

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 94 (2002)  
**Heft:** 9-10

**Artikel:** Erdbeben und Talsperren  
**Autor:** Wieland, Martin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-939655>

### **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:** 22.02.2026

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

## Zusammenfassung

Die Auswirkungen von Starkbeben der Jahre 1999 bis 2001 auf Talsperren sowie das Erdbebenverhalten grosser Schüttdämme und Betonmauern infolge historischer Starkbeben werden diskutiert. Die Erdbebenrichtlinien, die in den vergangenen Jahren vom Erdbebenkomitee (Committee on Seismic Aspects of Dam Design) der Internationalen Talsperrenkommission (ICOLD) erarbeitet wurden, werden kurz vorgestellt. Im Weiteren wird das aktuelle Pflichtenheft des ICOLD-Erdbebenkomitees diskutiert, welches folgende Themen enthält:

- I Erdbebensicherheit bestehender Talsperren
- II Seismische Interpretation von Messdaten
- III Erdbeben, die durch den Stausee ausgelöst werden (Reservoir-triggered Seismicity oder kurz RTS)
- IV Aspekte des Erdbebenrisikos von Talsperren

Die Aktivitäten des Erdbebenkomitees auf dem Gebiet der Erdbebensicherheit von Talsperren werden aufgeführt, und eine Liste der Erdbeben Themen, die bei Talsperren in Zukunft bearbeitet werden sollten, wird gegeben. Die Bedeutung der Erdbebensicherheit grosser Talsperren wird im Zusammenhang mit dem umfassenden Talsperrensicherheitskonzept diskutiert. Zudem wird auf die Notwendigkeit der Starkbebeninstrumentierung von Talsperren hingewiesen.

## Abstract

*The effects of recent earthquakes on dams are presented and the observed historical earthquake behaviour of large embankment and concrete dams is summarized. The guidelines published recently by the Committee on Seismic Aspects of Dam Design of the International Commission on Large Dams (ICOLD) are presented, and the Committee's terms of reference are discussed. They include the following topics:*

- I Seismic safety of existing dams;*
- II Seismic interpretation of integrated observation data;*
- III Reservoir-triggered seismicity; and*
- IV Seismic risk determination and related techniques.*

*Furthermore, the current activities of the Committee in the field of earthquake safety of dams are discussed. A list of subjects on dams and earthquakes, which need further attention in the future, is given.*

*The importance of earthquake safety of large dams is presented in the general context of dam safety. Furthermore, the need for strong motion instrumentation of large dams is emphasized.*

## 1. Auswirkungen der Erdbeben der Jahre 1999 bis 2001 auf Talsperren

Die folgenden Erdbeben hatten Auswirkungen auf Dämme und Staumauern:

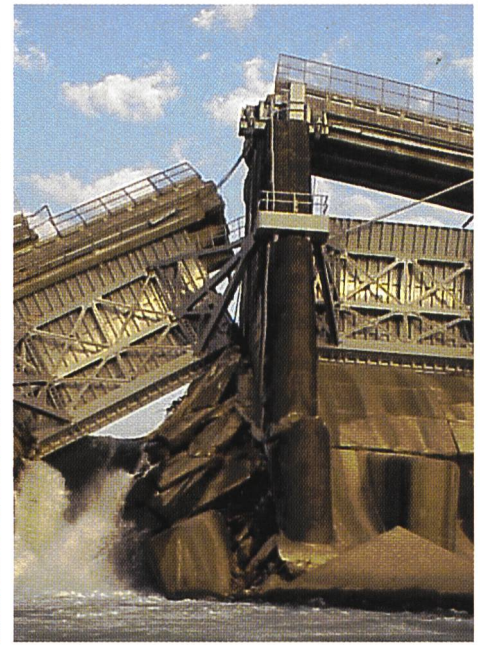
- I 17. August 1999 Kocaeli-Erdbeben, Türkei, Magnitude  $M = 7,4$  und 12. November 1999 Duzce-Erdbeben,  $M = 7,2$ :
- Von den 53 Schüttdämmen, darunter befanden sich auch der 108,5 m hohe Kirazdere- und der 61 m hohe Gokce-Damm, die sich im Nahbereich des Kocaeli-Bebens befanden, wurden keine sicherheitsrelevanten Schäden gemeldet. Setzungen und Risse wurden jedoch beobachtet. Keiner dieser Dämme war mit Starkbebengeräten instrumentiert.

- Während des Duzce-Bebens wurden Spitzenbeschleunigungen von bis zu 0,8 g gemessen.
- II 21. September 1999, Chi-Chi-Erdbeben, Taiwan,  $M = 7,6$  (Bild 1):
- Zwei Wehröffnungen des 25 m hohen Shih-Kang-Wehres wurden durch vertikale Relativverschiebungen von 7,7 m entlang der Chelungpu-Verwerfung, welche die Fundation dieses 357 m langen Wehres durchquert (Wehr mit 18 Wehröffnungen), zerstört. Der Stausee hat ein Volumen von 3,4 Millionen  $m^3$ . Dieser wurde vollkommen entleert. Aufgrund des beschränkten Maximalabflusses durch die beiden zerstörten Wehröffnungen entstanden jedoch im Unterlauf des Da-Jia Flusses keine Überschwemmungsschäden.
- In Schüttdämmen wurden Setzungen, Verformungen und Risse beobachtet. Beim 96 m hohen Liyutan-Damm, der 1992 fertiggestellt wurde und der sich ca. 7 km nördlich vom Shih-Kang-Wehr be-

findet, wurden in der Dammfundation Spitzenbeschleunigungen von 0,1 g gemessen. Die Erschütterungen verursachten maximale Setzungen und Horizontalverschiebungen des Dammes von ca. 10 cm. Zudem wurde ein Querriss beobachtet, und die Sickerwassermenge erhöhte sich nach dem Erdbeben um ca. 15%. Das Erdbebenverhalten des Liyutan-Dammes war für den Autor von grossem Interesse, da er seinerzeit bei der Erdbebenbemessung mitgewirkt hat (Shi, Towhata und Wieland, 1989).

- Maximale Bodenbeschleunigung in nächstgelegener Ortschaft des Shih-Kang-Wehres: 0,57 g.
- III 6. Oktober 2000, Western-Tottori-Erdbeben, Japan,  $M = 6,6$ :
- In der Fundation der 49 m hohen Kasho-Gewichtsmauer wurde eine maximale Bodenbeschleunigung von 0,53 g gemessen und auf der Mauerkrone ein Maximalwert von 2,1 g. An der Mauer entstanden keine Schäden.
- Maximale Bodenbeschleunigungen im Epizentralbereich: 0,6–0,8 g.
- IV 26. Januar, 2001 Bhuj-Erdbeben, Gujarat, Indien,  $M = \text{ca. } 7,9$  (Bild 2):
- Etwa 200 Schüttdämme (vorwiegend homogene Erddämme) mit einer Höhe von weniger als 30 m müssen aufgrund der beobachteten Schäden in den nächsten Jahren verstärkt werden.
- Etwa 18 grössere Schüttdämme von Bewässerungsprojekten wurden infolge Verflüssigung der Dammmaterialien stark beschädigt. Die Mehrzahl der Dämme wurde vor dem Eintreffen des Monsuns behelfsmässig repariert, indem die Risse mit Erdreich aufgefüllt wurden.
- Die Stauseen waren zur Zeit des Erdbebens praktisch leer, was den Bruch der stark beschädigten Dämme verhindert hat. Würde sich ein ähnliches Ereignis nach den Monsunregenfällen ereignen, dann wären bedeutend schwerere Schäden zu erwarten.
- Von diesem Erdbeben gibt es keine Starkbebenaufzeichnungen, es ist deshalb auch nicht bekannt, welchen Erschütterungen die stark beschädigten Dämme ausgesetzt waren.
- V 24. März 2001 Hiroshima-Erdbeben, Japan,  $M = 6,4$ :
- In 184 Erdbauten (Dämme für Bewässerungsanlagen und Verkehrswege, Deiche





**Bild 1. Schäden am Shih-Kang-Wehr in Taiwan, welche im Bereich des rechten Widerlagers durch vertikale Relativverschiebungen von 7,7 m entlang der Chelungpu-Verwerfung, während des Chi-Chi-Erdbebens vom 21. September 1999 in Taiwan, entstanden. Abgescherter Wehrpfeiler neben den zerstörten zwei Wehröffnungen.** (Fotos: P. F. Foster und R. Charlwood)

usw.) wurden Risse und Setzungen beobachtet.

- Nach dem Beben wurden 132 Talsperren kontrolliert, es wurden keine Schäden festgestellt.
  - In der Fundationsgalerie der Norogawa-Staumauer wurde bei diesem Beben eine maximale Beschleunigung von 0,18 g gemessen und auf der Mauerkrone ein Wert von 1,49 g.
  - Maximale Bodenbeschleunigungen im Epizentralbereich: 0,5–0,7 g.
- VI 23. Juni 2001, Erdbeben in Südperu, Peru,  $M = 8,4$ :
- Setzungen, Deformationen, Risse und Bodenverflüssigungseffekte wurden vereinzelt in Dämmen und dem feinkörnigen Abraummateriale von Bergwerken (Tailings Dams) beobachtet.

## 2. Erdbebenverhalten grosser Talsperren

Das Erdbebenverhalten der grossen Talsperren kann aus der bisherigen historischen Erfahrung wie folgt zusammengefasst werden:

### I Generelles Verhalten:

- Während Erdbeben sind bisher sehr wenige grosse Talsperren beschädigt worden.
- Ungefähr 10 Talsperren haben bis heute während eines Erdbebens versagt. Dabei handelte es sich vorwiegend um so genannte Tailings Dams, die feinkörnige Materialien und Schlamm aus dem Bergbau zurückhalten, sowie um so genannte «Hydraulic Fill»-Dämme, eine Konstruktionsart, die heute kaum noch verwendet wird und in der Schweiz nie gebraucht wurde.

- Nur eine kleine Anzahl grösserer Schüttdämme und Gewichts- und Pfeilerkopfmauern wurde beschädigt.
  - Bisher ist in der Literatur kein Fall bekannt, wo durch das erdbebenbedingte Versagen einer modern konzipierten Talsperre Menschen an den Folgen einer Flutwelle umgekommen sind. Hingegen sind beim Bruch von Tailings-Dämmen während Erdbeben mehrere Personen umgekommen.
- II Beobachtetes Erdbebenverhalten von Schüttdämmen:
- Moderne und nach dem Stand der Technik projektierte und gebaute Schüttdämme haben sich während der bisherigen Erdbeben bewährt.
  - Homogene Dämme aus verdichteten tonhaltigen Materialien haben sich gut ver-



**Bild 2. Risse in wasserseitiger Böschung und im Kronenbereich von zwei Schüttdämmen, die während des Bhuj-Erdbebens vom 26. Januar 2001 in Indien beschädigt wurden.** (Fotos: Prof. S. K. Jain)



halten, da diese kaum Höhen von 50 m überschreiten.

- Steinschüttdämme und Dämme mit einer wasserseitigen Betonabdichtung haben sich bisher gut verhalten.
  - Ungenügend verdichtete Dämme aus Sand oder Silt, Dämme mit feinkörnigen und schlammhaltigen Bergbauabfällen und eingespülte Dämme haben ein ungenügendes Erdbebenverhalten gezeigt (Setzungen, Verflüssigungserscheinungen usw.).
- III Beobachtetes Erdbebenverhalten von Staumauern:
- Bogenmauern haben sich bisher ausserordentlich gut bewährt, aber gleichzeitig muss hinzugefügt werden, dass bisher nur sehr wenige Bogenmauern wirklich starken Erdbeben ausgesetzt waren. Beispiele sind die Pacoima-Bogengewichtsmauer in Kalifornien, die 1971 (San-Fernando-Erdbeben) und 1994 (Northridge-Erdbeben) starken Erschütterungen mit maximalen Bodenbeschleunigungen in der Grössenordnung von 0,5 g ausgesetzt war. Die Schäden an der Mauer waren gering, aber der Stauseespiegel war in beiden Fällen relativ tief. Starken Erdbebenerschütterungen war 1985 auch die Rapel-Bogenmauer in Chile ausgesetzt, die nur geringfügige Schäden verursachten.
  - Gewicht- und Pfeilerkopfmauern haben sich im Allgemeinen gut verhalten.
  - Die Schäden am Shih-Kang-Wehr (1999 Chi-Chi-Erdbeben, Taiwan, Bild 1) haben gezeigt, dass Staumauern kaum gegen Relativverschiebungen in der Fundation von mehreren Metern bemessen werden können.

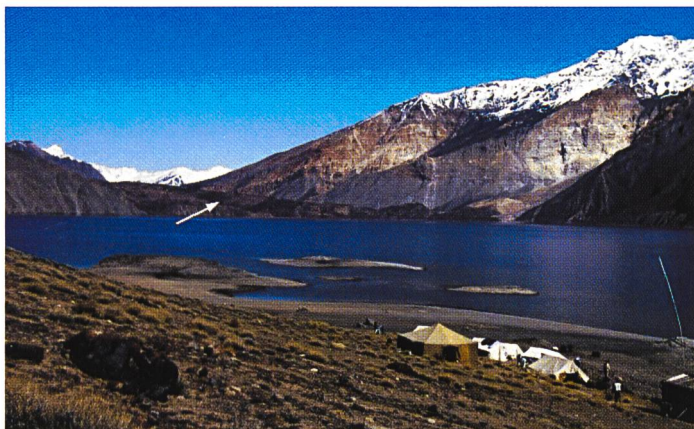
Zahlreiche Fallstudien über beobachtete Erdbebenschäden an grossen Talsperren können dem kürzlich erschienenen ICOLD Bulletin 120 (ICOLD 2001) entnom-

men werden. Die markantesten Objekte und Fallstudien sind die folgenden:

- I *Grösster Damm*: Der weltweit mit Abstand grösste Damm ist der Usoi-Damm in Tajikistan, der eine maximale Höhe von ca. 650 m hat und 1911 während eines starken Erdbebens durch einen Felssturz entstanden ist (Bild 3). Das Volumen dieses natürlichen Dammes beträgt ca. 2 km<sup>3</sup>. Der Usoi-Damm staut den Lake Sarez mit einem Inhalt von 17 km<sup>3</sup> und einer maximalen Wassertiefe von rund 600 m. Auch während dem Chi-Chi-Erdbeben 1999 ist durch einen grösseren Felssturz ein natürlicher Damm entstanden. Die Mehrzahl solcher Dämme wird jedoch in relativ kurzer Zeit zerstört.
- II *Durch Stausee ausgelöste Erdbeben (RTS)*: Die 102 m hohe Koyna-Gewichtsmauer in Indien und die 104 m hohe Hsinfengkiang-Pfeilerkopfmauer in China wurden durch Erdbeben mit Magnituden von 6,5 (1967) bzw. 6,1 (1962) beschädigt. Es wird vermutet, dass beide Beben durch das Auffüllen des Stausees ausgelöst wurden. Die beobachteten Schäden im oberen Teil der beiden Mauern waren einerseits auf konstruktive Mängel (abrupte Steifigkeitsänderungen im oberen Teil der Mauern verbunden mit lokalen Spannungskonzentrationen bei dynamischen Einwirkungen), die bei modernen Mauern vermieden werden, und andererseits auf die Tatsache, dass beide Sperrenstandorte nicht als seismisch aktive Zonen bekannt waren, zurückzuführen. Die beiden Talsperren wurden wie damals üblich nach der pseudostatischen Methode gegen Erdbeben ausgelegt, mit einer Beschleunigung von 0,1 g. Während des Erdbebens sind dann um ein Vielfaches höhere Beschleunigungen aufgetreten. Die beiden Mauern wurden in der Folge verstärkt und sind seitdem un-

unterbrochen in Betrieb. Rege seismische Aktivität wird auch heute noch im Bereich der beiden Stauseen registriert, dabei handelt es sich jedoch um schwache Ereignisse, die keine Auswirkungen auf Bauwerke und Installationen haben. Aus heutiger Sicht ist RTS kein Problem für Stauanlagen, falls diese nach dem heutigen Stand der Technik gegen Erdbeben ausgelegt werden, da Talsperren dem so genannten «Maximum Credible Earthquake» (MCE) erfolgreich widerstehen müssen, und dieses verursacht stärkere Bodenbewegungen am Sperrenstandort als das stärkste RTS-Ereignis.

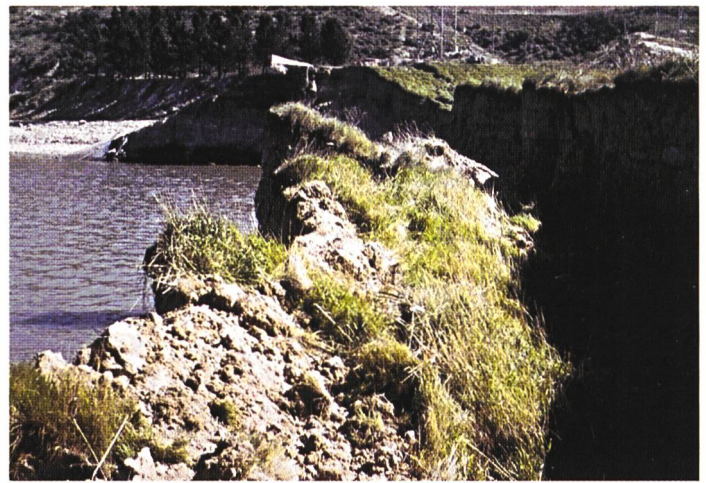
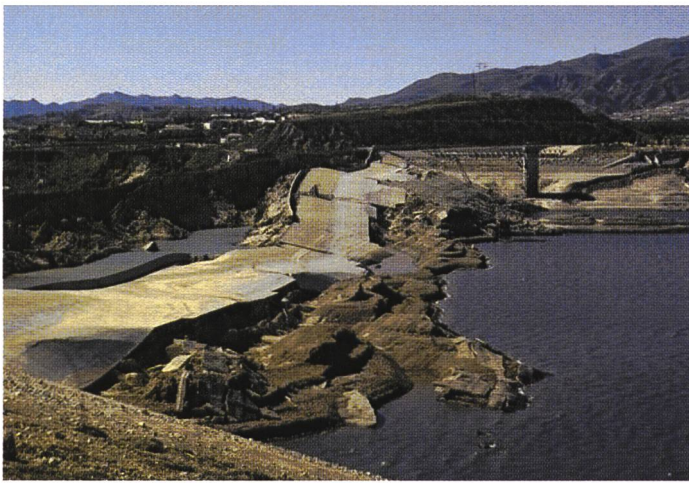
- III *Höchste registrierte Beschleunigungen bei Talsperren*: Die 113 m hohe Pacoima-Bogengewichtsmauer in Kalifornien war bereits zweimal sehr starken Erdbebenerschütterungen ausgesetzt. Während des San-Fernando-Erdbebens 1971 (M = 6,4) wurde auf einer Felskante im Bereich der Krone eine horizontale Spitzenbeschleunigung von 1,25 g gemessen. Während des Northridge-Erdbebens 1994 wurden auf der Mauerkrone der inzwischen sehr gut instrumentierten Mauer Spitzenbeschleunigungen von über 2 g gemessen. Aufgrund des tiefen Reservoirsiegels entstanden nur geringfügige Schäden. Die Anlage ist weiterhin in Betrieb.
- IV *Schäden an Dämmen infolge Bodenverflüssigung*: Der 38 m hohe Lower-Van-Norman-Damm, ein homogener gespülter Damm aus locker gelagertem sandig-siltigem Material, erlitt grosse Schäden infolge Bodenverflüssigung und eines daraus resultierenden wasserseitigen Böschungsversagens (Bild 4). Ein vollständiges Versagen des Dammes wurde verhindert, da der Wasserspiegel im Reservoir relativ tief war. Anderenfalls wären bei einem Dammbruch über 70 000 Per-



**Bild 3. Usoi-Damm und Lake Sarez, welcher 1911 während eines starken Erdbebens in Tajikistan durch einen Fels- und Gletscherabbruch gebildet wurde. Klar erkennbar ist die Anrissstelle des Felssturzgebietes am rechten Ufer (maximale Dammhöhe ca. 650 m; Freibord ca. 50 m; Volumen des Felssturzdammes ca. 2 km<sup>3</sup>).**

(Fotos: J. Hanisch)





**Bild 4. Lower-Van-Norman-Damm, ein 38 m hoher «Hydraulic Fill»-Damm, welcher während des San-Fernando-Erdbebens 1971 durch Verflüssigung des Schüttmaterials stark beschädigt wurde. Der relativ tiefe Stauseespiegel hat ein Auslaufen des Reservoirs verhindert. (Fotos: Steinbrugge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley)**

sonen bedroht gewesen, die unterhalb des Dammes wohnten. In der Folge wurde der Damm repariert und nur noch als Retentionsbecken zum Hochwasserschutz genutzt. Während des Northridge-Bebens von 1994 wurde der Damm wiederum beschädigt.

- V **Staumauern:** Die 106 m hohe Sefid-Rud-Pfeilerkopfmauer wurde 1990 durch das Magnitude-7,5-Manjil-Erdbeben im Nordosten Irans stark beschädigt (Bild 5). Bei diesem Katastrophenbeben, dessen Epizentrum nach Aussage von Experten weniger als ein Kilometer von der Sperrstelle entfernt lag, verloren rund 40 000 Menschen ihr Leben. Diese Stauwand war wahrscheinlich den bisher weltweit stärksten Erschütterungen ausgesetzt, und die beobachteten Schäden können als Richtschnur für die bei Gewichtsmauern während eines MCE zu erwartenden Schäden betrachtet werden. Die Mauer wurde repariert, indem die durchgehenden Horizontalrisse im oberen Teil der Mauer durch Epoxymörtel-Injektionen abgedichtet wurden, und als strukturelle Reparaturmassnahme wurden in allen gerissenen Mauerblöcken Felsanker mit einer Vorspannkraft von je 100 MN installiert. Die Stauanlage, die Kernteil eines grossen Bewässerungsprojektes ist, ist weiterhin in Betrieb.
- VI **Staumauern auf aktiven Verwerfungen:** Das Shih-Kang-Wehr in Taiwan wurde durch eine aktive Verwerfung in der Fundation während des Chi-Chi-Erdbebens 1999 stark beschädigt (Bild 1). Der gesamte Stausee mit einem Volumen von 3,4 Millionen m<sup>3</sup> wurde durch die beiden zerstörten Wehrröffnungen freigesetzt. Aufgrund des geringen Stauvolumens und der beschränkten Abflusskapazität der beiden Wehrröffnungen (das gesamte

Wehr hat 18 Öffnungen) wurde eine Überschwemmung im Unterlauf des Flusses vermieden. Die Verwerfung in der Fundation des Wehres war nicht bekannt. Es gibt zahlreiche weitere grosse Talsperren, die auf potenziell aktiven Verwerfungen liegen, wie z.B. die 271 m hohe Inguri-Bogenmauer in Georgien (weltweit höchste Bogenmauer) oder der Tarbela-Damm in Pakistan. Das ICOLD Bulletin 113 (ICOLD 1999) befasst sich mit dem Problem der Staumauern auf Verwerfungen. Aus den dargestellten Fallstudien ist ersichtlich, dass einige Talsperren auf Verwerfungen stehen, die heute als potenziell aktiv beurteilt werden, obwohl Sperren an Standorten mit bekannten Verwerfungen unerwünscht sind.

### 3. Überblick über Bulletins des ICOLD-Erdbebenkomitees

Das Erdbebenkomitee, das sich aus Vertretern von rund 25 verschiedenen Ländern aus allen Kontinenten zusammensetzt, hat während der letzten Jahre folgende Bulletins vorbereitet und veröffentlicht:

- I Bulletin 52 (1986): Earthquake analysis procedures for dams – State of the Art
- II Bulletin 72 (1989): Selecting seismic parameters for large dams
- III Bulletin 112 (1998): Neotectonics and dams
- IV Bulletin 113 (1999): Seismic observation of dams
- V Bulletin 120 (2001): Design features of dams to effectively resist seismic ground motion
- VI Bulletin 123 (2002): Earthquake design and evaluation of structures appurtenant to dams

Diese Bulletins widerspiegeln den Stand der Technik in den Ingenieurbüros und Organisationen und Behörden, die sich mit

der Erdbebensicherheit von Stauanlagen befassen, und werden in vielen Ländern, die keine eigenen Vorschriften haben, als Stand der Technik betrachtet. Die ICOLD-Richtlinien stellen gewissermassen universell gültige Dokumente für Talsperreningenieure dar, was einzigartig ist. Beispielsweise hat fast jedes Land seine eigenen Erdbebennormen für Hoch- und Brückenbauten. Es gibt wohl Anstrengungen, die Bauwerksnormen zu vereinheitlichen, wie das in Europa mit der Einführung der Eurocodes in den nächsten Jahren der Fall sein wird. Die Ausarbeitung der Eurocodes ist ein langer Prozess. Deshalb besteht insbesondere auf dem Gebiet des Erdbebeningenieurwesens, wo die Entwicklung relativ rasch fortschreitet, die Gefahr, dass gewisse Teile bereits überholt sind, bevor sie überhaupt in Kraft treten. Im Gegensatz dazu ist der Genehmigungsprozess der ICOLD Bulletins, die auch den Charakter von Normen haben, geradezu einfach. Diese werden normalerweise innerhalb von rund 6 Jahren erarbeitet und genehmigt. Aufgrund dieser Praxis wird erreicht, dass die ICOLD Bulletins modern bleiben und neue Entwicklungen relativ einfach berücksichtigt werden können. Aufgrund der Tatsache, dass die ICOLD Bulletins eine breite Akzeptanz unter den Talsperreningenieuren finden, sind die Sicherheitsstandards in den meisten Ländern vergleichbar und die Talsperrenfachleute sprechen dieselbe Sprache, was heute keine Selbstverständlichkeit mehr ist.

### 4. Aktivitäten des ICOLD-Erdbebenkomitees

Das Pflichtenheft des jetzigen Komitees wurde an der ICOLD-Jahrestagung von 1999 in Antalya in der Türkei verabschiedet und umfasst folgende Aufgaben:

- I **Erdbebensicherheit bestehender Talsperren:** Die bestehenden Talsperren



wurden nach Kriterien und Methoden analysiert und bemessen, die während des Baus dieser Anlagen zur Verfügung standen. Seit dem Bau dieser Sperren sind grosse Fortschritte in der Erdbebenbemessung und Sicherheitsbeurteilung von Talsperren erzielt worden. Heute besteht ein zunehmendes Bedürfnis, die Talsperrensicherheit besser zu kennen. Das Schwergewicht liegt auf der Neubeurteilung der Erdbebensicherheit der bestehenden Talsperren.

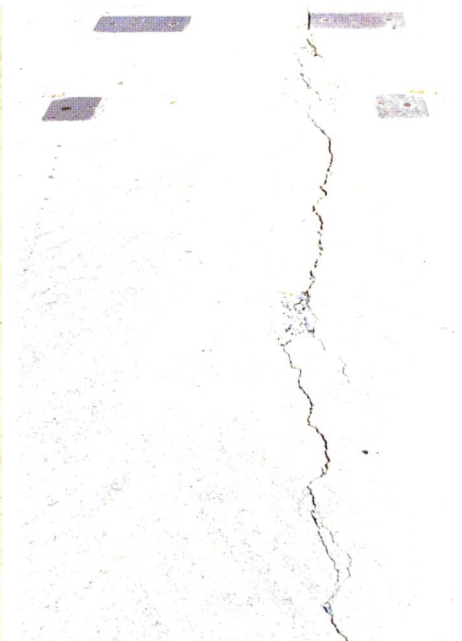
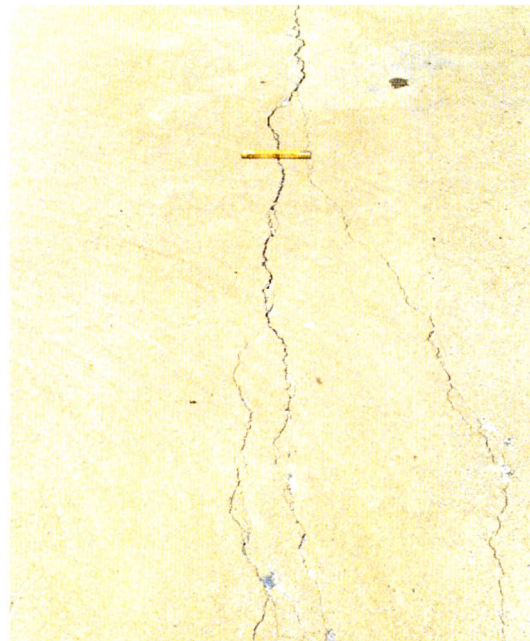
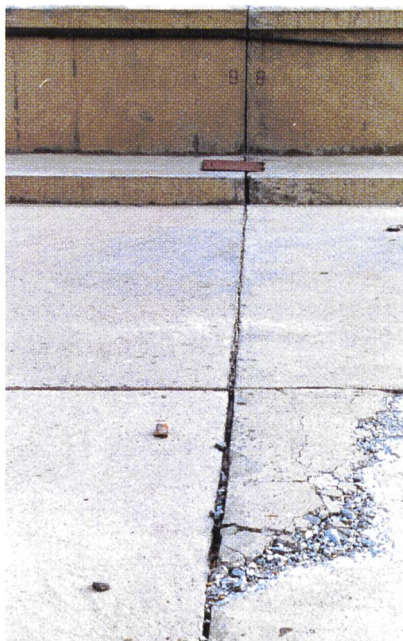
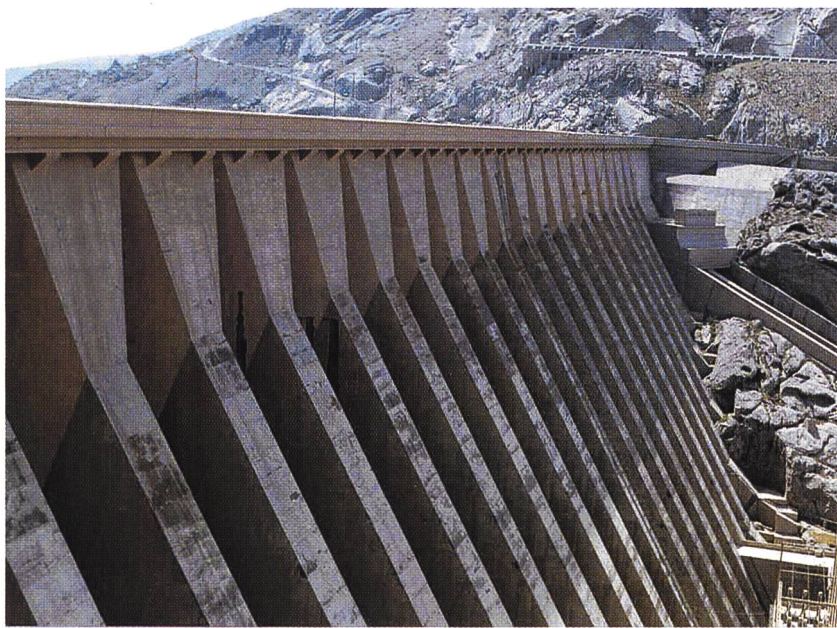
II *Seismische Interpretation von Messdaten:* Von primärem Interesse ist die Analyse von Starkbebenaufzeichnungen von Talsperren, die bei geeigneter Auswertung eine Vielzahl von Informationen zu liefern vermögen. Aber auch die kontinu-

ierliche automatische Registrierung liefert Zeitverläufe von Deformationen, Spannungen, Sickerwassermengen usw. im Talsperrenkörper und der Foundation während Erdbeben. Die integrale Betrachtung dieser Messdaten liefert ein umfassenderes Bild über das Erdbebenverhalten. Das Hauptgewicht liegt in der Starkbebeninstrumentierung von Talsperren, da bisher für solche Bauwerke nur sehr wenige brauchbare Starkbebenaufzeichnungen existieren.

III *Erdbeben, die durch den Stausee ausgelöst werden (sog. Reservoir-triggered Seismicity [RTS]):* Bereits seit den 1970er-Jahren versteht man die Ursachen der meist temporär erhöhten Seismizität bei grossen Stauanlagen und der Erdbeben,

die durch das Auffüllen des Stausees ausgelöst werden. Es existieren auch zunehmend Daten zu diesem Phänomen. Aus heutiger Sicht ist RTS kein Sicherheitsproblem bei Staumauern, die die heutigen ICOLD-Erdbebenanforderungen erfüllen, da das maximale RTS-Beben schwächer ist als das MCE, das für die Sicherheitsbeurteilung einer Talsperre massgebend ist. Das Ziel besteht in einer Neubeurteilung der RTS.

IV *Aspekte des Erdbebenrisikos von Talsperren:* Ein Hauptziel bei Sicherheitsbetrachtungen ist die Bestimmung des seismischen Risikos von Stauanlagen. Bekanntlich sind Starkbeben Ereignisse, die neben Bodenerschütterungen, die bei der Erdbebenbemessung üblicherweise



**Bild 5.** Injizierter luftseitiger Horizontalriss entlang einer Betonierfuge (oben rechts) der 106 m hohen Sefid-Rud-Pfeilerkopfmauer (oben links), welche während des Manjil-Erdbebens vom 21. Juni 1990 im Nordwesten Irans stark beschädigt wurde. Die Längsrisse auf der Mauerkrone und Abscherung im Bereich einer Mauerfuge (unten) zeigen auch die Beanspruchung der Mauer quer zum Tal.



im Vordergrund stehen, auch Verschiebungen an Verwerfungen in der Talsperrenfundament und/oder im Reservoir verursachen können. Im Weiteren ist in Berggebieten mit zahlreichen Felsstürzen, Erdbeben und Lawinen in den Stauseen, die Flutwellen erzeugen können, zu rechnen. Das seismische Risiko hängt (a) von der seismischen Gefährdung, (b) von der Erdbebensicherheit und dem Zustand der Talsperre (Verletzlichkeit) und (c) dem möglichen Schadensausmass beim Versagen einer Sperre ab. Das Hauptgewicht liegt in der Beurteilung der seismischen Gefährdung und in der Überarbeitung der Erdbebenbemessungskriterien. Die Punkte (b) und (c) werden bereits in anderen ICOLD-Komitees bearbeitet.

Zurzeit wird an diesen vier oben erwähnten Themen gearbeitet. Das wichtigste Thema ist natürlich die Erdbebensicherheit der bestehenden Talsperren, da die älteren Talsperren mit aus heutiger Sicht überholten Erdbebenbemessungskriterien und dynamischen Berechnungsmethoden analysiert und bemessen wurden. Deshalb ist auch nicht bekannt, ob diese Talsperren die heutigen Erdbebensicherheitsanforderungen erfüllen oder nicht.

Dieses Problem wurde inzwischen von den Behörden und Talsperrenbesitzern erkannt, und in verschiedenen Ländern wird bereits an diesem Problem gearbeitet.

Ein umfassendes Programm zur Überprüfung der Erdbebensicherheit der bestehenden Stauanlagen und zur Verstärkung mangelhafter Sperren wurde in den 1990er-Jahren in Kalifornien durchgeführt. Als Folge davon musste eine Anzahl Schüttdämme verstärkt werden. Das geschah, indem die Dammkrone verbreitert wurde, die Böschungen abgeflacht wurden, das Freibord erhöht wurde, verflüssigungsanfällige Materialien ersetzt wurden usw. Die schnellste Lösung zur Reduktion des Erdbebenrisikos einer Stauanlage besteht in einer Teilabsenkung des Stausees. Das bedeutet jedoch, dass die Stauanlage nicht mehr wie ursprünglich geplant betrieben werden kann. Eine Stauseeabsenkung kann deshalb nur als temporäre Lösung betrachtet werden.

In diesem Zusammenhang ist geplant, unter anderem auch folgende Themen zu behandeln:

- Notwendigkeit der Neubeurteilung der Erdbebensicherheit der bestehenden Stauanlagen
- Erdbebensicherheitsaspekte von Erd-dämmen für Bewässerungssysteme und Wasserversorgung (Dämme mit einer Höhe von weniger als 15 m in ländlichen Gebieten)

- Notwendigkeit der Starkbebeninstrumentierung von Talsperren
- Neubeurteilung der Erdbebenbemessungskriterien von Stauanlagen
- Erdbebenaspekte von RCC (Roller Compacted Concrete)-Staumauern und CFR (Concrete-Faced Rockfill)-Schüttdämmen
- Erdbebenaspekte von Dichtungsschirmen und Schlitzwänden
- Erdbebenstabilität von Böschungen im Reservoirbereich
- Erdbebenaspekte von Untertagbauten
- Modelle für die Erdbebenanalyse gerissener Staumauern (MCE-Sicherheitsnachweis)
- Erdbebenbedingte hydrodynamische Drücke in Druckleitungen, Grundablässen, wassergefüllten Stollen usw.
- Rissbildung in Staumauern und hydrodynamische Drücke in Rissen
- Zugspannungen in Staumauern bei Starkbeben und Zugfestigkeit von Massenbeton
- Sicherheit von Talsperren mit Verwerfung in Foundation usw.

Der hier aufgeführte Themenkatalog, der auch zahlreiche Themen umfasst, wo zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig sind, kann natürlich von einem ehrenamtlichen Komitee nur ganz beschränkt bearbeitet werden. Vielmehr geht es darum, praxisrelevante Forschungsthemen darzustellen, aufzuzeigen, wo ein Nachholbedarf besteht, und Forscher zu motivieren, diese Themen aufzugreifen.

## 5. Talsperrenkongress Montreal 2003

Während des 21. Talsperrenkongresses in Montreal, Kanada, befasst sich eine der vier Kongressfragen mit Erdbebenaspekten von Talsperren. Die folgenden Themen werden diskutiert:

- Seismic hazard evaluation of the dam site – Risk of reservoir-triggered seismic event – Selection of design earthquake – Selection of seismic parameters for dynamic analysis.
- Dynamic material properties for concrete and embankment dams, including foundations – Laboratory tests and field measurements.
- Design, analysis and construction features to ensure seismic safety (including appurtenant works and equipment).
- Evaluation of seismic safety of dams.
- Performance of dams under seismic loading – Lessons learnt for future projects.

Es wird erwartet, dass die verschiedenen technischen Artikel zu diesem Thema

zu einem besseren Verständnis der Erdbebenauswirkungen auf Talsperren und der Erdbebensicherheit von Talsperren führen. Die zu diskutierenden Themen umfassen im Wesentlichen auch die Themen des ICOLD-Erdbebenkomitees.

Erdbebenaspekte von Talsperren wurden das letzte Mal während des ICOLD-Kongresses 1979 in New Delhi in Indien diskutiert. Seitdem wurden substantielle Fortschritte auf dem Gebiet des Erdbebeningenieurwesens erzielt, und mehrere Talsperren sind seitdem durch starke Erdbeben beansprucht und beschädigt worden. Die Erdbebensicherheit von Talsperren ist kein abgeschlossenes Thema, und auch in Zukunft ist mit neuen Erkenntnissen zu rechnen, da bisher nur sehr wenig Information über das Verhalten von Talsperren unter Starkbeben wie das MCE existiert. Trotz den numerischen Simulationsmöglichkeiten, die heute zur Verfügung stehen, und den dynamischen Bruchuntersuchungen an Damm- und Staumauermodellen, die in verschiedenen Labors durchgeführt wurden, bestehen doch grosse Unsicherheiten über das stark nichtlineare Verhalten einer Talsperre während des MCE.

## 6. Zur Erdbebengefährdung von Stauanlagen

Für den Sicherheitsnachweis von Talsperren sind Bodenerschütterungen von starken Erdbeben zu verwenden. Das sind normalerweise Erdbeben mit Magnituden von 6 oder darüber. Falls sich ein Magnitude-6-Erdbeben mit oberflächennahem Herd in der Nähe einer Talsperre ereignet, dann können an der Erdoberfläche ohne weiteres maximale Beschleunigungen von über 0,5 g entstehen. Ein Beispiel dafür ist das Erdbeben vom 3. September 2000 im Napa Valley in Kalifornien, wo ein Magnitude-5,2-Erdbeben in einer Entfernung von 7 km von der Verwerfung eine maximale Horizontalbeschleunigung von 0,49 g verursacht hat. Schätzungsweise 3000 bis 5000 Gebäude wurden durch dieses Beben beschädigt. Die maximalen Bodenbeschleunigungen im Epizentralbereich von Erdbeben mit Magnituden von über 7 nehmen im Vergleich mit denjenigen eines Magnitude-6-Erdbebens mit oberflächennahem Herd nicht mehr signifikant zu. Der Hauptunterschied zwischen den Bodenerschütterungen eines Magnitude-8 Bebens und denjenigen eines Magnitude-6 Bebens liegt in der Dauer der starken Erschütterungen und den vorherrschenden Frequenzen. Bei Staumauern spielt für die Rissbildung der Spitzenwert der Bodenbeschleunigung im Frequenzbereich bis zu ca. 7 Hz eine wichtige Rolle, während bei den erdbebenbedingten Deformationen von Schüttdämmen und für den Aufbau von



Porenwasserspannungen die Dauer der starken Erschütterungen massgebend ist.

Als Beispiel ist hier zu erwähnen, dass wegen der hohen Seismizität in Chile, wo Starkbeben relativ häufig auftreten, und aufgrund der Tatsache, dass die Spitzenwerte der Bodenbeschleunigung bei den sehr seltenen Extrembeben im Vergleich zu den Beben mit Wiederkehrperioden von ca. 500 Jahren nur unwesentlich ansteigen, für den Erdbebensicherheitsnachweis von Talsperren ein Erdbeben mit einer mittleren Wiederkehrperiode um 800 Jahre verwendet wird. In Gebieten mit mittlerer bis schwacher Seismizität wie in der Schweiz wird die maximale Bodenbeschleunigung erst bei einem Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von mehreren tausend Jahren erreicht (in englischen Erdbebenrichtlinien für Talsperren wird in speziellen Fällen eine Wiederkehrperiode von 30 000 Jahren angegeben). Auf den ersten Blick erhält man den Eindruck, dass die chilenischen Talsperren im Vergleich zu denjenigen in der Schweiz, die einem Beben mit einer Wiederkehrperiode von 10 000 Jahren widerstehen müssen, demzufolge unsicherer sind. Es trifft wohl zu, dass in Chile Starkbeben weit häufiger auftreten als in der Schweiz und deshalb Talsperren häufiger Erdbebenerschütterungen ausgesetzt sind als bei uns. Das ist jedoch kein Problem, wenn die Talsperren für derartige Erschütterungen ausgelegt sind. Es ist auch klar, dass die Bodenerschütterungen eines Bebens mit 800-Jahre-Wiederkehrperiode aufgrund historischer Daten zuverlässiger vorauszusagen sind als diejenigen eines 10 000-jährlichen Ereignisses in einem Gebiet mässiger Seismizität. Diesen Gedanken kann man noch weiterentwickeln. In Chile sind die Bodenerschütterungen eines 800-Jahre-Ereignisses in der Nähe derjenigen des MCE, während in Mitteleuropa ein 10 000-Jahre-Ereignis noch weit von einem MCE entfernt sein kann. Zudem sind die Unsicherheiten in den Bodenbewegungen in Gebieten schwacher bis mässiger Seismizität bedeutend höher als in Gebieten hoher Aktivität. Das bedeutet, dass Talsperren in Chile – falls sachgerecht ausgelegt – besser gewappnet sind, ein MCE zu überstehen, als eine Talsperre in Mitteleuropa, die auf ein 10 000-jährliches Ereignis ausgelegt worden ist.

Dieser Aspekt der seismischen Gefährdung von Talsperren wird gerne übersehen. In Gebieten mittlerer bis niedriger Seismizität werden für die Erdbebensicherheitsüberprüfung von Talsperren Spitzenbeschleunigungen von 0,1 bis 0,2 g als ausreichend erachtet. Das Napa-Erdbeben hat gezeigt, dass diese Werte beträchtlich überschritten werden können. Es ist deshalb zu erwarten, dass bei Talsperren die Spitzen-

werte der Grundbeschleunigung, vor allem in Gebieten mit niedriger bis mittlerer Seismizität, in Zukunft weiter ansteigen werden. Dieser Prozess der höheren Spitzenbeschleunigungen wird durch die inzwischen zahlreich vorhandenen Starkbebenaufzeichnungen beschleunigt.

Die maximale Grundbeschleunigung ist nur einer der Parameter der Bodenbewegung. Eine umfassendere Charakterisierung stellt das Beschleunigungsantwortspektrum dar. Man kann zwischen den idealisierten Antwortspektren unterscheiden, die in den Erdbebennormen von Gebäuden verwendet werden, dabei handelt es sich um Spektren, die den Einfluss verschiedener Erdbeben abdecken und deshalb einen grossen Frequenzinhalt aufweisen, und Antwortspektren, die aus seismologischen Betrachtungen hergeleitet werden. Letztere decken einen relativ schmalen Frequenzbereich ab, und die Verwendung derartiger Spektren kann deshalb bei der Erdbebenberechnung zu einer zu günstigen Beurteilung der dynamischen Beanspruchung einer Talsperre führen. Seismologische Antwortspektren werden deshalb in der Nuklearindustrie nicht zugelassen und sollten bei Talsperren nur mit Vorsicht verwendet werden.

## **7. Erdbebensicherheit als Element der integralen Talsperrensicherheit**

Um die Erdbebensicherheit gewährleisten zu können, sind folgende sicherheitstechnischen Elemente zu betrachten:

### **I Erdbebensicherheit der Talsperre:**

- **Staumauern:** Geometrie der Mauer (Vermeidung von Spannungskonzentrationen), Steifigkeit (Erdbebenkräfte hängen von den Eigenfrequenzen der Mauer ab und die dynamischen Verformungen von der Steifigkeit), Zugfestigkeit von Massenbeton (massgebend für die Rissbildung), Duktilität (Erschütterungen, die über denjenigen des Sicherheitsbebens sind, sollen zu zunehmenden inelastischen Verformungen, nicht aber zum Versagen führen) und Stabilität (dynamische Gleit- und Kippstabilität der durch Risse, Fugen usw. abgetrennten Teile der Mauer) usw.
- **Schüttdämme:** Dammgeometrie (Damm mit breiter Krone und flachen Böschungen); Widerstand gegen innere Erosion (Kern aus selbstheilendem Material, dicke Filterschichten), Materialwahl (Vermeidung verformungs- und verflüssigungsempfindlicher Materialien), komfortables Freibord (Schutz vor Überströmen der Dammkrone bei grossen Setzungen und örtlichen Rutschungen,

Schwallwellen im Reservoir durch Felsstürze usw.), Erdbebenstabilität der Böschungen usw.

### **II Erdbebensicherheitsüberwachung:**

- Starkbebeninstrumentierung
- Visuelle Beobachtungen
- Talsperreninspektion nach einem Beben gemäss Checkliste
- Datenanalyse und integrale Interpretation.

### **III Betriebssicherheit bei Erdbeben:**

- Betriebs- und Inspektionsrichtlinien für Erdbebenfall
- Erfahrenes und qualifiziertes Personal usw.

### **IV Erdbebennotfallplanung:**

- Analyse verschiedener Erdbebenszenarien
- Alarmierung
- Evakuierung im Erdbebenfall (dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einem Erdbeben, das eine Talsperre stark beschädigen kann, die Dörfer und Städte sowie Infrastrukturbauten [Strassen, Brücken] im Unterlauf ebenfalls sehr stark beschädigt sein werden)
- Engineering back-up usw.

Diese Sicherheitsaspekte spielen natürlich bei einer Erdbebenrisikobeurteilung einer Talsperre ebenfalls eine grosse Rolle. Diese Aufzählung zeigt, dass Erdbebeneinwirkungen in allen Stufen der Sicherheitsplanung berücksichtigt werden müssen. Eine Besonderheit von Erdbeben ist, dass gleichzeitig alle Elemente einer Stauanlage betroffen sind, d.h. Talsperre, Grundablass, Hochwasserentlastung, Wasserfassung und sämtliche Nebenanlagen. Da redundante Sicherheitssysteme gleichzeitig beansprucht werden, ist die Betriebssicherheit der Kontrollorgane ebenfalls stark reduziert. Zudem sind im Unterlauf einer Sperre sehr schwere Schäden zu erwarten, da die Hoch- und Brückenbauten und andere Infrastrukturobjekte auf geringere Erdbebeneinwirkungen ausgelegt sind als die Talsperren, die das MCE überstehen müssen.

## **8. Erdbebensicherheit von Talsperren**

Als Folge der Bodenverflüssigungsschäden an gespülten Dämmen während des San Fernando-Erdbebens von 1971 versteht man heute dieses Phänomen bedeutend besser. Dieser Dammtyp wird zwar heute bei grossen Talsperren nicht mehr verwendet, aber wie die Schäden des Bhuj-Erdbebens von 2001 gezeigt haben (Bild 2), gibt es trotzdem eine grosse Anzahl Dämme, die Verflüssigungsprobleme aufweisen, da oft auch die Materialien in der Dammfundation verflüssigungsanfällig sind.



Bei Stau Mauern sind die linear-elastischen Berechnungsmethoden stark entwickelt worden und die dynamische Interaktion der Mauer mit dem Wasser im Reservoir und der Foundation kann heute theoretisch korrekt analysiert werden. Es bleiben jedoch noch Fragen offen, und jedes Starkbeben deckt neue Probleme auf, die gelöst werden müssen.

Die Hauptprobleme sind folgende:

- I Massenbeton ist ein sprödes Material mit einer relativ kleinen dynamischen Zugfestigkeit, die zudem von den massgebenden Dimensionen einer Mauer abhängt. Es besteht auch ein rein konzeptionelles Problem, da unarmerter Beton bei Stau mauern akzeptiert wird, aber in den neuen Erdbebennormen für Gebäude usw. werden unarmierte Mauerwerksbauten in Erdbebengebieten nicht mehr toleriert.
- II Stau mauern aus RCC werden aus wirtschaftlichen Gründen in zunehmendem Masse an Stelle konventioneller Beton mauern erstellt. Keine grössere RCC-Mauer war bisher einem starken Erdbeben ausgesetzt. Für die Erdbebenanalyse werden die gleichen Rechenmodelle verwendet wie für Mauern aus Massenstein.
- III Steinschüttdämme mit wasserseitiger Wasserabdichtung (CFR) und Dämme auf Lockergestein mit Schlitzwänden usw. Die Vorteile von CFR-Dämmen sind wirtschaftlicher Natur, da diese Bauweise wegen der Abwesenheit eines Tonkerns steilere Böschungen erlaubt. Keiner dieser Dämme war bisher einem starken Erdbeben ausgesetzt, und es ist nicht klar, ob der grosse Steifigkeitsunterschied zwischen Boden und den Betonscheiben bei einer Erdbebenanregung in Richtung der Scheibe zu übermässigen Schubbeanspruchungen oder gar lokalem Ausbeulen der Betonabdichtung führt, wie das beispielsweise bei Uferverkleidungen von Flüssen während des Chi-Chi-Erdbebens von 1999 in Taiwan beobachtet werden konnte. Es ist nicht auszuschliessen, dass diese neuen Dammtypen zusätzliche seismische Bemessungskriterien erfüllen müssen.
- IV Die Mehrzahl der bestehenden Talsperren wurde nach – aus heutiger Sicht – veralteten Methoden gegen Erdbeben bemessen. Die heutigen Bemessungskriterien sind eindeutig rigoroser als diejenigen, die in der Vergangenheit verwendet wurden.

Die heutige Erdbebenbemessungspraxis kann wie folgt zusammengefasst werden (ICOLD, 1989):

I Betriebserdbeben (Operating Basis Earthquake – OBE):

- Talsperrensicherheit: OBE nicht massgebend für strukturelle Sicherheit
- Wiederkehrperiode: ca. 145 Jahre
- Schadensbild: keine strukturellen Schäden (bei Stau mauern wird dieses Kriterium z.B. erfüllt, wenn die erdbebenbedingten maximalen dynamischen Zugspannungen geringer als die dynamische Betonzugfestigkeit sind)
- Maximale Bodenbeschleunigung in Gebieten hoher Seismizität:  $< 0,2\text{--}0,3\text{ g}$
- II Sicherheitserdbeben (Maximum Credible Earthquake – MCE bzw. Maximum Design Earthquake – MDE):
- Talsperrensicherheit: MCE massgebend für strukturelle Sicherheit
- Wiederkehrperiode: ca. 800 Jahre (Chile) bis 30 000 Jahre (U.K.)
- Schadensbild: kein Talsperrenbruch und kein unkontrolliertes Ausströmen des Stausees; strukturelle Schäden und grössere Verformungen werden akzeptiert
- Maximale Bodenbeschleunigung in Gebieten hoher Seismizität:  $> 0,4\text{--}0,5\text{ g}$

Im Gegensatz zu anderen extremen Einwirkungen wie Hochwasser, Stürme, Erdbeben usw., sind Starkbeben unvorhersehbare seltene Ereignisse, welche eine Gefahr für die Talsperren darstellen. Das gilt insbesondere für Gebiete mit mässiger bis geringer seismischer Aktivität, da Erdbeben aufgrund des seltenen Eintretens als weniger wichtig betrachtet werden.

## 9. Starkbebeninstrumentierung von Talsperren

Die Messinstrumente, die üblicherweise in den Talsperren installiert werden, eignen sich hauptsächlich zur Erfassung des Langzeitverhaltens der Sperren. Kurzfristige Änderungen im Verhalten, die innerhalb von wenigen Minuten stattfinden, können damit kaum im Detail erfasst werden.

Bei diesen Prozessen handelt es sich in erster Linie um Erdbebeneinwirkungen und in zweiter Linie um plötzliche Massenbewegungen in den Stausee, Steinschläge und Lawinen im Bereich der Sperre, Wind- und Welleneinwirkungen, Terroranschläge und kriegerische Einwirkungen sowie Fehlmanipulationen während des Betriebs und Unfälle bei Unterhalts- und Reparaturarbeiten usw. Zudem können auch Bruchvorgänge im Inneren einer Mauer (plötzliche Rissbildung) oder der Foundation festgestellt werden.

Es besteht deshalb ein Bedarf an Instrumenten, mit denen auch diese dynamischen Vorgänge zuverlässig und rechtzeitig erfasst werden können. Zusätzliche Messinstrumente verbessern zwar die strukturelle

Sicherheit einer Talsperre nicht, mit modernen Starkbebeninstrumenten ist jedoch eine rechtzeitige Warnung der betroffenen Bevölkerung möglich. Sicherheitsorgane der Sperre können bedient werden und das Kraftwerk usw. abgestellt werden. Bei Kernanlagen gehören Starkbebengeräte auch in Gebieten mässiger Seismizität seit langem zur Standardausrüstung.

Wenn man bedenkt, dass eine zuverlässige Erdbebenvorhersage in absehbarer Zeit nicht möglich sein wird, Starkbeben jedoch in der Lage sind, Talsperren zu beschädigen, ist eine rechtzeitige Alarmierung von grossem Nutzen. Im Weiteren erlauben es Starkbebengeräte – diese weisen heute eine sehr grosse Dynamik auf –, auch kleinste Erschütterungen zu erfassen. Mit diesen Daten lässt sich einerseits der Ablauf der eingangs erwähnten dynamischen Ereignisse rekonstruieren und andererseits können mit den ambienten Messdaten allfällige Änderungen in der Steifigkeit der Mauer und/oder des Untergrundes festgestellt werden (Health Monitoring). Dies ist bei den Deformationsmessungen nur unter Zuhilfenahme eines detaillierten, kalibrierten Rechenmodells der Sperre möglich. Die Kosten dieser Rechenmodelle können diejenigen einer Starkbebeninstrumentierung bei weitem übersteigen, und die entsprechenden rechnerischen Kontrollen benötigen zudem einige Zeit. Die Daten der Starkbebengeräte lassen sich praktisch auf Knopfdruck auswerten. Zu erwähnen sind noch eine Reihe anderer Vorteile, die nicht direkt der instrumentierten Talsperre zugute kommen, die aber mit der Verbesserung der Bemessungsmethoden der Talsperren zu tun haben. Denn mit diesen Daten lassen sich auch die seismischen Bemessungskriterien einer Sperre verifizieren und verbessern und örtliche (Mikro-)Beben (beispielsweise RTS) lassen sich damit identifizieren.

Aus diesen Überlegungen wäre es im Interesse einer umfassenden Sicherheitsüberwachung sinnvoll, sämtliche grossen Talsperren zusätzlich mit Starkbebengeräten zu instrumentieren.

In der Schweiz sind die Bogenmauern Mauvoisin, Emosson und Punt dal Gall, die Grande-Dixence-Gewichtsmauer und der Mattmark-Schüttdamm mit Starkbebengeräten ausgerüstet. Diese Geräte haben bereits mehrere Erdbeben registriert. Dabei handelte es sich jedoch vorwiegend um schwächere Beben, die für die Sicherheit der entsprechenden Talsperren nicht relevant waren. Trotzdem konnten aus den Beschleunigungsaufzeichnungen die Eigenfrequenzen und auch das Dämpfungsverhalten der Stau mauern ermittelt werden.



## 10. Schlussfolgerungen

Das Gebiet des Talsperren-Erdbebeningenieurwesens ist noch eine relativ junge Disziplin wie das gesamte Gebiet des Erdbebeningenieurwesens auch, deshalb ist hier in der nächsten Zeit mit weiteren neuen Erkenntnissen zu rechnen. Ein wichtiges Problem stellt die Tatsache dar, dass bisher praktisch keine Messdaten über Talsperren vorliegen, die einem Starkbeben wie dem MCE ausgesetzt waren. Das Erdbebenverhalten der Talsperren unter diesen Ereignissen kann mit den vorhandenen numerischen Simulationsprogrammen nicht zuverlässig vorhergesagt werden. Es ist deshalb zu erwarten, dass bei jedem Starkbeben Phänomene auftreten, denen bisher wenig Beachtung geschenkt worden ist, und welche Modifikationen in der Bemessungspraxis bewirken können.

Es ist zudem zu beachten, dass viele grosse Talsperren, die z.B. in den asiatischen Ländern und Gegenden wie Türkei, Iran, Zentralasien, Kaukasus, Pakistan, Indien, Nepal, Bhutan, Burma und vor allem im Südwesten Chinas geplant sind und in den nächsten Jahren realisiert werden sollen, in Gebieten mit relativ hoher Seismizität liegen. Deshalb ist zu

erwarten, dass die Beherrschung der Erdbebeneinwirkung bei diesen Projekten eine zentrale Rolle einnehmen wird. Zudem ist zu erwarten, dass mit der Forderung, dass eine Talsperre das MCE sicher überstehen muss, auch in Gebieten mässiger bis niedriger Seismizität die Erdbebeneinwirkung an Wichtigkeit gewinnen wird.

Schlussendlich sollte man sich bewusst sein, dass Talsperren (das gilt ganz allgemein auch für Gebäude und andere Infrastrukturbauten), die starken Beben widerstehen können, sich auch unter dem Einfluss anderer Einwirkungen und Gefährdungen besser verhalten.

### Referenzen

- [1] ICOLD Bulletin 52 (1986), Earthquake Analysis Procedures for Dams – State of the Art, ICOLD, Paris.
- [2] ICOLD Bulletin 72 (1989): Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.
- [3] ICOLD Bulletin 112 (1998): Neotectonics and dams, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.

[4] ICOLD Bulletin 113 (1999): Seismic observation of dams, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.

[5] ICOLD Bulletin 120 (2001): Design features of dams to effectively resist seismic ground motion, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.

[6] ICOLD Bulletin 123 (2002): Earthquake design and evaluation of structures appurtenant to dams, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, ICOLD, Paris.

[7] Shi L.P., Towhata I., Wieland M.: Prediction of seismically induced deformation of Liyutan dam, Taiwan, by means of cyclic triaxial testing and finite element analysis, Int. Journal on Computers and Geotechnics, Vol. 7, 1989 (pp. 205–222).

[8] World Commission on Dams (2000): Dams and Development: A new framework for decision-making, Earthscan Publications Ltd., London and Sterling, VA.

### Anschrift des Verfassers

Dr. Martin Wieland, Electrowatt-Ekono AG, Hardturmstrasse 161, Postfach, CH-8037 Zürich, Tel. +41 76 356 28 62, Fax + 41 1 355 55 61, E-Mail: martin.wieland@ewe.ch

# 50. Geomechanik-Kolloquium

*Zu diesem Jubiläums-Kolloquium hatte die Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) am 11. und 12. Oktober 2001 eingeladen. Im neuen Kongresszentrum zu Salzburg konnte der Präsident Baurat h.c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Michael Vavrovsky über 700 Teilnehmer aus 15 Ländern begrüßen.*

*In 24 Berichten befassten sich erfahrene Fachleute mit den Grundlagen des modernen Felsbaus, der Quantifizierung in der Ingenieurgeologie, dem Sicherheitsmanagement im oberflächennahen Tunnelbau und dem Entwicklungsstand im Tunnelbau anhand von hervorragenden Beispielen [1]. Hier soll auf einige unsere Leser interessierende Vorträge näher eingegangen werden.*

Nach den Ausführungen von Dr. Ernst Pürer von den Vorarlberger Illwerken AG in Schruns über die Rolle der Felsmechanik beim Bau und Betrieb grosser Wasserkraftanlagen hat die nicht zutreffende Einschätzung der Wirkung des Kluftwasserdrucks in der Geschichte des Baus grosser Wasserkraftanlagen zum Teil zu katastrophalen Schäden und als Folge davon zu einer rasanten Entwick-

lung der modernen Felsmechanik geführt [2]. Die Fragestellungen beim Bau von Talsperren mit ihren Speichern, Druckstollen und Schächten sowie den Kavernenzentralen sind vielfältig und erfordern ganzheitliches, ingenieurmässiges Denken und Handeln. Eine weit entwickelte felsmechanische Versuchstechnik und eine Vielzahl einfacher bis anspruchsvoller mathematischer Modelle unterstützen den planenden Ingenieur. Einen wertvollen Beitrag in der Weiterentwicklung der Felsmechanik und bei der Interpretation von Bauwerksverhalten leisten die Rückrechnungen (Back Analysis). Auch beim Betrieb und in der Erhaltung von Wasserkraftanlagen treten mannigfaltige felsmechanische Fragen auf, und die Felsmechanik ist ein wichtiges Instrument des verantwortlichen Ingenieurs. Die verständnisvolle Zusammenarbeit des Geologen, Hydrogeologen, des Felsmechanikers, des Statikers und des Bodenmechanikers ist eine unabdingbare Voraussetzung für das Gelingen grosser Wasserkraftwerke.

Anschliessend erläuterte Prof. Dr. Ing. habil. Peter Egger von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne die geomechanischen Untersuchungen für die Talsperre Tirso. Wegen Schäden an der Talsperre Santa Chiara, die den Fluss Tirso im



**Bild 1. Bewehrungskorb zur Verbesserung der Krafteinleitung von der Stau-mauer in den Felsnagel (Egger, EPFL).**

Südwesten Sardinien zur Bewässerung aufstaut, wurde der Bau einer neuen Sperre unterhalb der bestehenden Mauer beschlossen. Die neue Sperre, eine Pfeilerstau-mauer