Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 96 (2004)
Heft: 1-2

Artikel: Erdbebensicherheit von Stauanlagen
Autor: Wieland, Martin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939544

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: 02.07.2025

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

Erdbebensicherheit von Stauanlagen

Martin Wieland

Zusammenfassung

Eines der vier Themen, die vom 16. bis 20. Juni 2003 am 21. ICOLD-Kongress in Montreal diskutiert wurden, befasste sich mit Erdbebenaspekten von Talsperren. Zu diesem Thema wurden 73 Beiträge aus 23 Ländern eingereicht (ICOLD, 2003). Die Beiträge befassten sich mit folgenden Themen: (I) Beobachtungen über das Erdbebenverhalten von Talsperren und seismische Gefährdung, (II) Erdbebenaspekte von Schüttdämmen inklusive Bodenverflüssigung, (III) Erdbebenaspekte von Staumauern und (IV) Seismische Verstärkung bestehender Talsperren und von Nebenanlagen.

Erdbebenaspekte von Talsperren wurden das letzte Mal 1979 an einem ICOLD-Kongress diskutiert. Seitdem haben sich die seismischen Bemessungskriterien verändert, Beobachtungen über das Verhalten von Talsperren während Starkbeben konnten gesammelt werden und auf dem gesamten Gebiet des Erdbebeningenieurwesens und der Beurteilung der seismischen Gefährdung sind wesentliche Fortschritte erzielt worden. Deshalb war eine umfassende Standortbeurteilung über den Stand der Technik der Erdbebenaspekte von Talsperren angebracht.

Der vorliegende Artikel ist eine Zusammenfassung des General Report über Erdbebenaspekte von Talsperren, der vom Verfasser am ICOLD-Kongress in Montreal präsentiert worden ist.

Abstract

One of the four topics discussed during the 21st ICOLD Congress, which was held in Montreal from June 16 to 20, 2003, was concerned with seismic aspects of dams. The 73 papers received from 23 different countries, covered the following relatively broad areas (ICOLD, 2003): (I) Observed earthquake effects on dams and seismic hazard assessment; (II) Seismic aspects of embankment dams including liquefaction; (III) Seismic aspects of concrete dams; and (IV) Seismic rehabilitation of dams and appurtenant structures.

Since 1979 ICOLD Congress in New Delhi when the question of seismicity and aseismic design of dams was discussed the last time, the seismic design criteria have changed, important experience with the seismic behaviour of large dams has been gained, and many new developments in the whole field of earthquake engineering and seismic hazard assessment have taken place. Therefore, a global review of the state-of-practice in seismic aspects of dams was appropriate.

The paper summarizes the main topics of the author's General Report on Seismic Aspects of Dams presented at the ICOLD Congress in Montreal.

Übersicht

1971 verursachte das San-Fernando-Erdbeben grosse Schäden am Lower-San-Fernando-Damm, einem sog. «hydraulic fill»-Damm, eine Bauweise, die heutzutage nicht mehr verwendet wird. Das Beben verursachte zudem oberhalb eines der Widerlager der 116 m hohen Pacoima-Bogenmauer maximale Bodenbeschleunigungen von 1,2 g, das heisst Spitzenbeschleunigungen, die bis anhin bei Talsperren unbekannt waren. Die Schäden an der Pacoima-Mauer waren jedoch gering, was sicher auch auf den relativ tiefen Wasserspiegel im Stausee zurückzuführen war. Dieses Ereignis hatte einen grossen Einfluss auf die Entwicklung von dynamischen Berechnungsmethoden von Staumauern und Schüttdämmen. Speziell in der Beurteilung der Verflüssigungsgefährdung von Schüttmaterialien wurden grosse Fortschritte erzielt. Bis 1971 wurden Staumauern nach der pseudostatischen Methode gegen Erdbeben bemessen, eine Methode, die aus den 1930er-Jahren stammte und bei Ingenieuren der Einfachheit wegen immer noch sehr beliebt ist. Dabei wurden die Trägheitskräfte der Mauer sowie die hydrodynamischen Drücke aus dem Stausee als statisch äquivalente Kräfte betrachtet. Bei den Schüttdämmen wurden konventionelle Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt, wobei in der potenziellen Gleitmasse statisch äquivalente horizontale Trägheitskräfte angenommen wurden. Die Erdbebeneinwirkung wurde durch einen seismischen Koeffizienten (oft wurde ein Wert von 0,1 verwendet) charakterisiert. Diese Methoden werden heute als überholt betrachtet, da sie in vielen Fällen zu falschen Ergebnissen führen können.

Für die Erdbebenberechnung von Talsperren sind anspruchsvollere Rechenverfahren erforderlich als bei statischen Einwirkungen, deshalb ist die Entwicklung der dynamischen Berechnungsmethoden eng mit der Entwicklung in der Computertechnik verbunden. Wesentliche Fortschritte sind bei der linear-elastischen dynamischen Analyse von Staumauern erzielt worden, wobei das Zusammenwirken mit der Fundation und dem Stausee ebenfalls modelliert wird. Für Schüttdämme wurde die äquivalente lineare Rechenmethode entwickelt, eine Methode, die in der Praxis weit verbreitet ist und auch heute noch verwendet wird. Verfahren zur nichtlinearen dynamischen Berechnung von Talsperren während eines Starkbebens befinden sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Bei den Staumauern geht es in erster Linie um diskrete Phänomene wie das Öffnen der injizierten Kontraktionsfugen, die Rissbildung entlang den Arbeitsfugen sowie die Rissbildung im Massenbeton. Bei den Schüttdämmen liegt das Problem im inelastischen dynamischen Verhalten der Schüttmaterialien sowie im Aufbau von Porenwasserspannungen. Auch die dynamische Interaktion zwischen Talsperre und Untergrund ist immer noch ein Problem, das noch nicht zufriedenstellend gelöst worden ist, da die vorhandenen Modelle bisher kaum der Wirklichkeit entsprechen.

Wesentliche Erkenntnisse über die dynamischen Eigenschaften von Schüttmaterialien und den Untergrund konnten aus Versuchen gewonnen werden. Dynamische Materialuntersuchungen gehören jedoch bei den meisten Schüttdämmen zur Ausnahme.

Wie bis anhin ist man auf Beobachtungen über das Verhalten von Talsperren bei Starkbeben angewiesen. Das gilt speziell für die sehr grossen Talsperren und die neuen Talsperrentypen wie «roller compacted concrete»(RCC)-Staumauern und «concrete-faced rockfill»(CFR)-Dämme. Starkbeben werden die wirklichen Schwächen und Stärken zeigen, die mit rein analytischen Mitteln nicht erfasst werden können. Solange diese Erfahrung fehlt, muss man sich mit Modellversuchen begnügen. Ein Problem, das näher untersucht werden muss, sind die hohen Geschwindigkeitsimpulse der Bodenbewegung, die im Nahbereich einer Verwerfung beobachtet wurden.

Erdbeben erschüttern sämtliche Elemente einer Stauanlage, d.h. die Talsperre, den Untergrund der Sperre, den Stausee und die Uferböschungen, die Sicherheitssys-

teme, das Druckwassersystem, die Nebenanlagen, unterirdische Anlagen, hydromechanische und elektromechanische Komponenten, Leitungen usw. Deshalb führen redundante Systeme nicht automatisch zu einer erhöhten Sicherheit wichtiger Komponenten. Nach dem heutigen Stand der Technik müssen alle diese Elemente eine genügende Erdbebensicherheit aufweisen. Beispielsweise sind für sicherheitsrelevante Komponenten die gleichen seismischen Auslegungskriterien zu verwenden wie für die Talsperre. Für weniger wichtige Nebenanlagen können beim Fehlen von Erdbebenvorschriften die Bauwerksnormen verwendet werden. Ein wichtiger Punkt ist, dass die Talsperreningenieure, Geotechniker, Hydromechaniker, Elektroingenieure usw. die gleichen Erdbebenbemessungskriterien verwenden. Das ist leider oft nicht der Fall. Bei gewissen Berufsgruppen wird Erdbeben sogar als akzeptiertes Risiko betrachtet und deshalb vernachlässigt. Diese Inkonsistenz führt mit dazu, dass eine Stauanlage bereits nach wenigen Jahren aufgerüstet werden muss. Ein Beispiel dafür sind Hochwasserentlastungen auf der Krone von zwei Gewichtsmauern in Neuseeland (Wieland, 2003), die ursprünglich für einen seismischen Koeffizienten von 0,1 ausgelegt worden sind, dabei wurde die dynamische Verstärkung der Bodenbewegung vom Mauerfuss zur Mauerkrone vernachlässigt. Kürzlich wurden diese Hochwasserentlastungen seismisch verstärkt, dabei wurde als Bemessungskriterium eine Horizontalbeschleunigung von 1,9 g verwendet (Bild 1).

Da aufgrund der technisch überholten Bemessungskriterien die Erdbebensicherheit vieler der bestehenden Talsperren unbekannt ist und da zahlreiche kleine Dämme in armen ländlichen Gebieten (speziell in Indien) von Organisationen und Gruppen erstellt werden, die keine ausreichende Erfahrung im Dammbau haben, ist es unbedingt erforderlich, die Leute zu erreichen, die für diese Projekte verantwortlich sind. Dabei sind die Auslegungskriterien basierend auf Risikobetrachtungen festzulegen. Nach dem Bhuj-Erdbeben von 2001 in Indien, wo zahlreiche Schüttdämme beschädigt worden sind (Bild 2), wurde festgestellt, dass rund 245 Dämme, die Mehrzahl Erddämme mit einer Höhe von weniger als 15 m, verstärkt werden mussten. Da zum Zeitpunkt des Erdbebens alle Reservoirs praktisch leer waren, entstanden keine grösseren Schäden durch austretendes Wasser.

Seismische Gefährdung

Die Bestimmung der Bodenbewegung am Standort von wichtigen Infrastrukturprojekten und Projekten mit einem sehr grossen Schadenpotenzial ist eines der Kernprobleme für die Beurteilung der Erdbebensicherheit. Eine umfassende Zusammenstellung über den Stand der Technik auf dem Gebiet der seismischen Gefährdung findet der Leser in Abrahamson (2000).

Erdbeben können bei Talsperren durch folgende Phänomene Schäden verursachen:

I Bodenverschiebungen, die in einer Talsperre, im Untergrund, in Nebenanlagen und Einrichtungen usw. Erschütterungen verursachen.

II Verschiebungen entlang von Verwerfungen in der Talsperrenfundation oder im Stausee, die direkte strukturelle Schäden an einer Sperre verursachen oder zu einem Verlust an Freibord führen können.

III Massenbewegungen in den Stausee, diese verursachen Impulswellen, können den Grundablass verstopfen usw.

Normalerweise befassen sich Erdbebenvorschriften nur mit Erdbebenerschütterungen. Diese verursachen Spannungen, Deformationen, Risse, Gleit- und Kippbewegungen von Böschungen bzw. schlanken Bauteilen, Bodenverflüssigung usw.

Die Gefährdung durch Felsstürze und Rutschungen wird in bergigen Gegenden oft unterschätzt. Beispielsweise ereigneten sich während des Manjil-Erdbebens von 1990 in Iran und dem Chi-Chi-Erdbeben von 1999 in Taiwan jeweils mehr als 10000 Felsstürze. Diese Massenbewegungen können den Zugang zu einer Stauanlage und allfällige Rettungseinsätze stark verzögern. Grosse Felsstürze können auch selber zur Bildung von Stauseen führen wie z.B. der Earthquake Lake, der 1959 durch einen 20 Mm^3 Felssturz während des Hebgen-Lake-Erdbebens in Montana, USA, gebildet wurde (ein künstlicher Ausfluss wurde kurz nach dem Beben geschaffen) sowie der Lake Sarez, der durch einen Felssturz von 2200 Mm^3 während eines Magnitude-7,4-Erdbebens 1911 in Tadschikistan entstanden ist (Der Damm mit einer Höhe von 650 m steht heute noch, und es gibt keinen kontrollierten Ausfluss aus dem Stausee).

Falls sich ein starkes Beben ereignet, das eine nach dem heutigen Stand der Technik dimensionierte Talsperre beschädigen kann, welche dem maximal möglichen Beben (MCE) widerstehen kann, dann ist zu erwarten, dass die Gebäude und Infrastrukturbauten im Bereich der Sperre und des Stausees noch stärker beschädigt sein werden und dass der Zugang zur Stauanlage stark beeinträchtigt sein wird. (Anmerkung: Im Folgenden wird der Einfachheit halber der Begriff MCE verwendet, um starke Bodenbewegungen zu charakterisieren. MCE steht deshalb auch für das maximale Bemessungserdbeben oder das Sicherheitserdbeben usw.).

Bedeutung des maximalen Wertes der Bodenbeschleunigung

Trotz allen Nachteilen wird der Maximalwert der Bodenbeschleunigung (PGA) immer noch verwendet, um auf einfache Art und Weise eine Aussage über die Stärke der Bodenbewegung an einem bestimmten Standort machen zu können. Es ist jedoch seit langem bekannt, dass zur Bestimmung der dynamischen Antwort einer Staumauer das Beschleunigungsantwortspektrum eine weit bessere Darstellung der Bodenbewegung ist als der PGA-Wert.

Sehr oft wird die Frage gestellt, welcher Zusammenhang zwischen dem seismischen Koeffizienten und dem PGA-Wert besteht. Die Antwort ist nicht einfach, da der seismische Koeffizient mit der pseudostatischen Berechnungsmethode verknüpft ist und der Zeitverlauf der Bodenbeschleunigung sowie der PGA-Wert mit einer dynamischen Berechnungsmethode. Die Ergebnisse der entsprechenden Talsperrenberech-

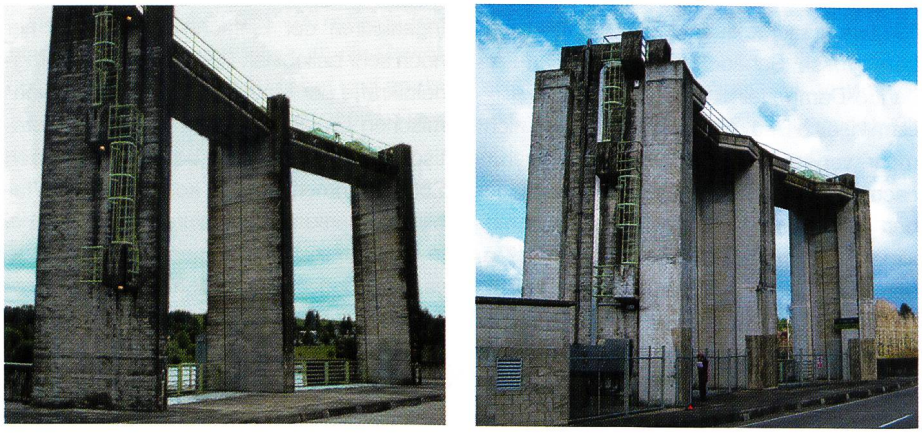


Bild 1. Verstärkung der Hochwasserentlastung auf der Krone der 56 m hohen Whakamura-Gewichtsmauer in Neuseeland. Links: ursprüngliche Konstruktion, die 1956 für seismischen Koeffizienten von 0,1 ausgelegt wurde; rechts: verstärkte Konstruktion mit neuem seismischem Bemessungswert von 1,9 g (Fotos: P. F. Foster).

Bild 2. Erdbebenschäden an zwei Schüttdämmen (links: Shivlakha-Damm mit wasserseitiger Rutschung, rechts: massive Querrisse und Setzungen im Chang-Damm), die während des Bhuj-Erdbebens vom 26. Januar 2001 in Indien beschädigt wurden. Insgesamt mussten bei rund 245 Dämmen Reparatur- und Verstärkungsmassnahmen getroffen werden (Fotos: Prof. S. K. Jain und M. S. Patel).

nungen lassen sich deshalb nicht übertragen, auch wenn eine Beziehung zwischen den beiden Grössen erstellt werden kann.

Wenn wir annehmen, dass der seismische Koeffizient in etwa dem Effektivwert der Bodenbeschleunigung entspricht und Letzterer mit ca. $^2/_3$ des PGA-Wertes angegeben werden kann (bei einer harmonischen Bodenbewegung ergibt sich ein Wert von 0,71), dann entspricht ein seismischer Koeffizient von 0,1 einem PGA-Wert von 0,15 g. Da in der Vergangenheit Talsperren normalerweise für einen seismischen Koeffizienten von 0,1 ausgelegt wurden, müsste deshalb bei neuen Talsperren ein PGA-Wert des Bemessungsbebens von mindestens 0,15 g verwendet werden. Ein seismischer Koeffizient von 0,1 wurde auch in Gebieten geringer bis mässiger Seismizität verwendet, deshalb sind Talsperren, wo nun der PGA-Wert des MCE unter 0,1 g bis 0,15 g fallen sollte, kritisch zu betrachten. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass bereits relativ kleine Erdbeben mit Magnituden um 5,5 und Herd nahe der Erdoberfläche maximale Bodenbeschleunigungen von weit über 0,15 g verursachen können (vgl. hierzu auch Kapitel «Starkbebenaufzeichnungen»). Derartige Beben können fast überall auftreten.

Der Maximalwert der Bodenbeschleunigung ist von geringer Bedeutung, wenn er durch hohe Frequenzen charakterisiert wird (wie z.B. bei Sprengungen). Bei Erdbebenanregungen mit dominanten Frequenzen der Bodenbeschleunigung von weniger als 10 Hz ist der PGA-Wert für die Rissebildung vor allem in kleineren Staumauern oder Mauerwerkteilen von Bedeutung.

Seismische Risikobetrachtungen

In Gebieten geringer bis mässiger Seismizität ist die Meinung weit verbreitet, dass der Erdbebengefahr zu viel Gewicht beigemessen wird und dass die erdbebensichere Bemessung eher etwas für Japan, Kalifornien, die Türkei, Iran usw. sei. Dies mag in einigen Fällen zutreffen. Tatsache bleibt, dass Talsperren mit einem grossen Schadenpotenzial in der Lage sein müssen, den Bodenbewegungen des MCE zu widerstehen. Dies ist eine konsistente Forderung, da Talsperren auch auf das maximal mögliche Hochwasser ausgelegt werden müssen. Gegen letzte Forderung gibt es kaum Einwände. Bei sehr seltenen Starkbeben kann der PGA-Wert auch in Gebieten, die nicht als Erdbebengebiete bekannt sind, sehr hohe Werte annehmen, was aus Bild 3 für eine Stauanlage in Australien ersichtlich ist. Bei einer Wiederkehrperiode von rund 500 Jahren, was den gängigen Anforderungen für die Bauwerksnormen entspricht, resultiert eine Spitzenbeschleunigung von weniger als 0,1 g. Bei einem Beben mit einer Wiederkehrperiode von 10 000 Jahren steigt der PGA-Wert bereits auf ca. 0,4 g an. Ähnliche Werte ergeben sich bei uns auch für einige Stauanlagen im Wallis.

Das Erdbebenrisiko für eine Stauanlage ist das Produkt der seismischen Gefährdung (z.B. ausgedrückt als Überschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten PGA-Wertes usw.) mit der Erdbebenverletzlichkeit einer Stauanlage für ein bestimmtes Gefährdungsniveau und den Konsequenzen des Erdbebenschadens an einer Stauanlage (z.B. Verlust der Verfügbarkeit des Wassers im Stausee, unkontrolliertes Ausfliessen des Stausees, Schäden an Talsperre und Nebenanlagen usw.). Die direkten Erdbebenschäden an Mensch, Umwelt, Gebäuden, Infrastrukturbauten usw. im Gebiet der Stauanlage müssen in dieser Risikoanalyse nicht berücksichtigt werden, da diese bei tektonischen Beben nichts mit der Stauanlage zu tun haben

Im Fall von Erdbeben, die durch den Stausee ausgelöst werden (sog. Reservoir-triggered Seismicity – RTS), können jedoch an Gebäuden und Infrastrukturbauten Schäden auftreten. Die Auswirkungen von RTS müssen deshalb in einer Risikobetrachtung berücksichtigt werden.

Im Vordergrund steht jedoch immer die Sicherheit der Talsperre, da die Schäden und Konsequenzen eines Talsperrenbruchs die wirtschaftlichen Schäden des Eigentümers durch den Verlust einer grossen Stauanlage normalerweise bei weitem übersteigen.

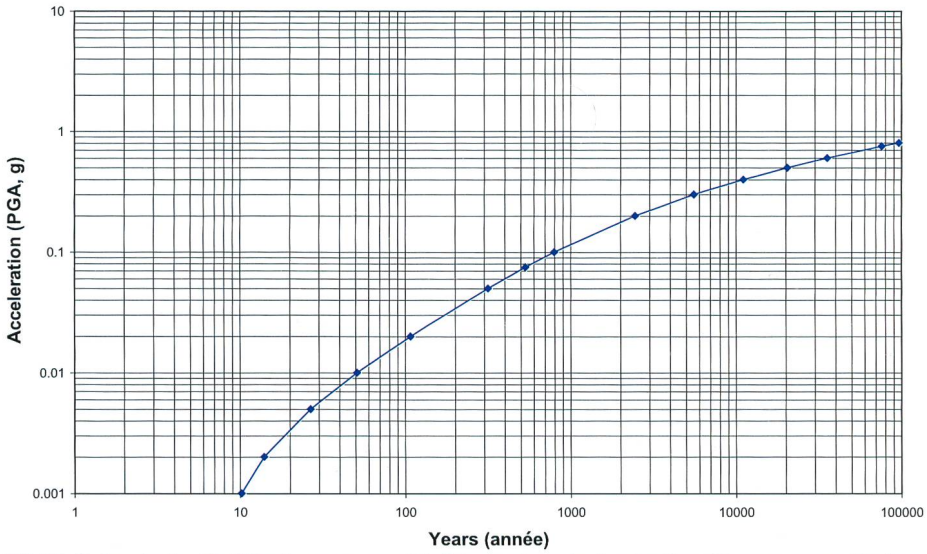


Bild 3. Seismische Gefährdungskurve für Stauanlage in Australien (Yarrawonga-Wehr, Bild: S. D. Fox).

Deshalb ist bei Risikobetrachtungen immer von einem gefüllten Stausee auszugehen, obwohl bei bestimmten Talsperrentypen (z.B. Bogenmauern) bei leerem Stausee ungünstigere seismische Beanspruchungen auftreten können als bei vollem See.

Inelastische Deformationen in Staumauern

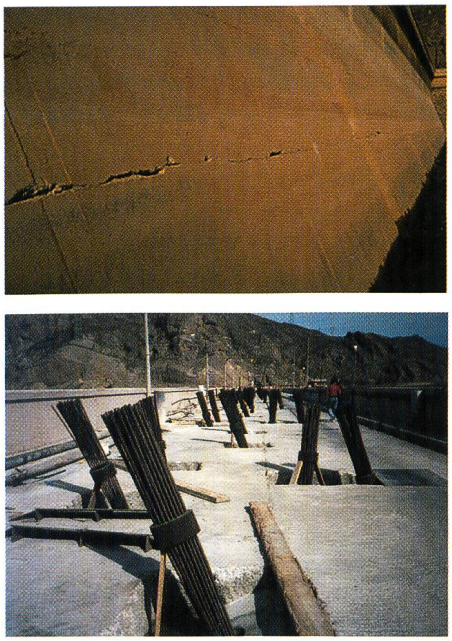
Die wenigen Beobachtungen von Erdbebenschäden an Staumauern haben gezeigt, dass die Bodenbewegung im hoch beanspruchten oberen Teil von Staumauern Risse verursacht und zu Bewegungen in den Kontraktionsfugen führt. Diese Risse verlaufen vorzugsweise entlang den Arbeitsfugen im Massenbeton, da die Festigkeit der Arbeitsfugen im Allgemeinen geringer ist als diejenige des Massenbetons. Massgebend für die Risse sind die dynamischen Zugspannungen und die geringe dynamische Zugfestigkeit, die den Wert von ca. 4 MPa kaum übersteigt. Die erdbebenbedingten Druckspannungen stellen kein Problem dar und die Nichtlinearitäten, die bei einem Starkbeben auftreten, sind in erster Linie auf die Rissebildung sowie die Bewegungen in den Rissen und Fugen zurückzuführen. In Bild 4 sind typische Horizontalrisse entlang den Arbeitsfugen dargestellt, die 1990 während des Manjil-Erdbebens im Iran im oberen Teil der Sefid-Rud-Pfeilerkopfmauer entstanden sind. Alle Horizontalrisse verliefen von der Oberwasser- zur Unterwasserseite.

Sobald ein Betonblock durch Risse und Fugen vom übrigen Teil der Mauer getrennt ist, kann dieser Gleit- und Kippbewegungen erfahren, ohne dass das zum Bruch einer Staumauer führt.

Fugen und Risse schützen die ungerissenen Teile einer Mauer vor hohen dynamischen Beanspruchungen. Deshalb treten nur vereinzelte Risse auf. Horizontalrisse sind von Vorteil, da die dynamische Gleitstabilität eines Blockes mit horizontaler Gleitfuge am grössten ist. Die 57-m-Lower-Crystal-Springs-Gewichtsmauer (Bild 5) bestätigt diese Annahme. Die Mauer befindet sich wenige Kilometer von der San-Andreas-Verwerfung entfernt und hat die starken Bodenbewegungen des San-Francisco-Erdbebens von 1906 in Kalifornien schadlos überstanden. Wie aus Bild 5 ersichtlich, besteht die Mauer aus zahlreichen verzahnten Betonblöcken. Während des Bebens haben sich einige der Fugen geöffnet und gegen Ende des Bebens wieder geschlossen.

Da bisher keine Bogenmauer während eines Erdbebens beschädigt worden ist, gibt es kaum Hinweise über die Schäden, die bei den starken Bodenbewegungen des MCE entstehen können. Es gibt inzwischen aber mehrere experimentelle Untersuchungen aus den USA und China. Diese lassen sich jedoch nicht verallgemeinern, da die Modelle und die verwendeten Erdbebenanregungen nur teilweise der Realität entsprechen.

Es ist jedoch aufgrund linear-elastischer Berechnungen klar, dass während eines Starkbebens dynamische Zugspannungen auftreten können, die die Zugfestigkeit von Massenbeton bei weitem übersteigen. Deshalb sind Risse und Fugenbewegungen zu erwarten.



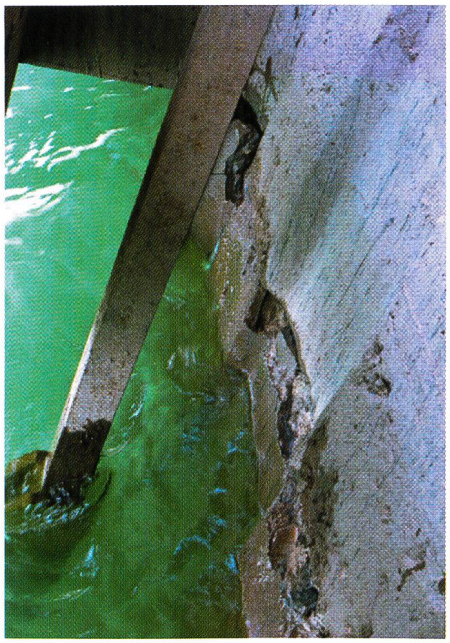


Bild 4. Horizontalrisse entlang den Arbeitsfugen im oberen Bereich der Sefid-Rud-Pfeilerkopfmauer, die 1990 während des Magnitude-7,7-Manjil-Erdbebens im Nordwesten Irans entstanden. Die Risse wurden mit Epoxymörtel ausinjiziert, und durch Vertikalvorspannung wurde die Scherfestigkeit verbessert.

Was die nichtlineare Erdbebenberechnung von Staumauern anbelangt, kann festgestellt werden, dass inzwischen auch in der Praxis das Öffnen der Kontraktionsfugen berücksichtigt wird. Dies ist ein gangbarer Weg bevor kompliziertere Modelle verwendet werden können. Rechenmodelle mit verteilten Rissen im Massenbeton (sog. «smeared crack models») eignen sich nur zur Lokalisierung von Rissen, nicht aber zur Vorhersage des dynamischen Verhaltens einer Mauer nach der Bildung von Rissen.

Inelastische Deformationen in Schüttdämmen

Zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Schüttdämmen werden normalerweise folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der bleibenden Verformungen am Ende eines Bebens (wichtig für die Bestimmung des Verlustes an Freibord).
- Berechnung der Böschungsstabilität während und nach dem Erdbeben und Ermittlung der dynamischen Gleitverschiebungen von Böschungen.
- Beurteilung des Aufbaus von Porenwasserspannungen im Damm und Untergrund (Bodenverflüssigung).
- Abschätzung des Schadens an Filter-, Drainage- und Übergangsschichten und Kontrolle ihrer Funktionstüchtigkeit nach einem Erdbeben.
- Abschätzung des Schadens an Dichtungselementen im Damm und der Fundation (Kern, wasserseitige Dichtungselemente aus Beton oder Asphalt, Geomembrane, Dichtungsschirm in Fundation usw.).
- Beurteilung der Verwundbarkeit eines Dammes gegen interne Erosion nach der Bildung von Rissen, Gleitverschiebungen von Böschungen oder geschwächten Materialzonen infolge hoher Schubdehnungen usw.

Bodenverflüssigung ist in erster Linie ein Problem für Dämme im Bergbau (sog. Tailings-Dämme) und für kleine Dämme aus kohäsionslosem, locker gelagertem Material oder Dämme, die auf derartigen Böden stehen (Bild 2). Wenn die Bodenbewegung genügend stark ist, sind auch andere Schütt- und Fundationsmaterialien gefährdet.

Bei grossen Schüttdämmen basiert die Erdbebensicherheitsbeurteilung vor allem auf den erdbebenbedingten Dammdeformationen. Die Bestimmung der Setzungen von grossen Steinschüttdämmen oder CFR-Dämmen ist immer noch sehr approximativ, da die meisten dynamischen Bodenuntersuchungen für Korngrössen von weniger als 5 cm durchgeführt werden. Dies ist vor allem ein Problem bei Steinschüttdämmen und

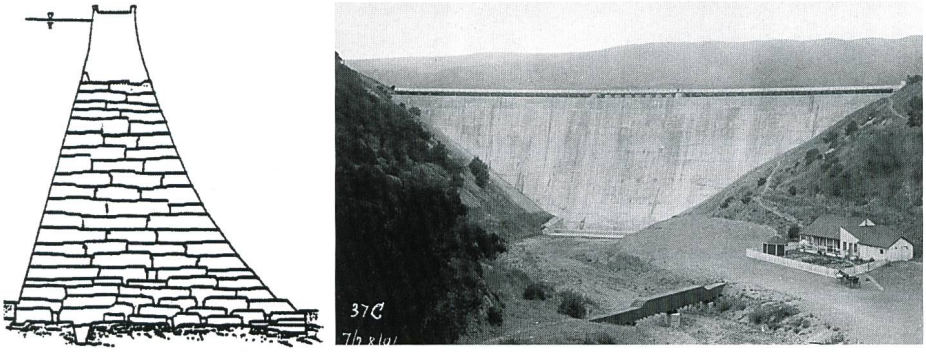


Bild 5. Die Lower-Crystal-Springs-Gewichtsmauer in unmittelbarer Nähe der San-Andreas-Verwerfung hat die starken Erschütterungen des San-Francisco-Erdbebens von 1906 schadlos überstanden. Die 44,5 m hohe Mauer besteht aus verzahnten Betonblöcken, und bei starker seismischer Beanspruchung können sich kurzfristig einige der Fugen öffnen. Als 1887 mit dem Bau dieser Mauer begonnen wurde, war dies weltweit die grösste Staumauer. Die Mauer wurde 1911 erhöht (Foto: City of San Francisco).

Dämmen, die Materialien mit grossen Steinen enthalten, die beim Bau nicht oder nur ungenügend verdichtet werden konnten. Schlecht verdichtete Steinschüttdämme mögen sich wohl stark setzen, aber können einem Starkbeben trotzdem widerstehen. Diese Aussage ist jedoch in jedem Fall durch Fachleute zu verifizieren.

Querrisse als Folge von Dammverformungen sind ein wichtiger Faktor, da derartige Risse zum Bruch von Dämmen führen können, die keine Filter-, Drainage- und Übergangszonen aufweisen, oder in Dämmen, wo diese Zonen nicht über den Stauseespiegel hinaufführen oder wo moderne Filterkriterien beim Bau des Dammes ignoriert wurden.

Erdbebenaspekte von RCC-Mauern

RCC-Staumauern sind vorwiegend Gewichtsmauern (oder vereinzelt auch Bogengewichtsmauern), deren Erdbebenverhalten demjenigen von konventionellen Gewichtsmauern entspricht. Hohe Erdbebenbeanspruchungen sind im oberen Teil der Staumauern zu erwarten.

Der Hauptunterschied zwischen RCC- und konventionellen Staumauern liegt im unterschiedlichen Verhalten des eingebauten Massenbetons. In RCC-Mauern beträgt die Zugfestigkeit in den zahlreichen horizontalen Arbeitsfugen nur einen Bruchteil derjenigen des Grundmaterials. Das bedeutet, dass sich im Falle eines Starkbebens Horizontalrisse entlang einiger dieser Fugen bilden. Zudem werden sich auch Bewegungen entlang von Kontraktionsfugen einstellen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Horizontalrisse von der Wasser- zur Luftseite ausdehnen werden. Der obere Teil der Mauer wird deshalb vollständig abgetrennt. Wie bereits im Abschnitt über die inelastischen Verformungen bei Staumauern erwähnt, schützen derartige Risse die anderen Teile der Mauer vor Überbeanspruchung. Das dynamische Verhalten eines abgetrennten Betonblockes kann relativ einfach durch ein Starrkörpermodell bestimmt werden, wo sämtliche Verformungen an den Riss- und Fugenflächen stattfinden.

Das durch ein Starkbeben verursachte Rissebild in einer RCC-Gewichtsmauer kann wie dasjenige in der Sefid-Rud-Pfeilerkopfmauer (Bild 4) nach dem Manjil-Erdbeben von 1990 ausschauen.

Basierend auf dieser rein qualitativen Beurteilung kann gefolgert werden, dass das Erdbebenverhalten von RCC Staumauern eher besser ist als dasjenige von entsprechenden konventionellen Mauern, da sich vorzugsweise Horizontalrisse bilden werden, was bei konventionellen Staumauern nicht unbedingt der Fall sein wird. Zudem weisen Blöcke, die durch einen Horizontalriss abgetrennt sind, ein besseres dynamisches Verhalten auf als Blöcke mit geneigter Rissfläche. Zur Bestätigung dieser Hypothese sind jedoch zusätzliche Untersuchungen erforderlich, und Beobachtungen über das Verhalten von RCC-Mauern während Starkbeben müssten – wenn vorhanden – analysiert werden

Erdbebenaspekte von Schüttdämmen mit wasserseitiger Betonabdichtung

Die Schüttdämme mit wasserseitiger Betonabdichtung (CFR-Dämme) werden von verschiedenen Fachleuten als die erdbebensichersten Talsperren betrachtet. Im Allgemeinen werden Schüttdämme als zweidimensionale Strukturen analysiert, wobei der höchste Querschnitt verwendet wird. In diesen Erdbebenberechnungen bleiben die dynamischen Biegebeanspruchungen der armierten Betonabdichtung relativ gering.

Oft wird jedoch übersehen, dass die Betonabdichtung für die Erdbebenkomponente in Talquerrichtung im Vergleich zum benachbarten Schüttmaterial als sehr steife Scheibe wirkt und aufgrund des unterschiedlichen Deformationsverhaltens sowie des unterschiedlichen dynamischen Verhaltens während eines Erdbebens sehr grosse Kräfte anziehen kann. Die Kräfte, die vom Schüttmaterial auf die Betonabdichtung übertragen werden können, sind im Prinzip nur durch die Reibung beschränkt. Die daraus resultierenden Scheibenkräfte können Schäden an den Fugen (Abscherungen) und dem Plinth führen, und lokal kann die relativ dünne Betonmembran sogar ausbeulen. Dieses Szenario ist noch eher hypothetischer Natur, da bisher noch keine entsprechenden Beobachtungen von CFR-Dämmen vorliegen. Es ist deshalb noch verfrüht, anzunehmen, dass CFR-Dämme die sichersten Talsperren sind.

Erdbebenverstärkung von Talsperren

In Kalifornien wurde in den vergangenen Jahren die Erdbebensicherheit der 1200 Talsperren, die unter Aufsicht des Staates sind, sowie von 175 eigenen Talsperren überprüft. Als Folge davon wurde bei 116 Talsperren die Erdbebensicherheit verbessert. Als Sofortmassnahme wurde bei der Feststellung einer ungenügenden Erdbebensicherheit der Stausee teilweise abgesenkt. Die verschiedenen Massnahmen, die getroffen wurden, sind in Tabelle1 aufgeführt. Bei mehreren Talsperren war mehr als eine Massnahme erforderlich (Bild 6).

Diese seismischen Verstärkungsmassnahmen sind kein Ersatz für Sicherheitsorgane in den Talsperren oder für die Notfallplanung und Notfallsysteme bei einem Talsperrenbruch.

Beim Bhuj-Erdbeben von 2001 in Indien wurden zahlreiche Schüttdämme (vorwiegend Erddämme mit einer Höhe von weniger als 15 m) stark beschädigt. Rund 245 beschädigte Dämme mussten in der Folge verstärkt werden. Bild 7 zeigt die Schäden an zwei der grösseren Talsperren sowie die Massnahmen, die unmittelbar nach dem Beben getroffen wurden (Patel et al., 2003). Chang-Damm ist ein homogener Erddamm mit einer Mauerwerksdichtungswand. Der Damm hat eine Höhe von 17 m, eine Länge von 1227 m und wurde 1959 fertig gestellt. Der Damm und die Dichtungswand kollabierten buchstäblich im Bereich des Flusslaufes infolge Bodenverflüssigung. In diesem Bereich wurde der Damm entfernt, um zu verhindern, dass dieser während des Monsuns zerstört wird. Es ist jedoch geplant, den Damm wieder aufzubauen.

Um das Erdbebenrisiko von Stauanlagen effizient vermindern zu können, ist es

Dammanschüttungen (Kronenverbreiterung) oder Abflachung der Böschungen von Erddämmen	34
Vergrösserung des Freibords durch Erhöhung von Schüttdämmen	3
Einbau von Risse hemmenden Zonen (Crack stopper zones)	6
Entfernen und ersetzen von ungeeigneten Materialien im Untergrund und/oder Schüttdämmen	11
Vibroflotation – Vibrationsverdichtung oder dynamische Verdichtung	4
Injektionen in Fundation, Drainagebohrungen oder Bau einer Dichtungswand	11
Umleitungsstollen zubetoniert	2
Staumauern mit Betonpfeilern verstärkt	7
Mehrfachgewölbemauern versteift oder armiert	4
Installation von Vorspannkabeln	3
Erhöhung des Freibords durch Tiefersetzung der Hochwasserentlastung oder Entfernen der Schützen der Hochwasserentlastung usw.	27
Talsperre entfernt	5
Bau einer Ersatzsperre (z.B. Ersatz durch Wassertanks)	10
Stausee entleert (einige werden als Hochwasserretentionsbecken genutzt)	7
Permanente Restriktionen des Stauziels	12
Temporäre Restriktionen des Stauziels bis zu Fertigstellung permanenter Erdbebenverstärkungsmassnahmen	36
Verbesserung oder Erneuerung der Ablassorgane	21
Ersatz oder Erneuerung der Hochwasserentlastung	2
Total Anzahl Massnahmen (bei einigen Talsperren wurden mehrere Massnahmen getroffen)	205

Tabelle 1. Erdbebenverstärkungsmassnahmen bei 116 Talsperren in Kalifornien (Babbitt, 2003).

aus wirtschaftlichen Gründen äusserst wichtig, dass zuerst die Talsperren mit dem grössten Erdbebenrisiko identifiziert werden. Ein einfaches Verfahren wurde beispielsweise für die Erdbebensicherheitsbeurteilung der Talsperren in Schottland erstellt, das sich auch für Talsperren in anderen Ländern eignet (Morison et al., 2003). Ein ähnliches Verfahren wurde auch in Frankreich verwendet.

Generell darf festgestellt werden, dass sich bereits mehrere Länder mit der Erdbebensicherheit der bestehenden Stauanlagen befassen, befassen wollen oder sich bereits damit befasst haben. Auch in der Schweiz wird man sich in den kommenden Jahren mit dieser Aufgabe befassen.

Durch den Stausee ausgelöste Erdbeben

Wenn eine grosse Talsperre nach dem heutigen Stand des Wissens entworfen und gebaut wurde, was bedeutet, dass sie sicher dem maximal möglichen Erdbeben (MCE) standhalten kann, kann sie auch den Wirkungen des grössten durch den Stausee ausgelösten Erdbebens standhalten, da dieses nicht stärker sein kann als das MCE. Deshalb ist die durch Stauseen ausgelöste Seismizität kein Sicherheitsproblem für eine gut ausgebildete Talsperre oder die Menschen, die durch ein Versagen derselben betroffen sein könnten. Die durch Stauseen ausgelöste Seismizität kann aber ein Problem für Gebäude und Strukturen in der Nähe der Talsperre sein, da diese in aller Regel eine viel kleinere Erdbeben-Standfestigkeit haben als die Talsperre selbst.

In der Mehrheit der durch Stauseen ausgelösten Erdbeben ist deren Stärke gering und kein Problem für die Sicherheit von Bauten. Obwohl die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens der ersten Füllung eines Stausees mit einem schädlichen Erdbeben in ein und derselben Gegend extrem klein ist, besteht Zweifel, ob einige der grössten angeblich von Stauseen ausgehenden Erdbeben wirklich von Stauseen induziert waren. Deshalb bezweifeln Stauanlagenbesitzer die Klassifizierung beobachteter Erdbeben in Gebieten mit grossen Talsperren als vom Aufstau dieser Seen induzierte Ereignisse.

Weil von Stauseen ausgelöste Erdbeben oft oberflächennah sind und ihre Epizentren in der Nähe der Talsperre liegen, können die massgebenden Bodenbeschleunigungen bei den grössten Ereignissen dennoch relativ bedeutend sein.

Starkbebenaufzeichnungen

Nach dem Kobe-Erdbeben von 1995 wurde entschieden, sämtliche 413 Talsperren (die meisten mit einer Höhe von mehr als 15 m), die im Zuständigkeitsbereich des «Ministry of Land, Infrastructure and Transport» in Japan stehen, mit Starkbebengeräten auszurüsten. 1152 Geräte sind zurzeit in diesen Talsperren

Bild 6. Erdbebenverstärkung der Weber-Gewölbemauer. Verstärkung der Widerlagerpfeiler durch RCC-Block, links: Endzustand, rechts: Bauzustand (Fotos: D. Babbitt).

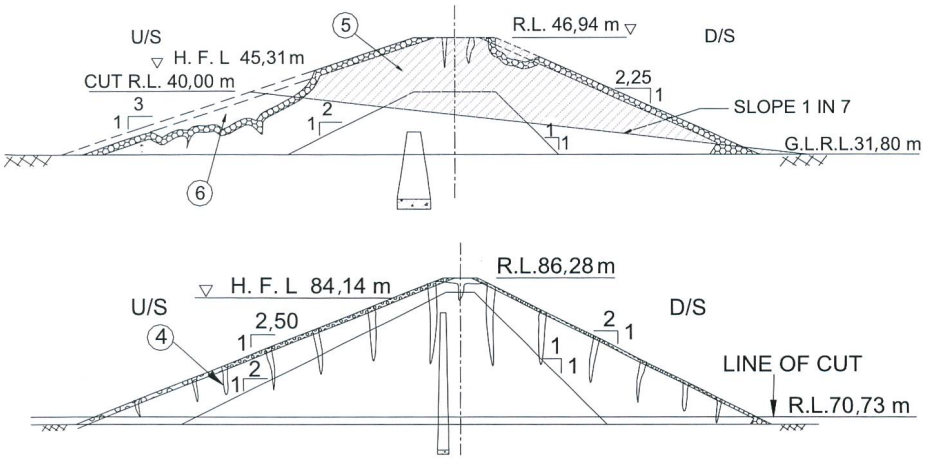


Bild 7. Typische Erdbebenschäden während des Bhuj-Erdbebens von 2001 in Indien (Patel et al., 2003). Oben Suvi-Damm: Gleitverschiebungen in Böschungen, der schraffierte Teil des Dammes wurde entfernt und neu erstellt. Unten Chang-Damm: Längs- und Querrisse sowie Setzungen; der Damm wurde im Bereich des Talwegs bis zum Niveau 70,73 m abgetragen und soll wieder neu erstellt werden.

Standort	Nord-Süd-Komponente	Ost-West-Komponente	Vertikal-komponente	Epizentral-distanz (km)
Magnitude-5,5-Beben				
Yamoto	366	476	360	4,1
Naruse	603	2005	584	3,9
Kasimadai	516	489	183	7,6
Nanngou	268	229	226	6,5
Ishinomaki	302	403	107	11,8
Magnitude-6,2-Hauptbeben				
Yamoto	667	850	1242	4,2
Nangou	366	491	193	9,9
Naruse	636	756	923	1,0
Kasimadai	1606	910	492	10,5
Magnitude-5,3-Beben				
Kanan	649	356	499	1,1
Nangou	276	166	126	4,9
Wakutani	255	342	130	6,9
Momou	175	162	150	8,4

Tabelle 2. Maximale Bodenbeschleunigung in cm/s² während der drei stärksten Erdstösse des Miyagi-Erdbebens vom 26. Juli 2003 in Japan.

installiert, dabei handelt es sich vorwiegend um digitale Geräte. Im Durchschnitt sind drei Geräte pro Sperre installiert, je eines im Freifeld, am Talsperrenfuss und auf der Krone. 236 Geräte in 50 Talsperren sind mit einer gemeinsamen Zentrale verbunden. Bis Ende 2002 wurden an diesen Talsperren 1374 Akzelerogramme mit einem PGA-Wert von mindestens 0,025 g registriert. Diese Information steht allen Interessierten zur Verfügung. Die Daten wurden bereits statistisch analysiert.

Auch in China und Iran gibt es bereits umfangreiche Starkbebenaufzeichnungen von Talsperrenstandorten. Auch in der Schweiz sind in Punt dal Gall, Mauvoisin, Emosson, Grande Dixence und Mattmark verschiedene Beben registriert worden.

Obwohl die Anzahl Aufzeichnungen an Sperrenstandorten beeindruckend ist, ist doch festzuhalten, dass bei kaum einer der instrumentierten Sperren während eines der Beben Schäden entstanden sind.

Aufzeichnungen von Starkbeben analog zum MCE fehlen weitgehend. Die höchsten Beschleunigungen von ca. 2,5 g wurden 1994 während des Northridge-Erdbebens im Kronenbereich der Pacoima-Bogenmauer in Kalifornien gemessen. Eine systematische Auswertung war jedoch nicht möglich, da die installierten Analoggeräte übersteuerten und die Beschleunigungszeitverläufe deshalb nicht zuverlässig digitalisiert werden konnten. Der Wasserspiegel im Stausee war während des Bebens relativ tief, und es entstanden nur relativ geringe Schäden an der Mauer.

Während des Tottori-Erdbebens von 2000 in Japan wurde auf der Krone der Kasho-Gewichtsmauer eine Maximalbeschleunigung von 2,1 g registriert, am Mauerfuss betrug die Spitzenbeschleunigung 0,54 g. Das Beben verursachte keine Schäden an der Mauer. Ein ähnlicher Wert wurde am Mauerfuss der Pacoima-Mauer gemessen. Bodenbeschleunigungen um 0,5 g entsprechen an vielen (seismisch aktiven) Standorten den Bodenbewegungen des MCE, deshalb sind derartige Aufzeichnungen äusserst wertvoll.

Die Instrumentierung von grossen Talsperren mit Starkbebengeräten gehört heute zum Stand der Technik.

Wie hoch die PGA-Werte bei mässigen bis mittelstarken Erdbeben sein können ist aus Tabelle 2 ersichtlich. Am 26. Juli 2003 wurden im Norden der Miyagi-Präfektur in Japan drei stärkere Erdbeben verspürt mit Magnituden von 5,5, 6,2 und 5,3. Die geringe Herdtiefe von ca. 10 km verursachte starke Erschütterungen an der Erdoberfläche mit maximalen Horizontalbeschleunigungen von 2,04 g (Magnitude-5,5-Beben) und maximalen Vertikalbeschleunigungen von 1,27 g (Magnitude-6.2-Beben). Bei diesen Beben gab es keine Todesopfer, aber rund 600 Personen wurden verletzt, 318 Gebäude wurden zerstört und 1617 beschädigt

Unmittelbar nach den Beben wurden 53 Talsperren inspiziert. Es wurden keine Schäden festgestellt. Die grösste Bodenbeschleunigung wurde am Fuss des Kejonuma-Dammes registriert. Diese betrug 179 cm/s² und auf der Krone wurde ein Wert von 319 cm/s² gemessen.

Erdbeben vom 21. Mai 2003 in Algerien und 26. Mai 2003 in Japan

Am 21. Mai 2003 kamen bei einem Erdbeben der Magnitude 6,8 ca. 2270 Menschen in Algerien ums Leben. Mehrere Talsperren befanden sich im Erdbebengebiet. Von Interesse ist vor allem der 106 m hohe Keddara-Schüttdamm, der sich ca. 30 km vom Epizentrum entfernt befand. Der PGA-Wert (auf Fels gemessen) betrug 0,34 g in Ost-West-Richtung, 0,25 g in Nord-Süd-Richtung und 0,25 g vertikal. Auf der Dammkrone wurden nach dem Beben drei kleinere Querrisse beobachtet, die jedoch als unkritisch beurteilt wurden. Auch andere Messwerte zeigten kein abnormales Verhalten. Eine Inspektion sämtlicher elf Dämme im Erdbebengebiet hat ergeben, dass diese das Erdbeben tadellos überstanden haben.

Am 26. Mai 2003 hat sich in Japan ein Magnitude-7,0-Erdbeben ereignet, und 228

Personen wurden verletzt. Das Epizentrum lag im Pazifik unmittelbar vor der Küste. An der Erdoberfläche wurden Spitzenbeschleunigungen von 0,5 g bis 1,0 g registriert. In einer Distanz von rund 80 km wurde an einem Talsperrenstandort ein PGA-Wert von ca. 0,33 g gemessen. Da im Einflussbereich des Bebens mehrere Talsperren mit Starkbebengeräten ausgerüstet waren, konnte unmittelbar nach dem Beben eine erste Auswertung der Daten vorgenommen werden. Bei den Schüttdämmen lag die Verstärkung der Beschleunigung vom Fuss zur Krone bei einem Faktor von 2 bis 3 (bei maximalen PGA-Werten bis zu 0,15 g). Bei den Staumauern lagen die entsprechenden Verstärkungsfaktoren im Bereich von 3 bis 7 (bei maximalen PGA-Werten bis zu 0,22 g).

Schlussbetrachtungen

Weil bisher nur sehr wenige Talsperren starken Erdbeben ausgesetzt waren und deshalb an grossen Talsperren kaum Erdbebenschäden aufgetreten sind, darf nicht geschlossen werden, dass Talsperren generell erdbebensicher seien. Es trifft jedoch zu, dass Talsperren, die nach dem heutigen Stand der Technik gegen Erdbeben ausgelegt sind, auch anderen Einwirkungen und Kräften besser widerstehen können und deshalb sicherer sind. Das Wissen und die Werkzeuge für das erdbebensichere Bauen von Stauanlagen sind im Prinzip vorhanden. Die strukturellen Schwächen von Talsperren bei einem Starkbeben sind jedoch noch zu wenig bekannt, das gilt insbesondere für sehr hohe Talsperren in seismisch aktiven Gebieten, für neue Talsperrentypen wie CFR-Dämme und RCC-Mauern sowie Talsperren an «schwierigen» Standorten. Dass die Erdbebensicherheit von Talsperren nur etwas für die ausgesprochenen Erdbebengebiete wie Japan, Kalifornien, Iran usw. sei und dass zu viel Gewicht auf Erdbebensicherheit gelegt würde, ist reines Wunschdenken, das in Gebieten geringer bis mässiger Seismizität noch weit verbreitet ist.

Die Zeiten, wo Erdbebenschäden an Bauwerken als «höhere Gewalt» und als akzeptiertes Risiko betrachtet wurden, mit der Folge, dass Erdbeben bei der Auslegung von Bauwerken sogar ignoriert werden konnten, sind längst vorbei.

Auch der Hinweis, dass man in der Vergangenheit mehrere Projekte ohne Berücksichtigung von Erdbeben realisiert hätte und aufgrund der bisherigen Erfahrung die Bauwerke erdbebensicher seien, wie das beispielsweise im Untertagebau der Fall war, hat heute keine Berechtigung. Denn was zehnmal falsch gemacht wurde, wird beim elften Mal nicht automatisch richtig.

Es sollte in der Zwischenzeit allgemein bekannt sein, dass die pseudostatische Berechnungsmethode unter Verwendung eines seismischen Koeffizienten von 0,1 ein veraltetes Bemessungskonzept für Talsperren ist, das in vielen Fällen sogar zu falschen Ergebnissen führt. Ein seismischer Koeffizient von 0,1 war bequem, da in den meisten Fällen der Erdbebenlastfall nicht massgebend war. Wenn man beispielsweise die Böschungsstabilität von Dämmen betrachtet, dann wird man feststellen, dass die kritische pseudostatische Beschleunigung, die zu einer Gleitsicherheit von 1,0 führt, in der Grössenordnung von 0,15 g bis 0,25 g liegt. Wenn nun beim MCE eine Bodenbeschleunigung von 0,3 g zu berücksichtigen ist, was für mehrere Talsperrenstandorte in der Schweiz zutrifft, dann ist klar, dass ein Erdbebensicherheitsnachweis mit der pseudostatischen Methode nicht mehr möglich ist.

Der Wunsch nach tiefen Grundbeschleunigungen ist deshalb verständlich, speziell in Gegenden, wo Starkbeben sehr selten sind. Die Verwendung von Beschleunigungswerten des MCE von weniger als 0,1 g bis 0,15 g ist nicht zu empfehlen, da derartige Beschleunigungen nicht einmal einem seismischen Koeffizienten von 0,1 entsprechen, ein Wert der in der Vergangenheit normalerweise bei Talsperren verwendet wurde. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei sehr seltenen Starkbeben wie dem MCE weit höhere Spitzenbeschleunigungen auftreten können.

Für das Erdbebenrisiko sind die gleichen Kriterien zu verwenden wie für das Hochwasserrisiko, d.h. beispielsweise Auslegung auf das MCE und das maximal mögliche Hochwasser. Beim Erdbebenrisiko kommen die grössten Beiträge von den stärksten Erdbeben, da die Verletzlichkeit der Talsperren für diese sehr seltenen Ereignisse stark ansteigt.

Eine konservative seismische Auslegung einer Stauanlage ist die beste Versicherung für ein langes Leben.

Einige der Hauptprobleme, die in der Zukunft gelöst werden müssen, sind wie folgt:

- Überprüfung der Erdbebensicherheit der bestehenden grossen Talsperren, die nicht nach dem heutigen Stand der Technik gegen Erdbeben ausgelegt worden sind und Verstärkung der Talsperren mit unakzeptablem Erdbebenrisiko.
- Überprüfung und Verbesserung der Erdbebensicherheit von kleinen Dämmen, die nicht von Dammfachleuten erstellt wurden und in Zukunft in grosser Zahl erstellt werden (gilt vor allem für ländliche Gebiete in Entwicklungsländern).
- Konsistente Verwendung von seismischen Bemessungskriterien, die auf Risikoanalysen basieren (gilt für neue und alte Talsperren).

Literatur

[1] *Abrahamson N. A.* (2000): State-of-the-practice of Seismic Hazard Assessment, Proc. GeoEng 2000, Int. Conf. on Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 1: Invited Papers, Nov. 2000, Melbourne, Technomic Publications, Lancaster, Pennsylvania.

[2] *Babbitt D. H.* (2003): Improvement of Seismic Safety of Dams in California, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada.

[3] *Davidson R. R., Fox S. D., Cooper B. W.* (2003): Seismic Upgrade of Yarrawonga Weir, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada.

[4] *Foster P. F., Black J. C.* (2003): Remediation Works at Whakamaru and Roxburgh Dams to Ensure the Seismic Safety of the Spillway Structures, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada.

[5] ICOLD (2003): Proceedings 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada, Vol. 3, Q. 83, Seismic Aspects of Dams, ICOLD, Paris.

[6] *Morison A. C., Dempster K. J., Gallocher S., Bu S.* (2003): Use of a Seismic Vulnerability Index for Dams in Scotland, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada.

[7] *Patel M. S., Brahmabhatt V. S.* (2003): Restoration and Rehabilitation of Embankment Dams Damaged Due to Bhuj Earthquake of January 2001, Gujarat, India, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada.

[8] *Wieland M.* (2003): Seismic Aspects of Dams, General Report Q. 83, Vol. 3, Proc. 21st ICOLD Congress, Montreal, Canada, pp. 1243–1362.

Anmerkung

Der vorliegende Artikel basiert auf dem General Report zum Thema «Seismic Aspects of Dams», der vom Autor für den 21. Internationalen Talsperrenkongresses, der vom 16. bis 20. Juni 2003 in Montreal, Kanada, stattfand, verfasst wurde.

Anschrift des Verfassers

Dr. *Martin Wieland*, Chairman, ICOLD Committee on Seismic Aspects of Dam Design, Electrowatt-Ekono AG, Hardturmstrasse 161, Postfach, CH-8037 Zürich.