmerksam zu werden. Unten aufgeführt ist eine Auswahl von Journals, in welchen nach Artikeln zum Thema Gletschergefahren gesucht wird:

- Annals of Glaciology
- Journal of Glaciology
- Mountain Research and Development
- Quaternary Science Review
- Geological Society of America Bulletin
- Cold Regions Science and Technology
- Natural Hazards and Earth System Sciences
- Earth Surface Processes and Landforms
- Journal of Volcanology and Geothermal Research

- Natural Hazards

Wertvoll für die vorliegende Arbeit waren darin enthaltene Artikel, in welchen Aufstellungen von mehreren historischen Gletscherkatastrophen publiziert wurden. Beispielfhaft werden an dieser Stelle zwei Papers zitiert:

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

Lliboutry, L., Arnao, B. M., Pautre, A., Schneider, B. (1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18 (79), 239 – 254.

Das erste Paper listet in einer Tabelle 13 Ausbrüche von moränen-gestauten Seen auf. Das Paper von Lliboutry et al. beschreibt elf bekannte *aluviones* in der Cordillera Blanca von Peru. Ähnlich diesen beiden Beispielen gibt es eine Vielzahl weiterer Artikel, in denen Kommentare über Gletscherkatastrophen zu finden sind. Zur Datensammlung beigezogen wurden auch Artikel, die ein einzelnes Ereignis ausführlich behandeln. Ein Beispiel:

Watanabe, T., Rothacher, D. (1996): The 1994 Lugge Thso glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Research and Development*, 16 (1), 77 - 81.

In diesem Paper beschreiben die Autoren detailliert, wie es zum Seeausbruch des Lugge Tsho gekommen ist und welche Schäden er im Tal angerichtet hat. Dank solchen Quellen ist es gelungen, die erforderlichen Attribute der Tabelle zusammen zu tragen.

3.1.3 Internet

Auch das Internet wurde als Informationsquelle genutzt. Ähnlich wie in den Journals findet man auch im Internet Webseiten mit Aufstellungen verschiedener Gletscherkatastrophen. Ein Beispiel dafür ist die Internetseite <http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/peru/hazards.html>, wo eine Tabelle 22 Gletscherkatastrophen in der südamerikanischen Cordillera Blanca seit 1702 zusammenfasst. Wiederum gibt es auch im Internet Seiten, welche sich mit nur einem Ereignis intensiver auseinandersetzen. Die Internetseite <http://ak.water.usgs.gov/glaciology/hubbard/> beschreibt ausführlich, wie sich der Surge des Hubbard Glacier entwickelte und welche Folgen daraus resultierten.

3.2 Methodische Grundlagen

3.2.1 Datenbankmodelle

Für die vorliegende Arbeit sollen die gesammelten Ereignisse in einem geeigneten Datenmodell verwaltet und gespeichert werden. Unter dem Begriff Datenmodell versteht man die generalisierte, benutzerdefinierte Darstellung der Daten. Ein optimales Datenmodell verhindert Redundanzen, d. h. dass die gleichen Daten in mehr als einem Record gespeichert werden (Jones, 1997). Die in dieser Arbeit erhobenen Daten wurden in einer einfachen Tabellenstruktur erfasst. Die entstandene Tabelle stellt eine modulare Erweiterung der WGMS-Tabelle dar. So wird eine Konvertierung der Daten vom einen ins andere System möglich.

Beim relationalen Ansatz werden die Daten in zweidimensionalen Tabellen dargestellt, die aus Zeilen (Tupel) und Spalten (Attribute) bestehen. Die Tabelle `Special Events` des WGMS besteht aus 24 Attributen und 85 Einträgen, also Tupeln.

Die einzelnen Tabellen werden als Relationen bezeichnet. Relationale Datenbanken verknüpfen Daten aus verschiedenen Tabellen über Schlüsselattribute. So ist die vorliegende Tabelle über das Attribut WGMS_ID mit der WGMS-Tabelle für `Allgemeine Gletscherinformation` verknüpft.

3.2.2 Software

Die gesammelten Daten wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel in einer einfachen Tabelle zusammengestellt. Dank den Sortier- und Filterfunktionen von Excel können die Ereignisse ausgewertet und in Diagrammen graphisch dargestellt werden.

Zur Darstellung der Dokumentation im GIS kamen Desktop und Workstation ArcGIS-ArcView 9.8 von ESRI zum Einsatz. Die Ereignisse wurden dort über die Spalten LATITUDE und LONGITUDE vektorbasiert eingelesen. Jedes Ereignis erscheint somit als Punkt auf einer Weltkarte. Diese Form der Darstellung erlaubt einen schnellen räumlichen Zugriff auf die Objekte (Selektion).

Um aus den GIS-Karten HTML-Files zu generieren, kam der HTML ImageMapper zum Einsatz. HTML ImageMapper ist eine einfache und kostengünstige Lösung, um aus ArcView- oder ArcGIS-Karten Online-GIS-Anwendungen zu machen (www.alta4.com). Der Benutzer kann die Online-Karten in einem herkömmlichen Browser (z.B. Internet Explorer) anschauen, ohne auf eine aufwändige, wartungsintensive Online-Datenbankanbindung angewiesen zu sein.

Kapitel 4

Datenmodell

4.1 Anforderungen

Die wichtigste Anforderung an das Datenmodell ist, die registrierten Ereignisse in einer einfachen, verständlichen Form über längere Zeit speichern resp. archivieren zu können. Aktuelle Ereignisse sollen in vertretbarem Aufwand nachgeführt werden können. Ausserdem soll die erarbeitete Tabelle mit der WGMS-Tabelle für `Allgemeine Gletscherinformation` kompatibel sein. Das Datenmodell soll es ermöglichen, die Daten im Nachhinein in ein GIS zu integrieren, um die Dokumentation dort auszuwerten und die Ergebnisse zu illustrieren. Die Tabelle soll deshalb so konzipiert sein, dass ein Transfer in diese Datenstruktur möglich ist. Schliesslich soll die Dokumentation im Internet betrachtet und genutzt werden können. Dem Benutzer soll es dort möglich sein, eigene Abfragen zu generieren. Optimale Rahmenbedingung für die Umsetzung der gestellten Anforderungen bietet Excel, weshalb die Dokumentation in diesem Programm erarbeitet wird.

Der WGMS hat bereits eine digitale Tabelle (Abb. 4.1) für aussergewöhnliche Ereignisse in Zusammenhang mit Gletscher erstellt. Diese Tabelle soll als Grundlage dienen und durch relativ wenige, aber gut zu erfassende Merkmale ergänzt werden.

Jedes Ereignis kann über die Schlüsselattribute WGMS_ID, DAY, MONTH und YEAR (Datum) von den anderen unterschieden werden. Dabei geht man davon aus, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass sich zwei Ereignisse am selben Tag am gleichen Gletscher ereignen. Über die Attribute LATITUDE und LONGITUDE wird die exakte Lokalisierung jedes Ereignisses auf der Weltkarte garantiert.

Da die Tabellenstruktur prozessorientiert ausgerichtet werden soll, ist es wichtig neben den bereits erwähnten Attributen, auch Parameter zu erfassen, die Angaben zur Grösse und zu den beteiligten Prozessen eines Ereignisses machen. Weiter sollen auch Aussagen über Art und Häufigkeit von Prozesskombinationen möglich werden. Daher ist es nötig diese in der Tabellenstruktur optimal zu repräsentieren.

4.2 Aufbau

Der WGMS hat für das Melden der Special Events bereits eine einfache Excel-Tabelle (Abb. 4.1) entworfen. Diese dient für das vorliegende Datenmodell als Grundlage und umfasst die neun Spalten

ATTRIBUTE, POLITICAL_UNIT, WGMS_ID, GLACIER_NAME, EVENT_DATE, EVENT_TYPE, EVENT_DESCRIPTION, DATA_SOURCE und REMARKS. Eine Beschreibung dieser Parameter folgt weiter unten.

In der WGMS-Tabelle wird jedes Ereignis über den Gletscher lokalisiert. Dies ist auch in der ausgearbeiteten Dokumentation der Fall. Das bedeutet, dass für jedes Ereignis der betroffene Gletscher bekannt sein muss.

SPECIAL EVENTS								
ATTRIBUTE	POLITICAL UNIT	WGMS ID	GLACIER NAME	EVENT DATE	EVENT TYPE	EVENT DESCRIPTION	DATA SOURCE	REMARKS
Unit	Country specific alphanumeric code	5 numeric digits	Up to 15 alphanumeric or numeric digits	Date	Numeric code	Alphanumeric or numeric digits	Alphanumeric or numeric digits	Alphanumeric or numeric digits
Example	CH	2222	EXAMPLE	18.05.2010	5	On September 11, 2000 a rock fall of about 1.1 Mio. M3 started between 2000-2200m a.s.l. the west face of Mäntenberg, above EXAMPLE glacier. The rock fall reached and destroyed the trail leading to the Schreckhornhütte.	World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zurich Switzerland	Data reported by J. Naezli. Earlier special events on EXAMPLE glacier are reported in 1994 (Challinor), 1952 (Challinor), 1983 (Challinor), 1951, 1922-1842, 1776 and 1600 by Raymond and others (2003).

Abb. 4.1: WGMS-Tabelle Special Events (WGMS, 2005)

Die erweiterte Tabelle umfasst 23 Spalten. Jeder zu erfassende Parameter in den Spalten verfolgt eines der unten beschriebenen Ziele:

1. exakte Identifikation jedes Ereignisses (gelb)
2. Erfassung des Datums (hellorange)
3. Identifikation des Gefahrentyps (dunkelorange)
4. Angaben zur Grösse und zum Hergang der Ereignisse (rot)
5. Bemerkungen zu Schäden und weiterführender Literatur (dunkelrot).

4.2.1 Identifikation

Die Spalten POLITICAL_UNIT, WGMS_ID, GLACIER_NAME, LATITUDE und LONGITUDE sollen eine exakte Identifikation der Ereignisse auf der Weltkarte ermöglichen. Über die WGMS_ID und den GLACIER_NAME soll erreicht werden, dass die Datenstruktur mit der Tabelle des WGMS für 'Allgemeine Gletscherinformationen' (General Glacier Information) kompatibel ist. Diese beiden Attribute wurden direkt aus der betreffenden Tabelle übernommen und als Schlüsselindikatoren verwendet.

Die Spalten LATITUDE und LONGITUDE geben die Position des Gletschers an und sind v. a. für die Arbeit im GIS wichtig. Über sie wird die Tabelle mit der Weltkarte verknüpft, wo die einzelnen Ereignisse als Punkte erscheinen.

Beschreibung der Parameter:

POLITICAL_UNIT

Über einen Code wird definiert in welchem Land das Ereignis stattgefunden hat (z.B. CH = Schweiz).

WGMS_ID

Jeder Gletscher, über welchen der WGMS regelmässig Beobachtungen Dritter sammelt, besitzt eine Nummer. Das erlaubt eine einfache Identifikation des Gletschers,

auch wenn Gletscher denselben oder keinen Namen tragen. Ändert sich der Name eines Gletschers, behält diese Nummer weiterhin ihre Gültigkeit.

GLACIER_NAME

Name des Gletschers.

KEYWORDS

In diese Spalte können Begriffe eingetragen werden, unter denen ein Ereignis ev. besser bekannt ist. So verbindet man die Katastrophe am Huascarán (1970) in Peru eher mit dem Namen des Berges, als mit dem Namen des Gletschers (Glaciár 511).

LATITUDE

Gibt den geographischen Breitengrad an, welcher als Dezimalzahl in die Tabelle eingetragen wird. Ereignisse, die sich auf der nördlichen Hemisphäre ereignet haben, tragen positive Werte, diejenigen auf der südlichen negative.

LONGITUDE

Beschreibt den Längengrad eines Ereignisses und wird ebenfalls dezimal eingetragen. Ereignisse östlich des Nullmeridians haben positive Werte, solche westlich negative.

Die Attribute POLITICAL_UNIT, WGMS_ID, GLACIER_NAME, LATITUDE und LONGITUDE stellen das Minimum für die Erfassung eines Gletschers in der WGMS-Datenbank dar. Der WGMS-ID wird vom WGMS vergeben.

4.2.2 Datum

Das Datum wird über die drei Spalten DAY, MONTH und YEAR eingelesen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Abfragen betreffend der Saisonalität von Gletschergefahren zu treffen. So kann etwa gefragt werden, in welchen Monaten sich bevorzugt Eislawinen lösen. Auch bietet sich so die Möglichkeit, nur Daten innerhalb eines bestimmten Zeitraums darzustellen.

Beschreibung der Parameter:

DAY

Tag, an dem sich die Katastrophe ereignet hat.

MONTH

Monat, in dem sich die Katastrophe ereignet hat.

YEAR

Jahr, in dem sich die Katastrophe ereignet hat.

Ist das genaue Datum eines Ereignisses nicht bekannt, wird die Spalte DAY (ev. auch MONTH) auf 1 gesetzt und eine entsprechende Bemerkung in den REMARKS gemacht. Zur besseren Vergleichbarkeit sollte mindestens das Jahr bekannt sein.

4.2.3 Gefahrentyp

Anhand der Spalten GLACIER_LENGTH_VARIATION, GLACIER_FLOOD, ICE_AVALANCHE, ROCK_FALL, VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION und OTHER wird definiert, welche Gefahrentypen in die Katastrophe involviert waren. Die binäre Erfassung der beteiligten Prozesse (1 = ja, 0 = nein) wurde gewählt, um auch Prozesskombinationen optimal registrieren zu können. Sie führten in der Vergangenheit mitunter zu den grössten bekannten Gletscherkatastrophen. So löste am 31. Mai 1970 ein Erdbeben am Gipfel des Huascarán in Peru einen Fels-/Eissturz aus. Die Folge war ein enormer Murgang mit einem Volumen von 50 Mio m³. Involviert waren dementsprechend die Gefahrentypen: GLACIER_FLOOD, ICE_AVALANCHE, ROCK_FALL und VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION. Diese Spalten wurden bei der Erfassung des Ereignisses auf 1 gesetzt. Dank der Spalte OTHER können auch Gefahrentypen miteinbezogen werden, die nicht einer der aufgeführten

Spalten zugeordnet werden können (z.B. Schneelawinen) und es wird die Möglichkeit offen gelassen, auch bis anhin unbekannte Prozesse nicht auszuschliessen.

Beschreibung der Parameter:

GLACIER_LENGTH_VARIATION

Wenn in das Ereignis eine Gletscherlängenänderung involviert war, wird eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

GLACIER_FLOOD

Wenn in das Ereignis ein Gletscherhochwasser involviert war, wird eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

ICE_AVALANCHE

Wenn in das Ereignis eine Eislawine involviert war, wird eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

ROCK_FALL

Wenn in das Ereignis ein Felssturz involviert war, wird eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION

Fand während des Ereignisses Interaktion mit vulkanischer Aktivität oder Erdbeben statt, wird eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

OTHER

Interagiert ein Ereignis mit einem Gefahrentyp (z.B. Schneelawine), der nicht in einer der anderen Spalten zu finden ist, wird hier eine 1 eingetragen, ansonsten eine 0.

4.2.4 Ereignisbeschreibung

Die Spalten, welche zur näheren Beschreibung eines Ereignisses dienen, sollen Angaben zur Höhenlage (MAX_ALTITUDE, MIN_ALTITUDE), zur Auslaufdistanz (DISTANCE), zum Volumen (VOLUME) und zum Spitzenabfluss (PEAK_DISCHARGE) machen. Diese Angaben werden in eigenen Spalten erfasst, um so Analysemöglichkeiten zu eröffnen.

Das Pauschalgefälle wird in der Tabelle nicht explizit erfasst (ausser es wird in der EVENT_DESCRIPTION erwähnt), kann aber über die Parameter MAX_ALTITUDE, MIN_ALTITUDE und DISTANCE berechnet werden. Dazu muss zuerst die Höhendifferenz (MAX_ALTITUDE - MIN_ALTITUDE) ausgerechnet werden, welche anschliessend durch die Reichweite (DISTANCE) dividiert wird.

Unter EVENT_DESCRIPTION erwartet der WGMS eine kurze Beschreibung des Ereignisses, wenn möglich mit quantitativen Angaben. Um die Kompatibilität mit dieser Tabelle zu garantieren, sollen auch in der Dokumentation alle Informationen aus den anderen Spalten nochmals aufgegriffen werden.

Beschreibung der Parameter:

MAX_ALTITUDE

Maximale Höhenlage des Anrissgebietes (m ü. M.).

MIN_ALTITUDE

Minimale Höhe der Auslaufstrecke (m ü. M.).

DISTANCE

Horizontale Auslaufdistanz in km.

VOLUME

Volumen eines Events in Mio m³.

PEAK_DISCHARGE

Wird v. a. bei Gletscherhochwasser in m³/s angegeben und meint den Wert des maximalen Abflusses.

EVENT_DESCRIPTION

An dieser Stelle wird das Ereignis möglichst kurz und informativ beschrieben, indem möglichst viele Informationen aus den anderen Spalten noch einmal aufgegriffen werden.

4.2.5 Ergänzende Informationen

Als ergänzende Informationen werden die entstandenen Schäden eines Ereignisses (DAMAGE), sowie Literaturangaben (DATA_SOURCE) und Bemerkungen (REMARKS) aufgeführt.

Beschreibung der Parameter:

DAMAGE

Beschreibung der entstandenen Schäden.

DATA_SOURCE

Angabe von Literatur zum Ereignis.

REMARKS

Hier folgen ergänzende Informationen, die in den anderen Spalten noch nicht aufgeführt wurden. An dieser Stelle können beispielsweise bauliche Massnahmen oder wissenschaftliche Studien, die nach dem Ereignis erfolgten, erwähnt werden.

4.3 Inhalt

4.3.1 Allgemein

Für die vorliegende Dokumentation über historische Gletscherkatastrophen wurden Ereignisse der jüngeren historischen Vergangenheit berücksichtigt. Das älteste datiert vom 25. Mai 1595 und hat sich am Giétro Gletscher in der Schweiz ereignet. In die Datenbasis aufgenommen wurden Ereignisse aus allen Regionen der Erde, welche sich im glazialen und periglazialen Bereich ereignet haben und einer der beschriebenen Gefahrenarten zugeordnet werden können. Insgesamt sind das 88 Ereignisse. Die gesamte Dokumentation wurde in Englisch verfasst, da sie auf einer international benutzten Internetseite erscheinen soll.

Um die Datenmenge in überschaubarem Rahmen zu halten und sich auf die bedeutendsten Katastrophen zu konzentrieren, wurden Kriterien festgelegt, die ein Ereignis erfüllen musste, um aufgenommen zu werden (Tab. 4.1). Für die verschiedenen Gefahrenarten wurden unterschiedliche Kriterien festgelegt, da beispielsweise das Volumen eines Gletscherhochwassers nicht direkt mit dem einer Eislawine vergleichbar ist.

Gefahrenart	Kriterien
Gletscherlängenänderung	• Es sind Schäden entstanden ODER • der Surge ist signifikant, d. h. der Gletscher ist mehrere Meter am Tag vorgestossen ODER • die Schadenssumme beträgt mindestens 1 Mio US Dollar.

Gletscherhochwasser	• Es sind Schäden im grossen Stil entstanden (d. h.: Tote, mehrere zerstörte Häuser oder Infrastrukturanlagen) ODER • das Ausbruchsvolumen übersteigt 1 Mio m³ ODER • die Schadenssumme beträgt mindestens 1 Mio US Dollar.
Eislawine / Felssturz	• Es sind Schäden im grossen Stil entstanden (d. h.: Tote, mehrere zerstörte Häuser oder Infrastrukturanlagen) ODER • das Volumen übersteigt 100'000 m³ ODER • die Schadenssumme beträgt mindestens 1 Mio US Dollar.
Interaktion mit Vulkanismus / Erdbeben	• Es sind Schäden im grossen Stil entstanden (d. h.: Tote, mehrere zerstörte Häuser oder Infrastrukturanlagen) ODER • das Ausbruchsvolumen übersteigt 1 Mio m³ ODER • die Schadenssumme beträgt mindestens 1 Mio US Dollar.

Tab. 4.1: Kriterienliste zur Aufnahme von Ereignissen in die Dokumentation.

Diese Kriterienliste stellt lediglich Richtwerte zusammen. Ein wichtiges Ziel dieser Liste ist es, zu garantieren, dass sowohl Ereignisse in die Dokumentation einfließen, die kleine Volumen aufwiesen, aber verheerende Auswirkungen (Schäden) hatten. Wie auch Ereignisse mit enormen Volumen, welche jedoch geringe Schäden anrichteten.

4.3.2 Beispiele

An dieser Stelle werden neun Beispiele von Gletscherkatastrophen (Abb. 4.2) aufgeführt. Damit soll gezeigt werden wie die Ereignisse in der Dokumentation erfasst sind. Es wurde versucht möglichst verschiedene Prozesse und Prozesskombinationen zu integrieren, sowie Ereignisse aus verschiedenen Regionen der Erde auszuwählen.



Abb. 4.2: Übersicht der gewählten Beispiele (Quelle: ESRI).

4.3.2.1 Giétro Gletscher, CH

POLITICAL_UNIT:	CH
WGMS_ID:	367
GLACIER_NAME:	GIETRO
KEYWORDS:	
LATITUDE:	46.0000
LONGITUDE:	7.3800
DAY:	25
MONTH:	5
YEAR:	1595
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	1
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	0
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	2'200.00
MIN_ALTITUDE:	475.00
DISTANCE:	30.00
VOLUME:	20.00
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	The advance of Gietroz Glacier blocked the main valley and dammed the Dranse river. On May 25, 1595, the ice dam failed and 20 Mio m ³ bursted out. The flood caused the death of 160 people and destroyed 500 building.
DAMAGE:	The flood caused the death of 160 people and destroyed 500 buildings.
DATA_SOURCE:	www.glacierhazards.ch http://glaciology.ethz.ch/glacier-hazards/download/gietro.pdf
REMARKS:	Other events with less damage than 1595 and 1818, occurred in 1549, 1640 and 1817.

4.3.2.2 Tête Rousse Gletscher, FR

POLITICAL_UNIT:	FR
WGMS_ID:	
GLACIER_NAME:	TETE ROUSSE
KEYWORDS:	St. Gervais
LATITUDE:	45.8569
LONGITUDE:	6.8094
DAY:	11
MONTH:	7
YEAR:	1892
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	0
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	2'950.00
MIN_ALTITUDE:	800.00
DISTANCE:	10.00
VOLUME:	0.20
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	A waterpocket rupture occurred in 1892 at Tête Rousse glacier, Mont Blanc.100`000 m ³ of water were released. 175 people lost their lives at St. Gervais.
DAMAGE:	175 people lost their lives at St. Gervais.
DATA_SOURCE:	http://www.nimbus.it/glaciorisk/Glacier_view.asp?IdGlacier=1952&Vista=paese&Paese=France&IdTipoRischio=
REMARKS:	To prevent an other catastrophe of this type, a tunnel was built to control the water level.

4.3.2.3 Allalingletscher, CH

POLITICAL_UNIT:	CH
WGMS_ID:	394
GLACIER_NAME:	ALLALIN
KEYWORDS:	Mattmark
LATITUDE:	46.0500
LONGITUDE:	7.9300
DAY:	30
MONTH:	8
YEAR:	1965
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	0
ICE_AVALANCHE:	1
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	2'500.00
MIN_ALTITUDE:	2'040.00
DISTANCE:	0.95
VOLUME:	2.00
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	On August 30, 1965, an ice avalanche (2 Mio m ³) broke off at the terminus of Allalin Glacier and fall down a rock slope towards the Mattmark dam construction site. During this unexpected catastrophic event 88 people were killed.
DAMAGE:	88 people were killed
DATA_SOURCE:	www.glacierhazards.ch http://glaciology.ethz.ch/inventar/download/allalin.pdf
REMARKS:	In view of a possible repetition of a catastrophic event, a monitoring program to observe the behaviour of Allalin Glacier, surface velocity and mass balance measurements was initiated. Later in the 1990s a automatic camera was installed.

4.3.2.4 Glaciar 511 (Huascaran), PE

POLITICAL_UNIT:	PE
WGMS_ID:	
GLACIER_NAME:	GLACIAR 511 (HUASCARAN)
KEYWORDS:	Huascaran
LATITUDE:	-9.1137
LONGITUDE:	-77.6394
DAY:	31
MONTH:	5
YEAR:	1970
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	1
ROCK_FALL:	1
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	1
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	6'000.00
MIN_ALTITUDE:	2'500.00
DISTANCE:	16.00
VOLUME:	50.00
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	On May 31, 1970 the most catastrophic known avalanche in history descended from Nevados Huascaran, the highest peak in the Peruvian Andes. The avalanche caused about 18'000 casualties. The avalanche was triggered at 3:23 PM by a great earthquake (M=7.7). The avalanche originated from a partially overhanging cliff at 5400-6500 m elevation, where the fractured granitic rock of the peak was covered by a 30-m-thick glacier. The avalanche had a volume of ~ 50-100 million cubic meters and traveled 16 km to Rio Santa with a vertical drop of 4 km.
DAMAGE:	The aluvion buried the city of Yungay. 18'000 people died.
DATA_SOURCE:	Lliboutry, L., Arnao, B. M., Pautre, A., Schneider, B. (1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. Journal of Glaciology, 18 (79), 239 – 254. http://www.soest.hawaii.edu/martel/Courses/GG454/GG454_Lec_20.pdf
REMARKS:	Mapping after the 1970 event revealed deposits from a substantially larger pre-Columbian (before 1492) avalanche that might have attained average speeds of 315-355 km/hr.

4.3.2.5 Langmoche Gletscher, NP

POLITICAL_UNIT:	NP
WGMS_ID:	904
GLACIER_NAME:	LANGMOCHE
KEYWORDS:	Dig Tsho
LATITUDE:	27.8700
LONGITUDE:	86.5800
DAY:	4
MONTH:	8
YEAR:	1985
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	1
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	4'400.00
MIN_ALTITUDE:	1'563.00
DISTANCE:	80.00
VOLUME:	6.00
PEAK_DISCHARGE:	1'600.00
EVENT_DESCRIPTION:	On August 4, 1985, a large ice avalanche ($150'000 \text{ m}^3$) overran the Langmoche Glacier and impacted the lake Dig Tsho. A wave was generated, which overtopped the moraine dam. Five people were killed and the destruction of a newly built hydroelectric power plant, 14 bridges, about 30 houses, and many hectares of agricultural land as well as a heavily damaged trail network, resulted from 6 Mio m^3 water being released. Peak discharge was estimated to be $1'600 \text{ m}^3/\text{s}$. The damage costs were estimated at 1.5 Mio US \$.
DAMAGE:	The damage to cultivated land, property, and vegetation was severe, 30 houses, 14 bridges between Langmoche Valley and Jubing, a nearly complete small hydro-electricity powerplant was completely destroyed, five people were killed. The damage costs were estimated at 1.5 Mio US \$.
DATA_SOURCE:	Vuichard, D., Zimmermann, M. (1986): The Langmoche flash-flood, Khumbu Himal, Nepal. Mountain Research and Development, 6 (1), 90 - 94.
REMARKS:	People of the Kumbu area waited many years for promised electrical power as a partial substitute for fuelwood. This will remain hypothetical with the destruction of the Hydel Project. The destruction of cultivable level land is one of the severest consequences of the event, as it may have deprived communities of their subsistence base.

4.3.2.6 Azufrado (Nevado del Ruiz), CO

POLITICAL_UNIT:	CO
WGMS_ID:	1523
GLACIER_NAME:	AZUFRADO (NEVADO DEL RUIZ)
KEYWORDS:	Nevado del Ruiz
LATITUDE:	4.9000
LONGITUDE:	-75.3200
DAY:	13
MONTH:	11
YEAR:	1985
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	0
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	1
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	5'400.00
MIN_ALTITUDE:	100.00
DISTANCE:	104.00
VOLUME:	90.00
PEAK_DISCHARGE:	48`000
EVENT_DESCRIPTION:	On November 13, 1985, a relatively small phreatic-magmatic eruption of Nevado del Ruiz in the Central Andes of Colombia caused a catastrophic event due to the existence of a 21 km ² ice cap covering the volcano. The quick erosion and mobilization of unstable ice bodies as well as the surface melting of snow and ice triggered several lahars, the most important of which destroyed the city of Armero. More than 23`000 people were killed. About 90 Mio m <sup>3</sup> of water was discharged. Estimated peak discharge ranged up to 48`000 m ³ /s. (The damage costs were estimated at 200 Mio US\$.)
DAMAGE:	23`000 people killed or missing, 4`420 injured, 5`092 homes destroyed, and 210`000 hectares of land stripped or buried in muddy debris. (The damage costs were estimated at 200 Mio US\$.)
DATA_SOURCE:	Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. J., Borrero, C. A. (1989): Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41, 17 - 66.
REMARKS:	

4.3.2.7 Hubbard Gletscher, US

POLITICAL_UNIT:	US
WGMS_ID:	87
GLACIER_NAME:	HUBBARD
KEYWORDS:	Russell Lake
LATITUDE:	60.0800
LONGITUDE:	-139.3300
DAY:	7
MONTH:	10
YEAR:	1986
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	1
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	0
ROCK_FALL:	0
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	25.50
MIN_ALTITUDE:	0.00
DISTANCE:	60.00
VOLUME:	380.00
PEAK_DISCHARGE:	108`000
EVENT_DESCRIPTION:	Hubbard Glacier was advancing in 1986 when it closed the Russell Fiord on May 29. The total advance is estimated at 2 km. The surge had sometimes a flow rate of 36 m/d. The newly-formed Russell Lake began filling. On October 7, 1986 the ice dam failed. Russell Lake poured into Disenchantment Bay with a peak discharge of 108`000 m ³ /s and released a water volume of 380 Mio m ³ .
DAMAGE:	Erosion, vegetation was severely damaged, (remote area without human structures).
DATA_SOURCE:	Mayo, L. R. (1987): Advance of Hubbard Glacier and Closure of Russell Fiord, Alaska – Environmental Effects and Hazards in the Yakutat Area. Geological Studies in Alaska by the U. S. Geological Survey during 1987, 3 - 16.
REMARKS:	

4.3.2.8 Brenvagletscher, IT

POLITICAL_UNIT:	IT
WGMS_ID:	615
GLACIER_NAME:	BRENVA
KEYWORDS	Mount Blanc
LATITUDE:	45.8300
LONGITUDE:	6.9000
DAY:	18
MONTH:	1
YEAR:	1997
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	0
ICE_AVALANCHE:	1
ROCK_FALL:	1
VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	1
MAX_ALTITUDE:	3'750.00
MIN_ALTITUDE:	1'450.00
DISTANCE:	5.50
VOLUME:	7.00
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	On January 18, 1997, in the early afternoon, a large rock slide originated on the "Sperone della Brenva", a high buttress on the western flank of Mount Blanc, at an elevation of 3,750 m a.s.l. It has been shown that the rock material partly deposited on the Brenva Glacier and partly moved along the glacier surface by mobilizing a significant volume of snow and ice. Total volume was estimated at 7 Mio m ³ . The run out was approximately 5.5 km with a total fall of 2300 m. Two skiers lost their lives.
DAMAGE:	2 skiers lost their lives, 10 people were injured, on the opposite side hundreds of conifers were thrown down due to the air wave
DATA_SOURCE:	Barla, G., Dutto, F., Mortara G. (2000): Brenva Glacier rock avalanche of 18 January 1997 on the Mount Blanc Range, Northwest Italy. Landslide News, 13, 2-5. Giani, G.P., Silvano, S., Zanon, G. (2001): Avalanche of 18 January 1997 on Brenva Glacier, Mont Blanc Group, Western Italian Alps: an unusual process of formation. Annals of Glaciology, 32, 333 - 338.
REMARKS:	A very similar phenomenon occurred in the same area between November 14 and 19, 1920, when two large rockslides triggered along the Brenva Glacier a rock-ice avalanche of 6-7 Mio m ³ , which dammed the valley and ascended the opposite slope.

4.3.2.9 Kolka Gletscher, RU

POLITICAL_UNIT:	RU
WGMS_ID:	
GLACIER_NAME:	KOLKA
KEYWORDS	Genaldon Valley
LATITUDE:	42.7400
LONGITUDE:	44.4600
DAY:	20
MONTH:	9
YEAR:	2002
GLACIER_LENGTH_VARIATION:	0
GLACIER_FLOOD:	1
ICE_AVALANCHE:	1
ROCK_FALL:	1
VOLCANIC_EARTH-QUAKE_INTERACTION:	0
OTHER:	0
MAX_ALTITUDE:	4'000.00
MIN_ALTITUDE:	750.00
DISTANCE:	40.00
VOLUME:	100.00
PEAK_DISCHARGE:	
EVENT_DESCRIPTION:	A massive rock/ice avalanche of about 100 Mio m ³ volume took place on the northern slope of the Kazbek massif, North Ossetia, Russian Caucasus, on September 20, 2002. The avalanche started as a slope failure, that almost completely entrained Kolka glacier, travelled down the Genaldon valley for 20 km, was stopped at the entrance of the Karmadon gorge, and was finally succeeded by a distal mudflow which continued for another 15 km. The event caused the death of ca. 140 people and massive destruction.
DAMAGE:	The event caused the death of 140 people and destroyed important traffic routes, residential buildings and other infrastructures.
DATA_SOURCE:	Huggel, C., Zraggen - Oswald, S., Haeberli, W., Kääb, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, S. G. (2005): The 2002 rock / ice avalanche at Kolka / Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. Natural Hazards and Earth System Science, 5, 173 - 187. Haeberli, W., Huggel, C., Kääb, A., Oswald, S., Polkvoj, A., Zotikov, I., Osokin, N. (2005): The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 - an extraordinary event of historical dimensions in North Osetia (Russian Caucasus). Journal of Glaciology, 47 (156), 111 – 122.

REMARKS:

Several aspects of the event were extraordinary, i.e. the large ice volume involved or the erosion of a valley-type glacier, a process not known so far. The analysis of these aspects is essential for process understanding and worldwide glacial hazard assessments. The erosion of Kolka glacier is not yet well understood. The ice/debris deposits at Karmadon dammed several marginal lakes of up to 5 Mio m³ of water. Potential floods from these lakes were an imminent threat to the downstream areas after the disaster.

4.4 Darstellung im GIS

Die Daten wurden mit ArcGIS 9.8 bearbeitet und für die Präsentation im Internet vorbereitet. Die Ereignisse wurden den Gefahrentypen Gletscherlängenänderung, Felssturz, Eislawine, Gletscherhochwasser und Prozesskombination zugeordnet. Um aus den GIS-Karten (Abb. 4.3) HTML-Files zu generieren wurde der HTML ImageMapper von Alta 4 verwendet. Im Fenster des ImageMappers können verschiedene Funktionen, wie etwa die Zoomstufen, definiert werden.

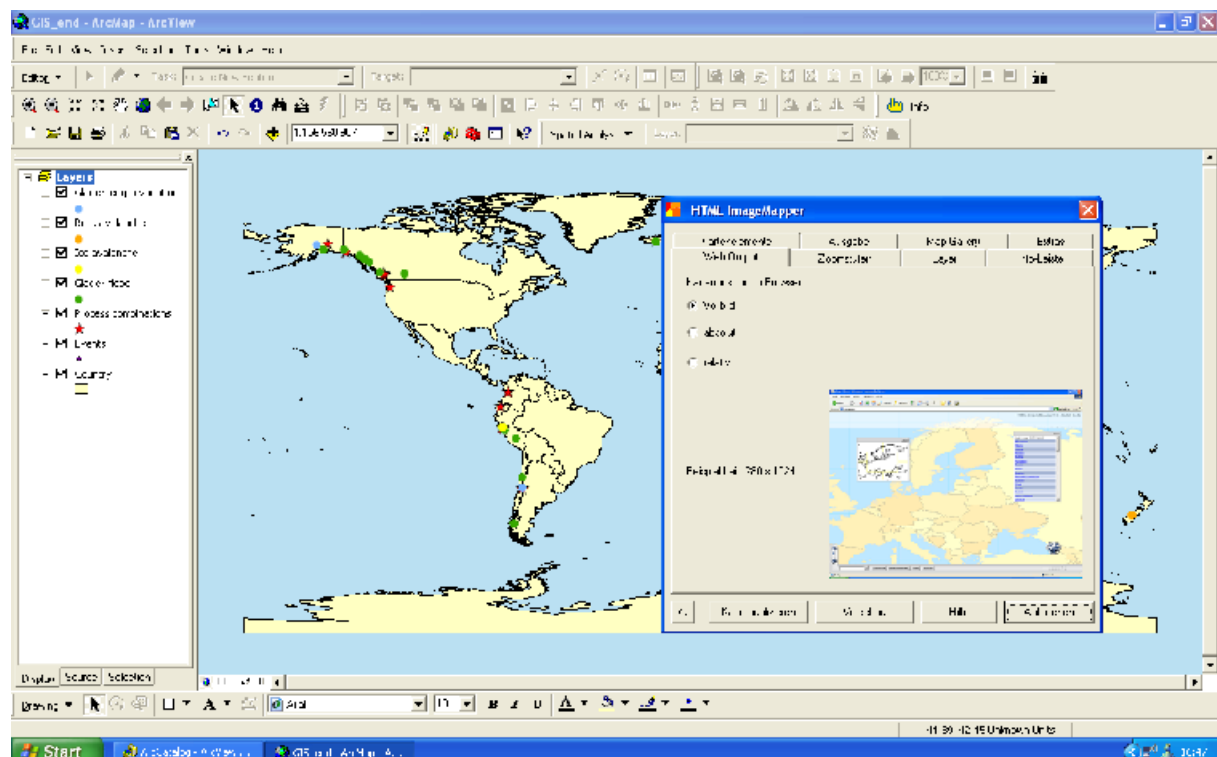


Abb. 4.3: Oberfläche im ArcGIS mit HTML ImageMapper.

Die HTML-Karten (Abb. 4.4) können vom Benutzer mit einem herkömmlichen Internetbrowser (z.B. Internet Explorer) dargestellt werden, ohne dass es GIS-Kompatibilität braucht.

Abb. 4.4 zeigt die Ansicht beim Öffnen der Internetseite. Im unteren Bereich sind die verschiedenen Funktionen dargestellt, welche Image Mapper bietet. Beim Anklicken eines Ereignisses, öffnet sich eine weitere Seite (Abb. 4.5), auf welcher der Ereignisverlauf beschrieben wird, sowie Informationen zu Schäden, Literatur und Bemerkungen zu finden sind.

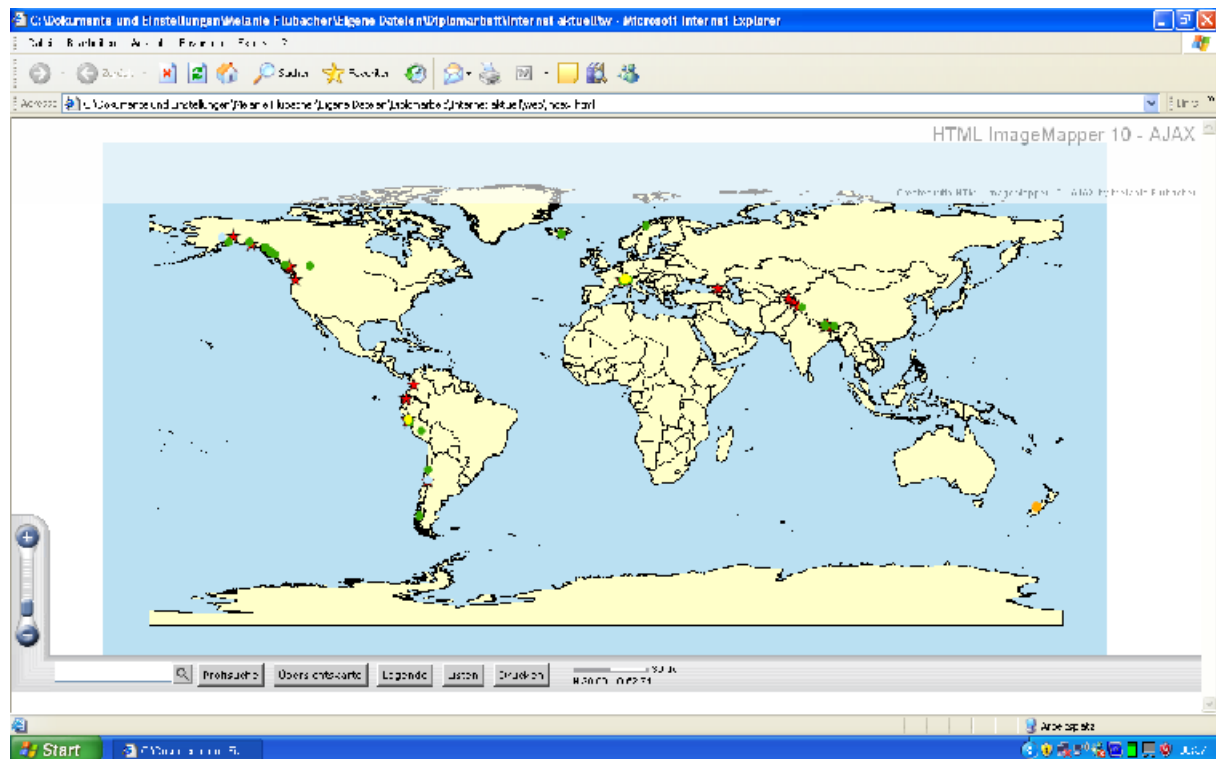


Abb. 4.4: Gesamtansicht beim Starten der Internetseite.

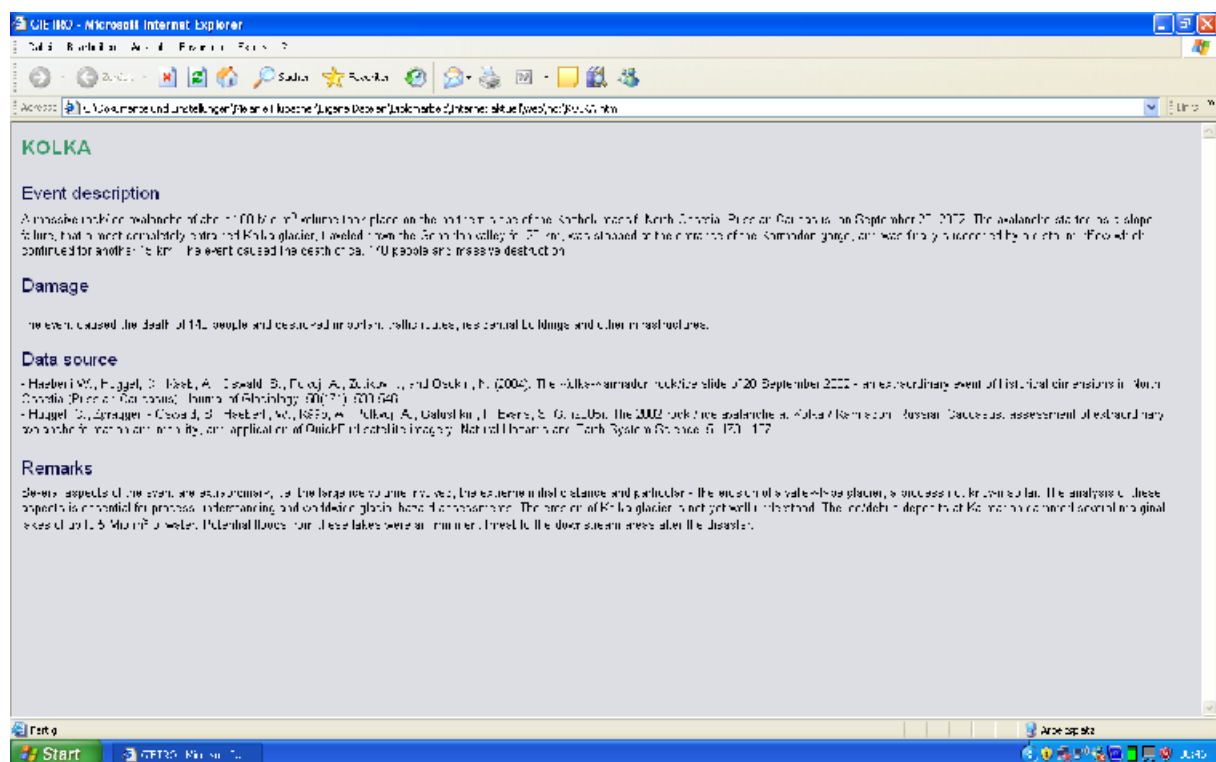


Abb. 4.5: Ereignisbeschreibung mit Informationen über entstandene Schäden, Literaturangaben und Bemerkungen.

Über den Button Übersichtskarte wird ein Fenster (1) geöffnet, in dem angezeigt wird, welcher Ausschnitt der Weltkarte aktuell abgebildet ist. Wählt man mit dem Cursor einen anderen Bereich der Übersichtskarte an, wird dieser Kartenausschnitt mit der gleichen Auflösung hergestellt.

Wählt man den Button Liste an, öffnet sich ein weiteres Fenster (2), in dem die Gefahrenarten aufgelistet werden. Wird eine Gefahrenart ausgewählt, erscheint eine Liste aller Gletscher, an dem sich der betreffende Prozess schon einmal ereignet hat. Beim Anwählen eines Gletschernamens, verschiebt sich der Kartenausschnitt dorthin und die Attributanzeige (3) öffnet sich automatisch. Hier werden diejenigen Attribute angezeigt, welche zuvor im ImageMapper definiert wurden.

Über den Legenden-Button öffnet sich das Legendenfenster (4). Hier werden die verschiedenen Symbole in der Karte erklärt. Links in Abb. 4.6 kann der gewünschte Massstab (5) eingestellt werden. Dabei stehen fünf Massstabsebenen zur Verfügung.

Unter Profisuche (6) können eigene Abfragen eingegeben werden. Im abgebildeten Beispiel sollen alle Ereignisse angezeigt werden, welche ein Volumen von über 100 Mio m³ freisetzen. Links im Fenster kann zwischen den verschiedenen Attributen der Tabelle gewählt werden. Zur Verfügung stehen dann `entspricht`, `ist grösser als` und `ist kleiner als`. Im leeren Feld kann dann ein entsprechender Wert eingesetzt werden.

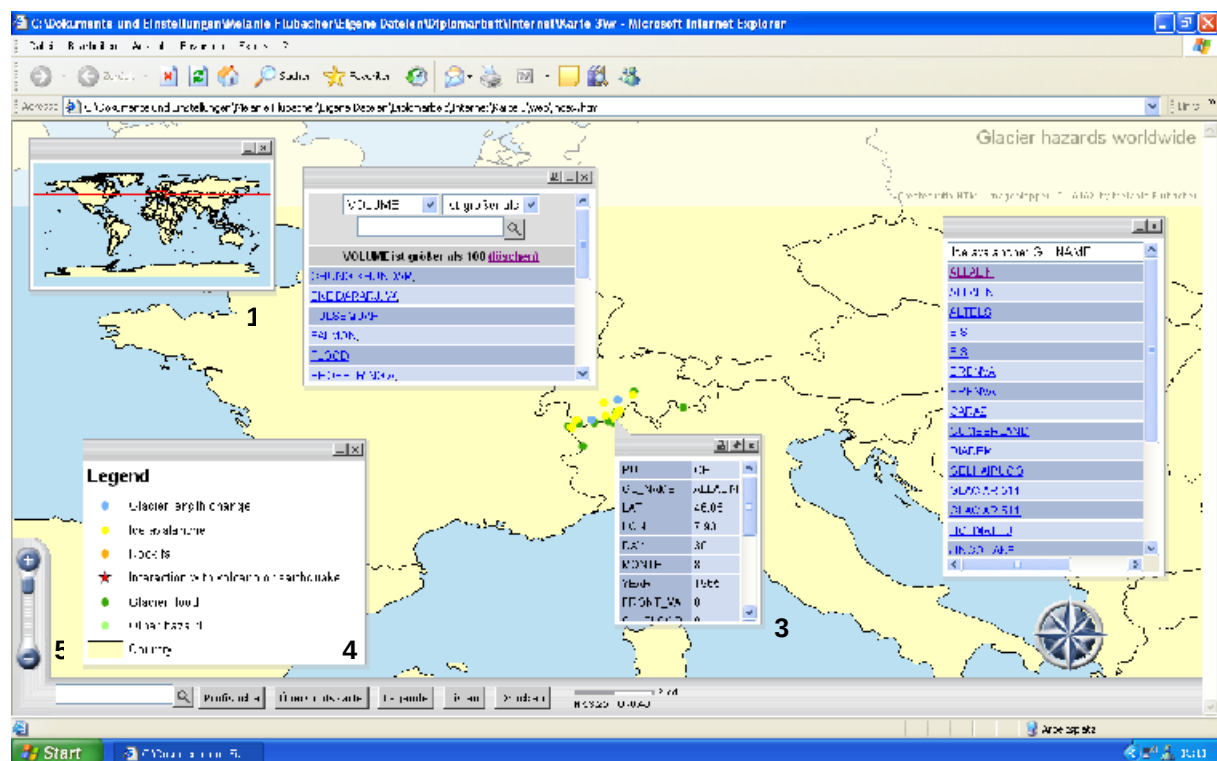


Abb. 4.6: HTML-Karte mit den verschiedenen Funktionen von ImageMapper.

Kapitel 5

Auswertung

Für die vorliegende Dokumentation wurde ein möglichst einfaches Datenmodell gewählt. In diesem Kapitel soll nun aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten in dieser Struktur liegen und wo sie an ihre Grenzen stößt. Um das zu verdeutlichen, wurde ein exemplarisches Set von einfachen bis komplexen Fragestellungen zusammengestellt, die in diesem Kapitel beantwortet werden sollen.

5.1 Verteilung der Ereignisse über den Globus

Die unten abgebildete Karte (Abb. 5.1) zeigt die Verteilung der registrierten Ereignisse über den Globus. Dabei wurde zwischen den Gefahrenarten Gletscherlängenänderung, Gletscherhochwasser, Eis-, Felslawine und Prozesskombination unterschieden.

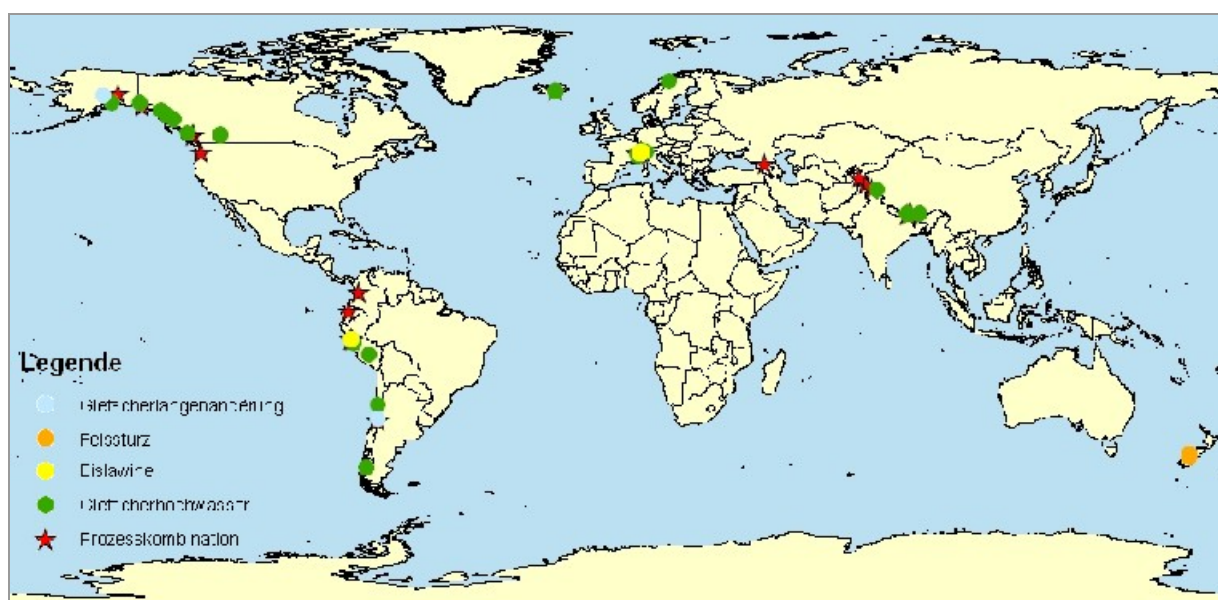


Abb. 5.1: Verteilung der Ereignisse über den Globus.

Insgesamt erfasst die Dokumentation 88 Ereignisse, die sich über die Erdteile Neuseeland, Asien, Europa, Nord- und Südamerika verteilen (Abb. 5.2). Für den afrikanischen Kontinent sind keine Ereignisse bekannt, was mit der vergleichsweise geringen Gletscherfläche dieses Kontinents zusammenhängen mag.

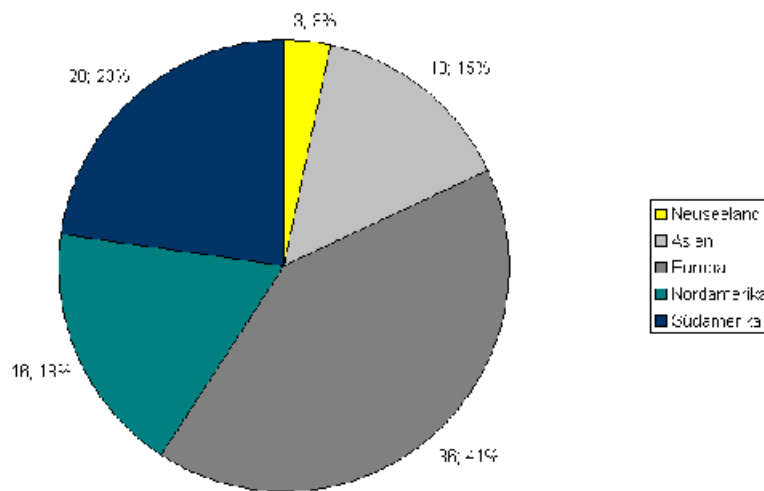


Abb. 5.2: Anzahl registrierter Ereignisse pro Kontinent.

Die erste Ziffer im Diagramm gibt die absolute Anzahl registrierter Ereignisse pro Kontinent an, die zweite den Anteil in Prozent. Über 40 Prozent aller Ereignisse der Dokumentation ereigneten sich in Europa. Dieser hohe Anteil lässt sich mit der guten Datengrundlage für diesen Kontinent begründen. Ausserdem führt die dichte Besiedlung in den Alpen dazu, dass Ereignisse häufiger Schäden verursachen oder überhaupt registriert werden. Auffallend ist die geringe Anzahl Ereignisse für Neuseeland. Die Suche nach Informationen betreffend Gletschergefahren für diesen Kontinent gestaltete sich schwierig. Die einzigen drei Ereignisse, wurden in Fluctuations of Glaciers 1990 – 1995 (Vol. VII) entdeckt.

Abb. 5.3 zeigt, wie oft welche Gefahrenart pro Kontinent erfasst wurde. Damit soll gezeigt werden, ob bestimmte Gefahrentypen für gewisse Hochgebirgsregionen vermehrt registriert werden.

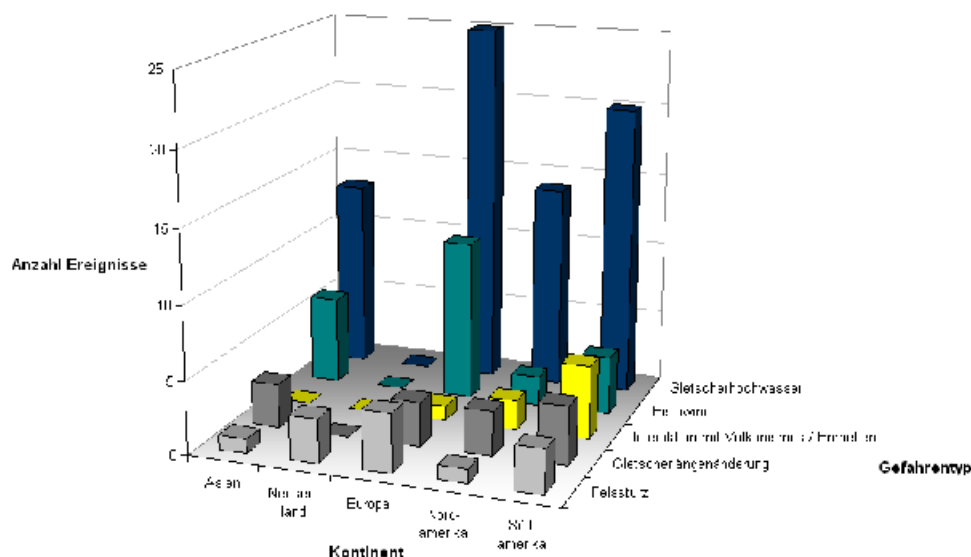


Abb. 5.3: Gefahrentypen der registrierten Ereignisse pro Kontinent.

Das Diagramm verdeutlicht, dass Gletscherhochwasser die häufigste Gefahrenart in der Dokumentation darstellen. Aus allen Erdteilen, mit Ausnahme von Neuseeland, sind im Vergleich zu den anderen Prozessarten davon am meisten bekannt. Daneben bestehen beträchtliche Unterschiede zwischen den Kontinenten. So sind für Europa vergleichsweise viele Eislawinen verzeichnet, während aus Nordame-

rika nur wenige bekannt sind. Viele Ereignisse in Zusammenhang mit tektonischer Aktivität ereigneten sich in Südamerika. Bei den einzigen drei aus Neuseeland bekannten Ereignissen, handelt es sich um Felsstürze. Für die anderen Erdteile wurden davon jedoch vergleichsweise wenig erfasst.

5.2 Prozesse / Prozesskombinationen

Dieser Abschnitt soll aufzeigen, wie gross der Anteil an Prozesskombinationen ist, wie häufig welche Kombinationen auftreten und welche überhaupt möglich sind. Unter Prozesskombinationen sind Ereignisse zu verstehen, bei denen mehr als eine Gefahrenart involviert waren.

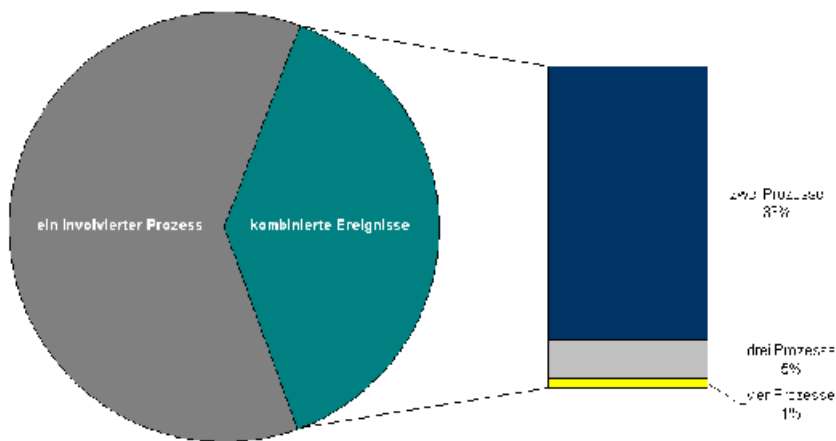


Abb. 5.4: Prozentualer Anteil der Anzahl involvierter Prozesse.

Beinahe 40 Prozent aller Ereignisse gehen auf Prozesskombinationen zurück. Ihnen kommt also eine grosse Bedeutung bei der Betrachtung von Gletscherkatastrophen zu. In dieser Dokumentation wurden Prozesskombinationen erfasst, die aus zwei, drei oder vier involvierten Prozessen bestehen. Jede Gletschergefahrenart kann dabei mit anderen interagieren oder Folgegefahren auslösen. In Abb. 5.4 zeigt sich, je mehr Prozesse miteinander interagieren, desto geringer ist die Auftretenswahrscheinlichkeit einer solchen Kombination.

Aus Abb. 5.5 geht hervor, wie häufig eine Gefahrenart insgesamt aufgetreten ist. Daneben wird differenziert, ob sie isoliert abgelaufen ist oder mit anderen Gefahrenarten interagierte.

An 71 von 88 inventarisierten Ereignissen war die Gefahrenart Gletscherhochwasser beteiligt. Damit stellt diese Gefahrenart mit Abstand die grösste Kategorie dar. Davon trat in 41 Fällen ein Gletscherhochwasser isoliert auf und in 30 Fällen interagierte die Gefahrenart mit anderen Prozessen. Auffallend ist, dass die Gefahrenarten Gletscherlängenänderung, Eislawine und Felssturz öfter in Prozesskombinationen eingebunden sind, als dass sie alleine auftreten. Das beschriebene Verhalten von Gletscherhochwasser lässt sich vermutlich mit dem häufigen Ausbrechen von Gletscherseen ohne Einwirkung einer Eis- oder Eislawine begründen. Dies ist der Fall, wenn ein instabiler Moränenwall bricht oder es zu einem Wassertaschenausbruch kommt.

Gletscherlängenänderungen, Eislawinen und Felsstürze können vor allem in Kombination mit anderen Gefahrenarten verheerende Auswirkungen haben. Dann können sie enorme Volumen oder Reichweiten erreichen und in bewohnte Gebiete vorstossen, wo sie Schäden anrichten können.

Für die Gefahrenarten Interaktion mit Vulkanismus und Andere gilt, dass sie mit anderen Prozessen interagieren müssen, um überhaupt in die Dokumentation aufgenommen zu werden.

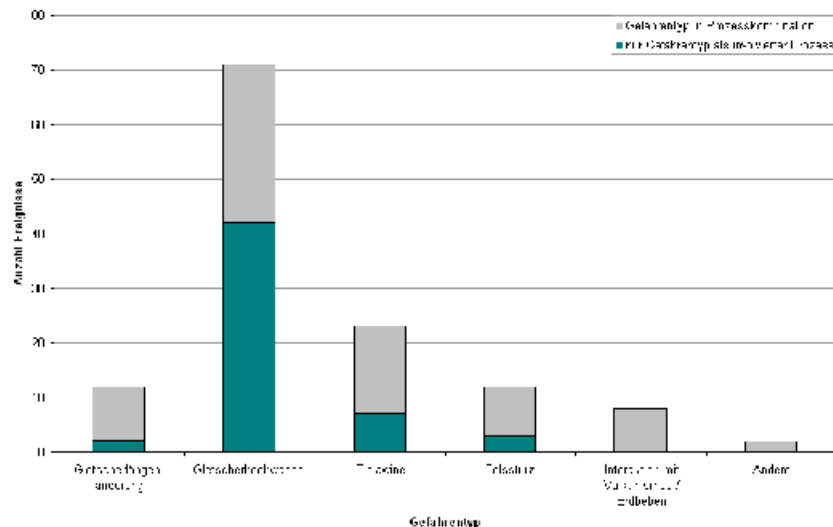


Abb. 5.5: Anzahl Ereignisse pro Gefahrenart.

Tab. 5.1 soll verdeutlichen, welche Prozesskombinationen in der Dokumentation vertreten sind und somit in der Natur auftreten können. Daneben bildet sie auch die Häufigkeit von Gefahrenarten und Prozesskombinationen ab.

Je neun Mal wurden die Prozesskombinationen Gletscherlängenänderung / Gletscherhochwasser und Gletscherhochwasser / Eislawine registriert. Zur Kombination Gletscherlängenänderung / Gletscherhochwasser kommt es beispielsweise, wenn der Gletscher aus einem Seitental in das Haupttal vorstösst, wodurch der dortige Fluss gestaut werden kann. Auf diese Weise kann sich ein See entwickeln, der im Laufe der Zeit ausbrechen kann. Die Prozesskombination Gletscherhochwasser / Eislawine tritt oft ein, wenn Teile der Gletscherzunge in einen proglazialen See stürzen und eine Schwallwelle verursachen, die den Bruch des Moränendamms zur Folge hat. Erstaunlicherweise kommen die beiden erwähnten Prozesskombinationen häufiger vor, als dass Eislawinen oder Längenänderungen isoliert auftreten.

Sechs Ereignisse gehen auf Vulkanausbrüche oder Erdbeben mit anschliessendem Hochwasser zurück. Dabei handelt es sich um Eruptionen von gletscherbedeckten Vulkanen, bei denen riesige Mengen Eis und Schnee schmelzen, was zu enormen Lahars führen kann.

Weiter sind drei reine Felsstürze erfasst, die sich im periglazialen Raum ereignet haben. Die Masse stürzte auf den darunter liegenden Gletscher, wodurch sich die Geschwindigkeit und die Reichweite erheblich erhöhte.

Gletscherlängenänderung															
Gletscherhochwasser															
Eislawine															
Felssturz															
Interaktion mit Vulkanismus															
Andere															
Total:	42	9	9	7	6	3	2	2	2	2	1	1	1	1	88

Tab. 5.1: Häufigkeit der registrierten Prozesse und Prozesskombinationen in der Dokumentation

5.3 Saisonalität von Gefahrrentypen

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, welche Ergebnisse die Dokumentation liefert, wenn man Abfragen zur Saisonalität von Gefahrrentypen tätigt. Eine mögliche Fragestellung wäre, in welchen Monaten sich Gletscherhochwasser bevorzugt ereignen. Haeberli (1983) schreibt dazu, dass Gletscherhochwasser fast ausschliesslich in den Sommermonaten auftreten.

Betrachtet man die Abb. 5.6, lässt sich feststellen, dass diese Aussage anhand der Dokumentation bestätigt werden kann. In die Auswertung eingeflossen sind nur Gletscherhochwasser, die isoliert aufgetreten oder als Folge von Längenänderungen entstanden sind.

Bei dieser Analyse wurde zwischen Ereignissen der Nord- und der Südhemisphäre unterschieden. Für die Nordhemisphäre zeigen sich die höchsten Werte in den Monaten Juli, August und September. Zwar sind für die Südhalbkugel weniger Ereignisse bekannt, dennoch zeigt sich, dass dort der Höchstwert im Januar erreicht wird, also im Südsommer.

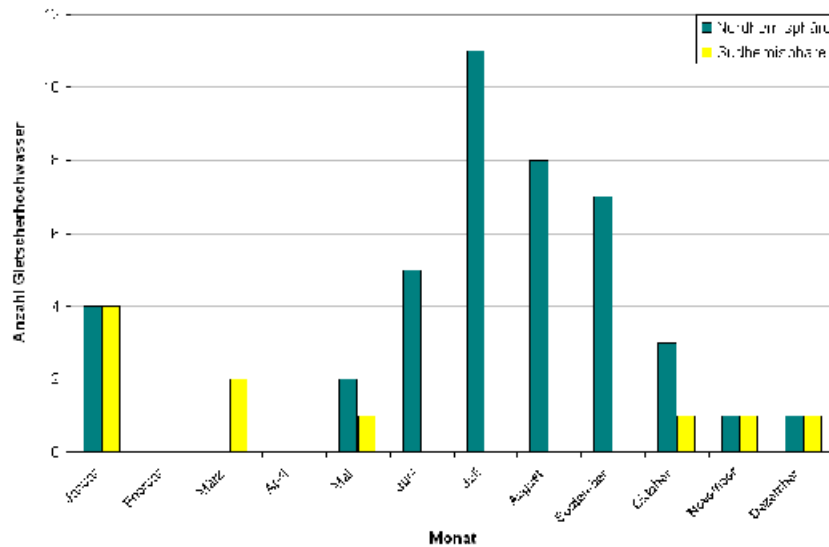


Abb. 5.6: Anzahl Gletscherhochwasser pro Monat.

Dieselbe Auswertung wurde auch mit dem Gefahrentyp Eislawine durchgeführt (Abb. 5.7). Da es sich dabei nur um 19 Ereignisse handelt, ist das entstandene Diagramm weniger aussagekräftig.

Zum Abbruchzeitpunkt von Eislawinen schreiben Haerberli und Käab (2004), dass Eislawinen der Typen Ib und II (vgl. Kap. 2.3) nicht eingeschränkt sind, Eislawinen des Typs Ia dagegen sind nur im Sommer und Herbst zu erwarten. Tatsächlich erreichen die Werte für die Nordhemisphäre ihren Höhepunkt in den Sommermonaten. Eine mögliche Vermutung wäre, dass es sich dabei um Eislawinen des Typs Ia handelt, da sich diese wie gesagt, bevorzugt im Sommer und Herbst ereignen und grosse Volumina ($> 1 \text{ Mio m}^3$) erreichen können, wodurch sie eher in die Dokumentation einfließen. Für die südliche Hemisphäre konnten nur drei Ereignisse registriert werden, was keine zuverlässige Aussage erlaubt.

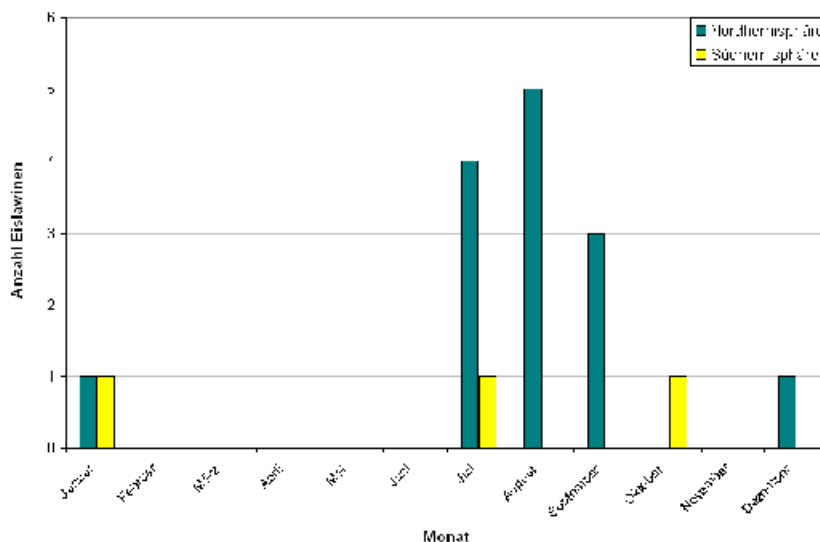


Abb. 5.7: Anzahl Eislawinen pro Monat.

Für die übrigen Gefahrenarten wird auf eine Untersuchung der saisonalen Komponente verzichtet, da zu wenige Ereignisse für eine statistische Aussage erfasst sind.

5.4 Analyse der Ereignisgrößen

Dieser Abschnitt soll zeigen, in welchem Größenbereich sich die Attribute der einzelnen Gefahrenarten bewegen. Die ersten drei Darstellungen zeigen Häufigkeitsverteilungen der Parameter Volumen, Spitzenabfluss und Reichweite. Bei der Häufigkeitsverteilung der Volumen (Abb. 5.8) wurde zwischen den Gefahrenarten Gletscherhochwasser, Eislawine und Interaktion mit Vulkanismus und Erdbeben differenziert. Die Häufigkeitsverteilung für den Spitzenabfluss (Abb. 5.9) konnte nur für die Gletscherhochwasser gezeichnet werden, da dieser Parameter für die anderen Gefahrenarten nicht erhoben wurde. Auch die Häufigkeitsverteilung der Reichweite (Abb. 5.10) konnte nur für Gletscherhochwasser dargestellt werden, da für die anderen Gefahrenarten zu wenig Einträge für diesen Parameter vorliegen.

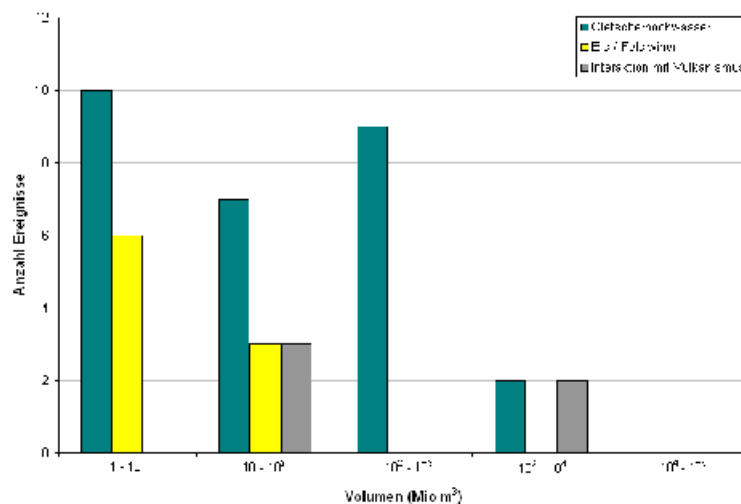


Abb. 5.8: Häufigkeitsverteilung der registrierten Volumen (Mio m³) von Gletscherhochwasser, Eis- /Felslawinen und Ereignissen, die mit Vulkanismus interagierten.

Neun Gletscherhochwasser erreichen Volumen zwischen 100 und 1000 Mio m³ und zwei weisen sogar ein Volumen über 1000 Mio m³ auf. Leider konnten in dieser Darstellung nur neun Eis- oder Felslawinen miteinbezogen werden. Trotzdem lässt sich vermuten, dass Eis- oder Felslawinen tendenziell kleinere Volumen umfassen. Von den fünf Ereignissen, welche mit Vulkanismus oder Erdbeben interagierten, zeigen zwei Volumen über 1000 Mio m³. Hier liegt die Vermutung nahe, dass diese oft sehr grosse Volumen freisetzen.

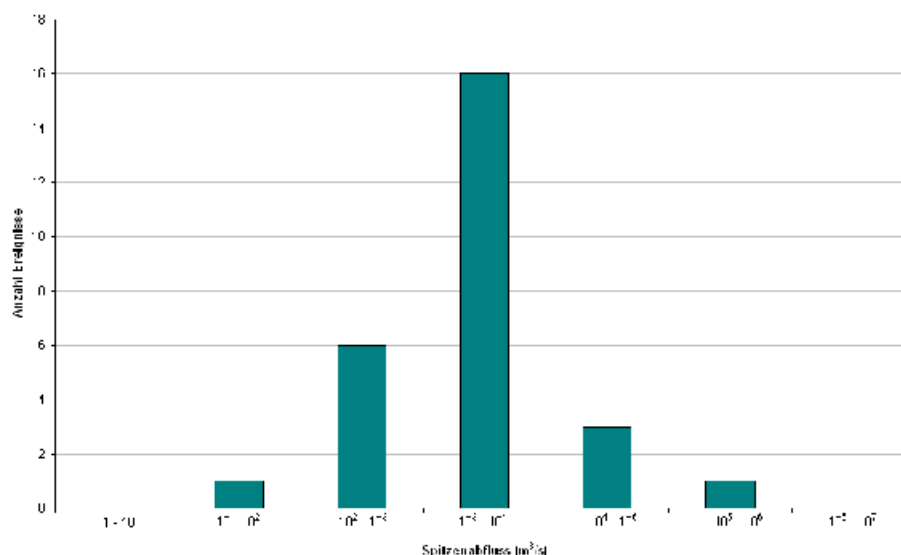


Abb. 5.9: Häufigkeitsverteilung der registrierten Spitzenabflüsse (m³/s) von Gletscherhochwasser.

Die gleiche Auswertung wurde auch mit den Spitzenabflüssen von Gletscherhochwasser vorgenommen (Abb. 5.9). Die meisten registrierten Spitzenabflüsse bewegen sich in einem Grössenbereich von $1\,000$ bis $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$. Es sind aber durchaus auch Spitzenabflüsse über $100\,000\text{ m}^3/\text{s}$ möglich.

Bei den Reichweiten von Gletscherhochwasser (Abb. 5.10) zeigt sich ein deutliches Maximum zwischen 10 und 100 km . Es können aber auch Reichweiten über $1\,000\text{ km}$ vorkommen.

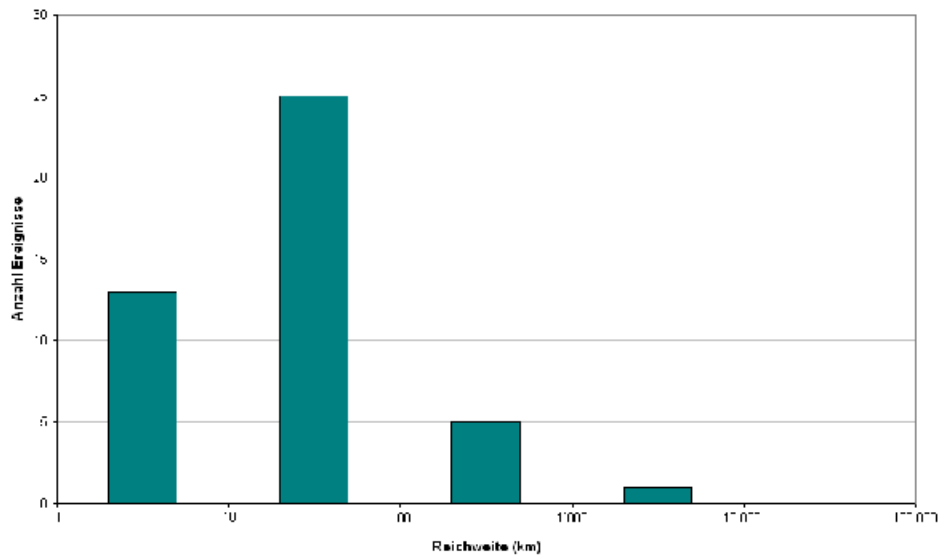


Abb. 5.10: Häufigkeitsverteilung der registrierten Reichweiten (km) von Gletscherhochwasser.

In Abb. 5.11 wird die Beziehung zwischen Spitzenabfluss und Volumen von Gletscherhochwasser dargestellt. Dabei wurde zwischen isolierten Gletscherhochwasser (dunkelblau) und Gletscherhochwasser in Prozesskombinationen (hellblau) unterschieden. Sämtliche Datenpunkte stammen aus der vorliegenden Dokumentation.

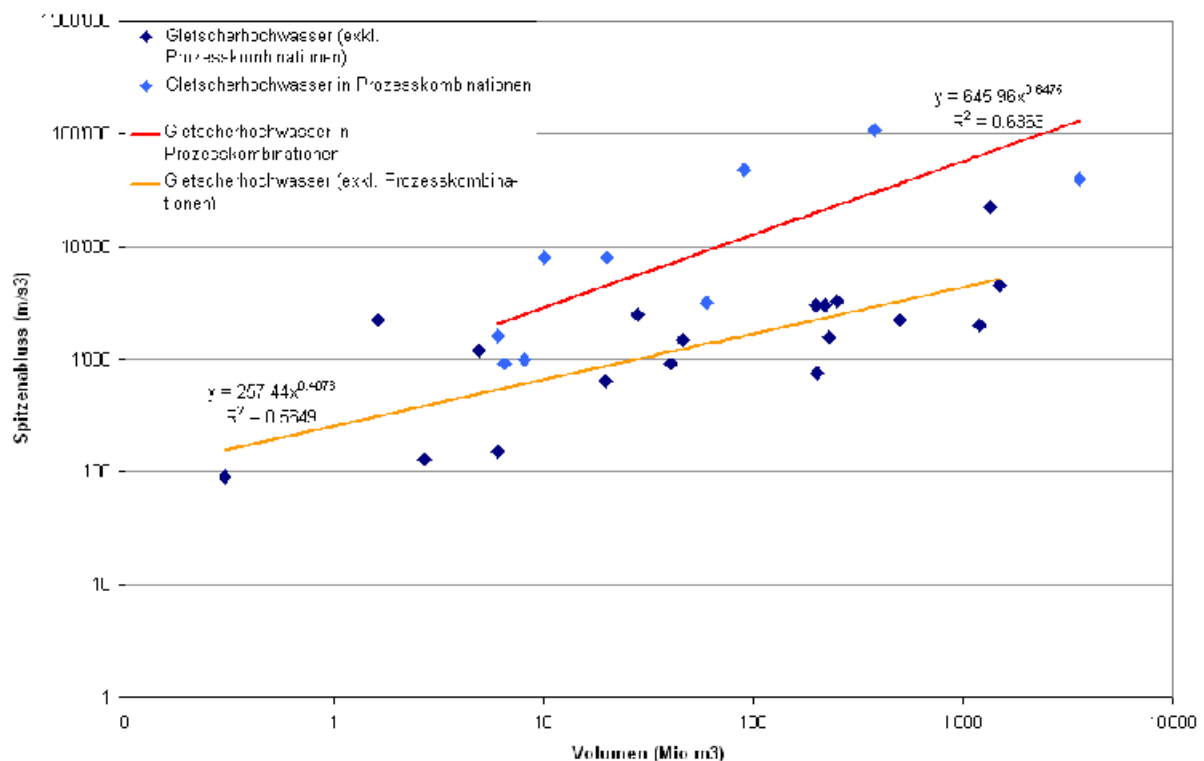


Abb. 5.11: Spitzenabfluss vs. Ausbruchvolumen für Gletscherhochwasser.

Es zeigt sich deutlich, dass die Spitzenabflüsse von Gletscherhochwasser, die in Prozesskombinationen involviert waren, über jenen für isolierte Hochwasser liegen. Im Gegensatz dazu sind die Volumina nicht unbedingt grösser.

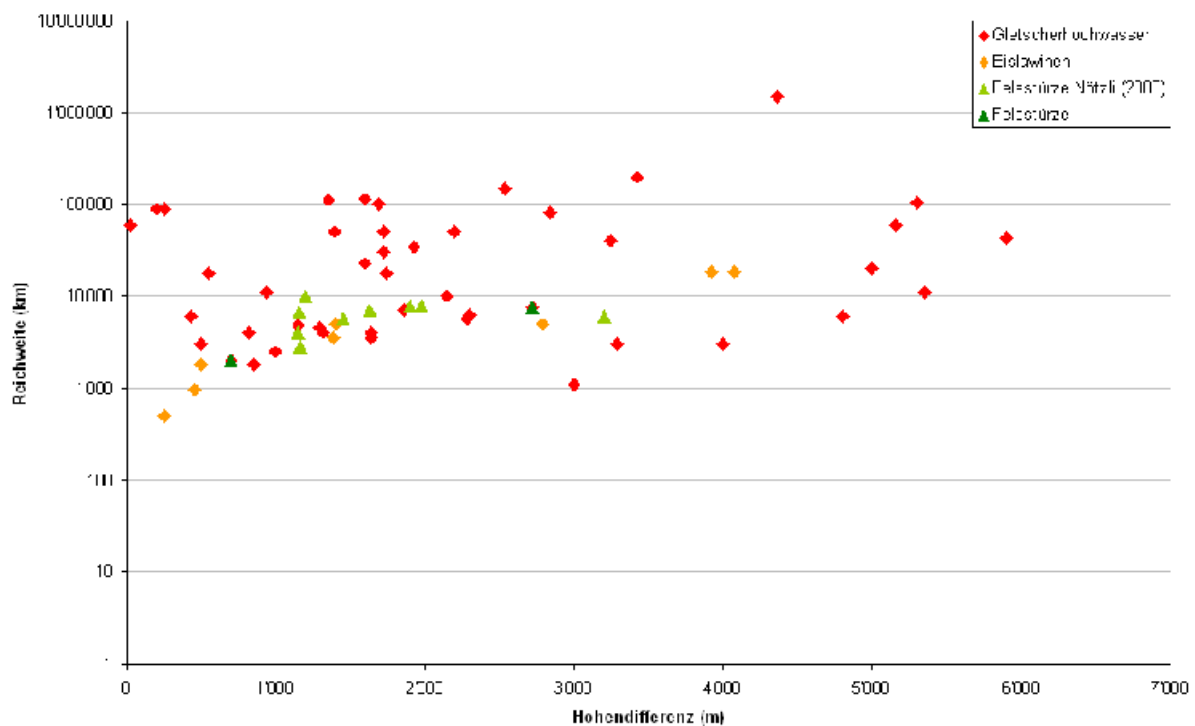


Abb. 5.12: Reichweite vs. Höhendifferenz. Zusätzlich wurden Felsstürze über Gletscher aus der Diplomarbeit von J. Nötzli (2003) aufgenommen.

Abb. 5.12 zeigt die Beziehung zwischen Reichweite und Höhendifferenz. Anhand des Quotienten dieser Parameter kann das Pauschalgefälle berechnet werden. Damit soll gezeigt werden, ob sich das Pauschalgefälle verschiedener Gefahrenarten unterscheidet. Es lässt sich feststellen, dass sich Eislawinen und Felsstürze ungefähr im selben Grössenbereich bewegen. Gletscherhochwasser erreichen oft grössere Reichweiten, wodurch das Pauschalgefälle reduziert wird. Auffallend sind die drei Gletscherhochwasser, welche einen sehr geringen Höhenunterschied überwunden haben. Das sind Ereignisse, die sich beinahe auf Meereshöhe ereigneten. Der äusserste Datenpunkt entspricht dem Ausbruch am Hubbard Gletscher. Daneben gibt es auch Gletscherhochwasser die extrem grosse Höhendifferenzen überwinden.

5.5 Schadensausmass

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der Frage, wo Ereignisse stattgefunden haben, die enorme Schäden bewirkten. Zu diesem Zweck wurde eine Tabelle (5.2) erstellt, die verschiedene Schadensklassen unterscheidet. Dabei wird zwischen keinen, geringen, mässigen, erheblichen und grossen Schäden unterschieden. Zusätzlich gibt es eine Klasse, die Ereignisse zusammenfasst bei denen die entstandenen Schäden nicht bekannt sind. Diese wird allerdings nur in der Karte dargestellt.

Schadensklasse	Schadensindikatoren
keine (1)	0 Physisch Geschädigte 0 Obdachlose (oder zerstörte Häuser) - kein geschädigtes Kulturland - keine Sachschäden

gering (2)	• 0 – 10 Physisch Geschädigte • 0 – 10 Obdachlose • gering geschädigtes Kulturland • Sachschäden < 100'000 CHF
mässig (3)	• 10 – 100 Physisch Geschädigte • 10 – 100 Obdachlose • mässig geschädigtes Kulturland • Sachschäden: 100'000 – 1 Mio CHF
erheblich (4)	• 100 – 1'000 Physisch Geschädigte • 100 – 1'000 Obdachlose • erheblich geschädigtes Kulturland • Sachschäden: 1 – 10 Mio CHF
gross (5)	• > 1'000 Physisch Geschädigte • > 1'000 Obdachlose • grosse Schäden an Kulturland • Sachschäden > 10 Mio CHF

Tab. 5.2: Mögliche Unterscheidung von Schadenklassen für Gletschergefahren (verändert nach Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2003).

Die Schadensklassen wurden aus der vorliegenden Dokumentation generiert. Es handelt sich dabei um eine eigene Interpretation des Sachverhaltes. Nach dem Definieren der Schadensklassen wurde in der Tabelle der Dokumentation eine neue Spalte eingefügt, in die der Code für die jeweilige Schadensklasse eingetragen wurde. Oft konnte die Schadensklasse nur anhand eines bekannten Parameters zugeordnet werden. Waren mehrere Parameter zum Schadensausmass aus der Literatur bekannt, die unter Umständen auch verschiedenen Schadensklassen zugeordnet werden konnten, wurde das Ereignis jeweils der höchsten erreichten Schadensklasse zugeteilt. So konnte anschliessend in einem GIS illustriert werden, wo sich Ereignisse mit grossen Schäden ereignet haben oder wo Schäden oft nicht bekannt sind.

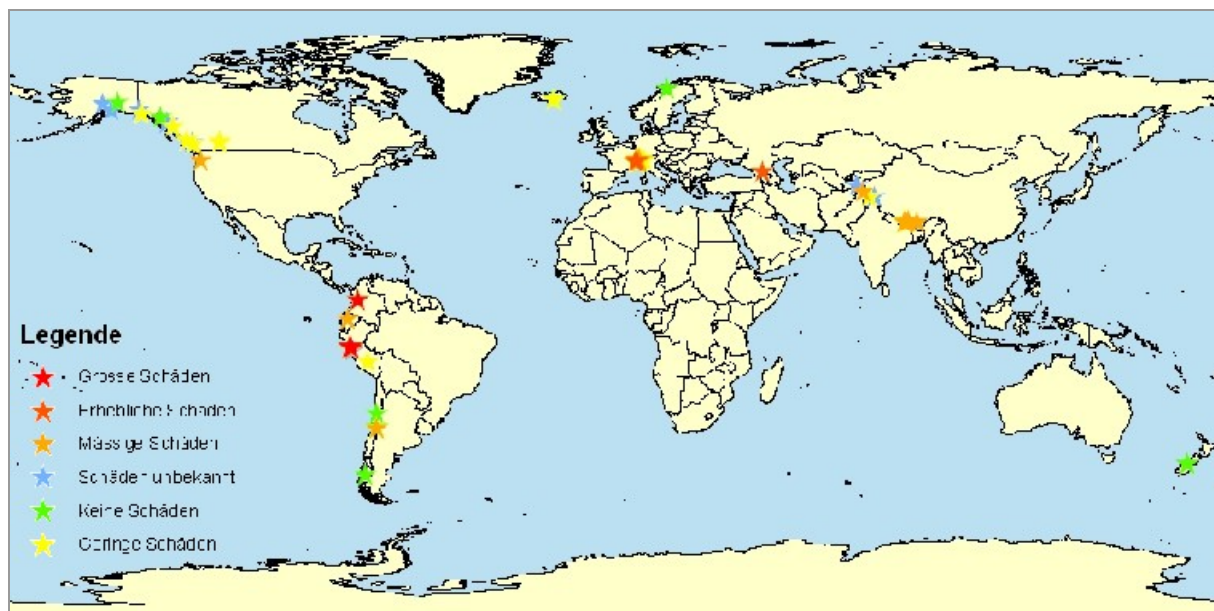


Abb. 5.13: Verteilung der Ereignisse gemäss Schadensklassen.

Abb. 5.13 zeigt deutlich, dass sich in Südamerika in der Vergangenheit häufig verheerende Ereignisse abspielten. Diese Aussage kann in Zusammenhang gebracht werden mit der Feststellung, die bereits weiter vorn gemacht wurde, dass für Südamerika viele Ereignisse bekannt sind, die mit Vulkanismus interagierten. Auch im Himalaja und den Alpen ereigneten sich immer wieder Katastrophen mit erheblicher Schadensfolge. In diesen drei Gebirgsregionen ist der Siedlungsdruck zum Teil sehr hoch. Viele Menschen leben im Gefahrenbereich.

Weiter fällt auf, dass in Nordamerika viele Ereignisse bekannt sind, die keine oder nur geringe Schäden verursacht haben. Diese Feststellung stimmt auch für Nordeuropa und lässt sich auf die geringe Bevölkerungsdichte in diesen Regionen zurückführen.

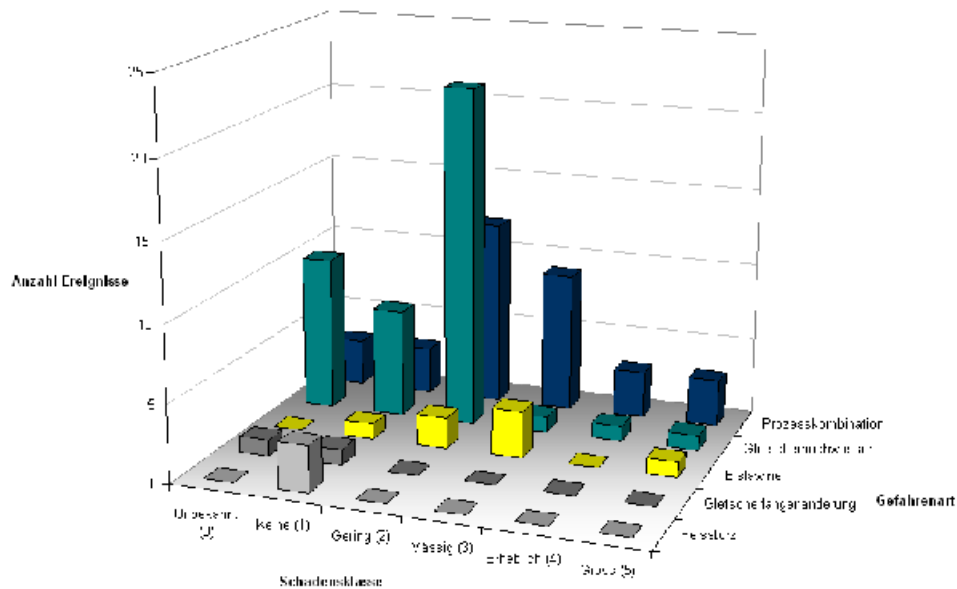


Abb. 5.14: Anzahl registrierter Ereignisse pro Gefahrenart und Schadensklasse.

Aus Abb. 5.14 wird ersichtlich, dass Prozesskombinationen am häufigsten zu grossen Schäden führen. Bei Gletscherhochwasser ist ein deutliches Maximum bei der Schadensklasse `gering` festzustellen. Eislawinen dagegen erreichen in der Schadensklasse `mässig` ihren Höchstwert.

Die Lage der Schneegrenze bestimmt u. a. die Verbreitung und Charakteristik der Gletscher und Eisschilde. Sie ist eine Funktion von Temperatur und Niederschlag und steigt von den Polen äquatorwärts an. Die höchste Lage erreicht sie in den subtropischen Trockenzonen (Haeberli et al., 2003). Diese Verteilung der Gletscher über die Meereshöhe widerspiegelt sich in Abb. 5.15. Es zeigt sich, dass keine Ereignisse in extrem nördlichen bzw. südlichen Breiten aufgenommen wurden. Die nördlichsten bzw. südlichsten registrierten Ereignisse weisen vermehrt die Schadensklassen unbekannt, keine oder geringe Schäden auf. Die Ereignisse mit grossen Schäden ereigneten sich ausschliesslich in Äquatornähe, was erstaunt, da dort die Gletscherdichte vergleichsweise gering ist.

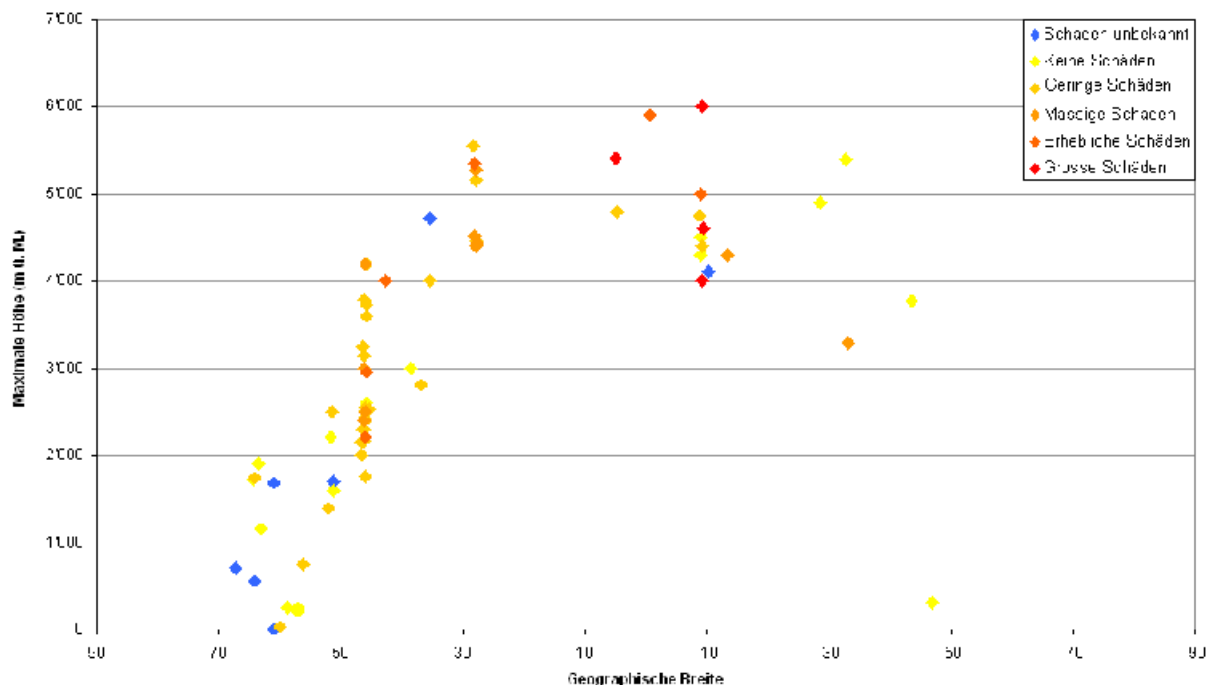


Abb. 5.15: Maximale Höhe des Anrissgebietes über die geographische Breite. Die Ereignisse werden den verschiedenen Schadensklassen zugeteilt.

5.6 Permafrostabschätzung

In diesem Abschnitt soll eine grobe Abschätzung der weltweiten Permafrostvorkommen vorgenommen werden. Damit soll das Spektrum der Analysemöglichkeiten dieser Dokumentation aufgezeigt werden.

Es werden zwei verschiedene Methoden angewendet, die anschliessend in der Diskussion miteinander verglichen werden. Die eine untersucht die Permafrostvorkommen global, die andere untersucht diese für die Alpen. Dabei soll mit einfachsten Hilfsmitteln gearbeitet werden.

5.6.1 Globale Permafrostabschätzung mit MAAT-Ansatz (1. Methode)

Die erste Abschätzung wird anhand der Regel vorgenommen, dass Permafrost bei einer MAAT (Mean annual air temperature) unter -6° bis -8°C kontinuierlich und bei einer MAAT von -1° bis -6°C diskontinuierlich auftritt (Washburn, 1979). Verwendet wird ein Temperatur-Grid (Massstab = 1:15 Mio) von ESRI. Auf www.geographynetwork.com schreibt ESRI zur Entstehung der Karte folgendes:

“The ESRI Temperature Zones map service contains temperature zone polygons, country boundaries, and city locations for the world. The temperature maps show mean annual or mean monthly air temperature at the ground. The mean air temperature maps were compiled with data from about 9,000 meteorological stations. Linear interpolation of the station data was possible only on flat plains far from the coasts. Elsewhere on the map, the isolines were laid out considering geographical situation. The isolines agree with the air temperature observations at each station (www.geographynetwork.com).”

Die Karte stellt also Polygone gleicher Jahresmitteltemperaturen über dem Boden dar und wurden aus Daten von 9'000 meteorologischen Stationen generiert, welche zwischen 1993 und 1997 erhoben wurden. Lineare Interpolation der Daten zwischen den Stationen war nur im flachen Gelände weit entfernt von den Küsten möglich. Ansonsten wurden die Isolinien den geographischen Gegebenheiten angepasst. Die Isolinien stimmen mit den Temperaturbeobachtungen jeder Station überein.

Die Temperaturkarte unterscheidet nur 5° -Schritte. Aus diesem Grund mussten die Bedingungen für die Permafrostabschätzung angepasst werden. In einem ersten Schritt wird versucht den kontinuierlichen Permafrost hervorzuheben. Dazu werden alle Flächen ausgewählt, bei denen die Temperaturhöchstwerte der Beziehung $T \leq -5^{\circ}\text{C}$ entsprechen. Um den diskontinuierlichen Permafrost abzuschätzen, wird für die Temperaturtiefstwerte die Beziehung $-5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$ verwendet. Um festzustellen, welche Ereignisse nun im kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Permafrost liegen, werden diese beiden Flächen mit den Ereignissen verschnitten. Aus dieser Berechnung (Abb. 5.16) geht hervor, dass neun Ereignisse der Klasse `kontinuierlicher Permafrost` zugewiesen werden, also eine MAAT $< -5^{\circ}\text{C}$ aufweisen. 17 Ereignisse kommen in der Klasse `diskontinuierlicher Permafrost` zu liegen, d. h. sie erreichen eine MAAT zwischen 0° und -5°C . Der Klasse `kontinuierlicher Permafrost` werden vor allem Ereignisse im Himalaja (Abb. 5.17) und in Kanada oder Alaska zugewiesen. Die Ereignisse der Alpen und Anden werden eher der Klasse `diskontinuierlicher Permafrost` zugeteilt.

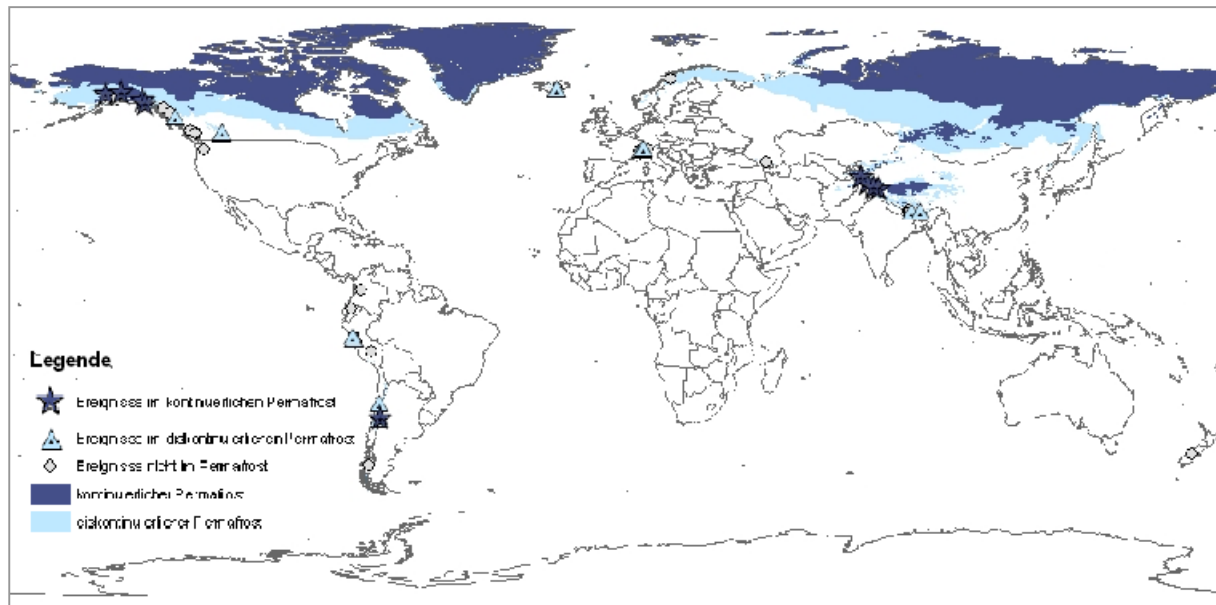


Abb. 5.16: Abschätzung der weltweiten Permafrostvorkommen (Quelle: World Temperature Zones (Annual) von ESRI, 1999).

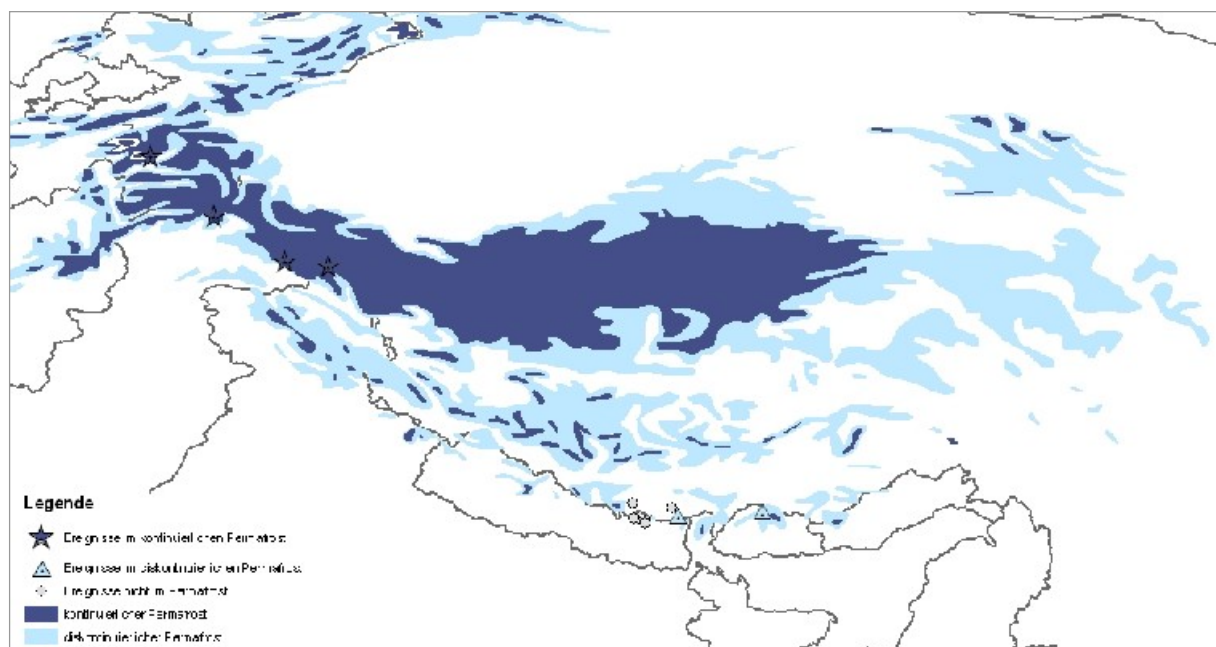


Abb. 5.17: Abschätzung der Permafrostvorkommen im Himalaja anhand des MAAT-Ansatzes (Quelle: World Temperature Zones (Annual) von ESRI, 1999).

5.6.2 Exposition-Seehöhen-Abschätzung für alpinen Permafrost (2. Methode)

Für die Abschätzung der Permafrostvorkommen in den Alpen wird der untenstehende Schlüssel zur Permafrostverbreitung (Abb. 5.18) beigezogen. Dieser Schlüssel zeigt, ab welcher Höhe bei welcher Exposition Permafrost flecken- oder flächenhaft vorkommt. Einflüsse der Topographie (z.B. Hangfusslagen) werden dabei nicht berücksichtigt. Die Exposition wird nicht als Information in der Tabelle geführt. Dieser Parameter musste für die verschiedenen Ereignisse noch erhoben werden. Weil dies nur bei den Eis- und Felslawinen Sinn macht, wurden in diese Berechnung nur diese Gefahrenarten

miteinbezogen. Die Exposition wurde entweder direkt aus der Literatur erhoben oder mit *Google Earth* (www.earth.google.com) abgeschätzt.

Mit Hilfe des Schlüssels zur Permafrostverbreitung wird dann eine Selektion (im ArcGIS *Select by Attributes*) derjenigen Ereignisse durchgeführt, die den gewählten Kriterien entsprechen. Die Abfrage nach den Ereignissen im flächenhaften Permafrost sieht dann aus, wie unter Abb. 5.19 gezeigt.

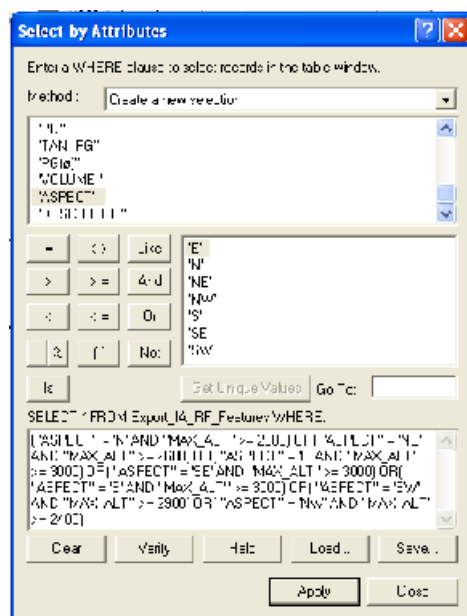


Abb. 5.19: Abfrage nach den Ereignissen im flächenhaften Permafrost.

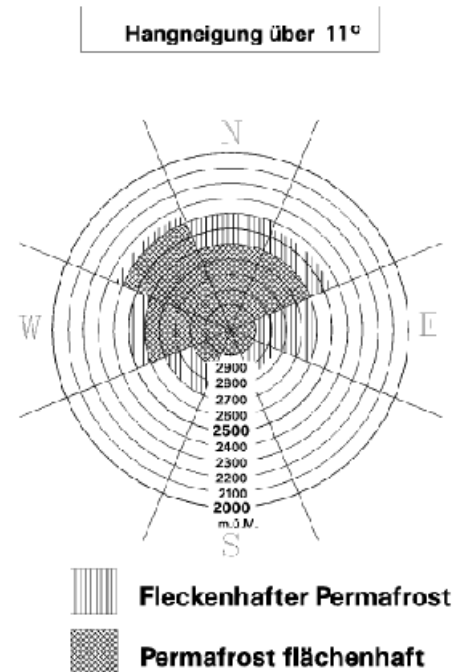


Abb. 5.18: Schlüssel zur Permafrostverbreitung für Hangneigungen über 11° (verändert nach Haeberli, 1975).

Die entstandene Karte (Abb. 5.20) zeigt, dass sich acht Ereignisse mutmasslich im flächenhaften Permafrost ereignet haben. Die Eislawine vom 30. August 1965 am Allalin Gletscher liegt im fleckenhaften Permafrost. Ein Ereignis (Rhone Gletscher, 23. Juli 1941) hat sich wahrscheinlich nicht im Permafrost ereignet.



Abb. 5.20: Permafrostabschätzung für Eis- und Felslawinen im Alpenraum.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Grundlagen

Im Kapitel 3.1 wurde bereits erklärt, dass die Informationen über die Ereignisse v. a. aus bestehenden Dokumentationen, wissenschaftlichen Journals, Büchern und dem Internet gewonnen wurden. Diese sollten, wenn möglich auf Deutsch oder Englisch vorliegen, in Ausnahmefällen auch auf Französisch. Zwischen den verschiedenen Quellen bestehen erhebliche Unterschiede, die vom Erscheinungsjahr bis zur Qualität der jeweiligen Quelle reichen.

Betrachtet man die verwendeten bestehenden Dokumentationen (vgl. Kap. 3.1.1) fällt auf, dass in der GRIDABASE von GLACIORISK 672 Ereignisse registriert sind und im Projekt *Glacial Lake Outburst Flood Monitoring and Early Warning System in Hindu Kush Himalayas* 20. Daneben werden in der Tabelle `Special Events` des WGMS 85 Ereignisse erfasst. In der ausgearbeiteten Dokumentation sind jedoch lediglich 88 Ereignisse aufgelistet. Dies kommt daher, dass diese Arbeit in erster Linie eine erste Datenbasis für die weltweit bedeutendsten Gletscherkatastrophen darstellen soll. Um die Datenmenge in überschaubarem Rahmen zu halten und sich nur auf die weltweit bedeutendsten Katastrophen zu beschränken, wurde eine Kriterienliste (vgl. Tab. 4.1, S. 24) ausgearbeitet, anhand derer entschieden wurde, ob ein Ereignis aufgenommen wird oder nicht.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass beinahe für jedes Ereignis eine andere Quelle verwendet wurde. Oft mussten mehrere Quellen beigezogen werden, um die gewünschten Attribute zu ermitteln. In solchen Fällen war es möglich, dass die Autoren von unterschiedlichen Referenzwerten ausgingen und so unterschiedliche Angaben zu einzelnen Parametern machten. Wenn dies der Fall war, wurde die verlässlichere Quelle beigezogen oder ein Mittelwert erfasst.

Beim Internet als Informationsquelle ist die Herkunft der Daten umstritten. Im Gegensatz zu Journals und Büchern fehlen bei Internetseiten Redaktionen, die Inhalte prüfen. Daher sollten Webseiten immer kritisch hinterfragt werden (Backhaus und Steinemann, 2001). Für diese Arbeit wurde das Internet vor allem dazu genutzt, auf noch nicht registrierte Ereignisse aufmerksam zu werden. Die dazugehörigen Attributgrößen wurden wenn immer möglich aus Büchern oder wissenschaftlichen Artikeln gewonnen. Erst wenn aus diesen Quellen keine weiteren Informationen zu erfahren waren, wurde auf die Information aus dem Internet zurückgegriffen.

Trotz der vielfältigen zur Verfügung stehenden Literatur, war es bei einzelnen Ereignissen schwierig, alle Attribute zu beziffern. Dann musste entschieden werden, ob auf die nicht vorhandenen Informationen verzichtet werden konnte, oder ob man ein Ereignis mangels Informationen ausschliessen

musste. Dies war bei drei Ereignissen aus dem Himalaja der Fall, bei denen es nicht gelang, sie zu lokalisieren.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit war es, ein möglichst einfaches, aussagekräftiges Datenmodell zu erstellen. Mit MS Excel wurde zu Gunsten eines Tabellenkalkulationsprogramms entschieden, welches weltweite Bekanntheit erlangt hat und sich vergleichsweise einfach handhaben lässt. Dies ist wichtig, wenn zu einem späteren Zeitpunkt neue Vorfälle von verschiedenen internationalen Experten nachgeführt werden sollen. Ausserdem konnte mit diesem Programm die Kompatibilität zur WGMS-Tabelle für Allgemeine Gletscherinformation erreicht werden. Die Struktur in Excel unterstützte auch den Export der Daten nach ArcGIS 9.8.

6.2 Erstellen des Datenmodells

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, warum sich die Autorin für welche Attribute in der Tabelle entschieden hat. Wie in Kapitel 4.2 bereits erläutert, können die einzelnen Parameter einem Überbegriff (Identifikation, Datum, Gefahrentyp, Ereignisbeschreibung, zusätzliche Informationen) zugeordnet werden. Diese fünf Überbegriffe sollen eine exakte Identifikation jedes Ereignisses ermöglichen, die Erfassung des involvierten Prozesses oder der Prozesskombination zulassen, eine Prozessbeschreibung vornehmen, sowie Angaben zu Schäden, Datenquellen und Bemerkungen machen.

Die exakte Identifikation jedes Ereignisses wird über die Schlüsselattribute `GLACIER_NAME`, `DAY`, `MONTH` und `YEAR` erreicht. Es wird also vorausgesetzt, dass nie zwei unabhängige Ereignisse innerhalb eines Tages am gleichen Gletscher stattgefunden haben. Anhand dieser Attributkombination kann jedes Ereignis individuell identifiziert und von den anderen abgegrenzt werden.

Da die Tabelle prozessorientiert aufgebaut wurde, war es wichtig, wie der involvierte Prozess oder die Prozesskombination in der Dokumentation gespeichert wurde (vgl. Kap. 6.2.1.3). Um auch quantitative Aussagen über die ablaufenden Prozesse zu machen, mussten eine Reihe von entsprechenden Parametern (z.B. Volumen, Reichweite, Höhenangaben) erfasst werden. In der Tabelle sollte es möglich sein, eine komplette Ereignisbeschreibung in Textform vorzunehmen. Dies wird über die Spalte `EVENT_DESCRIPTION` erreicht. An dieser Stelle können verschiedene Attribute zur Beschreibung der Ereignisgrösse aufgenommen werden. Weitere Spalten erfassen Literaturangaben und Bemerkungen.

6.2.1 Erfasste Attribute

Die ausgearbeitete Dokumentation umfasst nur eine Auswahl von möglichen Parametern, um die oben genannten Ziele zu erreichen. Dabei kann zwischen obligatorischen und optionalen Attributen unterschieden werden. Als obligatorisch werden jene Attribute bezeichnet, die für die Tabelle unverzichtbar sind. Optional sind Attribute, die man unter geeigneten Umständen in die Tabelle aufnimmt. Als obligatorisch gelten die Schlüsselattribute `GLACIER_NAME`, `DAY`, `MONTH` und `YEAR`. Daneben gehören auch die Attribute dazu, welche die Kompatibilität zur WGMS-Tabelle garantieren, also `POLITICAL_UNIT`, `LATITUDE` und `LONGITUDE`.

Die Tab. 6.1 zeigt eine Übersicht möglicher Parameter, welche zu den einzelnen Gefahrentypen erfasst werden könnten. Ausgehend von dieser Tabelle wurde eine Auswahl getroffen. Als erstes wurden jene Parameter berücksichtigt, die für alle Gefahrentypen interessieren und sich einfach erheben liessen. Dazu gehören die Attribute Schäden, maximale und minimale Höhe. Weitere Attribute wurden erfasst, wenn sie für mehrere Gefahrenarten erhoben werden konnten. Beispielsweise das Volumen oder die Reichweite. Verzichtet wurde dann auf Attribute, wenn diese prozessspezifisch sind, wie die Vorstossgeschwindigkeit bei Gletscherlängenänderungen. Ausserdem wurde bei der Wahl von Parametern darauf geachtet, ob genügend Informationen darüber zu bekommen sind. So stellte sich schnell heraus, dass zur Dauer von Gletscherhochwasser oft keine Angaben in der Literatur zu finden sind. Auch das Attribut Schadenssumme war in einer ersten Version der Tabelle noch vorhanden. Auf diese beiden wurde in der endgültigen Tabelle dann verzichtet, da es schwierig war, Informationen über diese At-

tribute in der Literatur zu finden. Zusätzlich musste auch immer abgeschätzt werden, welchen Nutzen diese Attribute für die Auswertung bringen würden.

Gefahrenart mögliche Attribute	Gletscherlängenänderung	Gletscherhochwasser	Eislawine	Felssturz	Interaktion mit Vulkanismus / Erdbeben	Attribut aufgenommen:
Schäden						✓
Schadenssumme						✗
Einsetzen eines Ereignisses						✗
Ende eines Ereignisses						✗
Dauer						✗
max. Vorstossgeschwindigkeit						✗
max. Vorstoss						✗
Periodizität						✗
Volumen						✓
Ausbruch-/Abbruchmechanismus						✓
Spitzenabfluss						✓
Reichweite						✓
Pauschalgefälle						✓
max. Höhe des Anrissgebietes						✓
min. Höhe des untersten Punktes der Ablagerung						✓
Fliessgeschwindigkeit						✗
Bettneigung						✗

Tab. 6.1: Auswahl von möglichen zu erfassenden Parametern. ✓ = Attribut wird in der Tabelle erfasst. ✗ = Attribut wird in der Tabelle nicht erfasst.

Ein weiteres interessantes Attribut ist das Pauschalgefälle. Diese Grösse ist nicht direkt in der Tabelle gespeichert, sondern kann über die Höhendifferenz (H) und die Reichweite (L) mit der Formel H/L berechnet werden.

Oft war es schwierig, die gewählten Attribute anhand der Literatur zu beziffern. Eine weitere Schwierigkeit war, festzustellen, welche Grösse mit einem angegebenen Wert genau gemeint ist. So gibt es beispielsweise beim Abfluss eines Hochwassers verschiedene Interpretationsmöglichkeiten. Zum einen kann vom mittleren Abfluss gesprochen werden, womit ein durchschnittlicher Abfluss während dem Ereignis zu verstehen ist, oder es wird der Spitzenabfluss genannt. Ein ähnliches Problem ergab

sich beim Festlegen des Volumens. Vor allem bei Prozesskombinationen war oft nicht ersichtlich, ob mit dem angegebenen Wert das Totalvolumen gemeint ist, oder ein partielles Volumen einer involvierten Eislawine oder eines Felssturzes. Für die Dokumentation wäre es in solchen Fällen allerdings auch von Interesse gewesen, das Gesamtvolumen zu kennen.

6.2.1.1 Lokalisierung der Ereignisse

Bei jedem Ereignis, welches in die Tabelle eingetragen werden sollte, wird vom Namen des betroffenen Gletschers ausgegangen. So wird sichergestellt, dass die Dokumentation mit der WGMS-Tabelle verknüpft werden kann. Ist dieser bekannt, wurde die Tabelle `General Glacier Information` konsultiert und überprüft, ob besagter Gletscher dort inventarisiert ist. Ist er in dieser Tabelle zu finden, konnte die geographische Länge und Breite, sowie der WGMS_ID direkt übernommen werden.

Wenn ein Gletscher nicht in der WGMS-Tabelle erfasst war (z.B. Tête Rousse Gletscher, vgl. S. 26), galt es, ihn anhand anderer Informationsquellen zu lokalisieren. In manchen Fällen fanden sich die Koordinaten direkt in Papers oder auf Internetseiten. Oder es waren dort Kartenausschnitte abgebildet, über die man zu ungefähren Informationen über die Position eines Gletschers gelangte. Mit Hilfe von *Google Earth* wurden diese dann präzisiert.

In einzelnen Fällen war der involvierte Gletscher aus der Literatur nicht ersichtlich. Es war daraus lediglich der Name des betroffenen Tals oder des Gletschersees zu entnehmen. Dies galt vor allem für Ereignisse in den Anden oder im Himalaja. In solchen Fällen wurde versucht, den Namen des Gletschers zu ermitteln. Gelingt dies nicht, ist anstelle des Gletschernamens das Tal oder der Gletschersee genannt.

In die Dokumentation einbezogen, wurden nur Ereignisse, von denen die geographische Lage bekannt war. Bei drei Ereignissen, die den Kriterien zur Aufnahme entsprochen hätten, gelang es nicht die genauen Längen- und Breitenkoordinaten zu ermitteln, wodurch auf diese verzichtet werden musste. Alle drei Ereignisse ereigneten sich im Himalaja.

Verschiedene Katastrophen sind unter anderen Bezeichnungen besser bekannt, als unter dem Namen des Gletschers. So verbindet man die Katastrophe am Nevado Huascarán eher mit dem Namen des Berges, als mit dem Gletschernamen Glaciér 511. Um diesem Problem zu begegnen, wurde die Spalte KEYWORDS eingeführt. An dieser Stelle können bekanntere Begriffe als der Gletschername zu einem Ereignis vermerkt werden, etwa der Name des Gletschersees, des Berges oder des betroffenen Tals.

6.2.1.2 Erfassen des Datums

In der Tabelle `Special events` des WGMS wurde das Datum in einer Spalte (EVENT_DATE) gespeichert. Im Hinblick auf die Auswertung war es jedoch von Interesse auch Abfragen nach dem Zeitpunkt eines Ereignisses zu tätigen, um so Aussagen zur Saisonalität gewisser Gletschergefahren zu machen. So ereignen sich etwa Gletscherhochwasser fast ausschliesslich in den Sommermonaten (Haeblerli und Käab, 2004). Um solche Aussagen zu überprüfen und zu zeigen, ob die Dokumentation auf ähnliche Ergebnisse kommt, ist es nötig das Datum auf andere Weise zu erfassen. Daher wurden drei Spalten mit den Überschriften DAY, MONTH und YEAR generiert. Dank dieser Änderung ist es nun möglich, Fragestellungen wie in Kapitel 5.3 zu beantworten. Bei Abfragen zur Saisonalität wird nur die Spalte MONTH in die Auswertung einbezogen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Jahreszeiten auf der Nord- und der Südhemisphäre gegensätzlich sind und dass, bei Ereignissen, wo nur das Jahr bekannt ist, ein Defaultwert für DAY (1) und MONTH (1) gesetzt wurde.

6.2.1.3 Erfassen des Gefahrentyps

Betrachtet man wiederum die Tabelle `Special events` des WGMS, stellt man fest, dass die Gefahrenart (EVENT_TYPE) als Code vermerkt ist. 1 steht dort für einen Gletschersurge, 2 für eine Kalbungsinstabilität usw. Prozesskombinationen können unter der Ziffer 6 `Other`, mit einer entsprechenden Bemerkung in der EVENT_DESCRIPTION, vermerkt werden. Der Nachteil dieser Darstellungsform ist, dass auf diese Weise nicht ersichtlich wird, welche Gefahrentypen miteinander interagierten. Da

ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist, den Anteil an Prozesskombinationen festzustellen, sowie herauszufinden welche Kombinationen möglich sind, musste eine neue Form gefunden werden. Dazu wurden verschiedene Möglichkeiten geprüft und die Vor- und Nachteile abgewogen. Untenstehend vier Varianten zur Darstellung des Gefahrentyps:

1. Die Form des WGMS wird übernommen. Zusätzlich wird ein weiterer Code für kombinierte Ereignisse eingeführt.
2. Die Ereignistypen werden in verschiedenen Spalten erfasst. Dort wird dann vermerkt, ob es sich bei einem bestimmten Ereignis, um die betreffende Gefahrenart handelt.
3. Für jeden Gefahrentyp wird eine andere Tabelle erstellt und Prozesskombinationen werden als Verbindungen zwischen diesen Tabellen gespeichert.

Im umgesetzten Datenmodell wurde die zweite Variante realisiert. Sie bringt den Vorteil, dass Prozesskombinationen optimal erfasst werden können. Zum einen kann festgestellt werden, ob es sich um eine Prozesskombination handelt. Zum anderen kann auch nachgewiesen werden, welche Prozesse zusammenspielen.

Bei der ersten Möglichkeit wären zwar Prozesskombinationen vermerkt worden, aber es hätte sich im Nachhinein nicht feststellen lassen, welche Prozesse involviert gewesen sind.

Die dritte Möglichkeit hätte die ganze Dokumentation unnötig kompliziert gemacht. Da ein wichtiges Ziel jedoch ihre Einfachheit war, wurde auch diese Möglichkeit ausgeschlossen.

In der Dokumentation wurde zwischen den sechs Gletschergefahrenarten Gletscherlängenänderung, Gletscherhochwasser, Eislawine, Felssturz, Interaktion mit Vulkanismus oder Erdbeben und Andere unterschieden. Dies entspricht allerdings nur einer möglichen Aufteilung der Gefahrenarten. So hätte man die Gletscherhochwasser zum Beispiel noch nach dem Ausbruchsmechanismus unterscheiden können. Oder die Eislawinen nach den Anrisszonen. Allerdings wäre diese Unterscheidung in der Praxis schwierig anzuwenden gewesen, da Informationen darüber in der Literatur schwierig zu finden sind. Ausserdem wäre die Auswertung dadurch unnötig kompliziert geworden.

6.3 Auswertung

6.3.1 Verteilung der Ereignisse über den Globus

Eine grundlegende Schwierigkeit der Dokumentation taucht bereits in Abb. 5.1 (S. 37) auf. Diese Karte soll darstellen, wie sich die Ereignisse über den Globus verteilen und welchen Gefahrentyp sie aufweisen. Jeder Gefahrenart wurde in der Karte eine andere Signatur zugewiesen. Da aber, wie unter 6.2.1.3 erklärt wurde, kombinierte Ereignisse in mehreren Spalten (Gefahrentypen) vermerkt sind, wurden diese mehrfach abgebildet. Abhängig von der Abfolge der Layer, wird eine Prozesskombination mit unterschiedlichen Symbolen abgebildet. Stürzte also eine Eislawine in einen proglazialen See und verursachte so eine Flutwelle, wird ein solches Ereignis im Layer Gletscherhochwasser, sowie im Layer Eislawinen erscheinen. Je nach dem, welcher Layer oben liegt, wird das Ereignis in einer anderen Ebene abgebildet. Diesem Problem kann begegnet werden, wenn ein zusätzliches Symbol für die Prozesskombinationen eingefügt wird. Dann werden unter den anderen Gefahrenarten nur jene Ereignisse wiedergegeben, in denen der entsprechende Prozess isoliert abgelaufen ist. Alle Prozesskombinationen sind in diesem Fall unter dem zusätzlichen Symbol dargestellt.

Will man in einer Karte nun die Verteilung der Ereignisse über den Globus darstellen, hat man folgende beiden Möglichkeiten:

1. Jeder Gefahrenart wird ein Symbol zugewiesen. Prozesskombinationen werden dann mehrfach in den entsprechenden Layer dargestellt.

2. Zusätzlich wird ein Symbol für Prozesskombinationen eingeführt. In den Layer der einzelnen Gefahrenarten erscheinen nur jene Ereignisse, bei denen ein Prozess isoliert abgelaufen ist.

6.3.2 Prozesse / Prozesskombinationen

In Kapitel 5.2 wurde festgestellt, dass Prozesskombinationen bei der Betrachtung von Gletscher- und Permafrostkatastrophen eine wichtige Bedeutung zukommt. Bei der Auswertung dieses Aspektes zeigte sich, dass die gewählte Darstellungsform der Gefahrenarten in der Tabelle günstig ist. Alle Fragestellungen konnten anhand der Dokumentation beantwortet werden. In MS Excel, wie auch in ArcGIS 9.8, lässt sich einfach feststellen, wie oft welche Gefahrenkombination aufgetreten ist. Damit liess sich auch nachweisen, welche Prozesskombinationen in der Natur schon aufgetreten sind. Dabei muss beachtet werden, dass die möglichen Prozesskombinationen sehr vielfältig sind. Einige davon treten nur sehr selten auf. Diese Tatsachen machen eindeutige Aussagen über die Bedeutung und Ausprägung der Kombinationen sehr schwierig. Es muss damit gerechnet werden, dass auch bis anhin nicht bekannte Kombinationen in Zukunft auftreten können.

6.3.3 Saisonalität von Gefahrentypen

In der Literatur sind verschiedene Aussagen zur Saisonalität von Gletschergefahrentypen zu finden. Davon sollten zwei in dieser Arbeit geprüft und ermittelt werden, ob diese Dokumentation ähnliche Resultate liefert. Die eine hält fest, dass Gletscherhochwasser fast ausschliesslich in den Sommermonaten auftreten. Die andere sagt aus, dass sich Eislawinen des Typs Ia vor allem im Sommer und Herbst lösen. Tatsächlich konnten diese Aussagen anhand der Dokumentation bestätigt werden (vgl. Kap. 5.3).

Bei der Bearbeitung dieser Fragestellungen mussten allerdings einige Punkte beachtet werden:

- Der gegensätzliche Verlauf der Jahreszeiten auf der Nord- und der Südhalbkugel.
- In die Untersuchung zur Saisonalität von Gletscherhochwasser konnten nicht alle Ereignisse dieser Gefahrenart einbezogen werden. So wurden Hochwasser, welche als Folge von Eislawinen, Felsstürzen oder Vulkaneruptionen entstanden sind, ausgeschlossen.
- Bei den Eislawinen wurde in dieser Arbeit nicht zwischen den einzelnen Typen unterschieden. So lässt bei der Abb. 5.7 nicht feststellen, welche Typen von Eislawinen zum Resultat beigetragen haben.

Diese Einschränkungen führten dazu, dass für die einzelnen Gefahrenarten nur noch sehr wenige Ereignisse in die Auswertung eingeflossen sind. Ein aussagekräftiges Diagramm liess sich somit nur noch für die Gefahrenarten Gletscherhochwasser und Eislawinen erstellen. Aus diesem Grund wurde auf Darstellungen der Saisonalität für die anderen Gefahrenarten verzichtet.

Ereignisse der Südhemisphäre zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Spalte LATITUDE eine negative Zahl aufweisen. So war es mögliche Ereignisse der Süd- und Nordhalbkugel auseinander zu halten und in Abb. 5.6 und 5.7 getrennt darzustellen.

6.3.4 Analyse der Ereignisgrössen

Bei den Fragestellungen nach der Grösse von Ereignissen stellt sich ebenfalls das Problem zu kleiner Datenmengen. Das rührt zum einen daher, dass bei diesen Auswertungen klar zwischen den einzelnen Gefahrenarten differenziert werden musste. Zum anderen war es nicht möglich, für alle Ereignisse die nötigen Attribute zusammenzutragen. Die so entstandene Datensätze waren oft zu klein, um statistisch signifikante Aussagen zu ermöglichen. So konnte die Abb. 5.10 nur für die Reichweiten von Glet-

scherhochwasser abgebildet werden, obwohl dieser Parameter auch für Eislawinen oder Felsstürze erhoben wurde. Oft fehlten die Informationen dazu aber in der Literatur.

6.3.5 Schadensausmass

Tab. 5.2 stellt eine mögliche Unterscheidung von Schadensklassen für Gletscherkatastrophen dar.

Diese Tabelle wurde anhand der vorliegenden Dokumentation generiert und entspricht einer eigenen Interpretation des Sachverhaltes. Als Vorlage diente eine Darstellung der Schadensklassen von Hochwasser (Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2003).

Beim Erfassen der Schäden für die Tabelle bestand die Schwierigkeit, dass teilweise keine Angaben dazu in der Literatur gemacht werden. In solchen Fällen bleibt offen, ob Schäden nicht bekannt und erwähnt sind oder ob es keine gegeben hat. Sind Schäden beschrieben, bleibt die Unsicherheit, ob die Beschreibung umfassend ist oder nur eine grobe Übersicht darstellt.

Eine Schadenssumme ist leider nur in den wenigsten Fällen angegeben. Sie hätte eine einfachere Vergleichbarkeit ermöglicht. Allerdings existiert bei diesem Parameter die Problematik, dass die Schadenssumme in einer bestimmten Währung angegeben ist und noch in eine definierte Grösse hätte umgerechnet werden müssen. Ausserdem haben sich die Katastrophen auch in anderen historischen Zeiträumen abgespielt und ein direktes Vergleichen des Schadenwertes dieser Katastrophen wäre ebenfalls nicht möglich. Falls in der Literatur Angaben zu Schadenssummen zu finden waren, wurden diese gleich in der entsprechenden Währung übernommen und bei der Ereignis- oder Schadensbeschreibung integriert.

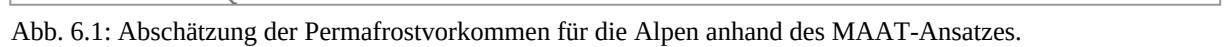
6.3.6 Permafrostabschätzung

Die Abschätzungen der Permafrostvorkommen global, wie auch lokal (Alpen), wurden mit einfachsten Hilfsmitteln vorgenommen. Es zeigte sich, dass die globale Abschätzung in den Hochgebirgen eher diskontinuierlichen Permafrost modelliert, mit Ausnahme des Himalajas und der Rocky Mountains. Auch in den Alpen zeigt die Permafrostabschätzung anhand des MAAT-Ansatzes nur relativ kleine Flächen mit diskontinuierlichem Permafrost (vgl. Abb. 6.1). Dies stimmt jedoch nicht mit der Realität überein. Betrachtet man die Hinweiskarte Permafrost Schweiz (Abb. 6.2), welche die potentielle Permafrostverbreitung aufgrund des DHM25 modelliert, wird ersichtlich, dass auch in den Alpen grosse flächenhafte Permafrostvorkommen existieren. Die vorgenommene Abschätzung mit der 1. Methode gibt also nur eine sehr grobe Übersicht über die weltweiten Permafrostvorkommen und kann daher nur für die globale Betrachtung beigezogen werden.

Vergleicht man die Resultate der beiden Abschätzungen, zeigt sich, dass diese sich extrem voneinander unterscheiden (vgl. Tab. 6.2). Bei der globalen Abschätzung wurden 8 Ereignisse der Alpen als 'nicht im Permafrost liegend' klassiert und 2 als 'im fleckenhaften Permafrost liegend'. Für die Abschätzung der Permafrostvorkommen im Alpenbereich zeigte sich ein gegensätzliches Bild. Hierbei wurden 8 Ereignisse im 'flächenhaften', sowie je ein Ereignis im 'fleckenhaften' und 'nicht im Permafrost' klassiert. Hätten sich die Ereignisse im selben Permafrostbereich abgespielt, müssten sie dieselbe Farbe haben. Dieses Ergebnis wurde jedoch bei keinem der untersuchten Ereignisse erzielt.

Basierend auf den vorliegenden Daten ist eine solide Abschätzung der Permafrostvorkommen nicht möglich. Zwar kann aus der globalen Abschätzung eine grobe Übersicht gewonnen werden. Betrachtet man die Ergebnisse jedoch im Detail, stimmen diese nicht mit der Realität überein. Bei dieser Analyse hat sich gezeigt, dass diese einfache Datenstruktur bei komplexen Fragestellungen an ihre Grenzen stösst.

Für die Ereignisse der Alpen gilt, dass, um Aussagen über den Zusammenhang mit Permafrost zu machen, weitere Parameter (z.B. Exposition) erhoben werden müssen.



	1. Methode	2. Methode
ROSSBODEN		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		
BRENVA		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		

	1. Methode	2. Methode
TRIOLET		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		
BIS		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		
ALTELS		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		

	1. Methode	2. Methode
BRENTA		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		
ALLALIN		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		
RHONE		
PF flächenhaft		
PF fleckenhaft		
kein PF		

Tab. 6.2: Vergleich der beiden Methoden zur Permafrostabschätzung für die Alpen.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Ausblick

In einem ersten Teil der Arbeit wurden möglichst viele gefährliche Ereignisse in vergletscherten Gebieten gesammelt und dokumentiert. Anschliessend wurde versucht, diese Ereignisse in ein geeignetes Datenmodell zu implementieren. Die entstandene Tabelle wurde anhand eines Sets von Fragestellungen auf ihren Aussagegehalt und ihre Anwendbarkeit geprüft.

Folgende Erkenntnisse können aus der Analyse der Dokumentation gewonnen werden:

- Über 40 Prozent der erfassten Ereignisse stammen aus Europa (36 Ereignisse), was sich mit der guten Datengrundlage für diesen Kontinent begründen lässt. Nur sehr wenige (3) bzw. gar keine Ereignisse sind für Neuseeland bzw. Afrika bekannt.
- Die häufigste Gefahrenart für die Kontinente Europa, Asien, Nord- und Südamerika stellen die Gletscherhochwasser dar. Für Neuseeland konnten lediglich drei Felsstürze erfasst werden. Betrachtet man die anderen Gefahrenarten, bestehen zwischen den Kontinenten erhebliche Unterschiede. So wurden in Europa vergleichsweise viele Eislawinen dokumentiert, während aus Südamerika viele Ereignisse in Zusammenhang mit tektonischer Aktivität bekannt sind.
- Bei der Betrachtung von Gletscherkatastrophen muss den Prozesskombinationen eine wichtige Bedeutung zugerechnet werden. Je mehr Prozesse involviert sind, desto geringer ist die Auftretenswahrscheinlichkeit einer solchen Kombination. Gletscherhochwasser laufen häufiger isoliert ab, als dass sie in Prozesskombinationen eingebunden sind. Gletscherlängenänderungen, Eislawinen und Felsstürze dagegen treten häufiger in Prozesskombinationen auf.
- Gletscherlängenänderung / Gletscherhochwasser sowie Eislawine / Gletscherhochwasser sind die am häufigsten erfassten Prozesskombinationen in der Dokumentation.
- Die Aussagen aus der Literatur, dass Gletscherhochwasser fast ausschliesslich in den Sommermonaten und Eislawinen des Typs Ia vor allem im Sommer und

Herbst zu erwarten sind, konnten anhand der gesammelten Daten bestätigt werden.

- Die Gesamtvolumen (inkl. Sedimentfracht) von Gletscherhochwassern, auch solchen, die mit Vulkanismus interagierten, können über 1'000 Mio m³ umfassen. Eislawinen erreichen Volumen von 100 Mio m³.
- Am häufigsten registriert wurden Spitzenabflüsse von Gletscherhochwassern im Grössenbereich zwischen 1'000 und 10'000 m³/s. Dabei liegen die Spitzenabflüsse von Hochwassern in Prozesskombinationen tendenziell über jenen von isolierten Prozessen. Die Volumen dagegen bewegen sich im selben Bereich.
- Viele Ereignisse mit verheerender Schadensfolge spielten sich in den dicht besiedelten Hochgebirgsregionen der Anden, Alpen und des Himalajas ab. Prozesskombinationen führen am häufigsten zur Schadensklasse 'gross'.

Zur Anwendbarkeit der Dokumentation können folgende Aussagen gemacht werden:

- Diese Datensammlung ist nicht umfassend. So können Ereignisse der Autorin nicht bekannt sein, oder es musste aufgrund eines Mangels an Information auf die Aufnahme von Ereignissen verzichtet werden. Ausserdem waren die Datengrundlagen für die einzelnen Kontinente sehr unterschiedlich. Ausgehend von der Anzahl Ereignisse pro Kontinent kann also nicht direkt auf die Gefährdung dieser Gebiete bezüglich Gletschergefahren geschlossen werden.
- Da aus der Literatur oft nicht ersichtlich war, welche Grösse mit einem angegebenen Wert genau gemeint ist, oder sich Werte aus verschiedenen Quellen unterschieden, müssen die Werte der Tabellenattribute kritisch hinterfragt werden.
- Bei den meisten Fragestellungen der Auswertung musste zwischen den einzelnen Gefahrenarten unterschieden werden. Dadurch ergaben sich zum Teil relativ kleine Datensätze, die keine statistischen Aussagen zulassen.
- Die meisten Fragestellungen konnten jedoch anhand der Dokumentation beantwortet werden. Je komplexer die Fragestellungen wurden, desto schwieriger gestaltete es sich, diese befriedigend zu beantworten und desto grösser wurde der Unsicherheitsbereich.
- Die ausgearbeitete Datensammlung eignet sich gut für die Darstellung der Daten in GIS und kann auf einfache Weise fürs Internet aufbereitet werden.

Mit dieser Dokumentation wird eine erste Datenbasis weltweiter Gletscherkatastrophen vorgelegt, die es erlaubt die globale Bedeutung und Ausprägung dieser Naturgefahr abzuschätzen.

Momentan umfasst die Dokumentation 88 Ereignisse. Es wäre wünschenswert, wenn sie in Zukunft um aktuelle oder noch nicht erfasste Ereignisse erweitert würde. Damit könnten sich neue Analysemöglichkeiten eröffnen. Denkbar wären ergänzende Analysen über die aktiven Prozesse bei Gletschergefahren. Um statistisch signifikante Aussagen zu ermöglichen, müssten für die einzelnen Gefahrenarten noch mehr Ereignisse zur Verfügung stehen. Ein weiteres Ziel dieser Massnahme könnte es sein, die Datengrundlage für die verschiedenen Kontinente zu homogenisieren. Aus den bestehenden Datenquellen (z.B. WGMS, GLACIORISK) liessen sich noch zahlreiche weitere Ereignisse erheben. Für das Nachführen neuer oder noch nicht eingetragener Ereignisse, müssten allerdings klare Kriterien festgelegt werden, die definieren, welche Attribute in welcher Form (Einheit, Beschaffenheit) zu erfassen sind.

Literatur

- Alean, J. C. (1984): Untersuchungen über Entstehungsbedingungen und Reichweiten von Eislawinen. Mitteilung Nr. 74 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, ETH Zürich, Zürich.
- Backhaus, N., Steinemann, M. (2001): Leitfaden für wissenschaftliches Arbeiten. Geographisches Institut der Universität Zürich, Zürich.
- Barla, G., Dutto, F., Mortara, G. (2000): Brenva glacier rock avalanche of 18 January 1997 on the Mount Blanc Range, Northwest Italy. *Landslide News*, 13, 2 – 5.
- Barla, G., Barla, M. (2001): Investigation and modelling of the Brenva Glacier rock avalanche on the Mount Blanc Range. *Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock*.
- Blown, I., Church, M. (1985): Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (4), 551-563.
- Buchroithner, M. F., Jentsch G., Wanivenhaus, B. (1982): Monitoring of recent geological events in the Khumbu Area (Himalaya, Nepal) by digital processing of Landsat MSS data. *Rock Mechanics*, 15, 181 – 197.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2003): KATARISK, Katastrophen und Notlagen in der Schweiz, Erläuterung der Methode, Bern.
- Clague, J. J., Evans, S. G. (2000): A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1763 – 1783.
- Clague, J. J., Evans, S. G. (1996): The 1994 jökulhlaup at Farrow Creek, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 19, 77 - 87.
- Clague, J. J., Mathews, W. H. (1973): The magnitude of Jökulhaups. *Journal of Glaciology*, 12 (66), 501 - 504.
- Clarke, G. K. C., Waldron, D. A. (1984): Simulation of the August 1979 sudden discharge of glacier-dammed Flood Lake, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 502 – 504.
- Clarke, G. K. C. (1982): Glacier outburst floods from “Hazard Lake”, Yukon Territory, and the problem of flood magnitude prediction. *Journal of Glaciology*, 28 (98), 3 - 4.
- Costa, J. E., Schuster, R. L. (1988): The formation and failure of natural dams. *The Geological Society of America Bulletin*, 100 (7), 1054 – 1068.

- Espizua, L. E., Bengochea, J. D. (1990): Surge of Grande del Nevado Glacier (Mendoza, Argentina) in 1984: its evolution through satellite images. *Geografiska Annaler*, 72 A (3 – 4), 255 - 259.
- Fischer, L., Kääb, A., Huggel, C., Nötzli, J. (2006): Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6, 761 – 772.
- Geertsema, M. (2000): Outburst floods at Tulsequah Glacier, northwestern British Columbia. http://www.for.gov.bc.ca/rni/Research/Extension_notes/Enote43.pdf. Zugriff: 9. Mai 06.
- GLACIORISK, Final report (2003): http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/sec6_GLACIORISK.pdf. Zugriff: 9. Mai 2006.
- Google (2006): <http://earth.google.com>. Zugriff: 6. November 2006.
- Haeberli, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). Mitteilung Nr. 17 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Zürich.
- Haeberli, W. (1983): Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, 85 – 90.
- Haeberli, W., Alean, J.-C., Müller, P., Funk, M. (1989): Assessing risks from glacier hazards in high mountain regions: some experiences in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 13, 96-102.
- Haeberli, W., Beniston, M. (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*. 27 (4), 258-265.
- Haeberli, W., Hoelzle, M., Fischer, U., Vonder Mühll, D. (2003): Gletscher und Permafrost. Vorlesungsunterlagen WS 03 / 04, Geographisches Institut der Universität Zürich, Zürich.
- Haeberli, W., Kääb, A. (2004): Gletscher im Umweltkontext (Teil 2: Naturgefahren in Gletschergebieten).
- Haeberli, W., Kääb, A., Hoelzle, M., Bösch, H., Funk, M., Vonder Mühll, D., Keller, F. (1999): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.
- Haeberli, W., Huggel, C., Kääb, A., Gruber, S., Nötzli, J., Zraggen-Oswald, S. (2006): Development and perspectives of applied research on glacier and permafrost hazards in high-mountain regions – the example of Switzerland. Proceedings of the International Conference “High mountain hazard prevention”, Vladikavkas, North Ossetia, and Moscow, 23. – 26. Juni 2004, 219 – 228.
- Hall, M. L. (1992): The 1985 Nevado del Ruiz eruption: scientific, social, and governmental response and interaction before the event. *Geohazards, natural and man-made*, 43 – 52.
- Hambrey, M., Alean, J. (1992): *Glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Harrison, W. D., Post, A. S. (2003): How much do we really know about glacier surging? *Annals of Glaciology*, 36 (1), 1-6.
- Hoelzle, M., Haeberli W., Dischl, M., Peschke, W. (2003): Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes. *Global and Planetary Change*, 36 (4), 295-306.
- Horstmann, B. (2004): *Glacial lake outburst floods in Nepal and Switzerland*. Germanwatch, Berlin.

- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J. M., Quincey, D., Richardson, S. D., Luyo, M. Z., Portilla, N. S., Hambrey, M. J. (2005): Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1251 - 1264.
- Huggel, C. (2004): Assessment of glacial hazards based on remote sensing and GIS modelling. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich, Zürich.
- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W.: <http://www.glacierhazards.ch>. Zugriff: 2. Mai 06.
- Huggel, C., Zraggen - Oswald, S., Haeberli, W., Kääb, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, S. G. (2005): The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, 173 - 187.
- IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO (1988): Fluctuations of Glaciers 1980–1985, Vol. V (Haeberli, W., Müller, P.). World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Zürich.
- IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO (1993): Fluctuations of Glaciers 1985–1990, Vol. VI (Haeberli, W., Hoelzle, M.). World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Zürich.
- IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO (1998): Fluctuations of glaciers 1990–1995, Vol. VII (Haeberli, W., Hoelzle, M., Suter, S., Frauenfelder, R.). World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Zürich.
- IPCC (2001): Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, D. und Johnson, C. A.), Cambridge University Press, Cambridge.
- IUGG(CCS)/UNEP/UNESCO (2005): Fluctuations of glaciers 1995 – 2000, Vol. VIII (Haeberli, W., Zemp, M., Frauenfelder, R., Hoelzle, M. und Kääb, A.; Eds.). World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Zürich.
- Johnson, P. G., Power, J. M. (1985): Flood and landslide events, Peyto Glacier Terminus, Alberta, Canada, 11-14 July 1983. *Journal of Glaciology*, 31 (108), 86-91.
- Jones, C. (1997): Geographical information systems and computer cartography. Longman Harlow, England.
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schlaefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozzi, T., Weidmann, Y. (2005): Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 527 – 554.
- Kääb, A. et al. (2004): Glacier hazards at Bervedere Glacier and the Monte Rosa east face, Italian Alps: process and mitigation. Internationales Symposium, INTERPRAEVENT 2004, Riva / Trient.
- Kääb, A., Reynolds, J. M., Haeberli, W. (2005): Glacier and permafrost hazards in high mountains. Global change and mountain regions – A state of knowledge overview. The Mountain Research Initiative. Kluwer.
- Kattelmann, R. (2003): Glacial lake outburst floods in the Nepal Himalaya: A manageable hazard? *Natural Hazards*, 28, 145 - 154.
- Kienholz, H. (2003): Alpine Naturgefahren und –risiken – Analyse und Bewertung. 54. Deutscher Geographentag Bern: Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen, 54, 249-258.

- Koenig, M. A., Heierli, H. (1994): *Geologische Katastrophen*. Ott, Thun.
- Nussbaumer, J. (1996): *Die Gewalt der Natur*. Grünbach: Edition Sandkorn, Budapest.
- Kotlyakov, V. M., Rototaeva, O. V., Nodenko, G. A. (2004): The September 2002 Kolka Glacier catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: Evidence and analysis. *Mountain Research and Development*, 24, 78 - 83.
- Lasafam, Iturrizaga (2005): The historical Saklei Shuyinj and Chateboi Glacier dams as triggers for lake outburst cascades in the Karambar Valley, Hindukush. *The Island Arc*, 40 (4), 389-399.
- Leiva, J. C. (1999): Recent fluctuations of the Argentinian glaciers. *Global and Planetary Change*, 22, 169 – 177.
- Lizong, W., Tao, C., Rui, J., Xin, L., Tongliang, G., Yuhong, X., Mool, P. K., Bajracharya, S. R. (2003): Pumqu Basin, Tibet Autonomous Region of PR China. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) Affected by global warming in the mountains of Himalayan Region.
- Lliboutry, L., Arnao, B. M., Pautre, A., Schneider, B. (1977): Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18 (79), 239 – 254.
- Margreth, S., Funk, M. (1999): Hazard mapping for ice and combined snow / ice avalanches – two case studies from the Swiss and Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 30, 159 - 173.
- Mayo, L. R. (1987): Advance of Hubbard Glacier and closure of Russell Fiord, Alaska – Environmental effects and hazards in the Yakutat Area. *Geological Studies in Alaska by the U. S. Geological Survey during 1987*, 3 - 16.
- Mool, P. K., Bajracharya, S. R., Joshi, S. P. (2001): Lake outburst floods: Monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan Region, Nepal. *International Centre for Integrated Mountain Development*, Kathmandu, Nepal.
- Mool, P. K., Roohi, R., Ashraf, A. (2003): Astor Basin, Pakistan Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) Affected by global warming in the mountains of Himalayan Region. *International Centre for Integrated Mountain Development*, Kathmandu, Nepal.
- Mool, P. K., 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–Himalaya Region: Bhutan. *International Center for Integrated Mountain Development*, Kathmandu, Nepal.
- Mothes, P. A. (1992): Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador: hazard and risk evaluation. *Geohazards, natural and man-made*, 53 - 63.
- Nötzli, J. (2003): *Felsstürze aus Permafrost über Gletscher, Ansätze zur GIS-basierten Modellierung*. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.
- Nötzli, J., Huggel, C., Hoelzle, M., Haeberli, W. (2006): GIS-based modelling of rock-ice avalanches from Alpine permafrost areas. *Computational Geosciences*, 10 (2), 161 – 178.
- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T., Haeberli, W. (2004): Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31.

- Pfister, C. (2002): Am Tag Danach. Zur Bewältigung von Naturkatastrophen in der Schweiz 1500–2000, Bern.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. J., Borrero, C. A. (1989): Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17 - 66.
- Raymond, M., Wegmann, M. und Funk, M. (2003): Inventar der gefährlichen Gletscher in der Schweiz. Mitteilungen der VAW/ETH Zürich, 182.
- Reynolds, J. M. (1999): Glacial hazard assessment at Tsho Rolpa, Rolwaling, Central Nepal. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 209 – 214.
- Reynolds, J. M. (1992): The identification and mitigation of glacier-related hazards: examples from the Cordillera Blanca. *Geohazards: natural and man-made*, 143 – 157.
- Richardson, S. D., Reynolds, J. M. (2000): An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66 (2000), 31 – 47.
- Salzmann, N., Kääh, A., Huggel, C., Allgöwer, B., Haeberli, W. (2004): Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 58 (2), 74 – 84.
- Shrestha, M. L., Shrestha, A. B. (2004): Recent trends and potential climate change impacts on glacier retreat / glacier lakes in Nepal and potential adaption measures. ENV/EPOC/GF/SD/RD(2004)6/FINAL.
- Thouret, J. J. (1989): Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 177 - 201.
- Truffer, M., Crow, P., Trabant, D., March, R. (2002): Effects of the M7.9 Denali fault earthquake on glaciers in the Alaska Range. U.S. Geological Survey. http://ak.water.usgs.gov/glaciology/m7.9_quake/reports/2002agu_poster/2002agu_effects_on_glaciers_poster.pdf. Zugriff: 22. Dezember 06.
- U.S. Geological Survey (USGS, 2006): <http://www.usgs.gov>. Zugriff: 22. Dezember 06.
- Verstappen, H. T. (1992): Volcanic hazards in Colombia and Indonesia: lahars and related phenomena. *Geohazards, natural and man-made*, 33 - 42.
- Vuichard, D., Zimmermann, M. (1987): The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences. *Mountain Research and Development*, 7 (2), 91 - 110.
- Vuichard, D., Zimmermann, M. (1986): The Langmoche flash-flood, Khumbu Himal, Nepal. *Mountain Research and Development*, 6 (1), 90 - 94.
- Washburn, A. L. (1979): *Geocryology – A survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold, London, 19 – 61.
- Watanabe, T., Rothacher, D. (1996): The 1994 Lugge Thso glacial lake outburst flood, Bhutan Himalaya. *Mountain Research and Development*, 16 (1), 77 - 81.
- Woerd, J. van der, Owen, L. A., Tapponnier, P., Xiwei, X., Kervyn, F., Finkel, C. R., Barnard, P. L. (2004): Giant, ~ M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics. *GSA Bulletin*, 116 (3 – 4), 394 - 406.

World Glacier Monitoring Service (WGMS, 2005): <http://www.wgms.ch/>. Zugriff: 2. Mai 2006.

WWF Nepal Program (2003): <http://assets.panda.org/downloads/glacierssummary.pdf>. Zugriff: 9. Mai 06.

Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F. (2006): Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33 (13).

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

Anhang

An dieser Stelle findet sich die vollständige Dokumentation. Zu Beginn werden die einzelnen Attribute noch einmal erklärt. Wie bereits erwähnt wurde die Tabelle in Englisch verfasst, da sie auf einer internationalen Internetseite präsentiert werden soll.

Identification

The following attributes are needed to identify the involved glacier.

POLITICAL_UNIT

Country where the glacier is located. See the code for each country below:

AQ Antarctica	IN India
AR Argentina	IS Island
AT Austria	IT Italy
AU Australia	JP Japan
BG Bulgaria	KE Kenya
BO Bolivia	MX Mexico
CA Canada	NO Norway
CH Switzerland	NP Nepal
CL Chile	NZ New Zealand
CN China	PE Peru
CO Colombia	PK Pakistan
DE Germany	PL Poland
EC Ecuador	RU Russia
ES Spain	SE Sweden
FR France	UG Uganda
GL Greenland	US U.S.A.
ID Indonesia	VE Venezuela

WGMS_ID

Numbering allows better identification of the glaciers and has proven to be especially helpful when dealing with glaciers having the same name, no name or names changing with time. National correspondents are therefore asked to give numbers to glaciers on which data are submitted for Volume VIII. Once a Glacier Number has been assigned to a glacier it will not be changed again. Please, therefore, refer to earlier volumes of the “Fluctuations of Glaciers” when assigning the Glacier Number (= former PSFG number).

GLACIER_NAME

Name of glacier

KEYWORDS

Words which should help the user to identify an event if the user doesn't know the involved glacier.

LATITUDE

Latitude of glacier (positive values going north and negative values going south).

LONGITUDE

Longitude of glacier (with positive values going east and negative values going west).

Date

The following attributes are needed to specify the date.

DAY

Day on which the event took place.

MONTH

Month in which the event took place.

YEAR

Year in which the event took place.

Event type

The following attributes are needed to identify the event type.

GLACIER_LENGTH_VARIATION

1 if it was a glacier length variation. And 0 if it wasn't.

GLACIER_FLOOD

1 if it was a glacier flood. And 0 if it wasn't.

ICE_AVALANCHE

1 if it was an ice avalanche. And 0 if it wasn't.

ROCK_FALL

1 if it was a rock fall. And 0 if it wasn't.

VOLCANIC_EARTHQUAKE_INTERACTION

1 if the event interacted with volcanos or earthquakes. And 0 if it didn't interact.

OTHER

1 if it was an other eventtype. And 0 if it wasn't.

Process description

The following attributes describe the process of each event.

MAX_ALTITUDE

Altitude of highest affected area (masl).

MIN_ALTITUDE

Altitude of lowest affected area (masl).

DISTANCE

Horizontal travel distance of an event (km).

VOLUME

Amount of involved volume (millions of m³).

PEAK_DISCHARGE

Amount of estimated peak discharge (m^3/s).

EVENT_DESCRIPTION

Gives quantitative information wherever possible, for example:

- surge: date and location of onset, duration, flow or advance velocities, discharge anomalies, periodicity;
- glacier flood: outburst volume, outburst mechanism, peak discharge, sediment load, reach and propagation velocity of flood wave or front of debris flow/mudflow;
- ice avalanche: volume released, runout distance, overall slope of avalanche path;
- tectonic impact: volumes, runout distances and overall slopes of rock slides on glacier surfaces, amount of geothermal melting in craters, etc.

Supplementary information

DAMAGE

Description of the resulted damage from the event (deaths, houses, infrastructure, ...).

DATA_SOURCE

Reference or most important data source. Please indicate at least one or two references or sources which could help the reader to locate more detailed information, or give the name(s) of contact person(s) who would be able to supply additional information.

REMARKS

Amount or kind of possible destruction, particular technical measures taken against glacier hazards, or special studies carried out in connection with this event could be mentioned.