Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 84 (1992)
Heft: 11-12

Artikel: Zur Stabilität von Moränenseen in hochalpinen Gletschergebieten
Autor: Haeberli, Wilfried
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940609

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Zur Stabilität von Moränenseen in hochalpinen Gletschergebieten

Wilfried Haeberli

Einleitung

Hochwasser und Murgänge als kurze Extremereignisse im hochalpinen Abtragsprozess sind in der Zeitskala der Jahrtausende Teil eines dynamischen Gleichgewichtes. Seit jeher stellen sie ein Grundrisiko für Siedlungen in Bergregionen dar, da dort praktisch alle grösseren Fliessgewässer murfähig sind oder Wildbach-Charakter haben. In seiner klassischen Studie über aktuelle Massenumsätze im Gebirge erkannte Jäckli in den Murgängen und Wildbächen die entscheidenden Prozesse des Materialaustrags aus hochgelegenen Einzugsgebieten [1]. Ein intensiver Lernprozess hat nach dem Katastrophensommer 1987 eingesetzt [2]. Besonders für Murgänge sind aufgrund der detaillierten Analyse einer Grosszahl von niederschlagsbedingten Ereignissen in den Schweizer Alpen empirische Schätzformeln und Grenzwerte für Anrissbedingungen, Erosionsleistung, Spitzenabfluss und Auslaufdistanz hergeleitet worden [3, 4].

Hochwasser und Murgänge im Hochgebirge werden allerdings nicht immer durch Niederschläge verursacht: See- und Wassertaschenausbrüche im Gletscherrandbereich können sogar besonders gravierende Folgen haben [5]. So stammt etwa die vermutlich grösste Hochwasserspitze des 20. Jahrhunderts im Mattertal (13. September 1944, etwa 130 bis 150 m^3 in Zermatt) von einem Wassserausbruch nach temporärem Rückstau im Gornergletscher [6]. Bei Ausbrüchen von Seen im Moränenmaterial vereinigen sich mit Steilböschungen, mächtigen Lokkersedi- menten und grossen Wasserreserven oft entscheidende Faktoren für die Entstehung grosser Murgänge. Aus neuerer Zeit sind Schadenereignisse durch Gletscherhochwasser aus Moränengebieten der Schweizer Alpen etwa vom Glacier d'Otemma (1898), vom Rottalgletscher/Saas Almagell (1953), vom Vadret da Tschierva/Vadret da Roseg (1954), vom Steingletscher (1956) oder vom Grubengletscher/Saas Balen (1968, 1970) bekannt. In jüngster Vergangenheit wurde die Abteilung Glaziologie der VAW/ETHZ von italienischen Behörden bei der Sanierung des 1979 ausgebrochenen Lago delle Locce oberhalb von Macugnaga, Valle Anzasca, beigezogen [7, 8, 9, 10]. Grosse Schadenereignisse sind besonders auch von ausseralpinen Hochgebirgsregionen bekannt [11, 12].

Im 20. Jahrhundert hat sich die Murgangaktivität in den Alpen markant auf Lockersedimente ausgedehnt, die durch den Gletscherrückzug und die Permafrostschmelze freigelegt wurden [13]. Sollte sich der Eisrückgang fortsetzen oder gar beschleunigen, so könnte sich die Murgangaktivität zukünftig weiter verlagern und ausdehnen. Lokal sind auch katastrophale Ereignisse möglich. Im Fall der Moränenseen ist das Potential für derartige katastrophale Ereignisse erkennbar. Die wichtigsten Grundlagen für die Beurteilung der Stabilität bzw. Ausbruchsgefahr solcher Moränenseen sei im folgenden kurz dargelegt (bei Seen im anstehenden Fels fallen die für Lockermaterial typischen Aspekte sinngemäss weg).

Seen im Gletscher- und Permafrostbereich

Eigenschaften und Ausbruchsmechanismen von Seen im Gletscher- und Permafrostbereich hängen eng mit der Morphologie des Geländes zusammen. Neben sub-, intra- und supraglazialen Wasseransammlungen unter, im und auf dem Gletscher unterscheidet man zweckmässig – wenn auch nicht streng logisch – zwischen randglazialen, periglazialen und proglazialen Seen (vgl. Titelbild des Heftes).

Randglaziale Seen wie der wiederholt ausgebrochene See 3 am Grubengletscher stauen sich seitlich am Gletscher, haben infolge des direkten Eiskontakts Wassertemperaturen zwischen 0 und 4°C, transportieren in einer charakteristischen Zirkulation stetig Wärme zum Gletscherrand [14] und unterschneiden dadurch das Eis auf der Gletscherseite. Sie laufen dem Gletscherrand entlang über oder entwässern unter dem Gletscher durch und folgen demnach langfristig mit ihrer maximalen Spiegelkote der sich laufend ändernden Geometrie des Gletscherrandes. Häufigste Ursache für rasche Ausbrüche ist der sogenannte «hydraulische Bruch der Eisbarriere»: Der Seespiegel steigt bis zum Aufschwimmen des Eisdammes am kritischen Punkt («Eisbergmodell»), wo sich ein subglazialer Abflusskanal bildet und progressiv erweitert [15]. Solche Ausbrüche durch den Eisdamm können sich in kurzen Abständen (z. B. jährlich) wiederholen, da das Eis den Abfluss durch Deformation wieder schliesst. Das Überlaufen über Moränenmaterial am Gletscherrand kann auch zur Entleerung des Seebeckens führen. Die Erosion ist wegen der bescheidenen Oberflächenneigung allerdings meist undramatisch, besonders wenn ihr Permafrost grossen Widerstand entgegensetzt (z. B. Gruben-See 3 1958). Ein Ausbruch durch den Moränendamm wiederholt sich kurzfristig nicht, da die topographischen Voraussetzungen für die Seebildung mit der Erosion des Überlaufs eliminiert werden.

Periglaziale Seen wie der seit Mitte der 60er Jahre entstandene «Thermokarstsee» auf dem Gruben-Blockgletscher sind vom aktiven Gletscherrand losgekoppelt. Im Permafrost vergrössern sich solche Seen oft rasch durch Schmelzprozesse (Thermokarst) in Toteis oder anderen Vorkommen von massivem Eis im Untergrund, die Abflussverhältnisse sind oft schwierig einzuschätzen, können sich aber mit der Permeabilität des eishaltigen Untergrundes plötzlich ändern. Überraschende Ausbrüche sind möglich (z. B. Rottalgletscher/Saas Almagell 1953), wiederholen sich allerdings kaum. Im permafrostfreien Gebiet können sich Seen im Sommer deutlich über 4°C erwärmen, und die Entwässerung erfolgt durch Versickern im porösen Untergrund oder an einen Überlauf. Die Spiegelkote ist kurzfristig stark variabel, langfristig hingegen relativ konstant. Plötzliche Ausbrüche sind selten und werden von massiven Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet oder Wasserverdrängung durch Lawinen u. ä. ausgelöst.

Proglaziale Seen wie der See 1 am Grubengletscher bilden sich beim Gletscherrückzug in Übertiefungen des Gletscher-Vorfeldes, d. h. zwischen Endmoränen und der Gletscherzunge (Bild 1). Solange solche Seen in Kontakt sind mit dem Gletschereis, beschleunigen sie das Rückschmelzen der Gletscherzunge. Diese bildet dabei eine oft senkrechte bis überhängende Kalbungsfront, deren Rückzugsgeschwindigkeit linear von der Wassertiefe im See abhängt [16]. Fläche und Volumen von proglazialen Seen vergrössern sich dementsprechend mit zuerst zunehmender und dann abnehmender Geschwindigkeit, bis die Kalbungsfront ein Gleichgewicht zwischen Eisnachschub und Eisverlust im Wasser erreicht oder bis sich der Gletscher gänzlich aus dem See zurückgezogen hat. Der starke Schmelzwasserzufluss vom Gletscher entwässert unterirdisch durch das poröse Moränenmaterial. Wenn

Bild 1. Moränenbastion und proglazialer Moränensee am Sidelengletscher (Gerental/Obergoms). Der Murgang auf der Aussenböschung des Moränendamms ereignete sich während der Hochwasser im August 1987.

dieser Prozess nicht genügt, läuft der See an einer Depression im Moränenkranz über. Die Seespiegelkote variiert dementsprechend kurzfristig (Jahresgang) oft stark, ihr Maximum ist jedoch langfristig auf die Moränentopographie eingestellt. Diese kann sich bei einem Seeausbruch mit Breschenbildung völlig verändern. Bei derartigen natürlichen Dammbrüchen ist die Erosion in der steilen Aussenböschung der abdämmenden Moränen besonders intensiv. Ausbrüche von proglazialen Moränenseen gehören denn auch zu den grössten Murgangkatastrophen im Hochgebirge. Sie sind jeweils einmalig, da sich der See nach der Zerstörung des Moränendammes nicht mehr bilden kann.

Moränendämme

Grosse Moränenmassen werden durch Gletscher aufgeschüttet, die von den umliegenden Felswänden mehr Schutt erhalten, als der Gletscherbach evakuieren kann. Bei kleinen und flachen Gletschern sind Abfluss und Transportkapazität des Gletscherbachs besonders klein. Wenn gleichzeitig hohe und unvereiste Felswände viel Schutt liefern, überwiegt die Sedimentation von Moränenmaterial. Es können sich in solchen Fällen stark erhöhte Gletscherbetten aus Lockermaterial, im Extremfall sogar regelrechte «Moränenbastionen» aufbauen (Bild 1). Im Fall des Grubengletschers etwa wurde durch geoelektrische Sondierungen am Gletscherbett eine subglaziale Moränenmächtigkeit von über 100 m festgestellt [17]. Erhöhte Moränenbetten reduzieren ihrerseits wieder die Transportkapazität des Gletscherbachs, indem sie einen Teil des Schmelzwassers versickern lassen. Oft entstehen in Moränengebieten auch Seen, die zumindest vorübergehend als Sedimentfallen funktionieren. Bild 2 zeigt ein Profil durch eine Moränenbastion mit proglazialem See am Sidelengletscher im Gerental. Die seismischen und geoelektrischen Sondierungen ergeben keine Hinweise auf einen wassergesättigten Schichtkomplex im (hier ungefrorenen) Untergrund, auch nicht in unmittelbarer Umgebung des Sees. Der in rund 20 bis 30 Meter Tiefe liegende Fels dürfte stark geklüftet sein.

Moränenbastionen im Hochgebirge sind nichts anderes als vom Gletscher vorgeschobene und verformte Schutthalden. Hinsichtlich der Materialeigenschaften sind deshalb die Übergänge zwischen Schutthalden und Moränen fliessend. Nach den umfassenden Analysen von Murganganrissen des Sommers 1987 [4] handelt es sich meist um locker bis sehr locker gelagerte, schlecht sortierte, nicht plastische, inhomogene und gut durchlässige Sedimente mit teilweise übersteilen Böschungen. Alle Korngrössen – insbesondere auch sehr grösse Blöcke – sind vorhanden. Die Sandfraktion kann dominant sein, hingegen bleiben die Ton- und Siltanteile mit typischerweise um 1 bis 2 bzw. 10 bis 15 Gewichtsprozenten eher gering. Im dauernd gefrorenen Zustand (Permafrost) sind die geotechnischen Eigenschaften völlig anders als im ungefrorenen: Eisanteile zwischen 50 und 100 Volumenprozenten sind nicht ungewöhnlich, verleihen dem Material eine

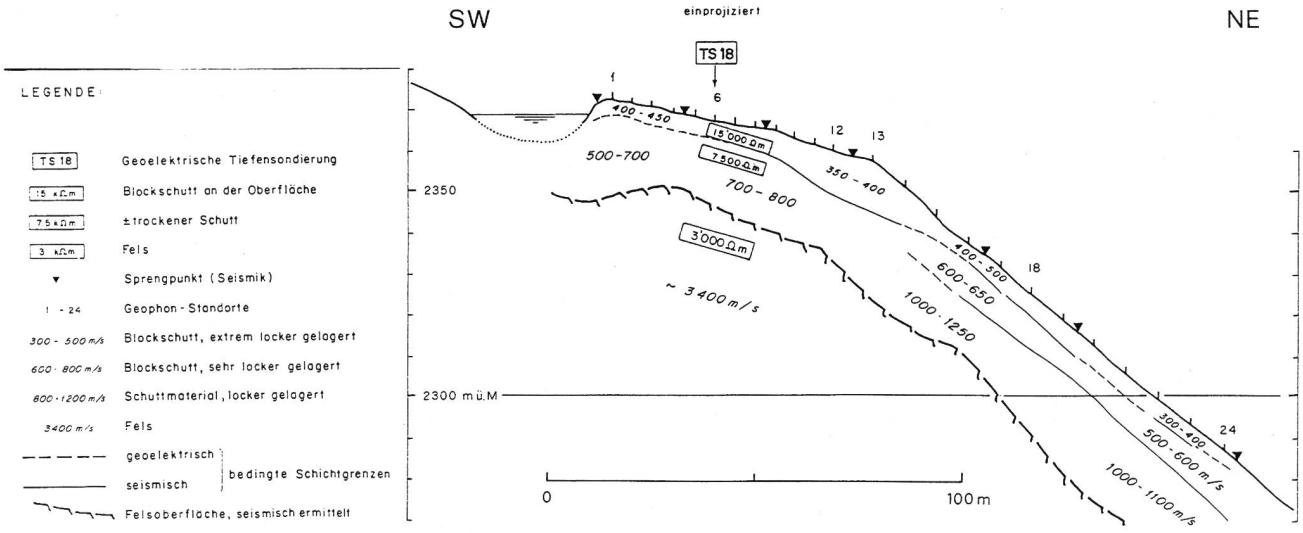

Bild 2. Geophysikalische Eigenschaften des Moränendamms am Sidelengletscher (Gerental/Obergoms). Die Sondierungen wurden 1988 im Rahmen der «Ursachenanalysen Hochwasser 1987» durchgeführt.

hohe kurzfristige Stand- und Erosionsfestigkeit und machen es hydraulisch dicht. Bei reduzierter innerer Reibung führen sie zu ausgeprägt kohaesivem Kriechverhalten und lassen dadurch die langfristige Festigkeit auf 0 absinken. Beim Auftauen des Permafrostes oder beim Schmelzen von Toteis spielen sich nicht nur massive Setzungsbewegungen ab, es kommt auch zur Bildung von kleineren und grösseren Kavernen im Lockermaterial. Derartig luftgefüllte Hohlräume sind bei geophysikalischen Sondierungen durch die Kombination von extrem hohen elektrischen Widerständen und sehr niedrigen seismischen Geschwindigkeiten charakterisiert. Ein Hohlraum von beträchtlichem Ausmass wurde beim Bau des Blockdammes am See 1 des Grubengletschers angefahren.

Stabilitätsbetrachtungen

Der Bruch von Moränendämmen kann erfolgen durch [vgl. 18]:

1. Feinmaterialausspülung und progressives Fliessen von Sicker- und Grundwasser («piping»),
2. Instabilität/Rutschung im Steilhang («liquefied flow»/ «slippage»),
3. Überfliessen mit rückschreitender Erosion («overtopping»).

Alle drei Prozesse werden bei maximaler Seespiegelkote wirksam und dürften dann bei vielen Ausbrüchen in Kombination auftreten. Erdbeben können vor allem die erstegenannten beiden Prozesse ungünstig beeinflussen.

Bei Gefahr von *Feinmaterialausspülung und progressivem Sickerwasserfluss* vergleicht man den effektiv vorhandenen Gradienten zwischen Seespiegel und Quellaustritt mit dem kritischen Gradienten

$$i_c = (\gamma - 1) / (1 + n_o)$$

mit γ = Verhältnis der spezifischen Gewichte des Gesteinsmaterials und des Wassers ($\approx$ 2,7), n_o = Volumenverhältnis Poren-/Gesteinsanteil. In unkonsolidiertem und grobblockigem Moränenmaterial von Gebirgsgletschern liegt der Wert von n_o oft bei etwa 0,5 und i_c wird höher als die natürliche Böschung von Moränenhalden. Gefahr besteht vor allem dann, wenn Schneeverwehungen, Lawinen, Gletscherzungen oder Trümmer von Eisabbrüchen schmale Dammpartien überstauen und dadurch kurzfristig extreme hydraulische Gradienten erzeugen (vgl. z. B. den Ausbruch des Mauvoisin-Stausees 1818 unter dem und durch den Giétro-Eistrümmerdamm hindurch). Hohlräume von geschmolzenem Toteis oder Permafrost im Moränenschutt heben die Porosität an und können dadurch lokal zu kritischen Verhältnissen führen (z. B. Ausbruch des periglazialen Sees am Rottalgletscher 1953).

Für *Rutschungen im kohäsionslosen Material* wird ein Sicherheitsfaktor definiert

$$F = [(1 - m\gamma_w/\gamma_s)\tan\varphi]/\tan\beta$$

mit β = Neigung der Rutschfläche, φ = Reibungswinkel des Moränenmaterials ($\approx$ 30 bis 40°), m = Verhältnis zwischen der Mächtigkeit des wassergesättigten Materials über der Rutschfläche und der Tiefe der Rutschfläche (= 1, wenn alles Material gesättigt ist). Auch bei hohem Grundwasserspiegel müssen die Rutschflächen steil sein. Voluminöse Moränendämme können deshalb wohl auch bei überlaufendem See nicht einfach gesamthaft abrutschen. Da das steile und poröse Moränenmaterial offenbar oft gar keine gesättigten Zonen enthält (vgl. Bild 2), können sich Rutschungen nur im kleineren Umfang und im bachnahen Bereich abspielen. Die Erfahrungen mit periglazialen Murgängen vom Sommer 1987 zeigen allerdings, dass rückschreitende Erosion ausgehend von einem Quellhorizont am Fuss einer steilen Schutthalde oder Moräne lokal die Rutschflächenneigung massiv erhöhen kann. Die dadurch ausgelöste Hanginstabilität kann sich zu sehr grossen muschelförmigen Ausbrüchen ausweiten und damit letztlich wahrscheinlich auch zum Bruch eines Moränendammes führen.

Der Überlauf von Moränenseen ist meist durch jahrelange Feinmaterialausspülung mehr oder weniger gepflästert und damit gegen Erosion bei normalen Hochwassern geschützt. Es braucht deshalb ein aussergewöhnliches Ereignis (Wassertaschenausbruch, Schwallwelle durch Lawine, Kalbung oder Felssturz usw.), um diese natürliche Pflästerung aufzureissen und einen irreversiblen Erosionsprozess einzuleiten. Rinnen auf der Aussenseite steilböschiger Moränen sind naturgemäss am meisten gefährdet. Bei einer wirksamen Abflusstiefe (vgl. [19, 20])

$$h_w \approx 0{,}1 \text{ bis } 0{,}15 d_m/J$$

mit d_m = massgebender Korndurchmesser, J = Energieliniengefälle (Neigung) des Gerinnes und bei typischen Werten für $J \approx 1/3$ auf Moränen-Aussenböschungen wird h_w für eine Pflästerung mit 1-m-Blöcken ein paar Dezimeter. Dieser Wert kann auch bei Ausbrüchen von kleinen Seen oder bei Schwallwellen zumindest vorübergehend erreicht werden: Es entstehen Murgänge, bei denen die mitgerissene Schuttmenge um ein Vielfaches höher sein kann als die ausgebrochene Wassermasse. Bei Ausbruchsvolumina unter etwa einer Million m³ kann das maximal mögliche Erosionspotential erfahrungsgemäss geschätzt werden [3, 5]

$$E \leqslant s_e \cdot 500 \text{ m}^2$$

mit s_e = Wegstrecke im erodierbaren Lockermaterial. Die Tiefenerosion bleibt meist unter 10 bis 20 m, da dann das Bachbett mit groben Blöcken aus den erodierten Uferpartien gepflästert ist (Bild 3).

Massnahmen und Perspektiven

Moränenseen in Gletschergebieten entstehen und erhalten sich über Jahre und Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte. Wie die Ausbrüche des Sees 3 am Grubengletscher bei Saas Balen in den Jahren 1968 und 1970 oder des Lago delle Locce am Ghiacciaio del Belvedere bei Macugnaga im Jahr 1979 zeigen, entwickelt sich das Potential für katastrophale Ausbrüche über entsprechend lange Zeiträume. Dieses Potential ist erkennbar und kann durch gezielte Massnahmen abgebaut werden. Dazu sind folgende Schritte geeignet:

1. Identifikation von Moränenseen anhand von Karten/ Luftbildern,
2. Definition gefährlicher Objekte,
3. Abklärung lokaler Voraussetzungen,
4. bauliche Eingriffe,
5. langfristige Kontrolle.

In den Schweizer Alpen liefert das regelmässig geflogene Luftbildmaterial des Bundesamtes für Landestopographie eine hervorragende Grundlage, um die Verbreitung und Entwicklung von Moränenseen grossräumig festzuhalten. Anhand von Grenzwerten für Murgang-Reichweiten (Pauschalgefälle) kann der potentielle Schaden eines Ausbruchs und damit die Gefährlichkeit einzelner Objekte beurteilt werden. In kritischen Fällen müssen die lokalen Gegebenheiten (Überlauf, Permeabilität, Permafrost/Toteis, Kalbungen/Lawinen usw.) hinsichtlich der Stabilität des Moränendammes untersucht werden. Falls nötig kann der Überlauf durch Blockwurf gesichert oder künstlich abge-

Bild 3: Grobblockige Pflästerung im Gerinne der Bresche am Rottalgletscher/Saas Almagell nach dem Murgang von 1953.

Bild 4: Blockwurfdamm am See 1 des Grubengletschers. Die spektakuläre Erosion auf der Luftseite des Dammes entstand bei den Ausbrüchen von See 3 in den Jahren 1968 und 1970.

senkt werden. Die Absenkung des Überlaufs muss allerdings mit grosser Vorsicht vorgenommen werden, da sie sonst selbst einen Ausbruch auslösen kann. So wurden etwa in Peru Moränenüberläufe in Schritten von 20 cm abgesenkt [11]. Beim See 1 am Grubengletscher soll ein flexibler Blockdamm die Setzungsbewegungen im Untergrund mitmachen (Bild 4), und am Lago delle Locce wurde die Retentionsfunktion des Moränendammes gegen Schwallwellen und plötzliche Wasserausbrüche durch eine Aufschüttung über dem neu installierten Drainagerohr erhalten. Mit langfristigen Kontrollen muss die Entwicklung beobachtet werden. Beim See 1 am Grubengletscher hat z.B. in den letzten Jahren die Permeabilität des Moränendammes offensichtlich stetig zugenommen, erreichte doch die maximale Spiegelkote trotz intensivster Gletscherschmelze den Überlauf nicht mehr. Ob die damit ansteigende Retentionskapazität des Seebeckens und mechanische Stabilität des Moränendammes im Überlaufbereich durch eine erhöhte Gefahr von progressivem Grundwasserfluss abgelöst wird, kann erst durch detaillierte Untersuchungen an Ort abgeklärt werden.

Weniger optimal sind die Voraussetzungen bei gefährlichen Moränenseen in Gletschergebieten anderer Hochgebirge, wo kaum exakte Karten und nur wenige Luft- oder Satellitenbilder vorliegen. Besonders bei sehr langen und stark schuttbedeckten Gletschern – etwa im Himalaya – mit stark verzögerter Reaktion auf den Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts und riesigen Moränenbastionen baut sich das Potential für entsprechende Flutkatastrophen eben erst auf. Ein Transfer der in den Alpen gesammelten Erfahrung in solche Regionen könnte ein klassisches Gebiet für die Prävention sein, wie sie das Schweizerische Katastrophenhilfekorps zurzeit zu verstärken sucht.

Literatur

[1] *Jäckli, H.* (1957): Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie 36, 136 S.

[2] *Naef, F., Haeberli, W.,* und *Jaeggi, M.* (1989): Morphological changes in the Swiss Alps resulting from the 1987 summer storms. Hydrology of Disasters, WMO Technical Conference Geneva 1988, Proceedings, S. 36–42.

[3] *Haeberli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M.,* und *Rösli, U.* (1991): Murgänge. In: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4 und Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, S. 77–88.

[4] VAW (1992a): Murgänge 1987 – Dokumentation und Analyse. Bericht Nr. 97.6 im Auftrag des Bundesamtes für Wasserwirtschaft.

[5] *Haeberli, W.* (1983): Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. «Annals of Glaciology» 4, S. 85–90.

[6] VAW (1992b): Die Grösse extremer Hochwasser und die erforderliche Gerinnekapazität der Vispa bei Randa nach dem Bergsturz vom Frühjahr 1991. Bericht Nr. 4049/3 im Auftrag des Katastrophenstabes Randa.

[7] *Haeberli, W.* and *Epifani, F.* (1986): Mapping the distribution of buried glacier ice – an example from Lago delle Locce, Monte Rosa, Italian Alps. «Annals of Glaciology» 8, S. 78–81.

[8] VAW (1984): Ricerche glaciologiche al Lago delle Locce, Macugnaga, Italia. Bericht Nr. 97.2 im Auftrag der Communità Montana della Valle Anzasca.

[9] VAW (1985): Studi sul comportamento del Ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga, Italia. Bericht Nr. 97.3 im Auftrag der Communità Montana della Valle Anzasca.

[10] VAW (1986): Valutazione dei rischi glaciali nella regione Macugnaga/Monte Rosa. Bericht Nr. 97.4 im Auftrag der Communità Montana della Valle Anzasca.

[11] *Lliboutry, L., Morales Arnao, B.,* und *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, S. 239–254.

[12] *Vuichard, D.,* und *Zimmermann, M.* (1987): The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequence. «Mountain Research and Development» Vol. 7, No. 2, S. 91–110.

[13] *Zimmermann, M.,* und *Haeberli, W.* (1992): Climatic change and debris flow activity in high mountain areas; a case study in the Swiss Alps. «Catena», Supplement 22, S. 59–72.

[14] *Haeberli, W.,* und *Röthlisberger, H.* (1975): Beobachtungen zum Mechanismus und zu den Auswirkungen von Kalbungen am Grubengletscher (Saastal, Schweiz). «Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie» 11/2, S. 221–228.

[15] *Nye, J.F.* (1976): Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins. «Journal of Glaciology» 17/76, S. 181–207.

[16] *Vischer, D., Funk, M.* und *Müller, D.* (1991): Interaction between a reservoir and a partially flooded glacier: problems during the design stage. Dix-septième Congrès des Grands Barrages, Vienne 1991, S. 113–135.

[17] *Haeberli, W.,* und *Fisch, W.* (1984): Electrical resistivity soundings of glacier beds: a test study on Grubengletscher, Wallis, Swiss Alps. «Journal of Glaciology» 30/106, S. 373–376.

[18] *Youd, T.L., Wilson, R.C.,* und *Schuster, R.L.* (1981): The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington – stability of blockage in the North Fork Toutle River. U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, S. 821–828.

[19] Bureau of Reclamation (1952): Progress report on results of studies on design of stable channels. Hydraulic Laboratory Report Hyd-352, 36 S.

[20] *Chervet, A.,* und *Weiss, W.* (1990): Sohlenstabilisierung mit Blockrampen. Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau; Separatdruck aus «Schweizer Ingenieur und Architekt» 42/1990.

Adresse des Verfassers: PD Dr. *Wilfried Haeberli,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, CH-8092 Zürich.