

Diss. ETH No. 14'871

Initial phase of landslide generated impulse waves

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich
(ETH Zürich)

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Hermann M. Fritz

Dipl. Bau-Ing. ETH
born on May 20, 1972
citizen of Zürich (ZH)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor, examiner
Prof. Dr. W.H. Hager, co-examiner
Prof. Dr. I. Grant, co-examiner

2002

Abstract

Large water waves in reservoirs, lakes, bays and oceans may be generated by landslides, shore instabilities, snow avalanches, glacier and rock falls. For Alpine lakes impulse waves are particularly significant, due to steep shores, narrow reservoir geometries, possible large slide masses and high impact velocities. The resulting impulse waves can cause disaster due to run-up along the shoreline and overtopping of dams. The complexity of the phenomena posed formidable challenges to physical model experiments that encompassed laboratory set-up, measurement techniques and data analysis. The verified scaling law was based on the generalized Froude similitude. The granular rockslide impact experiments were conducted in a rectangular prismatic water wave channel. The slide impact characteristics were controlled by means of a novel pneumatic landslide generator, which allowed exact reproduction and independent variation of single dynamic slide parameters within a broad spectrum. The following four relevant parameters governing the wave generation were analyzed: granular slide mass, slide impact velocity, stillwater depth and slide thickness. The slope angle $\alpha = 45^\circ$, the slide granulate density $\rho_g = 2.64 \text{ t/m}^3$ and the grain diameter were not altered. State-of-the-art laser measurement techniques such as digital particle image velocimetry (PIV) and laser distance sensors (LDS) were applied to the decisive initial phase. The wave generation was characterized by an extremely unsteady three phase flow consisting of the slide granulate, water and air entrained into the flow. PIV provided instantaneous velocity vector fields in a large area of interest and gave insight into the kinematics of the wave generation process. Differential estimates such as vorticity, divergence, elongational and shear strain were extracted from the velocity vector fields. The fundamental assumption of irrotational flow in the Laplace equation was confirmed experimentally. At high impact velocities flow separation occurred on the slide shoulder resulting in a hydrodynamic impact crater, whereas at low impact velocities no flow detachment was observed. The hydrodynamic impact craters may be distinguished into outward and backward collapsing impact craters. The maximum crater volume, which corresponds to the water displacement volume, exceeded the landslide volume by up to an order of magnitude. The water displacement caused by the landslide generated the first wave crest and the collapse of the air cavity followed by a run-up along the slide ramp issued the second wave crest. The extracted water displacement curves may replace the complex wave generation process in numerical models. The recorded wave profiles were extremely unsteady and non-linear. Four wave types were determined: weakly non-linear oscillatory wave, non-linear transition wave, solitary-like wave and dissipative transient bore. Most of the generated impulse waves were located in the intermediate water depth wave regime. Nevertheless the propagation velocity of the leading wave crest closely followed the theoretical approximations for a solitary wave. Between 5 and 50% of the kinetic slide impact energy propagated outward in the impulse wave train. The main wave characteristics were related to the landslide parameters driving the

whole wave generation process. The subaqueous slide run-out, the water displacement and the main wave characteristics were all described by multiple regressions of the following three dimensionless quantities: the slide Froude number, the relative slide volume and the relative slide thickness. The slide Froude number was identified as the dominant parameter. The obtained predictive equations allow a rapid assessment of the threats posed by a possible event. A detailed investigation, however, would require a full numerical simulation including the lake bathymetry and the surrounding topography. The physical model results were compared to the giant rockslide generated impulse wave which struck the shores of the Lituya Bay, Alaska, in 1958. The measurements obtained in the physical model were in agreement with the in-situ data.

Zusammenfassung

Impulswellen in Seen und Stauseen, Meeresbuchten und Ozeanen entstehen hauptsächlich als Folge von Erdbeben und Uferinstabilitäten, Fels- und Bergstürzen sowie Gletscherabbrüchen und Schneelawinen. Für alpine Seen und Stauseen sind Impulswellen besonders relevant wegen den steilen Uferböschungen, geringen Seebreiten sowie möglichen grossen Rutschmassen und hohen Eintauchgeschwindigkeiten. Die auflaufenden Impulswellen können Uferbereiche verwüsten sowie an Talsperren überschwappen. Die Initialphase von Impulswellen mit dem Eintauchen der Rutschmasse und der Wellengenerierung sowie dem Nahbereich der Wellenausbreitung wurde in einem physikalischen Modell untersucht. Die Froude'sche Modellähnlichkeit wurde verifiziert und die Versuche in einem prismatischen Wellenkanal mit Rechteckquerschnitt durchgeführt. Die granularen Rutschmassen wurden mit einem eigens entwickelten pneumatischen Rutschgenerator auf die Eintauchgeschwindigkeit beschleunigt, womit eine nahezu exakte Reproduktion von Experimenten sowie eine unabhängige Variation einzelner Rutschparameter ermöglicht wurde. Untersucht wurde der Einfluss der folgenden vier Parameter: granuläre Rutschmasse, Eintauchgeschwindigkeit des Rutsches, Ruhewassertiefe und Rutschmächtigkeit. Der Böschungswinkel $\alpha = 45^\circ$, die Rutschgranulat-Dichte $\rho_g = 2.64 \text{ t/m}^3$ und der Korndurchmesser wurden nicht variiert. Die Impulswellengenerierung wird durch eine instationäre Dreiphasen-Strömung gekennzeichnet, bestehend aus dem Rutschgranulat und dem Wasser sowie eingetragener Luft. Particle image velocimetry (PIV) ermöglicht das grossflächige Erfassen von momentanen Strömungsfeldern im Eintauch- und Wellengenerierungs-Bereich. Rotations-, Divergenz- und Deformationsfelder wurden aus den momentanen Geschwindigkeitsfeldern berechnet. Die Strömung unter Impulswellen war weitgehend rotationsfrei und bestätigte experimentell diese grundlegende Annahme in der Laplace-Gleichung. Ein hydrodynamischer Eintauchkrater bildete sich bei hohen Eintauchgeschwindigkeiten als Folge der Strömungsablösung an der Schulter des Rutsches aus, während bei geringen Eintauchgeschwindigkeiten keine Strömungsablösung beobachtet wurde. Die hydrodynamischen Eintauchkrater können in nach innen und nach aussen kollabierende Krater unterteilt werden. Das maximale Kratervolumen, welches der Wasserverdrängung entspricht, überschreitet das Rutschvolumen je Einheitsbreite um bis zu einer Grössenordnung. Der erste Wellenkamm wurde direkt durch den eintauchenden Rutsch erzeugt, während das wiederholte Auf- und Zurücklaufen von Wassermassen auf der Böschung der Sturzbahn die nachfolgenden Wellen erzeugte. Die ermittelten Wasserverdrängungs-Ganglinien könnten als Anfangsbedingung für numerische Simulationen dienen – ohne dabei auf die Details der komplexen Wellengenerierung einzugehen. Die Wellenaufzeichnungen waren extrem instationär und nicht-linear. Vier Wellentypen wurden bestimmt: leicht nicht-lineare oszillierende Welle, nicht-lineare Übergangswelle, Soliton-ähnliche Welle und dissipative transiente Bore.

Typischerweise liegen Impulswellen im Übergangsbereich zwischen den Flach- und Tiefwasser-Regimen. Trotzdem konnte die Wellenausbreitungs-Geschwindigkeit des ersten Wellenkamms mit der Solitärwellen-Theorie beschrieben werden. Zwischen 5 und 50% der kinetischen Rutschenergie wurde beim Eintauchen in Wellenenergie umgewandelt. Die subaquatische Rutschauslauflänge, die Wasserverdrängung und die Wellenparameter wurden als Funktion der relevanten Rutschparameter dargestellt. Die folgenden dimensionslosen Parameter wurden berücksichtigt: Froude-Zahl des Rutsches, relatives Rutschvolumen und relative Rutschmächtigkeit. Die Froude-Zahl des Rutsches war dabei die dominante Grösse. Die ermittelten Dimensionierungsgleichungen ermöglichen eine Vorhersage möglicher Bedrohungen. Eine exakte Untersuchung einzelner Ereignisse erfordert eine numerische Simulation oder eine spezifische Modelluntersuchung unter Berücksichtigung der lokalen Topographie. Die Resultate der systematischen Modelluntersuchung wurden mit der grössten je auf-gezeichneten Impulswelle in der Lituya Bucht in Alaska 1958 verglichen. Die physikalischen Modellmessungen und die in-situ Daten zeigen eine erfreuliche Übereinstimmung.