

**AUFLAUFEN UND ÜBERSCHWAPPEN
VON IMPULSWELLEN
AN TALSPERREN**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH



vorgelegt von
DIETER RAINER MÜLLER
Dipl. Bauing. ETH
geboren am 14. April 1960
von Lengnau AG

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. D. Vischer
Prof. R.O. Sinniger
Dr. A. Huber

KURZFASSUNG

Fels- und Eisstürze, Rutschungen, Lawinen, Gletscherkalbungen und Erdbeben können in Speicherbecken Impulswellen auslösen. Das Auflaufen dieser Wellen an den Böschungen und das Überschwappen an der Sperre sind wesentliche Punkte der Talsperrensicherheit. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auflauf- und Überschwappvorgängen von Impulswellen, die anhand physikalischer Modelle und Naturereignisse analysiert worden sind.

Die Impulswellen gehören in der Wellentheorie zu den Schwerewellen mit Perioden zwischen 20 Sekunden und einigen Minuten. Es sind Wellen im Übergangsbereich oder im Seichtwasserbereich, wo die Wellenlänge grösser als die doppelte Wassertiefe ist. Im allgemeinen sind es nicht-lineare Wellen, deren maximale Amplitude an der Front oder innerhalb der ersten drei Wellenperioden liegt. Ihr Spektrum bewegt sich zwischen Einzelwelle und disperser Wellengruppe mit sinusförmigen Wellen. Dieser Wellentyp unterscheidet sich also grundlegend von jenem periodischer Windwellen, die dem Tiefwasserbereich zuzuordnen sind.

Die Auflaufprozesse

Die Auflaufprozesse von Impulswellen aus Massenstürzen lassen sich am ehesten mit dem Auflaufen von Tsunamis vergleichen. Die Wellen brechen an den untersuchten Sperren kaum: sie laufen an den Sperrenneigungen 1:0 und 1:1 als sog. Reflexionsbrecher ("surging breaker") oder an Neigungen von 1:3 in wenigen Fällen in einer Übergangsform ("collapsing breaker") auf.

Mit der Methode der Dimensionsanalyse und der multiplen Regression gelingt es für den untersuchten Gültigkeitsbereich im zweidimensionalen Fall eine geschlossene Beziehung herzuleiten zwischen der Auflaufhöhe und den vier relevanten Parametern: Böschungsneigung, Wassertiefe, Wellenhöhe, Wellenlänge. Eisdecken bis zu 50 cm Dicke dämpfen die Wellen kaum und reduzieren die Auflaufhöhe nicht. Die Beckentopographie beeinflusst die Auflaufhöhen an der Sperre massgebend: bei seitlich 3:4-geneigten Hangböschungen liegen die Auflaufhöhen an den Flanken um 20-30% höher als in der Sperrenmitte.

Die Überschwapphöhen und -mengen

Überschreitet die auflaufende Welle das Freibord, so schwappt sie unter teilweiser Reflexion über. Die Überschwapphöhen über der Sperrenkrone sind stets kleiner als die Auflauhöhe und nehmen mit grösserer Freibordhöhe ab. Die Überschwappmengen wachsen naturgemäss mit den Überschwapphöhen.

Normiert man die erste Welle der Wellenzüge mit der maximalen Wellenamplitude und der Periode, so resultiert innerhalb derselben Versuche beim Überfall und im ungestörten Kanalbereich ein nahezu identisches Wellenbild, das für Impulswellen charakteristisch ist.

Der Überschwappvorgang von Impulswellen darf als quasistationärer Wehrabfluss über eine Sperre behandelt werden, und die Überschwappmenge lässt sich in Abhängigkeit der maximalen Auflauhöhe, der Freibordhöhe und des quasistationären Abflusses über eine vertikale Sperre ohne Freibord darstellen. Es wird eine Formel entwickelt, die es ermöglicht die Überschwappmenge anhand der Wellenparameter, der Wassertiefe und der Sperrengometrie zu berechnen.

Gefahrenszenarien

Abschliessend wird ein Konzept zur Abschätzung der Gefahrenszenarien möglicher Impulswellen vorgeschlagen. Mit den erarbeiteten Grundlagen wird an zwei praxisnahen Beispielen die praktische Anwendung erklärt.

RESUME

Les éboulements de roches ou de glace, les glissements de terrain, les avalanches de neige, le vèlage de glaciers et les tremblements de terre peuvent engendrer des ondes de translation dans les bassins de retenue. La montée des eaux (déferlement) sur les talus et leur déversement sur le couronnement du barrage, consécutifs à la formation de ces ondes, sont des facteurs importants influençant la sécurité de l'ouvrage. Le présent travail est consacré à l'étude de ces processus, qui ont été analysés à l'aide de modèles physiques et d'observations faites en nature.

Les ondes de translation appartiennent à la catégorie des ondes de gravité, avec des périodes allant de 20 secondes à quelques minutes. Elles se

développent en eau peu profonde, où leur longueur d'onde est supérieure à deux fois la profondeur d'eau, et également dans le domaine de transition menant en eau profonde. En général, il s'agit d'ondes non linéaires, dont l'amplitude maximale est située sur le front ou à l'intérieur des trois premières périodes. Leur spectre s'étend de l'onde solitaire au groupe d'ondes quasi sinusoïdales. Ce type d'ondes est ainsi fondamentalement différent de celui des ondes périodiques dues au vent, qui se rattachent au domaine des eaux profondes.

Déferlement des eaux sur les talus dû à l'impact des ondes de translation

En ce qui concerne les ondes de translation produites par l'éboulement de masses dans une retenue, le processus de déferlement des eaux sur les talus peut être comparé à celui qui caractérise les tsunamis. Les ondes observées ne se brisent pas au contact de l'obstacle. Elles s'élèvent puis sont réfléchies lorsque la pente du talus varie entre 1:0 et 1:1 ("surging breaker" ou "déferlement frontal"). Avec la pente 1:3, elles peuvent se trouver dans un état transitoire ("collapsing breaker") entre ce déferlement frontal et le déferlement plongeant.

En appliquant les méthodes de l'analyse dimensionnelle et de la régression multiple, il a été possible, dans le domaine de validité étudié et pour le cas bidimensionnel, de trouver une relation d'ensemble entre la surélévation des eaux et les quatre paramètres déterminants, à savoir la pente du talus, la profondeur d'eau initiale, l'amplitude et la longueur de la vague. Une couverture de glace allant jusqu'à 50 cm d'épaisseur n'amortit guère les ondes et ne réduit pas la surélévation des eaux. Par contre, la topographie du bassin de retenue influence notablement cette dernière grandeur au front d'un barrage: avec une pente des berges latérales de 3:4, la surélévation des eaux est de 20 à 30 % plus grande au voisinage des appuis que dans l'axe de l'ouvrage.

Hauteurs et débits de déversement

Si la vague monte au-delà de la hauteur de revanche, elle se déverse sur le couronnement du barrage tout en subissant une réflexion partielle. Les hauteurs de déversement sont toujours plus faibles que la surélévation des eaux. Elles diminuent lorsque la revanche est plus grande.

En normalisant la première onde des trains d'ondes par l'amplitude maximale et par la période, on obtient, à l'intérieur des mêmes essais, une

image identique des ondes sur le déversoir et dans la zone d'approche encore non perturbée à l'amont du barrage, fait caractéristique des ondes de translation.

Le déversement d'ondes de translation peut être considéré comme l'évacuation d'un débit quasi stationnaire sur le couronnement du barrage. Ce déversement est exprimé en fonction de la surélévation maximale des eaux, de la hauteur de revanche et du débit quasi stationnaire évacué sur un barrage vertical à hauteur de revanche nulle. Une formule, permettant de calculer le débit de déversement à partir des paramètres des ondes, de la profondeur d'eau et de la géométrie du barrage, a été développée.

Appréciation des risques à attendre

Un concept permettant d'apprécier les risques provoqués par la formation d'ondes de translation dans une retenue est finalement présenté. L'application pratique des données de base mises à disposition est montrée à l'aide de deux exemples concrets.

ABSTRACT

Impulse waves can be generated by rockfalls, landslides, snow and ice avalanches, calving of glaciers and earthquakes. Wave run-up on shores and dam overtopping are fundamental points of consideration for dam safety. The following work deals with run-up and overtopping due to impulse waves, which are analysed using physical models and by observation of natural incidents.

Impulse waves belong, according to the wave theory, to the family of gravity waves with periods between 20 seconds and several minutes. Impulse waves travel in transitional or shallow water. Their wave lengths are at least twice the water depth. Generally they are nonlinear with the maximum amplitude occurring at the wave front or within the first three wave periods. Their spectrum is between that of a solitary wave and disperse wave groups of sinusoidal waves. The wave type differs substantially from that of wind waves which occur in deep waters.

Wave run-up

The run-up process of impulse waves generated by mass movements can be compared with the runup of tsunamis. The waves seldomly break on the investigated dam embankments: they run up on slopes of 1:0 and 1:1 as "surging breakers" and on a slope of 1:3 in some cases as "collapsing breakers".

Using dimensional and multiple regression analysis for the examined range of validity it was possible to derive a closed function between the run-up and the four relevant parameters: dam slope gradient, water depth, wave height and wave length.

Ice coverings of up to 50 cm thickness do not dampen the impulse waves nor do they reduce their run-up. The topography of the reservoirs influences run-up at the dam wall decisively: the run-up in a dam with valley slopes of 3:4 is 20-30% higher at the flanks than in the middle part of the dam wall.

Wave overtopping: height and quantity

If wave run-up exceeds the freebord then the wave overtops and also reflects partially. The overtopping heights are always less than the run-up heights and reduce with increasing freebord. Naturally the overtopping volumes increase with overtopping height.

If the front wave of the impulse waves is standardized by means of the maximal amplitude and its period, identical waves patterns result at the overtopped dam wall as in the undisturbed water zone. This is a characteristic of impulse waves.

The complex overtopping process of impulse waves can be considered as a phenomenon similar to the discharge over a weir with a changing water depth as a function of time. The overtopping volume is a function of maximal run-up height, the freebord and the quasi-stationary flow over a vertical weir without freebord. A formula has been developed to calculate the overtopping volume depending of the wave parameters, the water depth and the geometry of the dam.

Danger scenarios

Finally a concept to estimate the possible danger presented by impulse waves is proposed. The practical application of this estimation method is shown using two examples of realistic problems encountered.