

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 84 (1992)
Heft: 5-6

Artikel: Auswirkungen von Schwallwellen auf Stauanlagen
Autor: Müller, Dieter / Huber, Andreas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940556>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Auswirkungen von Schwallwellen auf Stauanlagen

Dieter Müller, Andreas Huber

Zusammenfassung

Ausgehend von der Charakterisierung der Wellen, die als Folge von Fels- und Eisstürzen, Rutschungen, Lawinen, Kalbungen oder Erdbeben entstehen, werden die möglichen Gefahren bei alpinen Stauanlagen aufgezeigt. Verschiedene Methoden, die es erlauben, die Schwallwellen abzuschätzen, werden vorgestellt und auf drei konkrete Beispiele (Grimsel-West, Gelmer, Räterichsboden) angewandt. Am Schluss wird auf laufende Forschungsarbeiten zum Thema Auflauf- und Überschwappvorgänge an Sperrten hingewiesen und ein Ausblick auf noch ungelöste Fragen gegeben.

Résumé: Les effets des ondes de translation sur les barrages

Les dangers auxquels sont soumis les bassins de retenue alpins en cas d'éboulements de roches ou de glace, de glissements de terrain, d'avalanches de neige, du dévalage d'un glacier ou de tremblements de terre, sont montrés sur la base des caractéristiques des ondes engendrées. Différentes méthodes d'estimation de ces ondes de translation sont décrites et appliquées à trois cas concrets pour les retenues de Grimsel-West, de Gelmer et de Räterichsboden. Pour conclure, des travaux de recherche en cours traitant de la montée des eaux et de leur déversement sur le couronnement des barrages, respectivement un aperçu des problèmes encore à résoudre, sont présentés.

Summary: The effects of impulse waves on storage reservoirs

Based on the characterization of waves which are produced by rock- and icefalls, landslides, snow-avalanches, calving of glaciers or earthquakes, the resulting dangers to alpine reservoirs are shown. Different methods to estimate the impulse waves are presented and illustrated by three case studies (Grimsel-West, Gelmer, Räterichsboden). Finally, a reference to current research on the runup and overtopping phenomenon at dams is made and an overview of as yet unsolved problems is presented.

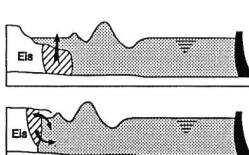
Felsstürze/Rutschungen



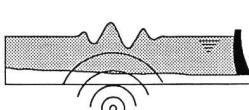
Lawinen/Eisstürze



Eiseinbrüche



Kalben von Gletschern



Erdbeben



Bild 1. Auslösemechanismen von Schwallwellen.



Bild 2. Schwallwelle infolge eines Felssturzes: Die bei einer Sprengung im Steinbruch Kehrsiten (10.3.1982) in den See stürzenden Felsmassen verursachten eine Grundwelle (Foto Hügli Sprengtechnik AG, Bern).

1. Schwallwellen in Seen

Auslösemechanismen

Schwallwellen in Stauseen werden durch Naturereignisse verschiedenster Art ausgelöst. Ursachen sind dabei sich bewegende Gesteins-, Schnee-, Eismassen. Die möglichen Ereignisse lassen sich systematisch anhand von Bild 1 darstellen und sollen hier kurz beschrieben werden:

- Bei den *Felsstürzen/Rutschungen*, die oberhalb oder unterhalb des Wasserspiegels in Bewegung geraten, kommt es infolge der Wasserverdrängung und/oder eines Impulsaustausches zwischen Gestein und Wasser zur Bildung von Wellen (Bild 2).
- *Lawinen und Eisstürze* haben ihren Ausgangspunkt immer oberhalb des Wasserspiegels. Sie treffen je nach Jahreszeit auf eine vereiste Seeoberfläche und durchschlagen diese oder laufen darauf aus.
- *Eiseinbrüche* sind Ereignisse, die vor allem bei stark vereisten Seen in engen Tälern zur Wellenbildung führen können. Überbrückende Eisdecken können infolge einer Schwächung oder zusätzlicher Belastung (Schnee, Regen) bei sinkendem Seespiegel plötzlich einstürzen.
- *Gletscher*, die in Kontakt mit Stauseen stehen, können als Folge des Ungleichgewichts der Kräfte kalben. Im Falle einer Auftriebskalbung schwimmt die Gletscherzunge unter der Bildung grosser Turbulenzen auf, im Falle einer Abbruchkalbung gleiten oder stürzen die Eisteile in den See.
- *Lokale Erdbeben*, die auf eine vertikale, impulsartige Verschiebung des Seegrundes zurückzuführen sind, können ein wiederholtes, flutartiges Ansteigen des Wasserspiegels zur Folge haben.

Charakteristik der Wellen

Die aus den geschilderten Ereignissen hervorgegangenen Wellen gehören in der Wellentheorie zu den impulsartigen Schwerewellen mit Perioden zwischen 20 Sekunden und einigen Minuten. Sie liegen im Bereich der sogenannten Übergangs- bis Seichtwasserwellen (Wellenlänge $> 2 \cdot$ Wassertiefe) und können nur im Falle kleiner Amplituden (Wellenhöhe \ll Wellenlänge, Wassertiefe) mit der linearen Wellentheorie behandelt werden. Im allgemeinen handelt es sich dabei aber um nichtlineare Wellen, deren maximale Amplitude an der Front oder innerhalb der ersten drei Wellenperioden liegt. Der Wellentyp bewegt sich im Spektrum zwischen Einzelwelle und nahezu sinusförmiger Wellengruppe. Er unterscheidet sich grundlegend von demjenigen periodischer Windwellen mit Perioden von wenigen Sekunden und zu den sogenannten Tiefwasser- oder Oberflächenwellen gehörend. Die charakteristischen Parameter der Schwallwellen sind: Wellenhöhe/-amplitude, -länge und Wassertiefe. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist unter anderem von der Wassertiefe abhängig.

Gefahren

Die Schwallwellen können Stauanlagen, deren Benutzer und Unterlieger beträchtlich gefährden (Bild 3). In Anbetracht der Tatsache, dass zukünftig viele Becken infolge eines energiewirtschaftlich bedingten Pumpspeicherbetriebes häufiger die Stauzielkote erreichen, steigt die Wahrscheinlichkeit des Überschwappens an der Talsperre. Während der Wellenauflauf sich auf den Speicherraum begrenzt, können über die Krone oder Hochwasserentlastung schwappende Wassermengen neben der Beschädigung baulicher Anlagen auch eine Hochwassergefahr für das unterliegende Tal bedeuten. Erdbeben, Fels-/Eisstürze und Kalbungen sind eher seltene Ereignisse. In schneereichen Wintern gehen aber Dutzende von Lawinen in Stauseen nieder. Im Hinblick auf solche Schwallwellen ist es unerlässlich, Schutzraumkoten in den Staubecken festzulegen, um potentiellen Schäden vorzubeugen. Neben der statischen Seespiegelerhöhung infolge der Wasserverdrängung ist auch die dynamische Seespiegelerhöhung infolge der Wellenbildung zu berücksichtigen. In den Wintermonaten kann für lawinengefährdete Becken eine zeitlich abgestufte Erhöhung des Freibordes vorgesehen werden. Inter-

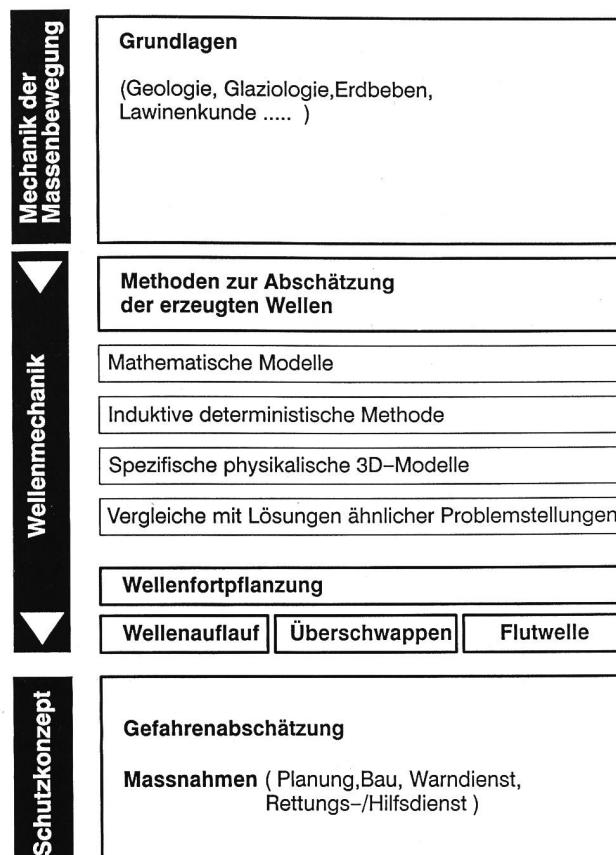


Bild 4. Schema einer Gefahrenanalyse.

essenkonflikte zwischen Energieproduktion und Sicherheit verlangen eine möglichst genaue Abschätzung der notwendigen Spiegelabsenkung.

2. Methoden zur Abschätzung der Gefahren

Die Ausgangslage zur Abschätzung von Schwallwellen als Folge der betrachteten ausserordentlichen Ereignisse wird bestimmt durch Art, Form und Grösse der drohenden Massenbewegung und des Seebeckens. Je weniger genau diese Ausgangsdaten abschätzbar sind, um so zweckmässiger ist es, im Sinne einer Sensitivitätsanalyse die verschiedenen Parameter bezüglich des Einflusses auf die erzeugte Schwallwelle zu untersuchen.

Die zahlreichen Abschätzmethoden sind im konkreten Fall in Anbetracht der vielen Randbedingungen und vereinfachenden Annahmen stets auf ihre Anwendbarkeit zu überprüfen. Aus den erwähnten Gründen liefern diese Methoden nicht genaue Werte, sondern können blos Grössenordnungen abstecken. Meistens reicht dieses Vorgehen aus, um die allfällig drohende Gefahr zu erkennen und geeignete Schutzmassnahmen vorzuschlagen.

Zur Gefahrenanalyse ist im wellenmechanischen Teil ein dreistufiger Weg (Bild 4) zu durchlaufen.

Die Wellenerzeugung als Folge der sich bewegenden Masse stellt den ersten Problemkreis dar. Entscheidend sind dabei vor allem die Art des Eintauchvorgangs und die Energieumwandlung, d.h. die Aufteilung der Bewegungsenergie in Wellenenergie und turbulente Reibungsverluste. Grundsätzlich stehen die vier in Bild 4 dargestellten Methoden zur Verfügung, um im konkreten Fall die Wellenkenngrössen abzuschätzen. Die nachfolgend erwähnten Forschungsarbeiten mit Literaturhinweis sind in [1] ausführlich beschrieben.

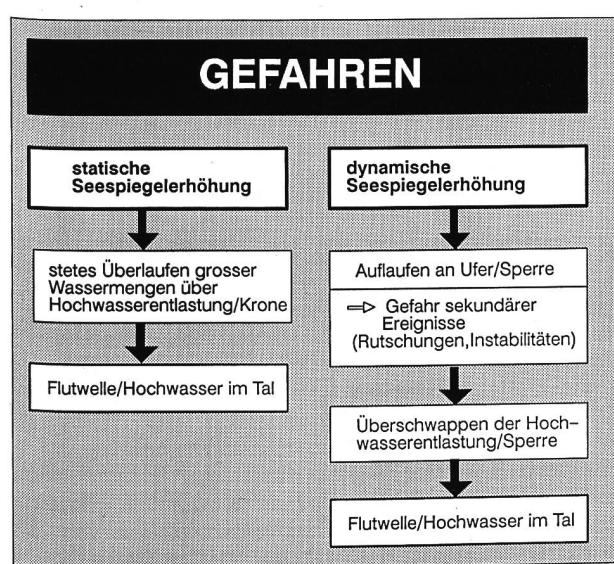


Bild 3. Auswirkungen der Schwallwellen in Stauseen.

Die *mathematischen Modelle* entstanden anhand physikalischer Gesetze unter idealisierten und vereinfachenden Annahmen. Sie basieren ursprünglich auf zweidimensionalen Betrachtungen. *Noda, Wiegel, Kuba, Gee* und *Tornberg* entwickelten auf der Basis der linearen Wellentheorie eine Abschätzmethode zur Bestimmung der maximalen Wellenhöhe im Spektrum zwischen oszillierenden Wellen und Einzelwellen. In Laborversuchen bestätigten sie die theoretische Abhängigkeit der Wellenamplitude von der Froude-Zahl der Massenbewegung. *Raney* und *Butler* entwickelten parallel zu einem dreidimensionalen physikalischen Modell ein numerisches Modell, welchem das Kontinuitätsgesetz und die Navier-Stokes-Gleichungen für eine inkompressible Flüssigkeit und vernachlässigbarer vertikaler Geschwindigkeitskomponente zugrunde liegen. Für die erste Welle lieferte dieses zufriedenstellende Resultate. *Kouitasens* Modell stellt auf die Gleichungen von de Saint-Venant ab. Die Untersuchungen beziehen sich auf einen prismatischen Kanal und wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gelöst. *Chaudhry, Mercer* und *Cass* entwickelten mit Hilfe eines physikalischen Flussmodells ein numerisches Modell, das ebenfalls auf den De-Saint-Venant-Gleichungen beruht, welche aber mit der Finite-Differenzen-Methode gelöst wurde. *Pugh* und *Chiang* bauten das Modell von *Raney* und *Butler* auf drei Dimensionen aus. *Towson* und *Kaya* nahmen zur Verifikation ihrer dreidimensionalen Modellversuche ein numerisches Modell zur Hilfe, das auf tiefengemittelten Gleichungen beruhte. Letztere wurden mit der Charakteristikenmethode gelöst. *Gozali* und *Hunt* entwickelten ein reines numerisches Näherungsmodell für nichtlineare, nicht-disperse lange Wellen in einem Kanal. *Villeneuve* und *Savage* schlossen in die Boussinesque-Gleichungen die variable Sohlentopographie ein.

Die *induktiven deterministischen Methoden* beruhen auf der Dimensionsanalyse und den aus Modellversuchen gewonnenen empirischen Formeln. *Wiegel* simulierte Unterwasserrutschungen mit Blöcken, die er auf einer geneigten Fläche oder vertikal in eine Rinne gleiten liess. Mit ähnlichen Experimenten klassierte *Prins* die entstehenden Wellen (oszillierende Wellen, Einzelwelle gefolgt von disperser Wellengruppe, Einzelwelle mit getrennt folgender Wellengruppe, komplexer Wellenzug von Einzelwellen). *Miller* studierte die Wellen, die entstehen, wenn eine vertikale Platte in einem Kanal horizontal verschoben wird. *Law* und *Brenner* zeigten, dass die maximale Wellenamplitude vom Volumen pro Breiteneinheit, von der (Tiefe)³ und von der Froude-Zahl des Sturzes abhängen. Die Dimensionsanalyse von *Kamphuis* und *Bowering* und deren Modellversuche ergaben eine deutliche Abhängigkeit der Wellenkenngrössen von der kinetischen Energie und der Froude-Zahl des Sturzes. *Slingerland* und *Voight* fanden mit dem Abgleiten von kleinen Massenpaketen in ein breites Reservoir, dass die Wellenamplitude primär vom Verdrängungsvolumen des Sturzes abhängt. *Huber* modellierte erstmals den Massensturz als Granulat und nicht als kompakte Masse. Die generierten Wellen stimmen mit den Wellentypen von *Prins* überein. Die Wellenhöhen hängen in Form einer Potenzfunktion vom Verdrängungsvolumen, vom Neigungswinkel der Sturzbahn und von der Distanz zum Sturzort ab. Zusätzliche Versuche im Becken (dreidimensionaler Fall) machen die Abhängigkeit der Wellenhöhe von der Ausbreitungsrichtung deutlich. *Vilas* Versuche in einer Rinne zeigten, dass die Wellenhöhen bei Lawinen auch von der Froude-Zahl der Massenbewegung abhängen.

Die für konkrete Stauanlagen zu erstellenden *physikalischen, dreidimensionalen Modelle* sind zwar in der Herstellung aufwendig, können aber bei einer Vielzahl von Ver-

suchsvarianten, bei komplizierter Topographie des Seebuckets oder nicht idealisierbaren Eintauchstellen der Lawinen/Felsstürze die Besonderheiten der Massenbewegung sowie der Wellen infolge Refraktion, Diffraktion und Reflexion erfassen, was mit mathematischen Modellen noch unzureichend möglich ist.

Eine vierte Methode zur Abschätzung drohender Wellen ist der *Vergleich mit den vorhandenen Lösungen ähnlicher Problemstellungen oder mit Beobachtungen an Naturereignissen*. Dabei werden Ähnlichkeiten zur Topographie, zum Eintauchvorgang und -ort und zur Masse zu andern Untersuchungen gesucht. Die gewonnenen Resultate lassen sich zur Abschätzung von Grössenordnungen heranziehen. Hilfreich für eine treffsichere Anwendung dieser Abschätzmethode ist die Erfahrung im Umgang mit solchen Fragestellungen.

Sind die wichtigsten Wellenkenngrössen einmal abgeschätzt, so erfolgt in einem zweiten Schritt die Berechnung der Wellenausbreitung bis zu den gefährdeten Ufern und zur Talsperre. Die Wellen verändern ihre Kenngrössen und Richtungen mit der Wassertiefe (Refraktion), am Beckenrumpf (Reflexion, Diffraktion) und mit dem Ausbreitungswege (Dämpfung) je nach Wellentyp. Die Mehrheit der oben erwähnten Untersuchungen befassen sich auch mit der Wellenausbreitung.

Der Wellenauflauf an natürlichen Ufern und an Talsperren sowie allfällige Überschwappvorgänge an der Hochwasserdienstlastung, über den Staudamm oder die Staumauer stehen im Vordergrund des Interesses. Erst diesbezügliche Kenntnisse lassen ein richtiges Einschätzen drohender Gefahren zu und ermöglichen die Durchführung gezielter Schutzmassnahmen. Beide Vorgänge sind abhängig von der Wellenamplitude, der Wellenhöhe und der Wellenlänge, der örtlichen Topographie, der Form und Beschaffenheit der Auflaufläche und vom Freibord. Mögliche Flutwellen im untenliegenden Tal stützen sich auf die Abflussganglinie der überschwappenden Wassermengen.

3. Beispiele konkreter Anlagen und Projekte

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ist seit den frühen siebziger Jahren wiederholt zur Beratung in bezug auf Schwallwellen in Seen [2, 3, 4, 5, 6] beigezogen worden. Die Frage nach den drohenden Gefahren infolge niedergehenden Eises, Schnees oder Fels (Gefahrenzone, maximale Auflauhöhen, notwendiges Freibord zur Verhinderung des Überschwappens) wurden mit verschiedenen Methoden (Kapitel 2) gelöst. Im folgenden wird an drei neueren Beispielen das Vorgehen aufgezeigt, und es werden die Resultate diskutiert.

Kalbungen im projektierten Speicher Grimsel-West

Durch die geplante Erhöhung des Stauziels im heutigen Grimselsee wird an dessen oberem Ende der Unteraargletscher auf eine Länge von 800 m eingestaut. Dies führt zum Wegschmelzen und Aufschwimmen der Gletscherzunge und nachher zu Kalbung an der Front, mit entsprechendem Rückzug des Gletschers. Die Kalbung von grossen Eismassen in einen See erzeugt Schwallwellen, die für ufernahe Zonen und den Staumauerbereich gefährlich sein können. Ziel der Untersuchungen war es, die Grösse der Kalbungs- wellen zu bestimmen und eine sichere Freibordhöhe gegen Überschwappen festzulegen. Glaziologische Vorabklärungen [4, 5] ergaben eine breite Palette möglicher Eisabbrüche, die im länglichen und leicht S-förmig gewundenen Speicher simuliert werden mussten. Da nur wenige Erfahrungen über Kalbungswellen existieren, wurden die Unter-

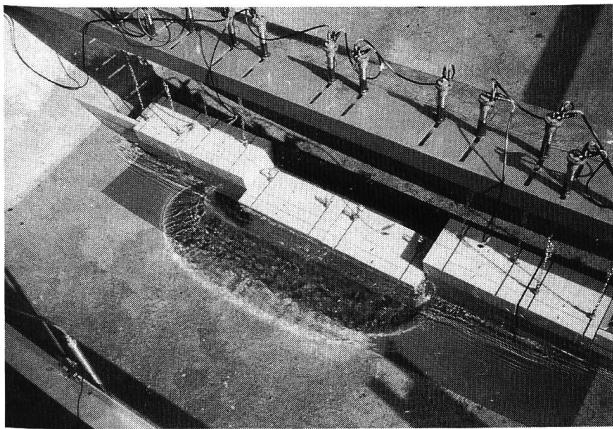


Bild 5. Abbruchkalbung im physikalischen Modell Grimsel-West: Blick auf die simulierte Kalbungsfront und die erzeugte Schwallwelle.

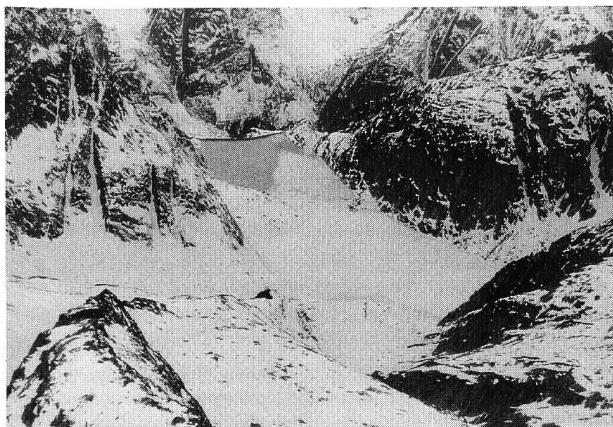


Bild 6. Blick von der Sturzbahn der Alplibach-Lawine auf den Gelmersee.



Bild 7. Blick auf das rechte Widerlager der Räterichsbodenmauer und den Kegel der einmündenden Gärstenbachlawine. Die Lawine durchbrach die Eisdecke und führte zur Wellenbildung, was an der Auflauhöhe an den Ufern sichtbar wurde.

suchungen in einem dreidimensionalen Modell im Massstab 1:250 (Methode 3 gemäss Bild 4) durchgeführt. In über 250 Versuchen wurden Kalbungsmasse und -form sowie die Abbruchstelle und -art variiert. Dabei zeigte sich, dass im Falle einer Auftriebskalbung von bis zu 25 Mio m³ Eis ein Freibord von 3 m an der 4,3 km entfernten Bogenmauer gegen Überschwappen genügt. Die Abbruchkalbung (Bild 5) mit Blockgrössen von 75 000 m³ bis 1 Mio m³ Eis erzeugt im Vergleich dazu trotz viel geringeren Massen wesentlich grössere Wellen. Die gefährdeten Zonen sind die gegen die Widerlager der Bogenmauer zulaufenden Buchten. Die extremsten Wellen von 9 m Höhe beim Entstehungsort erreichen Auflauhöhen von 1,7 m in Mauermitte und über 3 m an den Flanken der Mauer. Umfassenderes über diese Versuche finden sind in [4, 5, 6].

Lawinenniedergänge in den Stausee Gelmer

Das Ziel einer Untersuchung (Methoden 2 und 4 gemäss Bild 4) über die Schwallwellen als Folge verschiedener Lawinenniedergänge in den hinteren Beckenteil des Stausees Gelmer (Bild 6) war eine fundierte Festlegung des notwendigen Sicherheitsfreibordes [7]. Die 1,5 km von der Gewichtsmauer entfernten, in den eher flachen See (Tiefe 30 m) auslaufenden Lawinenbahnen erlaubten es, die Wellen mit Hilfe der Resultate aus zwei- und dreidimensionalen, systematischen Modellversuchen [8] abzuschätzen. Die Wertung der Resultate erfolgte mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse. Angenommen wurde eine Bemessungslawine von rund 150 000 m³, die mit einer Geschwindigkeit von 28 bis 38 m/s in den hinteren Teil des Sees eintaucht. Die abgeschätzte Wellenhöhe von 6,6 m nahe der Eintauchstelle klingt bis zur Mauer auf maximal 1,1 m ab. Aus den Erkenntnissen von Grimsel-West [6] konnte für die Auflauhöhe an Mauermitte eine Höhe von 1,2 m abgeschätzt werden. In beiden Randzonen, wo die Hochwasserüberfälle angeordnet sind, ist mit 4,8 m hohen Wellen zu rechnen. Das aus Gründen statischer Seespiegelerhöhung erforderliche Freibord von 4,7 m vermag dem Anlauf der Welle weitgehend zu genügen. Das allfällig kurzzeitige Überschwappen an den um 0,5 m tiefer als die Krone liegenden Überfällen bei den Widerlagern gefährdet die Stauanlage und das untenliegende Tal nicht. Hingegen ist es ratsam, den Uferbereich und die Krone der Staumauer in aussergewöhnlichen Lawinensituationen als Gefahrenzone zu sperren.

Lawinenniedergang in den Stausee Räterichsboden

Die Beurteilung dynamischer Lawineneinwirkungen auf den Stausee Räterichsboden war Ziel der Studie [9]. Diese stellt auf Vergleiche mit publizierten Untersuchungen und vereinfachte Modellversuche ab (Methoden 3 und 4 gemäss Bild 4). Die massgebende Gärstenbachlawine mündet am rechten Ufer unmittelbar bei der Sperre in den See (Bild 7). Die Primärwelle wurde aufgrund verschiedener Schneemengen, Frontgeschwindigkeiten, unter Annahme der Sturzbahn, der Seetopographie und der Seevereisung abgeschätzt. Da im Falle von Fließlawinen kein sicheres Rechnungsverfahren existiert, die Wellenhöhen zu bestimmen, wurden die brauchbaren Resultate einer Zusammensetzung untersuchter Schwallwellen entnommen. Die Vergleiche zeigten, dass maximale Wellenamplituden im Räterichsbodensee bei der Staumauer auf mindestens 6 bis 8 m anzusetzen sind. Vereinfachende Modellversuche im Massstab 1:250 – Mauerlänge und Seetiefe entsprachen näherungsweise natürlichen Gegebenheiten, die Sturzbahngeometrie wurde grob modelliert und die Lawinengeschwindigkeit simuliert – ergaben für ein Freibord von 7 m

ähnliche Resultate: Die Eisschollen aus Polypropylen-scheiben wurden auf die Mauerkrone und in geringem Ausmass auch darüber hinwegbefördert. Im Hinblick auf das Festlegen der Freiborde wurden vier Gefährdungsstufen ausgeschieden. Daraus ergibt sich für das Freibord eine Bandbreite von 6 bis 10 m.

4. Aktuelle Forschungsarbeiten

Die sich bei verschiedenen Stauanlagen stellende Frage nach der notwendigen Freibordhöhe veranlasste die VAW zu weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet. Ziel der aktuellen Studien ist es, qualitative und quantitative Berechnungsgrundlagen über die Phänomene Auflaufen und Überschwappen von Schwallwellen an Sperren bereitzustellen. Die Auswirkungen bevorstehender Ereignisse lassen sich damit besser abschätzen. In einem Kanal werden Auflaughöhen und überschwappende Wassermengen von Schwallwellen an einer Mauerkrone gemessen und ausgewertet. Einflüsse von Buchten bei den Widerlagern einer Sperre auf die Wellen sowie die Übertragbarkeit der Resultate zweidimensionaler Versuche auf die räumlichen Gegebenheiten werden in einem vereinfachten dreidimensionalen physikalischen Modell untersucht.

5. Ausblick

Trotz den heute verfügbaren allgemeinen Berechnungsgrundlagen sind spezifische physikalische Modellversuche nicht unentbehrlich geworden. In einzelnen Fällen liegen die natürlichen Verhältnisse ausserhalb der Gültigkeitsgrenze der Berechnungsgrundlagen oder die unregelmässige Topographie [3, 9] lässt eine idealisierte Simulation nicht zu. Gedacht sei etwa an weit verzweigte Seebecken oder an geringe Seetiefen, wo nur ein Teil der Masse eintauchen kann und wo die Schwallwellen brechen. Ein naturgetreues Relief ist auch dort unbedingt erforderlich, wo die Schwallwellen genauer ermittelt werden sollen [2, 6]. Numerische Modelle vermögen trotz Vielseitigkeit noch nicht zu befriedigen. Sie greifen wegen der komplexen Problemstellungen oft auf Vereinfachungen zurück oder lösen

nur Teilprobleme. Die Zulässigkeit der Vereinfachungen an den Eingabedaten ist nur am physikalischen Modell durch Eichmessungen kontrollierbar. Von Bedeutung sind die räumlichen Auswirkungen der Topographie auf die Wellenausbreitung, die oft andere Detailfaktoren dominieren. Dieser Modellentwicklung ist in Zukunft vermehrt Beachtung zu schenken.

Neben ungelösten strömungsmechanischen Problemen (Energiedissipation bei der Wellenauslösung, Mechanik brechender Wellen) gilt es zukünftig auch zu speziellen Fragen (Einfluss der Seevereisung auf die Wellenausbreitung, Stürze und Wellen in seichten Seen) Lösungen zu finden.

Literaturverzeichnis

- [1] Sander, J.: «Weakly nonlinear unidirectional shallow water waves generated by a moving boundary», VAW-Mitteilung Nr. 105, 1990.
- [2] Huber, A.: «Schwallwellen in einem See als Folge eines Felssturzes. Modellversuche zur Voraussage der Auswirkungen des Absturzes einer Gesteinsmasse in den Walensee», Interprävent 1975, Innsbruck.
- [3] Volkart, P.: «Talsperren-Überschwappvorgänge infolge von Lawinen- und Einstiedergängen in alpinen Staubecken», Interprävent 1975, Innsbruck.
- [4] Funk, M.; und Müller, D.: «Waves induced by calving of Unteraargletscher», IAHR 1990, Espoo, Finnland.
- [5] Vischer, D.; Funk, M.; Müller, D.: «Interaction between a reservoir and a partially flooded glacier: problems during the design stage», ICOLD 1991, Wien.
- [6] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bericht Nr. 990, «Untersuchung der Kalbungswellen im hydraulischen Modell des Staubeckens Grimsel-West», im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli AG, Sept. 1990 (unveröffentlicht).
- [7] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bericht Nr. 4028, «Beurteilung der dynamischen Lawineneinwirkungen für die Stauanlage Gelmer», im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli AG, Nov. 1990 (unveröffentlicht).
- [8] Huber, A.: «Mögliche Auswirkungen von Schneelawinen und Gletscherabbrüchen auf künstliche und natürliche Seen», Interprävent 1984, Villach.
- [9] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bericht Nr. 973, «Beurteilung der dynamischen Lawineneinwirkungen für die Stauanlage Räterichsboden», im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli AG, Sept. 1988 (unveröffentlicht).

Adresse der Verfasser: Dieter Müller, dipl. Bauing. ETHZ, und Dr. Andreas Huber, dipl. Bauing. ETHZ, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, CH-8092 Zürich.

Auslegung von Hydraulikkomponenten von Tiefseemaschinen unter hohem Umgebungsdruck

Werkstoffe werden unter hohem Umgebungsdruck komprimiert, wodurch sich ihre geometrischen Abmessungen verringern. Dieses führt dazu, dass sich die Spaltweiten von Kolben/Bohrungs-Systemen ändern, wenn sie aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sind. Bei früheren Versuchen mit Hydraulikkomponenten im Tiefseesimulator sind mehrfach Funktionsausfälle eingetreten. Solche Ausfälle sind vermeidbar, wenn die durch Umgebungsdruck und -temperatur verursachten Werkstoffkompressionen schon in der Fertigung der Bauteile durch grössere Spaltweiten bzw. durch besser geeignete Werkstoffkombination von Aussen- und Innenteil berücksichtigt werden.

Untersuchungen an der Universitäts-Gesamthochschule Siegen bestanden aus experimentellen Arbeiten und der

Entwicklung theoretischer Ansätze für die Auslegung von Hydraulikkomponenten. Die dafür notwendige Messtechnik musste neu erarbeitet werden. Das Ergebnis, dass jeder Körper unter dem Einfluss des hohen Umgebungsdruckes gleichmässig schrumpft, wonach er sich selbst in allen geometrischen Abmessungen ähnlich bleibt, führte zu einem Rechenmodell, das es gestattet, mittels eines Druckkoeffizienten für die wichtigsten Konstruktionswerkstoffe Passungsanalysen durchzuführen. Die Konsequenzen aus dem gefundenen Bauteil- und Systemverhalten führen zu speziellen Konstruktionsregeln des Tiefseemaschinenbaus, deren Beachtung im Hinblick auf Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit von Tiefseemaschinen sehr zu empfehlen ist. Dies gilt auch für die Auswahl am besten geeigneter Werkstoffe, die nicht nur nach den Kriterien von Preis, Gewicht und Korrosionsbeständigkeit zu treffen ist.

Institut für Konstruktion der Universitäts-Gesamthochschule Siegen, Prof. Dr.-Ing. W. Schwarz, Postfach 101240, D-5900 Siegen, Tel. 0271/740-4625.