

Rutschinduzierte Impulswellen im Kontext periglazialer Wasserkraftentwicklung

Conference Paper**Author(s):**

[Evers, Frederic M.](#) ; [Schwegler, Benno](#); [Fankhauser, Andreas](#); [Boes, Robert](#) 

Publication date:

2021

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000508173>

Rights / license:

[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)

Originally published in:

VAW-Mitteilungen 262



Rutschinduzierte Impulswellen im Kontext periglazialer Wasserkraftentwicklung

Slide-induced impulse waves in the context of periglacial hydropower development

Frederic Evers, Benno Schwegler, Andres Fankhauser, Robert Boes

Kurzfassung

Aufgrund schwindender Gletscher erschliessen sich in Zukunft neue potentielle Standorte für den Bau von Stauanlagen zur Wasserkraftnutzung. Die periglaziale Umgebung dieser Anlagen ist dabei in zunehmendem Ausmass von Massenbewegungsprozessen betroffen. Neben Schneelawinen und Gletscherabbrüchen stellen auch instabile Hänge, welche bis anhin vom Gletschereis gestützt worden waren, sowie das Auftauen von Permafrost infolge steigender mittlerer Lufttemperaturen ein Risiko für zukünftige Speicher dar: Tauchen diese Rutschmassen mit hoher Geschwindigkeit in einen Stausee ein, werden tsunami-artige Impulswellen erzeugt. Das Sperrenbauwerk als am niedrigsten gelegener Uferbereich ist dabei besonders gefährdet und kann bereits durch relativ kleine Wellen überströmt werden. Impulswellen stellen somit ein zu berücksichtigendes Risiko bei der Planung neuer Anlagen dar.

Abstract

Due to retreating glaciers, new potential locations for the construction of dams for hydropower use will open up in the future. The periglacial environment of these facilities is increasingly affected by mass wasting processes. In addition to snow avalanches and glacier break-off, unstable slopes previously supported by glacier ice and the thawing of permafrost due to rising mean air temperatures pose a risk to future reservoirs: If these landslides enter a reservoir at high speed, tsunami-like impulse waves are generated. The dam structure as the lowest situated shore area is particularly endangered and can be overtopped by relatively small waves. Impulse waves therefore represent a risk that must be taken into account when planning new facilities.

1 Einführung

Das Abschmelzen von Gletschern und deren damit verbundener Rückzug ermöglichen die Erschliessung neuer Standorte für den Bau von Stauanlagen zur Wasserkraftnutzung (NELAK 2013; Ehrbar *et al.*, 2019). Basierend auf einer Stu-

die von Ehrbar *et al.* (2018) geht das Schweizer Bundesamt für Energie von einem Wasserkraftpotenzial von rund 1 TWh/Jahr in diesem periglazialen Umfeld für die Schweiz bis 2050 aus (BFE, 2019). Die beiden Standorte, an welchen sich zur Zeit Projekte in der Planung befinden, Gorner- und Triftgletscher, decken mit zusammen 380 GWh/Jahr bereits mehr als ein Drittel dieses Potentials ab. Gemäss Ehrbar *et al.* (2019) könnten neue Wasserkraftanlagen an den 20 am besten geeigneten Standorten in den Gletscherrückzugsgebieten der Schweiz bis zu 1.8 TWh/Jahr produzieren, wobei sich der Energieinhalt und das Speichervolumen auf mindestens 1.4 bzw. 700 Mio. m³ belaufen würden. Farinotti *et al.* (2019) untersuchten weltweit 185'000 periglaziale Standorte und gehen unter Berücksichtigung technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Faktoren von einem nutzbaren Potential von 533±200 TWh/Jahr aus. Drei Viertel der gesamten untersuchten Standorte weltweit werden bis zum Jahr 2050 als eisfrei erwartet.

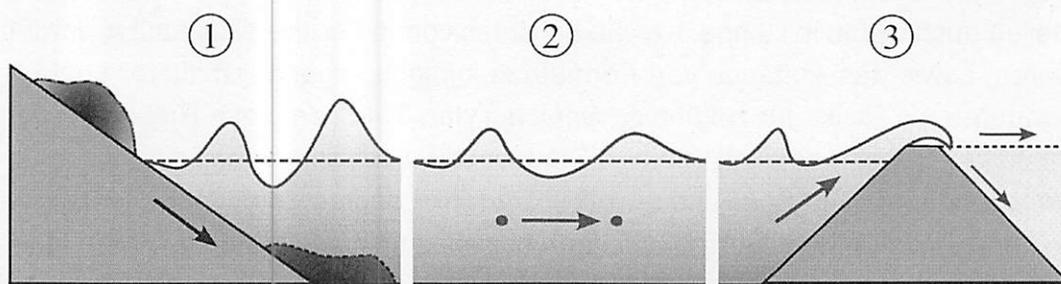


Abb. 1: Prozesskette eines Impulswellenereignisses mit (1) Wellenerzeugung, (2) Wellenausbreitung und (3) Uferinteraktion (Wellenauflaufen, Überlandströmung, Überschwappen) (Evers, 2017)

Nach dem Rückzug eines Gletschers können die eisfrei gewordenen Gebiete geomorphologisch sehr instabil und daher von erheblichen Massenbewegungsprozessen betroffen sein (NELAK 2013; Klimeš *et al.*, 2016). Wenn eine grössere Rutschmasse mit hoher Geschwindigkeit in einen Wasserkörper, wie beispielsweise einen Stausee, eintaucht, entstehen sogenannte Impulswellen. Die Prozesskette eines Impulswellenereignisses ist in Abb. 1 dargestellt: (1) die eintauchende Rutschmasse verdrängt das Wasser und erzeugt einen Impulswellenzug mit mehreren Wellenbergen und -tälern; (2) die Impulswellen breiten sich über den Wasserkörper aus und verändern dabei ihre Grösse und Form; (3) an den Ufern des Wasserkörpers laufen die Wellen tsunami-artig auf – an einem Sperrenbauwerk kann es im Falle eines zu geringen Freibords zum Überschwappen kommen. Infolge überschwappender Wassermassen können neben direkt an den Stausee angrenzenden Uferbereichen auch weit unterhalb gelegene Gebiete von Überflutungen betroffen sein. In Extremfällen kann es insbesondere bei Staudämmen durch luftseitige Erosion sogar zu einem Bauwerksversagen kommen.

Die massgeblichen Auftretensformen von Massenbewegungen mit hoher Geschwindigkeit im periglazialen Umfeld sind:

- Fels-/Bergstürze
- Moränenrutschungen
- Murgänge
- Gletscherabbrüche
- Schneelawinen

Fels- und Bergstürze können aufgrund des Auftauens des Permafrosts zukünftig insbesondere während sommerlicher Hitzeperioden zunehmen (BAFU, 2005; BAFU, 2016; PERMOS, 2019). Zwar ist zu erwarten, dass die Gefahr von Gletscherabbrüchen mit fortschreitendem Abschmelzen tendenziell abnehmen wird; allerdings zeigen Dalban Canassy *et al.* (2011), dass sich in Abhängigkeit der Topographie auch zuvor ungefährliche Gletscher innerhalb weniger Jahre zu einem Risiko entwickeln können. Neu entstehende proglaziale Gletscherseen können infolge eintauchender Rutschmassen ebenfalls Ausbruchsfluten (sogenannte GLOFs – glacier lake outburst floods) mit verheerenden Auswirkungen für die Unterlieger verursachen (Klimeš *et al.*; 2016). Werden natürliche Gletscherseen durch Sperrbauwerke für die Wasserkraft nutzbar gemacht, kann daher gleichzeitig eine Schutzwirkung gegen derartige Ereignisse erreicht werden (NELAK, 2013).

Die Berücksichtigung von Impulswellenszenarien ist ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzepts von Stauanlagen und findet Einzug in einschlägige Richtlinien und Empfehlungen (z.B. Achterberg *et al.*, 1998; BFE, 2017). Bei der Entwicklung periglazialer Wasserkraftstandorte ist möglichen Impulswellen infolge Massenbewegungen daher besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

2 Fallbeispiel Speichersee Trift

Mit einer geplanten Stromproduktion von 145 GWh/Jahr deckt allein der Neubau des Speichersees und Kraftwerks Trift durch die KWO AG rund bereits ein Siebtel des seitens BFE (2019) prognostizierten Wasserkraftpotentials im periglazialen Umfeld ab. Eine 167 m hohe Staumauer soll dabei ein Speichervolumen von 85 Mio. m³ einstauen, was einem Energiewert von 215 GWh entspricht. Die Kraftwerksturbinen mit einer installierten Leistung von 80 MW können eine Fallhöhe von 440 m energetisch nutzen. Abb. 2 zeigt die Zunge des Triftgletschers im Jahr 1948. Der Gletscher breitet sich in einem Becken aus, welches am nördlichen Ende durch einen Felsriegel begrenzt wird. Im Jahr 2006 hatte sich der Gletscher bereits stark zurückgezogen und das freigegebene Becken wurde durch einen

proglazialen See gefüllt, der durch ein enge Schlucht im Felsriegel abfließt. Wie die Fotomontage für das Jahr 2028 zeigt, soll für den Speichersee Trift eine Bogenstaumauer im Bereich dieser Schlucht gebaut werden. Aufgrund dieser vorteilhaften Gegebenheiten bietet dieser Standort ein sehr günstiges Verhältnis von für das Sperrbauwerk benötigtem Betonvolumen zu resultierendem Speicheringhalt (Schweizer *et al.*, 2020).



Abb. 2: Triftgletscher im Jahr 1948 (links, Archiv der Gesellschaft für Ökologische Forschung, Dalban Canassy *et al.*, 2011), Triftgletschersee im Jahr 2006 (mittig, Françoise Funk-Salamí, Dalban Canassy *et al.*, 2011) und Fotomontage des Speichersees Trift im Jahr 2028 (rechts, Evers *et al.*, 2018)

Geotechnische Untersuchungen der periglazialen Umgebung haben ergeben, dass Massenbewegungen wie Fels- bzw. Bergstürze sowie Moränenrutschungen aktuell keine primäre Gefahrenquelle für den geplanten Speichersee darstellen. Allerdings könnten Gletscherabbrüche und Schneelawinen den Speichersee erreichen und Impulswellen auslösen. Dalban Canassy *et al.* (2011) hatten bereits für den proglazialen See eine Gefahrenanalyse infolge eines Gletscherabbruchs durchgeführt und dabei auch die Entstehung von Impulswellen berücksichtigt. Abb. 3 zeigt vier mögliche Szenarien, in welchen Schneelawinen den zukünftigen Speichersee erreichen könnten. Die Ausbreitung der Lawinen wurde zunächst ohne Berücksichtigung des Wassers numerisch simuliert. Die an der Grenze zum Wasserkörper ermittelten Rutscheigenschaften wie beispielsweise die Fließgeschwindigkeit dienen als Eingangsparameter für eine anschließende Gefahrenbeurteilung erzeugter Impulswellen (Abb. 3). Zusätzlich wurden auch Szenarien von potentiellen Gletscherabbrüchen berücksichtigt. Bei den untersuchten Rutschungen handelt es sich jeweils um Worst-Case-Szenarien im Rahmen einer Risikoanalyse, deren Ziel es ist, kritische Systemzustände bereits vor ihrem Eintreten durch entsprechende Gegenmassnahmen auszuschliessen. Aufgrund der durchgeführten geologischen Untersuchungen ist nicht zu erwarten, dass kurz- oder mittelfristig durch Fels- oder Bergstürze Impulswellen ausgelöst werden

könnten. Unter Berücksichtigung der weiteren klimatischen Entwicklung (weiterer Gletscherrückzug, weiteres Auftauen des Permafrosts) gilt dies auch für die langfristigen Szenarien.

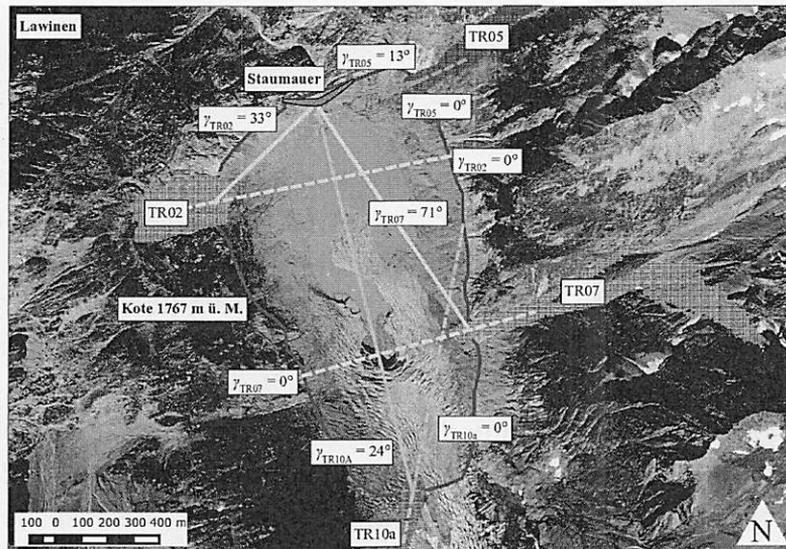


Abb. 3: Draufsicht des Triftspeichersees im Betriebszustand bei einem Stauziel von 1767 m ü. M. mit ausgewählten Schneelawinenszenarien und den Wellenausbreitungswinkeln γ (Orthofoto reproduziert mit Genehmigung von swisstopo (JA100120))

3 Gefahrenbeurteilung

Basierend auf im hydraulischen Labormodell entwickelten Gleichungen stellten Heller *et al.* (2008) eine Berechnungsmethodik zusammen, welche die gesamte in Abb. 1 dargestellte Prozesskette abdeckt. Diese erste Ausgabe des VAW-Impulswellenleitfadens ermöglichte eine schnelle Abschätzung der Auswirkungen eines Impulswellenereignisses, wie beispielsweise Wellen- und Auflaufhöhen. Neben der Anwendung bei kurzfristig eingetretenen Notsituationen erwies sich der Leitfaden auch als hilfreiches und kostengünstiges Werkzeug in der Vorprojektierung diverser Speicherseen. In der zweiten, aktualisierten Ausgabe des Leitfadens wurden neue Forschungsergebnisse und zusätzliche Berechnungsansätze ergänzt (Evers *et al.*, 2019). Neben den für die Staudammsicherheit relevanten grossen Rutschereignissen können bei einem geringen Freibord bereits Impulswellen mit vergleichsweise kleinen Wellenhöhen zu einem Überströmen der Krone des Sperrenbauwerks führen. Im periglazialen Umfeld können insbesondere kleinere Ereignisse mit einer grösseren Häufigkeit auftreten. Auch wenn kleinere Rutschungen mit folglich kleineren Wellenhöhen keine direkte Gefahr für die Stauanlagensicherheit darstellen, so sollten diese dennoch in der Freiborddimensionierung für den täglichen Betrieb mitberücksichtigt werden. Kastinger *et al.* (2020) untersuchten das Auflaufverhalten von Impulswellenzügen mit kleinen

relativen Wellenhöhen und stellen einen geeigneten Berechnungsansatz vor. Im Gegensatz zu durch grosse Massenbewegungen ausgelösten Impulswellen treten bei kleineren Rutschungen die maximalen Wellenhöhen innerhalb des Wellenzuges häufig erst hinter der ersten oder zweiten Welle auf.

In Abb. 4 ist eine Vorgehensweise zur Gefahrenbeurteilung von Impulswellen bei der Projektierung eines Speichersees im periglazialen Umfeld dargestellt. Nach der Identifikation potentieller Rutschmassen kann anhand des Impulswellenleitfadens im Rahmen einer Voruntersuchung eine erste Abschätzung des Impulswellenrisikos erfolgen. Lässt sich für die gewählten Extremszenarien eine Gefährdung, beispielsweise des Sperrenbauwerks, nicht ausschliessen, ist zu entscheiden, ob die Ergebnisse der Voruntersuchung aufgrund der örtlichen Gegebenheiten zu grosse Unsicherheiten aufweisen und sich weitere Detailanalysen empfehlen. Solche Detailanalysen können dabei durch Labormodelle oder Computersimulationen erfolgen. Während diese Verfahren bei fachgerechter Anwendung und Interpretation zwar genauere Ergebnisse ermöglichen, sind sie jedoch auch mit einem erheblich höheren Aufwand verbunden. Abschliessend können auf Basis der berechneten Impulswellen geeignete Gegenmassnahmen, wie beispielsweise eine temporäre Stauseeabsenkung oder ein Rückhalt im Entstehungsgebiet der Massenbewegung (z.B. Lawinenverbauungen), geplant werden.

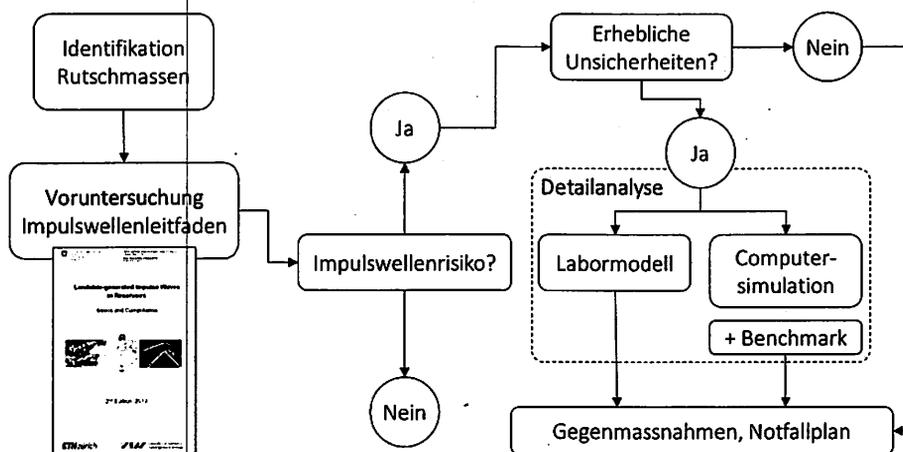


Abb. 4: Vorgehensweise einer Gefahrenbeurteilung von Stauseen infolge Impulswellen

4 Zusammenfassung

Aufgrund erheblicher Massenbewegungsprozesse sind Impulswellen bei der Entwicklung von Wasserkraftprojekten im periglazialen Umfeld zu berücksichtigen. Bei der Planung des Speichersees Trift wurden mögliche Impulswellenszenarien infolge Schneelawinen und Gletscherabbrüchen berücksichtigt, um deren Eintreten mit gezielten Gegenmassnahmen zu vermeiden. Der an der VAW erstellte

Impulswellenleitfaden stellt eine praxisnahe Methode zur schnellen Gefahrenbeurteilung dar, welche bei Bedarf durch genauere Untersuchungsmethoden ergänzt werden kann.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Schweizer Kompetenzzentrums für Energieforschung – Strombereitstellung (SCCER-SoE) erstellt und durch das Bundesamt für Energie BFE sowie die Schweizerische Agentur für Innovationsförderung Innosuisse unterstützt.

Referenzen

- Achterberg, D., Gotzmer, J. W., Spath, R., Tseng, M., Woodward, D. E., Miller, N., Shipman, S. A. (1998). Federal guidelines for dam safety: selecting and accommodating inflow design floods for dams. Dept. of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- BAFU (2005). Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BAFU (2016). Schutz vor Massenbewegungsgefahren - Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BFE (2017). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen – Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- BFE (2019). Wasserkraftpotenzial der Schweiz – Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Dalban Canassy, P., Bauder, A., Dost, M., Fäh, R., Funk, M., Margreth, S., Müller, B., Sugiyama, S. (2011). Hazard assessment investigations due to recent changes in Triftgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(8), 2149-2162.
- Ehrbar, D., Schmocker, L., Vetsch, D.F., Boes, R.M. (2018). Hydropower potential in the periglacial environment of Switzerland under climate change. *Sustainability*, 10(8), 2794.
- Ehrbar, D.; Schmocker, L.; Vetsch, D.; Boes, R. (2019). Wasserkraftpotenzial in Gletscherrückzugsgebieten der Schweiz. *Wasser, Energie, Luft* 111(4): 205-212.
- Evers, F.M. (2017). Spatial propagation of landslide generated impulse waves, VAW-Mitteilung 244 (R. Boes, Hrsg.), ETH Zürich, Zürich.
- Evers, F.M., Heller, V., Fuchs, H., Hager W.H., Boes, R.M. (2019). Landslide-generated impulse waves in reservoirs - Basics and computation, VAW-Mitteilung 254 (R. Boes, Hrsg.), ETH Zürich, Zürich.
- Evers, F.M., Schmocker, L., Fuchs, H., Schwegler, B., Fankhauser, A.U., Boes, R.M. (2018). Landslide generated impulse waves: assessment and mitigation of hydraulic hazards, ICOLD Kongress 2018, Wien.
- Farinotti, D., Round, V., Huss, M., Compagno, L., Zekollari, H. (2019). Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, 575(7782), 341-344.

- Heller, V., Hager W.H., Minor, H.-E. (2008). Rutscherzeugte Impulswellen in Stauseen Grundlagen und Berechnung, VAW-Mitteilung 206 (H.-E. Minor, Hrsg.), ETH Zürich, Zürich.
- Kastinger, M.B.A., Evers, F.M., Boes, R.M. (2020). Run-up of Impulse Wave Trains on Steep to Vertical Slopes, *Journal of Hydraulic Engineering*. (in Begutachtung)
- Klimeš, J., Novotný, J., Novotná, I., de Urries, B. J., Vilímek, V., Emmer, A., Strozzi, T., Kusák, M., Rapre, A.C., Hartvich, F., Frey, H. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*, 13(6), 1461-1477.
- NELAK (2013): Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques. Haeberli, W., Bütler, M., Huggel, C., Müller, H. Schleiss, A. (Hrsg.), Forschungsbericht NFP 61, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.
- PERMOS 2019. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Noetzli, J., Pellet, C. and Staub, B. (Hrsg.) Glaciological Report Permafrost No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Schweizer, S., Schwegler, B., Rohrer, M., Meyer, M., Schläppi, S., Baumgartner, J., Berger, B., Fahner, S., Fankhauser, A., Zeh Weissmann, H., Niedermayr, A., Roulier, C., Döring, M. (2020) Das Triftprojekt – ein Überblick zu Projekt, Ökologie und Partizipation. *Wasser Energie Luft*, 111(4), 213-221.

Adressen der Autoren

Dr. Frederic Evers (korrespondierender Autor)

Prof. Dr. Robert Boes

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

CH-8093 Zürich, Hönggerberggring 26

evers@vaw.baug.ethz.ch

Benno Schwegler, Andres Fankhauser

Kraftwerke Oberhasli AG

CH-3862 Innertkirchen, Grimselstrasse 19