Diss. Nr. 6627

Schwallwellen in Seen als Folge von Felsstürzen

ABHANDLUNG

zur Erlangung der Würde eines
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
Andreas Huber
dipl. Bauingenieur ETH
geboren am 26. Juni 1938
von St. Gallen

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. D. Vischer, Referent
Prof. Dr. Th. Dracos, Korreferent

Zürich
1980

Zusammenfassung

An Seen mit steilen und instabilen Felsufern können, wie die Vergangenheit lehrt, Gesteinsmassen abstürzen und zerstörende Schwallwellen auslösen. Oft kündigt sich der drohende Sturz durch sichtbare Felsverschiebungen, Geräusche, Steingeriesel und durch Beunruhigungen in der Tierwelt an. In dieser Situation ist eine rasche und zuverlässige Prognose über das Ausmass der Sturzmasse, der möglichen Schwallwelle und der gefährdeten Ufer vordringend, damit die Bevölkerung rechtzeitig und sachlich informiert werden kann.

Bis heute stellte man auf spekulative und oft auch fragwürdige Mutmassungen ab oder es mussten in zeitraubender Arbeit spezifische Modelle gebaut und Versuche durchgeführt werden, ein Vorgehen, das oft wegen dem unmittelbar bevorstehenden Sturz nicht mehr in Frage kam. Grundlagenversuche zur Erzeugung felssturzbedingter Schwallwellen wurden wohl in Rinnen unter stark idealisierten Annahmen durchgeführt. Sie ergaben jedoch Wellen, die in ihren Dimensionen der Wirklichkeit kaum entsprechen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stützen sich auf zahlreiche Modellversuche, welche teilweise in einer Rinne und teilweise in einem Becken mit seitlicher Ausbreitungsmöglichkeit der Wellen durchgeführt wurden. Die Modellstürze bestanden, gleich wie beim Trümmerstrom eines natürlichen Sturzes, aus einem Gemisch von feineren und gröberen Komponenten.

Die Untersuchungen beschränken sich auf Wellen, die durch den Impulsaustausch verhältnismässig kleiner Gesteinsmassen auf die Wasserkörper der Seen ausgelöst werden. Bergstürze, die einen erheblichen Teil des Seevolumens verdrängen, frei fallende kompakte Massen, Gletscherabbrüche und Schneelawinen in Seen liegen ausserhalb des Rahmens dieser Arbeit. Tiefer gehende Fragen zur Felssturzgeologie werden ebenfalls nicht behandelt.

Die Randbedingungen eines Sturzes in einen See lassen sich durch 5 Parameter beschreiben, nämlich: Verdrängungszahl,

Froude-Zahl des Sturzes, Sturzbahnneigung, Ausbreitungsweg und Ausbreitungswinkel der gemessenen Wellen. Die Ergebnisse umfassen die dimensionslosen Kennzahlen der Wellen wie relative Höhe, relative Länge, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Periode, Ursell-Zahl, ferner die Charakterisierung der Wellenform, Massen-, Impuls- und Energieverhältnis zwischen bewegter Wassermasse und Sturzmasse.

Die Versuchsauswertung führte zu folgenden Erkenntnissen über die wichtigsten Zusammenhänge zwischen Parametern und Ergebnissen:

- Die Verdrängungszahl bestimmt massgebend die relative Wellenhöhe. Der Zusammenhang lässt sich durch ein einfaches Potenzgesetz ausdrücken. Bei kleinen Verdrängungszahlen entstehen niedrige Sinuswellen, die sich als Wellengruppe ausbreiten. Stürze mit grösseren Verdrängungszahlen lösen eine Gruppe höherer Wellen aus, deren Form sichtbar von der Sinuslinie abweicht. Die vorauseilende erste Welle überragt die nachfolgende Gruppe deutlich, breitet sich rascher aus als diese und weist eine cnoidale Form auf. Bei noch grösseren Verdrängungszahlen entstehen Einzelwellen, deren Höhe bis an die Stabilitätsgrenze gegen Brechen reichen kann.

- Die Froude-Zahl des Sturzes ist der dimensionslose Ausdruck der Eintauchgeschwindigkeit. Bei grossen Froude-Zahlen ist der Einfluss auf die Wellenhöhe nur noch gering. Hierfür gibt es zwei Erklärungen:

  Während der Beschleunigung auf hohe Geschwindigkeiten flachen die Stürze ab und dehnen sich in der Fallrichtung aus. Der Impulsaustausch während des Eintauchens erstreckt sich trotz grösserer Eintauchgeschwindigkeit über eine längere Zeitspanne als bei langsamen Stürzen.

  Je höher die Eintauchgeschwindigkeit, desto grösser sind relative und absolute Anteile der Turbulenz an der gesamten Sekundärenergie und desto kleiner ist der relative Anteil der Wellenenergie. Die absolute Wellenenergie nimmt mit zunehmenden, hohen Eintauchgeschwindigkeiten nur schwach zu.

- Die Sturzbahnneigung beeinflusst die Wellenhöhe insofern, als sie die Grösse der reibungserzeugenden Normalkraft des Sturzes auf seiner Bahn bestimmt. Auf stark fallenden Bahnen verliert der Sturz weniger Energie durch Reibung, er kommt später zum Stillstand und wandelt mehr Energie in Wellen um. Grosse Sturzmassen tauchen bei geringen Sturzbahnneigungen und geringen Seetiefen nur unvollständig ein.

- Mit dem Ausbreitungsweg klingen die Wellen ab, wobei die hohen Einzelwellen verhältnismässig langsamer abflachen als die niederen Sinuswellen. Wellenlänge und Wellenperiode nehmen annähernd nach einem Potenzgesetz zu. Die Wellensteilheit dagegen verringert sich nach einem Potenzgesetz. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfront hängt von der Seetiefe und bei hohen Wellen zusätzlich von der Wellenhöhe ab.

- Steht den Wellen der Freiheitsgrad seitlicher Ausbreitung zur Verfügung, so breiten sie sich im Halbkreis aus. Zentrum ist die Eintauchstelle. In der Hauptimpulsrichtung, der Richtung des Sturzes, sind die Wellen am höchsten. Sie klingen gegenüber 2-dimensionalen Wellen stärker ab. Seitwärts, entlang dem Ufer streichend, sind sie mehrfach niedriger, verlieren jedoch langsamer von ihrer ursprünglichen Höhe.

An Hand der vorliegenden Ergebnisse lassen sich die Kennwerte der Schwallwellen, welche durch drohende Felsstürze in Seen erzeugt werden könnten, berechnen und voraussagen. Beigefügte praktische Beispiele erläutern die Anwendung der Berechnungsgrundlagen. Frühere Naturbeobachtungen an Schwallwellen erlaubten eine Verifizierung berechneter Kennwerte.

Résumé

L'expérience passée montre que des masses rocheuses instables peuvent se détacher des berges fortement inclinées bordant les lacs et engendrer ainsi des ondes de translation dévastatrices. Fréquemment, la menace d'un éboulement peut être reconnue par la détection de bruits, de mouvements de la roche, de ruissellements de matériau fin et par l'observation d'un comportement anormal de la faune. Il est alors primordial de pouvoir établir sans délai un pronostic correct sur le volume de l'éboulement en question, sur l'ampleur de l'onde à attendre et sur les rives menacées, afin que la population puisse être informée à temps d'une manière efficace.

Jusqu'à ce jour, les prévisions faites ont reposé souvent sur des bases spéculatives et discutables, ou alors la réalisation d'essais sur des modèles spécifiques a dû être entreprise. Ce dernier procédé, exigeant un travail considérable, n'a par manque de temps pas toujours pu être utilisé. Des recherches à caractère fondamental sur les ondes provoquées par l'éboulement de rochers ont certes été faites en canal. Les hypothèses par trop idéalisées admises pour ces essais ont conduit cependant à l'étude d'ondes dont les dimensions ne correspondent guère à la réalité.

Les résultats du présent travail ont été acquis au cours d'un programme important d'essais sur modèle réalisés soit en canal, soit dans un bassin permettant la propagation latérale des ondes. La masse d'éboulement en modèle était constituée, comme on peut le remarquer en nature, d'un matériau présentant un mélange de composantes fines et grossières.

Les investigations se sont limitées aux ondes créées par l'échange de quantité de mouvement consécutif à l'impact de masses rocheuses relativement petites sur le plan d'eau du lac. Les éboulements montagneux susceptibles de combler une partie importante du volume du lac, les ruptures de glaciers

et les avalanches de neige dans les lacs n'ont pas été prises ici en considération.

Les conditions liées à un éboulement rocheux dans un lac peuvent être décrites au moyen de 5 paramètres adimensionnels, à savoir: le paramètre du liquide déplacé, le nombre de Froude de l'éboulement, l'inclinaison de la rive, la distance respectivement l'angle de propagation des ondes mesurées. Les résultats contiennent également les caractéristiques adimensionnelles des ondes, telles que la hauteur et la longueur relatives, la vitesse de propagation, la période, le nombre d'Ursell, la forme de l'onde, les rapports de masse, de quantité de mouvement et d'énergie entre la masse d'eau mise en mouvement et la masse de l'éboulement. La mise en valeur des essais a permis de faire les constatations suivantes quant aux relations existant entre les paramètres et les résultats:

- La hauteur relative de l'onde engendrée est déterminée en premier lieu par le paramètre du liquide déplacé. La dépendance existante est exprimable par une simple loi de puissance. Aux petites valeurs de ce paramètre correspondent des ondes sinusoïdales de relativement faible amplitude qui se propagent en groupe. A des valeurs plus élevées, des éboulements engendrent un groupe d'ondes relativement plus grandes dont la forme s'écarte clairement de la ligne sinusoïdale. L'onde primaire dépasse nettement en ampleur les ondes du groupe qui la suit et se propage plus rapidement que celles-ci. Sa forme est cnoïdale. Lorsque la valeur du paramètre du liquide déplacé devient encore plus grande, une onde solitaire se forme, sa hauteur relative pouvant atteindre la limite de la stabilité au déferlement.

  Le nombre de Froude de l'éboulement est une expression adimensionnelle caractérisant la vitesse d'immersion. A nombres de Froude élevés, l'influence sur la hauteur relative de l'onde devient peu marquée. Deux explications sont alors possibles:

Pendant l'accélération jusqu'aux grandes vitesses, le matériau composant l'éboulement s'aplatit en s'étalant dans la direction du déplacement. L'échange de quantité de mouvement lors de l'immersion, malgré une vitesse plus élevée, s'effectue sur un laps de temps plus long que dans le cas d'un éboulement lent. Les parts relative et absolue de la turbulence dans l'énergie secondaire globale augmentent avec la vitesse d'immersion,de sorte que la contribution relative à l'énergie d'onde diminue. L'énergie d'onde absolue n'augmente ainsi que faiblement avec une augmentation des hautes vitesses d'immersion.

- L'inclinaison de la rampe d'éboulement influence la hauteur d'onde relative, dans la mesure où elle détermine la grandeur de la force normale du frottement de l'éboulement le long de la trajectoire. Sur des pentes très inclinées, l'éboulement perd moins d'énergie par frottement, s'immobilise plus tard et transforme ainsi plus d'énergie en ondes. Des grandes masses d'éboulement ne sont immergées que partiellement en cas de faible pentes de la rive et de faibles profondeurs d'eau du lac.

- Les ondes s'atténuent lorsque la distance relative de propagation augmente. Les grandes ondes, du type de l'onde solitaire, décroissent relativement plus lentement que les ondes sinusoïdales de petite amplitude. Les longueurs d'onde relatives, resp. les périodes relatives croissent sur la distance relative de propagation selon une loi de puissance à exposant négatif. La pente de l'onde diminue également le long du chemin de propagation selon une loi de puissance. La vitesse de propagation du front de l'onde dépend de la profondeur du lac et, pour les grandes ondes, de la hauteur d'onde relative.

- Si les ondes disposent du degré de liberté d'une propagation latérale, alors celles-ci se propagent en un demi-cercle dont le centre coïncide avec l'emplacement d'immer-

sion. Les ondes ont la plus grande amplitude dans la direction de l'éboulement, à savoir dans la direction où la quantité de mouvement est la plus importante. Elles s'atténuent plus fortement que des ondes à 2 dimensions. Sur les côtés, le long de la rive, les ondes ont une amplitude d'un ordre de grandeur plus faible mais ne perdent cependant leur hauteur initiale que plus lentement.

Sur la base des présents résultats d'essais, les caractéristiques des ondes de translation qui pourraient être engendrées par l'éboulement de masses rocheuses dans un lac, ont pu être calculées et prévues à l'avance. Des exemples pratiques facilitent l'application de la méthode de calcul.

Summary

History has shown us that on lakes with steep and instable rocky shores, rock masses can collapse into the lake and induce destructive impulse waves. Often the threatening rockslide is announced by visible rock displacements, noises, tumbling stones and unease among animals. In this situation a fast and accurate forecast of the dimensions of rock masses, the possible impulse waves and the threatened lake shore, is imperative in order to give early warning to the population.

Until recently, forecasts were speculative and often based on dubious suppositions. Alternatively, time-consuming specific hydraulic models had to be built and advance tests had to be undertaken. This is not always practicable due to the urgency of a situation. In fact, basic model tests to generate rock-slide induced waves were performed in flumes where the assumptions are very idealized. Waves resulting from these tests rarely agree with reality.

The results of the present work, based on a series of model tests which were carried out partially in a flume and partially in a tank, incorporated the possibility of lateral wave-propagation. The masses of the model slides consisted, as does the debris flow of a natural rock-slide, of a mixture of fine- and coarse-grained components.

The investigations were limited to waves induced by the momentum exchange of rock masses which were relatively small compared to the body of water in the lake. Landslides displacing a considerable part of the water volume and ice- and snow-avalanches are beyond the scope of this work.

The boundary conditions of a slide are defined by 5 dimensionless parameters: A parameter of displacement, the Froude number of the slide, the slope of the slide, the distance and the angle of wave propagation. The results include the following dimensionless numbers: relative wave height, relative wave length, wave steepness, velocity of propagation, period,

Ursell parameter, mass relations, the momentum and energy between moved water masses and slide masses, and finally the wave shape.

Interpretation of the test results led to the following conclusions on the most important relations between parameters and results:

- The relative height of the generated waves is determined decisively by the displacement parameter. The relation can be described by a potential law. At small displacement numbers, relatively small sinusoidal waves are generated, propagating in a group. Slides with larger displacement numbers induce a group of higher waves, whose shapes differ visibly from the sinusoidal shape. The advancing first wave clearly towers above the waves of the following group, propagates more quickly and has a cnoidal shape. At large displacement numbers a solitary wave is induced whose relative height can reach the limit of stability against breaking.

  The Froude number of the slide is the dimensionless expression of impact velocity. At large Froude numbers the influence on relative wave height is only small. There are two reasons for this:

  During acceleration to high velocities, the slides become flatter and stretch in the direction of movement. The exchange of momentum during impact extends over a longer time interval even though the velocity is higher.

  The higher the impact velocity, the higher are the relative and absolute parts of turbulence in the total secondary energy and the smaller is the relative part of wave energy. Therefore, the absolute wave energy decreases slightly with increasing high impact velocities.

- The slope of a slide influences the relative wave height in that it determines the magnitude of the friction-induced normal force between the slide and its course. On steep

slopes the slide loses less energy by frction, it takes longer to come to a standstill and converts more energy into waves. At small water depths and low slopes, large slide masses only partially submerge.

- With increasing relative propagation distance the wave height decreases. High waves of the solitary wave type become flat more slowly than low sinusoidal waves. The relative wave length and the relative period increase with an approximate potential law along the direction of propagation. The velocity of the wave front depends on the water depth and, for high waves, also on the relative wave height.

- If there exists a degree of freedom for lateral wave propagation, the waves spread out in semicircles with centre at the point of impact. In the main direction of momentum, which is the direction of the slide, the waves are highest. They decrease more quickly than 2-dimensional waves in a flume. Sideways, along the shore, the waves are several times lower, however they lose height more slowly.

With the help of the results of this study, characteristic numbers for impulse waves, generated by rockslides moving into lakes, can be computed and forecasted. Practical examples are included in the annex to facilitate application of the design principles.