

Roman Gabl, Gerhard Kapeller und Markus Aufleger

Lawineneinstoß in einen Speichersee – Vergleich numerisches und physikalisches Modell

Im Hinblick auf eine vollständige Risikoanalyse von Stauanlagen ist insbesondere im Alpenraum das Gefährdungspotenzial von durch Lawineneinstöße induzierten Impulswellen zu prüfen. Um eine Überspülung des Dammkörpers verhindern zu können, muss der kritische Absenkwasserspiegel bekannt sein. An Hand einer beispielhaften Wehranlage und dem dazugehörigen Speicher wurden für diesen Beitrag die physikalischen Modelluntersuchungen numerisch nachgebildet und verglichen. Ziel der Untersuchung war es unter anderem, den Nachweis der Gleichwertigkeit der beiden unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zu erbringen.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Speicherseen gehören in einigen alpinen Regionen zu den prägenden Landschaftselementen. Sie dienen meist der Speicherung und der Erzeugung von elektrischer Energie und sind oft auch wichtiger Bestandteil des Hochwasserschutzes. Im Zuge der aktuellen Erfordernisse des Energiemarktes befinden sich derzeit eine Reihe neuer Speicher in Planung. Zudem erhöht sich durch den Wunsch nach einer flächendeckenden Beschneigung von Pisten und Loipen die Anzahl von kleinen bis mittleren Speicherseen.

Die Gefahr für eine Speicheranlage durch Fels- oder sogar Bergstürze in den Staubeereich kann durch entsprechende geologische Untersuchungen und die daraus resultierende Situierung des Bauwerks bzw. technische Sicherungsmaßnahmen weitgehend vermieden werden. Wesentlich schwieriger ist es, die Gefahr eines Lawineneinstoßes in den Speichersee zuverlässig zu vermeiden. Lawinen können an ausreichend steilen Hängen unterschiedlicher Exposition und Höhenlage entstehen. Es erfordert einen hohen Aufwand, die Schneedecke in allen potenziellen Anbruchgebieten unter allen meteorologischen Randbedingungen zu stabilisieren. An vielen An-

lagen im Alpenraum ist daher grundsätzlich mit dem Auftreten von Lawineneinstößen zu rechnen. Die durch die einstoßenden Schneemassen erzeugte Impulswelle im Speicher kann bei ungünstigen Konstellationen zu einem Überspülen des Absperrbauwerkes und im schlimmsten Fall zu dessen Beschädigung führen.

1.2 Prävention

Eine wirksame Methode, diese Gefahr zu minimieren, ist es, den Stauspiegel unter eine kritische Höhe abzusenken. Dies hat zur Folge, dass die Betriebsführung unter bestimmten Bedingungen (Wetter, Schneemenge und Schneedeckenaufbau, Lawinengefahrenstufe) eingeschränkt werden muss. Eine alternative ausgedehnte Verbauung der lawinengefährlichen Hänge wird sich in den meisten Fällen als wirtschaftlich schlechter erweisen, da die Verbauung auf extreme Ereignisse ausgelegt werden muss.

Im Regelfall weist ein alpiner Speicher einen betriebsbedingten Tiefstand in den lawinenkritischen Monaten auf, wodurch die Gefahr einer Beschädigung zunächst deutlich geringer wird. Dies gilt nicht für Speicherseen, die der Beschneigung dienen oder durch Pumpspeicherwerke bewirtschaftet werden. Bei diesen Speichern können ein Maximalstau und ein großes Lawineneignis zusammentreffen. Im Zuge einer Risikoanalyse ist zu überprüfen, ob das vorhandene Freibord ausreicht, um die Gefahr eines Überströmens des Absperrbauwerkes zu verhindern. Ist

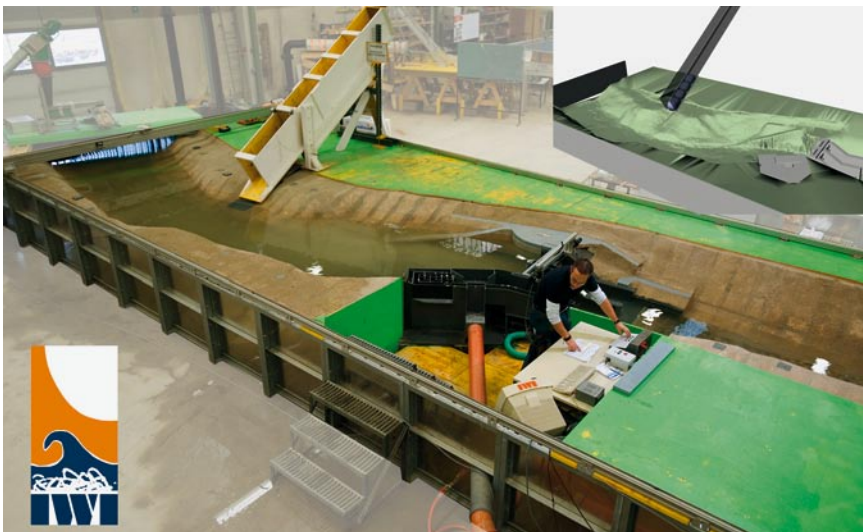


Bild 1: Physikalisches (großes Bild) und digitalisiertes Modell (kleines Bild)

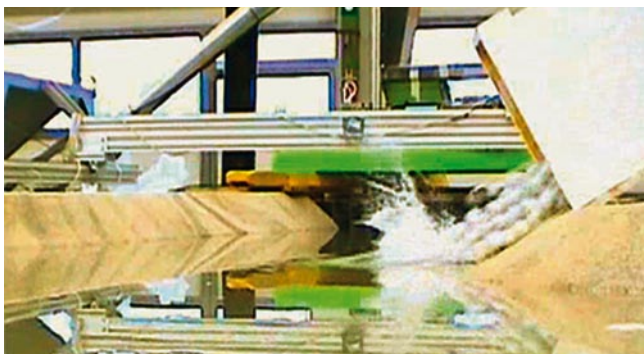


Bild 2: Einstoß Golfbälle (Hypothese P1)

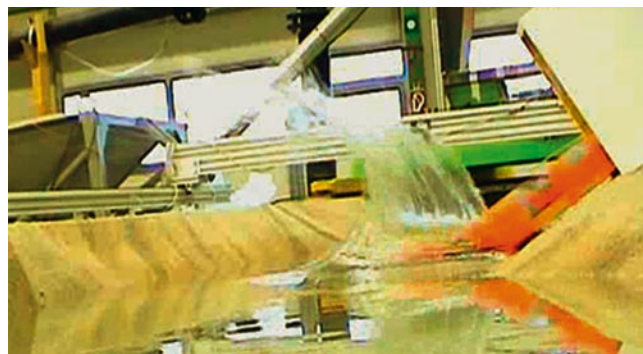


Bild 3: Einstoß Skateboards (Hypothese P2)

dies nicht der Fall, ist das mögliche Schädigungspotenzial in Abhängigkeit zum Stauspiegel für die lawinengefährliche Zeit zu überprüfen.

1.3 Modellbildung

Für die Untersuchung der Auswirkung eines Lawineneinstoßes stehen unterschiedliche Formeln und Bemessungsbehelfe zur Verfügung [1], [3], [4]. Der Anwendung integraler Formeln sind jedoch Grenzen gesetzt. Wichtige Einflussfaktoren wie die Topographie des Speichers können nur stark vereinfacht in einer einzelnen Formel oder über Formparameter berücksichtigt werden. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen auch, dass nicht zwangsläufig die primäre Welle maßgebend für die maximale Belastung bzw. den Wellenaufschlag sein kann, sondern durch Reflexion und Interferenzen (Überlagerung) nach dem Superpositionsprinzip eine deutlich höhere oder ungünstiger gerichtete Welle entstehen kann. Deshalb empfiehlt es sich, auf Grundlage dieser allgemein anwendbaren Ansätze eine weiterführende fallbezogene Untersuchung durchzuführen.

Die Entstehung und Bewegung von Lawinen wird mit unterschiedlichen Methoden beschrieben. In Österreich wird hierzu häufig die Software samos-AT® verwendet. Die Auswertung liefert Geschwindigkeitsvektoren und Abmessungen der zu erwartenden Lawine knapp vor der Wasseroberfläche. Ab der Wasseroberfläche muss ein anderes Werkzeug gewählt werden, um die Ausbreitung, Reflexion und Interpolation der induzierten Wellen zu ermitteln.

Für das geplante Ausleitungskraftwerk der Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH wurde neben anderen hydraulischen Untersuchungen der kritische Wasserspiegel bei einem Lawineneinstoß anhand eines physikalischen Labormodells bestimmt (Bild 1, groß). Nach Abschluss dieser Un-

tersuchungen wurde der Laborversuch numerisch nachgebildet (Bild 1, klein) und die Ergebnisse miteinander verglichen. Ziel der numerischen Untersuchung war es, die Aussagekraft der Modelle gegenüberzustellen. In beiden Untersuchungsvarianten war es notwendig, die einstoßende Lawine mit stark vereinfachenden Modellhypothesen hinsichtlich der Struktur und Bewegungsform der Lawine zu beschreiben.

2 Physikalischer Modellversuch

Bei der zu untersuchenden Lawine handelt es sich um ein Ereignis mit einem statistischen Wiederkehrintervall von etwa 10 bis 20 Jahren. Die Lawine mit einer Anbruchkubatur von 179 000 m³ stößt mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s und einer Fließhöhe von 5 m ca. 160 m oberhalb der Wehranlage in den Stausee ein (alle Angaben in Naturmaßen). Der Unterwasserbereich, die Wehranlage und der Staubeereich wurden im Maßstab 1:35 im Labor nachgebildet und die Sturzbahn der Lawine mit einem geneigten geraden Behälter vereinfacht. Diese Rinne diente dazu, die unter-

schiedlichen Modelllawinen entsprechend zu beschleunigen und auszurichten.

Es wurden bewusst weder Schnee noch Eis für die physikalische Modelllawine verwendet, da neben den nicht eindeutig bekannten Modelleffekten bei Schnee die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben wäre. Zusätzlich hätte es einen erheblichen Aufwand bedeutet, die beträchtliche Menge an Schnee für die unterschiedlichen Versuchsanordnungen unter Laborbedingungen zu erzeugen und vorzuhalten. Zur Modellierung der Lawine wurden zwei alternative Hypothesen verfolgt.

2.1 Kugeln („Golfbälle“) – Hypothese P1

Die erste physikalische Hypothese P1 geht von einzelnen Kugeln aus, welche gleichzeitig in einer definierten Höhe am Hang und in einer definierten Lage losgelassen werden. Als Simulationsmaterial für die Untersuchung des Lawineneinstoßes wurden 900 Golfbälle gewählt (Bild 2). Durch Trockenversuche erfolgte die Startplatzierung und die Anhäufung der Golfbälle in der Rinne so, dass die Geschwindigkeit und die Fließhöhe vor dem Einstoß eingehalten wurden. Auf Grund der relativ hohen Dichte eines Golfballs (ca. 1 140 kg/m³) sinken

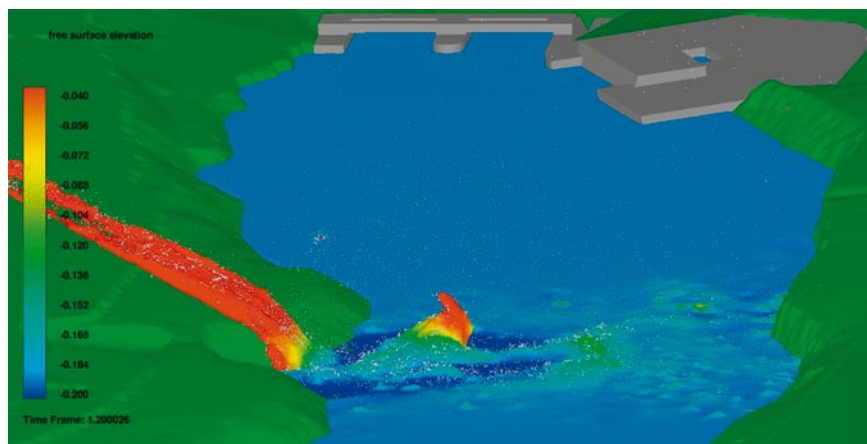


Bild 4: Einstoß Partikel und Wasser (Hypothese N1)

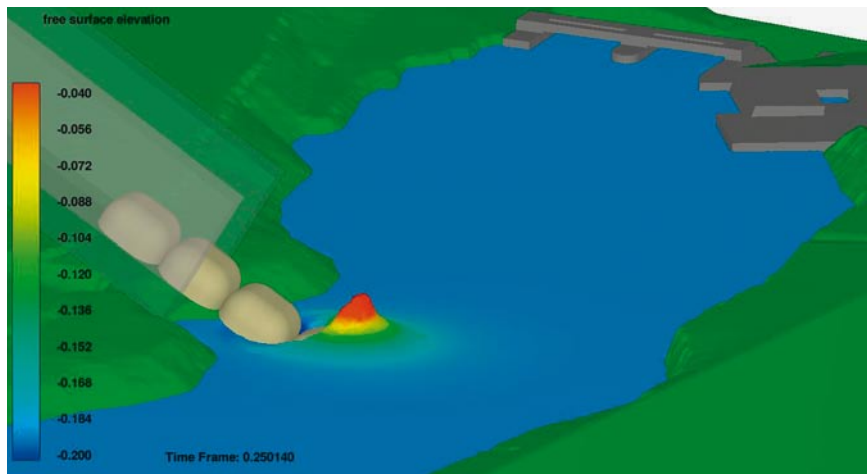


Bild 5: Einstoß Skateboards (Hypothese N2)

die Bälle nach der Impulsübertragung im Becken ab. Als Einheit betrachtet wies diese Modellannahme eine Dichte von ca. 600 kg/m^3 auf.

2.2 Kompakter Körper („Skateboard“) – Hypothese P2

Im Gegensatz zu den vielen kleinen Impulsen beruht die zweite physikalische Hypothese P2 auf der Annahme eines kompakten Einstoßes (**Bild 3**). Dies wurde durch Säcke erreicht, die mit Granulat gefüllt und auf mit Rollen versehenen Brettern befestigt wurden. Die sogenannten Skateboards simulierten eine Lawine mit 700 kg/m^3 , sowie das teilweise auch bei natürlichen Lawinen beobachtete Aufschwimmen des Schnees nach der Impulsübertragung.

3 Numerische Simulation

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit dem physikalischen Modell zu erreichen, wurde als Grundlage für die numerische Untersuchung der terrestrische Laserscan der Modelloberfläche herangezogen und nicht das ursprüngliche digitale Geländemodell (DGM) des Geländes. Das Bauwerk (Wehr und Einlaufbereich), die Rinne und die Skateboards wurden im CAD-Programm Rhinoceros modelliert und eingepasst. Die numerische Untersuchung erfolgt mit Hilfe der 3-D-numerischen Strömungssimulationssoftware FLOW-3D® (Version 9.3.2). Die Modellierung eines Gemisch aus Wasser, Luft und Schnee bzw. Festkörpern war mit dem zur Anwendung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung vorgesehenen numerischen Simulationswerk-

zeug FLOW-3D® nicht möglich. Es wurde daher eine Modellbildung der einstoßenden Lawine ähnlich dem physikalischen Versuch vorgenommen.

3.1 Partikel und Wasser – Hypothese N1

Anstatt 900 einzelne bewegliche Objekte zu definieren, wie bei der physikalischen Hypothese P1 mit den Golfbällen, wurden Partikel eingesetzt (**Bild 4**). Der in FLOW-3D® implementierte Partikel-Code ermöglicht eine komplette Interaktion der Partikel, ausgenommen deren gegenseitige Impulsübertragung. Um das Verhalten der Partikel beim Austritt aus der Startrinne denen der Golfbälle anzupassen, wurde zusätzlich ein Startwasser in der Rinne definiert. Die Dichte der verwendeten Partikel entsprach der der Golfbälle. Der Durchmesser der Partikel betrug ca. $1/3$ dessen der Golfbälle, was aber durch eine Erhöhung der Anzahl an Partikel ausgeglichen wurde. Neben dem Gesamt-

gewicht der Ersatzlawine wurde auf ein der Hypothese P1 ähnliches Einstoßverhalten des Gemisches geachtet, was durch die Positionierung des Startwassers mit beeinflusst wurde.

Im Zuge einer eigenständigen numerischen Untersuchung könnte auf diese statische Anfangsbedingung und die Simulation der Beschleunigung in der Rinne verzichtet werden, und durch eine Startgeschwindigkeit, welche der Einstoßgeschwindigkeit der Lawine entspricht, ersetzt werden.

3.2 General Moving Object (GMO) – Hypothese N2

Durch das weitgehend geometrieunabhängige Berechnungsgitter der Software FLOW-3D® eignet sich die Software für die Simulation von bewegten Objekten. Einzelnen Körpern können zeitabhängig Geschwindigkeitsvektoren und Rotationen vorgegeben und somit eine Bewegung beschrieben werden. Solche Objekte werden als General Moving Object (GMO) bezeichnet. Eine Freigabe der Interaktion des Wassers auf das einstoßende GMO (coupled mode) erwies sich im Zuge der Untersuchungen als nicht sehr geeignet. Für die Berechnungen wurde somit der vordefinierte Bewegungsmodus (prescribed) gewählt (siehe auch Flow Science [2]). Das nach der Vorlage des kompakten Körpers (Skateboard) aus dem physikalischen Modell geformte Objekt wird entlang einer imaginären Linie durch das Modell geführt (**Bild 5**). Dabei kommt es zu keiner Abbremsung der einstoßenden Modelllawine und zu keinem Aufschwimmen wie beim physikalischen Modellversuch mit den Skateboards, sondern nur zu

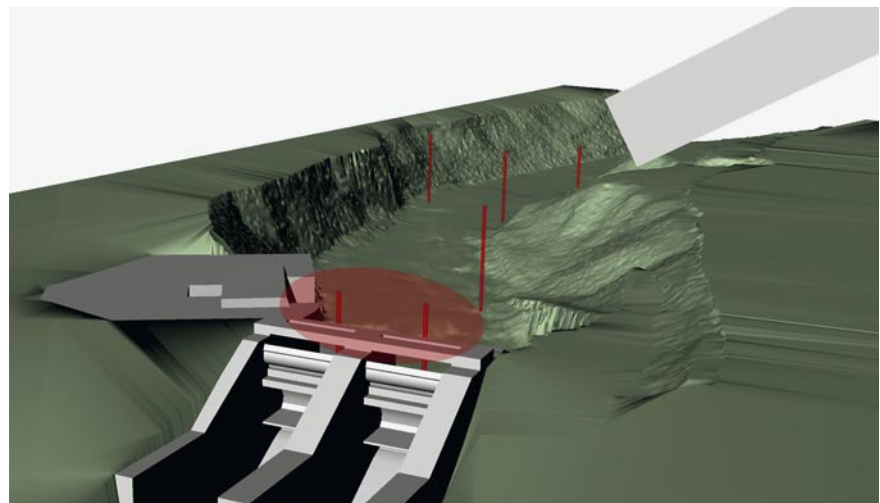


Bild 6: Darstellung der Auswertungspunkte

einem direkten Impulsübertrag auf den Wasserkörper.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung

Ein erster optischer Vergleich der Einstoßkrater (Bilder 2 und 3) zeigt sehr deutlich, dass das im physikalischen Modell auftretende Spritzen des Wassers in der Numerik, wie zu erwarten war, nicht simuliert werden konnte (Bilder 4 und 5). Ein direkter Vergleich der Wellenhöhe des Kraters war nicht durchführbar, da die Messungen am physikalischen Modell in diesem Bereich nicht möglich waren. Entscheidend für die Untersuchung war der Bereich direkt vor der Wehranlage (Bild 6). Verglichen wurde jeweils die maximal auftretende Amplitude der ankommenden Welle, bevor sie am Wehrbauwerk aufläuft und somit zu einem Überströmen führen konnte. Für den vorliegenden Vergleich wurden die Werte auf den Naturmaßstab hochskaliert. Der Wasserspiegel im Speicher war in allen Fällen auf Höhe des Stauzieles. Der mittlere Wasserstand im Modellspeicher

betrug ca. 40 cm, wodurch der Einfluss der Oberflächenspannung auf das Ergebnis zu vernachlässigen ist. Die numerischen Simulationen wurden ohne das Oberflächenspannungsmodul durchgeführt.

4.2 Vergleich

Es zeigte sich, dass die Differenzen in der Natur an den Auswertepunkten vor der Wehranlage zwischen den vergleichbaren numerischen und physikalischen Versuchsanordnungen (P1 verglichen mit N1 und P2 mit N2) im Bereich von wenigen Zentimetern und der Unterschied zwischen den Hypothesenpaaren P1/N1 („Golfbälle“) und P2/N2 („Skateboard“) im Bereich von Dezimetern lag.

4.3 Resümee

Aus dieser Untersuchung kann die Konsequenz gezogen werden, dass das physikalische und das numerische Modell vergleichbare Ergebnisse liefern. Die entscheidenden Unsicherheiten liegen daher in den grundlegenden Modellvereinfachungen. Sowohl für die beiden in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Modellhypothesen sowie für alle anderen

Ansätze fehlt derzeit die Möglichkeit einer Kalibrierung und Validierung durch Naturdaten von realen Lawineneinstößen. Solange diese Datengrundlage noch nicht geschaffen ist, empfiehlt sich eine physikalische Untersuchung des Lawineneinstoßes. Dies gilt insbesondere dann, wenn das Modell für weitere Untersuchungen (z. B. Geschiebe oder hydraulische Optimierung) verwendet wird. Alternativ oder auch ergänzend können auch numerische Untersuchungen vorgenommen werden, wobei aber deren Aussagekraft durch eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse der Eingangsparameter und Modellannahmen überprüft werden sollte. Die Entscheidung, ob sich ein physikalisches Modell oder eine numerische Berechnung für die Untersuchung anbietet, muss aber für jeden Einzelfall überprüft werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Auftraggebern, die die Untersuchungen zum vorliegenden Thema unterstützt haben. Besonderer Dank gilt den Gemeinschaftskraftwerk Inn GmbH, die den diesem Artikel zugrundeliegenden physikalischen Modellversuch beauftragt haben und CFD Consultants GmbH als langjähriger Partner für FLOW-3D®.

Autoren

Dipl.-Ing. Roman Gabl
Dipl.-Ing. Gerhard Kapeller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Markus Aufleger

Universität Innsbruck – Institut für Infrastruktur
 Arbeitsbereich Wasserbau
 Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, Österreich
 roman.gabl@uibk.ac.at
 gerhard.kapeller@uibk.ac.at
 markus.aufleger@uibk.ac.at

Literatur

- [1] Fritz, H. M.: Initial phase of landslide generated impulse waves. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (2002), Nr. 178.
- [2] Flow Science: FLOW-3D® User Manual Version 9.3. Santa Fe: Eigenverlag, 2008.
- [3] Heller, V.: Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (2008), Nr. 204.
- [4] Zweifel A.: Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (2004), Nr. 186.

Roman Gabl, Gerhard Kapeller and Markus Aufleger

Avalanche Impact into a Reservoir – Comparison of Numerical and Physical Model

In view of a complete risk analysis, the potential danger of an avalanche impact into a reservoir and the induced impulse wave has to be scrutinised. In order to prevent an impulse wave to overflow the dam, the critical water level in the reservoir has to be known. By using an exemplary weir this research study gives a summary of the results of a comparison of the physical model versus the numerical simulations. The intention is to prove the equality of the numerical and the physical model for this special problem.

Роман Габль, Герхард Капеллер и Маркус Ауфлегер

Лавинные сходы в водохранилищный резервуар – сравнение численной и физической моделей

Полностью учитывая анализ риска гидротехнических сооружений, в особенности в Альпийском регионе следует проверять потенциал угрозы возникновения импульсных волн, вызванных лавинными сходами. Чтобы иметь возможность предотвратить перелив воды через тело дамбы, необходимо знать критический уровень спада воды. Были проведены физические исследования на моделях, в качестве таковых использовалась опытная водосливная плотина и относящийся к ней резервуар. Для данной статьи результаты были смоделированы в виде цифровых данных, была проведена сравнительная оценка. Одной из целей исследования являлось доказательство равноценности двух различных методов исследования.