

Diss ETH Nr. 15596

**Impulswellen:
Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe**

Abhandlung

zur Erlangung des Titels

Doktor der Wissenschaften

der

Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von

Andreas Zweifel

Dipl. Nat. ETH

20.03.1974

von Zürich und Haslen (GL)

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor, Referent

Prof. Dr. sc. techn. W.H. Hager, 1. Korreferent

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Martin, 2. Korreferent

ZUSAMMENFASSUNG

Impulswellen werden hauptsächlich in Alpenrandseen, Stauseen und steilufrigen Meeresbuchten durch eintauchende Fels- und Bergstürze, Erdbeben, Uferinstabilitäten, Schneelawinen und Gletscherabbrüche generiert. Derartige Wasserwellen ereignen sich daher oft unerwartet und stellen eine bedeutende Naturgefahr dar, weil sie oftmals ganze Uferbereiche verwüsten oder an Talsperren überschwappen. Aufgrund der steilen Uferpartien, geringen Seebreiten, potentiell grossen Rutschmassen und der andererseits vielfach exponierten Lage von Siedlungen und Wasserbauwerken ist das Risiko von Impulswellen im Alpenraum besonders hoch. Die Generierung von Impulswellen im Eintauchbereich des Rutsches und deren Propagation im Nahbereich der Wellengenerationszone wurden in einem zweidimensionalen physikalischen Modell untersucht. Die massgeblichen Rutscheigenschaften wie Form, Volumen und Eintauchgeschwindigkeit wurden durch einen Pneumatikgenerator mit eingebauter Rutschbox gesteuert, welche die granulare Rutschmasse in einen rechteckig-prismatischen Wellenkanal beschleunigte. Die Effekte der Eintauchgeschwindigkeit, der Rutschmächtigkeit, der granularen Rutschmasse und der Ruhewassertiefe auf die resultierende Impulsquelle wurden unabhängig voneinander untersucht. Einzig der Eintauchwinkel $\alpha = 45^\circ$ längs der Hangneigungsrampe des Rutsches und der granulare Korndurchmesser wurden nicht variiert. Die Wellenprofile wurden von sieben kapazitiven Wellenpegeln aufgenommen, welche längs der Kanalachse in konstantem Abstand hintereinander angeordnet waren. Das turbulente Dreiphasengemisch aus Luft, Wasser und eintauchendem Granulat in der Wellengenerationszone wurde mithilfe von *Particle Image Velocimetry* (PIV) festgehalten, einer nicht-intrusiven Methode zur Aufnahme von instantanen Fliessgeschwindigkeitsfeldern. Je nach Art der Phasentrennung wurden bei der Primärwelle drei unterschiedliche Wellengenerationstypen klassifiziert: auswärts kollabierender Einschlagskrater, rückwärts kollabierender Einschlagskrater und kompakte Zweiphasenströmung. Im allgemeinen wies die erste Welle des generierten Wellenzuges die grösste Amplitude auf, weil sie direkt durch den eintauchenden Rutsch und nicht wie die nachfolgenden Wellen durch wiederholtes Auf- und Zurücklaufen von Wassermassen an der Uferböschung erzeugt wird. Die beobachtete Primärwelle war vorwiegend nicht-linear und es konnten vier verschiedene Wellentypen unterschieden werden: Schwallwelle, Übergangswelle, oszillatorische Welle und Solitärwelle. Die Nicht-Linearität der resultierenden Wellen nahm hauptsächlich mit dem Verhältnis zwischen der relativen Rutschmächtigkeit und dem relativen Verdrängungsvolumen des Rutsches ab. Empirische

Korrelationen für die gemessene Relativamplitude der Primärwelle mit der Eintauch-Froudezahl, der relativen Rutschmächtigkeit, der relativen Rutschmasse und der Relativdistanz von der Eintauchstelle des Rutsches wurden erstellt. Mithilfe des Impulssatzes wurde unter anderem die dominante Abhängigkeit der maximalen Wellenamplitude von der Eintauch-Froudezahl nachgewiesen. Die beobachteten Impulswellen befanden sich typischerweise im Übergangsbereich zwischen Flachwasser- und Tiefwasserregime, wobei deren Ausbreitungsgeschwindigkeit jedoch mit guter Näherung durch die Solitärwellentheorie beschrieben wird. Die aus dem physikalischen Modell hergeleiteten Dimensionierungsgleichungen wurden anhand von Feldmessungen einzelner Prototypen getestet, woraus sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung ergab. Ausserdem wurden die Resultate aus den granularen Rutschversuchen auf Vergleichsmessungen mit starren Blöcken in demselben physikalischen Modell angewandt. Die resultierenden Abweichungen ergaben, dass starre und kompakte Blöcke beim Eintauchen in einen ruhenden Wasserkörper grössere Impulswellen als deformierbare und poröse Rutschkörper bei sonst identischen Rutschparametern erzeugen.

ABSTRACT

Impulse waves in reservoirs, alpine lakes and fjords are substantially generated by landslides, shore instabilities, snow avalanches, glacier and rock falls. The unexpected occurrence of such large water waves poses an inherent threat to cultivated areas which are mainly exposed to their high potential of destroying coastal regions and overtopping dams. Above all, alpine regions are significantly endangered because of steep shores, narrow reservoir geometries and potentially large slide masses close to settlements or hydropower plants. The generation of impulse waves within the area of slide impact and the near field propagation of the waves were investigated in a two-dimensional physical model. The prominent slide impact characteristics such as form, volume and slide impact velocity were controlled by a novel pneumatic landslide generator used to accelerate the granular slide mass into the rectangular prismatic water wave channel. The effects of slide impact velocity, slide thickness, granular slide mass and the stillwater depth on the resulting impulse wave characteristics were investigated independently of each other. In contrast, the effects due to the slide impact angle $\alpha = 45^\circ$ measured along the hillslope ramp and the constant grain diameter were not investigated. The transient wave profiles were recorded by seven successive capacitance wave gauges which were evenly spaced along the axis of the water wave channel. The propagating wave features were also observed by two video cameras positioned sideways from the channel axis. The wave generation process was accompanied by a turbulent multiphase mixture due to the air entrained by the granular slide impact onto the water. Digital *particle image velocimetry* (PIV) was applied as a non-intrusive method for the acquisition of the instantaneous flow features within the wave generation area. Three different wave generation types were distinguished with respect to the primary wave depending on the aspect of flow separation during the slide impact: outward collapsing impact crater, backward collapsing impact crater and unseparated flow. The first wave hump of the generated water wave train normally has the highest crest amplitude because it results directly from the slide impact. The following amplitudes were generally smaller as the secondary waves were caused by the intrinsic runup of water and subsequent flow reversal on the impact slope of the slide, respectively. Four distinct wave types were classified primarily due to the variable non-linearity of the leading impulse wave: non-linear transient bore, unsteady transition wave, weakly non-linear oscillatory wave and solitary wave. The wave non-linearity decreases essentially with growing relative slide thickness, inversely proportional to the relative displacement volume of the slide. The measured relative amplitude was empirically correlated

with the main slide parameters such as the impact Froude number, relative slide thickness, relative slide mass and the relative wave propagation distance from the point of slide impact. The predominant role of the impact Froude number due to the relative maximum amplitude of the primary wave was demonstrated by applying the two-dimensional impulse theorem to the simplified process of wave generation. Impulse waves were typically observed in the transition region between the definite shallow and deep water regimes of gravitational water waves, respectively. However, the propagation velocity of the resulting waves was approximately described by the idealized theory of a propagating solitary wave. Predictive equations based on modeling results were successfully applied to field measurements from selected prototypes. Furthermore, the empirical correlations deduced from granular slide impacts were compared with analogous experiments using rigid blocks in the present physical model. The resulting differences in relative amplitudes indicated that rigid and compact impact bodies generate larger impulse waves than porous and deformable slide masses impacting the water at otherwise identical conditions.