

# Management of glacier floods in the Bernese Oberland

## Umgang mit Gletscherhochwasser im Berner Oberland

Nils Hählen<sup>1</sup>; Oliver Hitz<sup>2</sup>; Damian Stoffel<sup>2</sup>

### ABSTRACT

Glacier floods are an important part of natural hazards in the Bernese Oberland. As a result of climate change they will probably increase significantly in future. The approach of at least two scenarios with different characteristics (e.g. an optimistic and a pessimistic) is useful to handle the uncertainty in risk estimation. These scenarios can then be compared with the magnitude of floods caused by rainfall which are mapped on the hazard maps. This step allows a classification of the glacier flood in comparison to "normal" floods. Glaciers and their predisposition for hazardous processes change over time. As a consequence a periodical check of the situation is needed and if necessary the scenarios have to be adapted. Therefore a systematic monitoring and the sensitization of the persons responsible for security in the communes are essential for a successful hazard management of glacier risks.

### ZUSAMMENFASSUNG

Gletscherhochwasser sind ein wichtiger Teil der Naturgefahren im Berner Oberland und dürften als Folgen des Klimawandels in Zukunft noch zunehmen. Für deren Risikoabschätzungen sind mindestens zwei Szenarien mit verschiedenen Ausprägungen (z.B. ein optimistisches und ein pessimistisches) hilfreich, um mit den Unsicherheiten umzugehen. Diese Szenarien können mit der Magnitude von niederschlagsverursachten Hochwassern verglichen werden, die in den Gefahrenkarten abgebildet sind. Dieser Schritt erlaubt eine Einordnung von Gletscherhochwasser im Vergleich zu "normalen" Hochwassern. Gletscher und ihre Disposition für gefährliche Prozesse verändern sich laufend. Deshalb ist eine periodische Kontrolle der aktuellen Situation wichtig und die Szenarien sind, wenn nötig, periodisch anzupassen. Für ein erfolgreiches Risikomanagement sind daher ein systematisches Monitoring der Gletscher und die Sensibilisierung der Sicherheitsverantwortlichen entscheidend.

### KEYWORDS

glacier; flood; risk management; Bernese Oberland

### EINFÜHRUNG

Rund 200 km<sup>2</sup> oder 7% der Fläche des Berner Oberlandes sind vergletschert. Schon immer haben Hochwasser aus Gletschern im Berggebiet Siedlungen bedroht. Im Berner Oberland gelten die Ereignisse Grüöbengletscher Guttannen (1921, 1942), Steingletscher Gadmen (1956, 1998) und Unterer Grindelwaldgletscher (1951, 2008) als die grössten in den letzten

1 Amt für Wald des Kantons Bern, Interlaken, SWITZERLAND, nils.haehlen@vol.be.ch

2 Oberingenieurkreis I, Tiefbauamt des Kantons Bern

100 Jahren. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts häuften sich solche Ereignisse als Folge des beschleunigten Gletscherrückgangs durch die Klimaänderung. Die Herausforderung im Management von Gletscherhochwasser liegt in der frühzeitigen Erkennung kritischer Situationen, der Herleitung realistischer Szenarien und dem geeigneten Umgang mit Risiken, die zwar nur vorübergehend bestehen, aber oft ein immenses Gefahrenpotential beinhalten. Gletscher können verschiedene Gefahrenprozesse verursachen. Weil die Reichweite von Hochwasser sehr gross ist, sind Gletscherhochwasser die am weitesten reichenden Prozesse unter den Gletschergefahren (Raymond et al. 2003) und bilden somit ein erhebliches Gefahrenpotential. Auslöser von Gletscherhochwassern sind plötzliche Entleerungen von Wasseransammlungen am, auf oder in einem Gletscher. Bei Gletscherhochwasser ist zwischen supraglazialen Gletschersee- und subglazialen Wassertaschenausbrüchen zu unterscheiden. Oft sind Gletscherseeausbrüche die Folge einer Verkettung von Prozessen, so z. B. wenn grosse Massenbewegungen in Gletscherseen, diese zum Überlaufen bringen. Weiterführende Informationen zu Gletscherhochwasser geben beispielsweise Raymond et al. (2003) oder Huggel et al. (2004). Vertiefte Informationen über die Hydraulik von Gletscherhochwasser sind in Worni et al. (2014) zu finden.

#### **GEFAHRENBEURTEILUNG BEI GLETSCHERHOCHWASSER**

Die Gefahrenbeurteilung besteht in der Festlegung von Szenarien sowie der Ausscheidung von Wirkungsräumen und dazugehörigen Prozessintensitäten. Ein pragmatisches Vorgehen für eine grobe Gefahrenbeurteilung bei Gletschern ist in Huggel et al. (2004) beschrieben. Diese Methode bewährt sich für eine erste, einfache Einschätzung. Falls danach eine relevante Gefährdung nicht ausgeschlossen werden kann, sind vertiefte Analysen nötig. Angaben zur Wahrscheinlichkeit von Ereignissen, zum Speichervolumen und zur Ausbruchart mit dazugehöriger Ganglinie stellen die grossen Herausforderungen bei der Szenarienbildung für Gletscherhochwasser dar. Die verschiedenen Einflussfaktoren auf Szenarien und Prozessablauf sind in Abbildung 1 dargestellt und qualitativ nach ihrem Grad an Unsicherheit klassiert. Die Einteilung in die drei Kategorien erfolgt aufgrund des Kriteriums Qualität der Wissens- resp. Datenbasis und des Kriteriums der Subjektivität der nötigen Beurteilung. Unterliegen beide Kriterien einem grossen Streubereich, wird die Unsicherheit als gross, wenn nur eines einen grossen Streubereich hat, als mittel und wenn beide einen kleinen Streubereich haben als klein klassiert. Bei der Gefahrenbeurteilung ist auf die Faktoren mit grossen Unsicherheiten besonderes Augenmerk zu richten.

Häufig wiederholen sich Gefahrenprozesse an einem Gletscher. Informationen zu früheren Ereignissen sind daher sehr hilfreich. Liegen keine Informationen zu früheren Ereignissen vor oder hat sich die Situation seit den letzten Ereignissen relevant verändert, sind längerfristige Prognosen mit grossen Unsicherheiten verbunden. Dann muss auf Analysen, Annahmen und Analogieschlüsse zu ähnlichen Fällen abgestützt werden. Die Unsicherheiten sind entsprechend gross; oft bedeutend grösser als bei anderen Prozessarten. Weil Gefahrenbeurteilungen bei Gletscherhochwasser meist erst gemacht werden, wenn eine Gefahrenquelle neu entsteht,

ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass sie in kurzer Zeit anhand tatsächlicher Ereignisse überprüft werden kann - Chance für die Experten, ihre Überlegungen zu verifizieren, aber auch Fluch, weil Abweichungen Erklärungsbedarf gegenüber der Bevölkerung und Behörden nötig machen und die Glaubwürdigkeit der Experten leiden kann. Die grössten Unsicherheiten in der Gefahrenbeurteilung von Gletscherhochwasser liegen in der Festlegung der Szenarien. Die aus den Szenarien abgeleitete Wirkungsbeurteilung beinhaltet bedeutend weniger Unsicherheiten, weil es für die Ausbreitung der Prozesse heute gute Modellierungssoftware gibt. Auch die dazu notwendigen Höhenmodelle liegen in der Schweiz in hoher Genauigkeit vor.



Abbildung 1: Phasen in der Gefahrenbeurteilung und im Risikomanagement von Gletschergefahren mit dazugehörigen Teilschritten und Klassierung der Unsicherheit.

Um die Unsicherheiten in der Szenarienbildung zu reduzieren, hat es sich bewährt, eine Bandbreite an möglichen Szenarien festzulegen, was am Giesengletscher an der Nordwestflanke der Jungfrau exemplarisch gezeigt werden soll. An diesem hat sich seit 2011 an der Gletscherzunge ein Eispaket abgespaltet. Bei einem Abbruch ist davon auszugehen, dass die Eistrümmer in der darunterliegenden Schlucht eine Wasserstauung verursachen. Je nach Ausbildung der Ablagerung sind im Falle eines nachfolgenden Seedurchbruchs unterschiedliche Abflussspitzen möglich. Ein realistisches Szenario mit 100'000 m<sup>3</sup> Wasser würde eine Abflussspitze von 80 – 130 m<sup>3</sup>/s verursachen, im pessimistischen Szenario ist bei 400'000 m<sup>3</sup> Wasser mit einer Abflussspitze von 350 – 440 m<sup>3</sup>/s zu rechnen.

## RISIKOBEURTEILUNG VON GLETSCHERHOCHWASSER

Das Gefahrenpotential von Gletschern ändert sich über die Zeit, womit Gletscherhochwasser nicht immer gleich wahrscheinlich sind. Dies unterscheidet Gletscher von anderen Gefahrenquellen, deren Grunddisposition über längere Zeiträume keiner relevanten Veränderung unterworfen ist. Diese Variation hat vor allem mit der kontinuierlichen, klimabedingten Geometrieänderung (Vorstoss- und Rückzugsphasen) der Gletscher zu tun: Neue Senken entstehen und bestehende vergrössern sich oder lösen sich auf. Ein Gletscher hat Phasen, in

denen Gletscherhochwasser gehäuft und Phasen, in denen solche Prozesse nicht auftreten. Oft besteht eine Gefahrenquelle auch nur vorübergehend für einige Monate oder wenige Jahre.

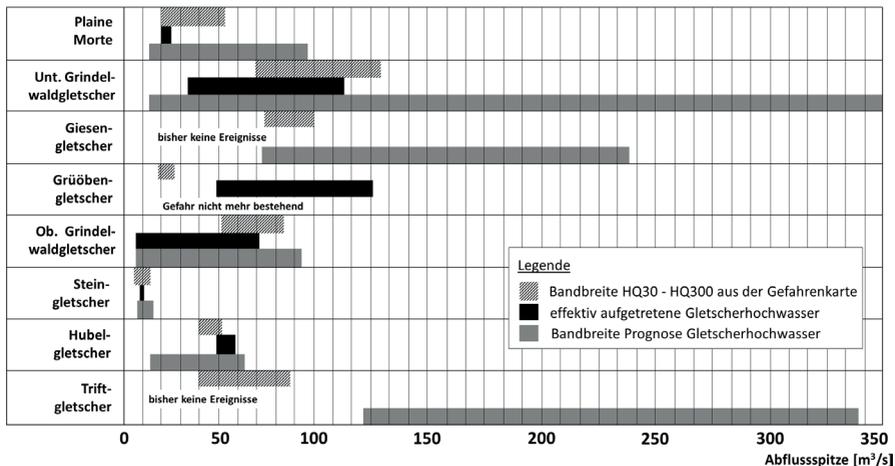


Abbildung 2: Vergleich der Bandbreite der niederschlagsverursachten Hochwasser (HQ<sub>30</sub> bis HQ<sub>300</sub>) aus der Gefahrenkarte, den effektiv aufgetretenen Abflussspitzen durch Gletscherhochwasser und der Bandbreite der Prognose für Abflussspitzen durch Wasserausbrüche für verschiedene Gletscher im Berner Oberland.

Die Risikobeurteilung setzt voraus, dass neben Ort und Intensität eines möglichen Gletscherhochwassers auch die Eintretenswahrscheinlichkeit und das Ausmass des daraus resultierenden Schadens bekannt sind. Risiko ist allgemein das Produkt aus Schadensausmass und Eintretenswahrscheinlichkeit. Wegmann et al. (2004) haben eine Methode zum Risikomanagement bei Gletschergefahren entwickelt. Diese beruht darauf, dass im Rahmen eines partizipativen Verfahrens mit Fachspezialisten und Lokalkennern die Risiken durch Gletschergefahren quantitativ abgeschätzt werden können. In der Anwendung dieser Methode bildet v.a. die Festlegung der Eintretenswahrscheinlichkeit aufgrund der oft sehr grossen Unsicherheiten eine Schwierigkeit. Dies kann am Beispiel des Oberen Grindelwaldgletschers gut gezeigt werden: Dort wurde von 2009 bis 2011 durch über dreissig Wassertaschenausbrüche dreimal ein 100-jährliches und sechsmal ein 30-jährliches Hochwasser überschritten. In einem solchen Fall ist es nicht sinnvoll, die Hochwasserstatistik, welche sich auf niederschlagsbedingte Hochwasser bezieht, anzupassen und das bisherige 100-jährliche neu als 10-jährliches Hochwasser zu klassieren, da absehbar ist, dass die Gefahrensituation nur solange anhält, bis sich der Gletscher in wenigen Jahren aus der engen, flachen Schlucht zurückgezogen hat. Hier eine Wiederkehrperiode für Gletscherhochwasser zu definieren, ist nicht möglich. Der Unsicherheitsbereich einer so festgelegten Wiederkehrperiode würde um ein Mehrfaches stärker variieren als alle übrigen Einflussgrössen auf das Risiko.

Bezüglich Eintretenswahrscheinlichkeit bei Gletscherhochwasser ergeben sich zwei Fragestellungen:

- Interannuelle Wahrscheinlichkeit: Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit für einen oder mehrere Wasserausbrüche mit einer bestimmten Abflussspitze innerhalb eines Jahres?
- Dekadische Wahrscheinlichkeit: Welche Wiederkehrperiode ist einer solchen Abflussspitze in der Hochwasserstatistik des betroffenen Gewässers innerhalb einer Zeitspanne von einem oder mehreren Jahrzehnten zuzuordnen?

Die interannuelle Wahrscheinlichkeit lässt sich nur durch eine situative, gutachterliche Beurteilung der Gefahrendisposition anhand des aktuellen Zustands des Gletschers und seines Umfelds beantworten und beinhaltet die beschriebenen Schritte der Gefahrenbeurteilung (siehe oben). Wird die Abflussspitze eines Gletscherhochwassers in Relation zu einem „normalen“ niederschlagsverursachten Hochwasser mit einer bekannten Wiederkehrperiode von beispielsweise 30, 100 oder 300 Jahren gesetzt, lässt sich die dekadische Wahrscheinlichkeit eingrenzen. Dies setzt aber voraus, dass Gletscherhochwasser über längere Zeiträume betrachtet nicht zu einer wesentlichen Veränderung der Hochwasserstatistik führen. Damit kann das potentielle Ereignis je nach Ausprägung in den Bereich eines häufigen oder eines aussergewöhnlichen Prozessablaufs eingeordnet werden (vgl. Abbildung 2). Gleichzeitig lässt sich die Eintretenswahrscheinlichkeit in der Risikoformel grob eingrenzen.

### **RISIKOMANAGEMENT VON GLETSCHERHOCHWASSER**

Das Risikomanagement hat zum Ziel, Schäden an Personen und Sachwerten zu minimieren oder im besten Fall zu verhindern. Die Konzepte und Instrumente des integralen Risikomanagements bei gravitativen Naturgefahren in der Schweiz haben sich bewährt und lassen sich auch bei Gletscherhochwasser erfolgreich einsetzen.

Da Gletscherhochwasser oft nur vorübergehend ein Risiko darstellen und die Wahrscheinlichkeit eines Grossereignisses meist gering ist, konzentrieren sich Präventionsmassnahmen üblicherweise auf organisatorische Massnahmen, d.h. den Schutz von Personen. Schäden an Sachwerten werden dabei eher in Kauf genommen. Das Risikomanagement setzt voraus, dass ein mögliches Gefahrenpotential erkannt wird. Da sich die Gletscher innerhalb kurzer Zeit stark verändern können, müssen sämtliche Schritte von der Szenarienbildung bis zur Wirkungsbeurteilung laufend überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Ein systematisches Monitoring ist daher eine essentielle Daueraufgabe. Dieses ermöglicht es, die Bildung oder Vergrösserung von Gletscherseen frühzeitig zu erkennen. Im Berner Oberland basiert dieses hauptsächlich auf periodischen Auswertungen von Luftbildern und Beobachtungsmeldungen durch Sicherheitsverantwortliche aus den Gemeinden, Bergführer oder Berggänger.

## RAUMPLANERISCHE MASSNAHMEN

Präventive raumplanerische Massnahmen gegen Gletscherhochwasser sind aufgrund der grossen Unsicherheiten oft nicht realisierbar. Sofern die Wirkungsräume und Intensitäten eines Gletscherhochwassers im Bereich des in der Gefahrenkarte abgebildeten, niederschlagsverursachten Hochwassers liegen (vgl. Abbildung 2), besteht keine Notwendigkeit, diese speziell in der Gefahrenkarte zu berücksichtigen. Sobald sie aber ein bedeutend grösseres Ausmass annehmen, sind sie bei der Beurteilung von Bauvorhaben über Bauverbote oder Bauauflagen zu berücksichtigen. Dazu werden die erwarteten Wirkungsräume in einer separaten Karte als ergänzendes Gefahrengebiet mit unbestimmter Gefahrenstufe dargestellt. Eine solche Karte hat oft nur wenige Jahre Gültigkeit. Sie wird aufgehoben, sobald die Gefährdung nicht mehr besteht. So war aufgrund des Gletschersees auf dem Unteren Grindelwaldgletscher von 2008 bis 2010 in acht unterliegenden Gemeinden eine solche Karte in Kraft und hat sich als Präventionsmittel sehr bewährt. Grössere Bauvorhaben in kritischen Gebieten wurden gestützt auf dieses Instrument zurückgestellt.

## ORGANISATORISCHE MASSNAHMEN

In Bezug auf Schutzmassnahmen ist die Art und Exposition der Schutzgüter entscheidend. In Fällen, in denen v.a. Personen gefährdet sind, ist es zweckmässig, die gefährdeten Räume abzusperren, wenn sich eine Gefahrensituation einstellt. Um diese Entscheidungen treffen zu können, sind Überwachungs- und Frühwarnsysteme hilfreich, welche die Sicherheitsverantwortlichen mit den notwendigen Informationen versorgen. Frühwarnsysteme haben zum Ziel, die Reaktionszeit im Vorfeld von Ereignissen zu erhöhen. Im Berner Oberland sind einige dieser Systeme erfolgreich im Einsatz. Voraussetzung dafür ist, dass die Prozesse verstanden sind und eine Notfallorganisation mit Pikettdienst besteht, welche die notwendigen Massnahmen bei kritischen Entwicklungen zeitgerecht umsetzt. Auf der Plaine Morte in der Gemeinde Lenk besteht ein solches Frühwarnsystem, das auf automatischen Kameras beim Gletschersee, einer Pegelmessung im See und einer Abflussmessung beim Gletschertor basiert. Durch die Gletscherseeausbrüche sind in erster Linie eine Alp, ein viel begangener Wanderweg in einem beliebten Ausflugsgebiet sowie ein Hotel und ein Campingplatz gefährdet. Die Seeausbrüche verliefen bisher sehr gutmütig: Ein Ausbruch war dank des Frühwarnsystems Tage im Voraus in der Stagnation und im anschliessenden gemächlichen Absinken des Seepegels erkennbar, bevor ein deutlicher Anstieg des Abflusses in der Stimme auftrat. Damit besteht eine komfortable Reaktionszeit, um gefährdete Wanderwege präventiv zu sperren. Für den Fall eines grösseren Ausbruchs liegt eine Notfallplanung zum Schutz von Personen vor.

## BAULICHE SCHUTZMASSNAHMEN

Bauliche Schutzmassnahmen an Gletschern sind selten und werden nur dann ergriffen, wenn das Ausmass eines Ereignisses sehr gross werden kann und der Schutz mit organisatorischen Massnahmen ungenügend ist. Beim Gletschersee auf dem Unteren Grindelwaldgletscher waren die Personenrisiken mit dem 2006 eingerichteten Frühwarnsystem und einer

umfangreichen Notfallplanung in den Griff zu bekommen. Für den Stollenbau war dann aber das erwartete Schadenausmass im Lütschinental bis nach Interlaken von rund Fr. 200 Mio. (berechnet gemäss Methode Econome 1.0 BAFU 2007) im Falle eines Seeausbruchs sowie der absehbare mehrwöchige Verkehrsunterbruch durch Schäden an der Verkehrsinfrastruktur nach Grindelwald entscheidend (Fechtig, Hählen 2013). Daher wurden die Investitionen von Fr. 15 Mio. für den Stollenbau in einer aufwändigen Variantenevaluation durch ein Expertengremium als verhältnismässig angesehen. Der Stollen wurde 2009 gebaut und hat seither zusammen mit dem weiteren Abschmelzen des Gletschers die Gefahrenlage am Unteren Grindelwaldgletscher markant entschärft.

### **VERZICHT AUF MASSNAHMEN**

Nicht bei jedem Gletschersee sind aufwändig Massnahmen nötig. Aus dem proglazialen Gletschersee am Hubelgletscher im hinteren Lauterbrunnental hat sich 2004 ein grosser Murgang ereignet, der eine Brücke zerstört, sechs parkierte Autos weggerissen und grosse Teile der Alp- und Forststrasse beschädigt hat. Ursache des Ausbruchs war der Bruch einer Verklausung des Seeausflusses durch Eisblöcke aus Eiskalbungen des hinterliegenden Gletschers. Ein solches Ereignis kann immer noch auftreten. Da jedoch nur Alpgebiete und Wanderwege betroffen sind, wurde auf umfangreiche Schutzmassnahmen verzichtet. Die gefährdeten Abschnitte des Wanderwegs sind mit Warntafeln mit Verhaltensanweisungen versehen. Daneben wird der Zustand des Gletschers periodisch durch die Sicherheitsverantwortlichen beurteilt.

### **AUSBlick**

Gemäss NELAK (2013) können im Berner Oberland im Zuge des Gletscherschwundes innerhalb der nächsten Jahrzehnte über 100 neue Seen auf insgesamt 39 Gletschern entstehen. Zusammen mit den tendenziell zunehmenden Instabilitäten durch degradierenden Permafrost, woraus sich Massenbewegungen in neue Seen ergeben können, dürfte das Gefahrenpotential in Zukunft weiter ansteigen. 2015 wurde im Berner Oberland eine Studie im Auftrag des Kantons abgeschlossen (vgl. Tobler et al. in Vorbereitung), welche u.a. die Entwicklung des Gefahrenpotentials der Gletscher bis ins Jahr 2060 grob beurteilt. Damit besteht neben dem Inventar der gefährlichen Gletscher der Schweiz (Raymond et al. 2003), welches auf einer retrospektiven Sicht beruht, auch eine Übersicht über mögliche Gefahren, die künftige Entwicklungen miteinschliesst. Diese Studie erlaubt es, die potentiell kritischen Gebiete zu identifizieren und mit einem geeigneten Monitoring ungünstige Entwicklungen frühzeitig erkennen zu können. Da die Bildung von gefährlichen Situationen bei Gletschern umso wahrscheinlicher ist, je stärker und schneller die Veränderung der Gletscher abläuft (GLACIORISK 2003), muss in den kommenden Jahren mit weiteren anspruchsvollen Situationen gerechnet werden. Die Bedeutung von anpassungsfähigen und verhältnismässigen Massnahmen wird dabei immer mehr zunehmen.

## LITERATUR

- BAFU (2007): EconoMe 1.0. Online-Berechnungsprogramm zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Handbuch/Dokumentation, Bern, 27 s.
- Fechtig R., Hählen N. (2013): Entwässerungsstollen Gletschersee Unterer Grindelwaldgletscher. In: Tunnelling Switzerland, vdf Hochschulverlag Zürich, S. 386-391.
- GLACIORISK (2003): GLACIORISK. Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions. EVG1 2000 00512 Final report (01.01.2001–31.12.2003), compiled by Richard D. and Gay M., Cemagref Grenoble, 62 S.
- Huggel Chr., Haeberli W., Kääh A., Bieri D., Richardson S. (2004): An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. In: Canadian Geotechnical Journal, 41, S. 1068-1083.
- NELAK (2013): Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli W., Bütler M., Huggel Chr., Müller H., Schleiss A. (Hrsg.), vdf Hochschulverlag Zürich. 290 S.
- Raymond M., Wegmann M., Funk M. (2003): Inventar gefährlicher Gletscher in der Schweiz, VAW Mitteilungen 182, ETH Zürich, 368 S.
- Tobler D., Mani P., Riner R., Liener S., Hählen N., Bender R., Graf K., Raetzo H. (in Vorbereitung): Periglazial Hazard Indication Map: A Basic Instrument in Prospective Hazard Management. Interpraevent 2016, Tagungsbeiträge, Klagenfurt.
- Wegmann M., Bruderer A., Funk M., Wuilloud Ch. (2004): Partizipatives Verfahren zum Risikomanagement bei Naturgefahren. Angewendet für Gletschergefahren. In: Interpraevent 2004 Band IX, Klagenfurt, S. 297-308.
- Worni R., Huggel Chr., Clague J.J., Schaub Y., Stoffel M. (2014): Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. In: Geomorphology 224. S. 161-176.