

# Erdbebensicherheit von Wasserkraftanlagen

Autor(en): **Wieland, Martin**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **104 (2013)**

Heft 2

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-856453>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Erdbebensicherheit von Wasserkraftanlagen

## Sicherheitsrelevante Auswirkungen auf hydromechanische und elektromechanische Komponenten

Grosse Stauanlagen werden seit den 1930er-Jahren weltweit gegen Erdbeben ausgelegt. Die damals verwendeten Verfahren basierten auf einer pseudostatischen Berechnung und einer Beschreibung der Erdbebeneinwirkung durch einen seismischen Koeffizienten. Da eine solche Berechnung aber dem dynamischen Verhalten einer Talsperre nicht gerecht wird, wurde sie 1989 durch die Betriebs- und Sicherheitserdbebenmethode abgelöst. Eine Überprüfung der schweizerischen Stauanlagen mit der neuen Methode wird zurzeit durchgeführt.

### Martin Wieland

Ohne nähere Kenntnis der Erdbebengefährdung wurde in den meisten Ländern praktisch unabhängig von der lokalen Seismizität ein seismischer Koeffizient von 0,1 verwendet. Dieses Verfahren wurde bei allen schweizerischen Stauanlagen verwendet, die gegen Erdbeben ausgelegt wurden. Bis in die 1980er-Jahre wurde diese Methode eingesetzt, und auch heute würden die Ingenieure gerne mit einer derart einfachen Bemessungsmethode arbeiten.

1989 hat das Erdbebenkomitee der Internationalen Talsperrenkommission ein Bulletin mit dem Titel «Selecting Seismic Parameters for Large Dams» publiziert, das sich mit den Erdbebenbemessungskriterien von grossen Talsperren befasst. Dieses Bulletin wurde 2010 überarbeitet [1]. Dabei wurde das Betriebs- und Sicherheitserdbeben eingeführt, und die Beschreibung der Erdbebeneinwirkung durch einen seismischen Koeffizienten wurde obsolet. Es wurde auch realisiert, dass mit einer pseudostatischen Berechnung das dynamische Verhalten einer Talsperre während eines Erdbebens nicht zuverlässig erfasst werden kann und dass die damit erzielten Ergebnisse oft nicht auf der sicheren Seite liegen.

Da die schweizerischen Stauanlagen nach der früheren Methode entworfen wurden, ist nicht näher bekannt, ob sie den heutigen Erdbebensicherheitsanforderungen genügen. Deshalb haben die

Bundesbehörden verlangt, dass die Erdbebensicherheit sämtlicher grosser Talsperren, die unter Bundesaufsicht stehen, bis 2013 überprüft wird. Diese Untersuchungen sind zurzeit im Gang. Bei diesen Abklärungen geht es in erster Linie um die Erdbebensicherheit der Talsperren,

d.h. Staumauern und Schüttdämme. Dabei wird verlangt, dass das Wasser in den Stauseen nach dem Sicherheitsbeben sicher zurückgehalten werden kann und der Wasserspiegel im Stausee unter Kontrolle bleibt.

Bei einem Starkbeben sind Schäden (Risse, Verformungen etc.) an einer Sperre zulässig, soweit der Stausee unmittelbar nach dem Beben sicher ist und nötigenfalls abgesenkt werden kann. Dies bedingt, dass nach dem Sicherheitsbeben der Grundablass geöffnet werden kann bzw. dass ein mittleres Hochwasser nach einem Beben durch die Hochwasserentlastung sicher abgeführt werden kann, da davon auszugehen ist, dass nach einem Starkbeben das Kraftwerk ausser Betrieb ist und kein Wasser turbinieren werden kann.

Nach dem Sicherheitsbeben müssen die sicherheitsrelevanten hydromechanischen Komponenten einer Stauanlage (Grundablass und Schütze der Hochwas-



**Bild 1** Umgestürzter Schaltschrank zur Bedienung der Hochwasserentlastung des Zipingpu-Damms (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).



**Bild 2** Einlaufbauwerke für die Zipingpu-Stauanlage mit beschädigten Bedienungsgebäuden (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).

serentlastung) funktionstüchtig sein. Die Schütze, Schieber und deren Antriebe, Steuerungen, Software, Stromversorgung, Notstromaggregate, Schaltschränke, Leitungen etc. müssen den Einwirkungen des Sicherheitsbebens widerstehen können. Je nachdem, wo sich diese Komponenten befinden, ist für deren Bemessung die Fusspunktbewegung massgebend. Das heisst, dass beispielsweise ein Schaltschrank, der sich auf der Krone einer hohen Bogenmauer befindet, einem Mehrfachen der Bodenbeschleunigung an der Felsoberfläche widerstehen muss. Eine Amplifikation um den Faktor 10 und mehr ist bei Bogenmauern möglich. Es ist deshalb klar, dass die Ingenieure, Lieferanten und Unternehmer, die derartige Komponenten bemessen, herstellen, liefern und installieren, über die Bedeutung dieser Einrichtungen im Erdbebenfall vertraut sind. Hier besteht ein dringender Nachholbedarf, denn die Sicherheit der Stauanlagen ist die Domäne der Bauingenieure, und es besteht oft wenig Koordination zwischen den Maschinen- und Elektroingenieuren, die für die Komponenten zuständig sind.

Die Erdbebenrichtlinien für hydromechanische und elektromechanische Komponenten haben nicht die gleiche Entwicklung durchgemacht wie die Erdbebenbemessungskonzepte von Talsperren.

Es werden deshalb die sehr einfachen, aber veralteten und teilweise falschen Konzepte verwendet, da der Gesamtüberblick fehlt.

Im Folgenden wird die Vielfältigkeit der Erdbebengefährdung bei Talsperren diskutiert. Ein Beispiel veranschaulicht die Auswirkungen eines kleinen Zwischenfalls auf die Sicherheit einer ganzen Stauanlage.

### **Erdbebengefährdung**

Vor dem Wenchuan-Erdbeben vom 12. Mai 2008 gab es nur wenige Stauanlagen, die Starkbeben wie dem heutigen Sicherheitsbeben für grosse Talsperren ausgesetzt waren. Durch das Wenchuan-Beben wurden 1803 Stauanlagen und Stauseen und 403 Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 3300 MW beschädigt. Die Mehrzahl davon befand sich in der Provinz Sichuan in China, und bei 95 % der Anlagen handelte es sich um kleine Dämme. Kein Beben hat bisher nur annähernd so viele Stauanlagen betroffen – es ist das wichtigste Erdbeben für die Talsperrenindustrie.

Starke Erdbeben können je nach Standort für eine Stauanlage eine mehrfache Gefährdung darstellen. Diese Gefährdungen umfassen [2]:

■ Bodenerschütterungen. Jeder Erdbebeningenieur bemisst seine Bauwerke für

diese Gefährdung nach bestehenden Normen und Richtlinien. Bodenerschütterungen wirken gleichzeitig auf sämtliche oberirdischen und unterirdischen Strukturen und Komponenten einer Wasserkraftanlage. Es besteht die Gefahr, dass andere Gefährdungen vernachlässigt werden. Das gilt insbesondere bei den hydromechanischen und elektromechanischen Komponenten.

■ Verschiebungen entlang einer aktiven Verwerfung im Fundament von Talsperren. Für Staumauern ist dies die grösste Gefährdung, da sie in Kombination mit Bodenerschütterungen auftritt und zu einer unkontrollierten Rissbildung in einer Staumauer führt.

■ Verschiebungen entlang Diskontinuitäten im Felsuntergrund von Talsperren, die durch ein Starkbeben in unmittelbarer Nähe der Sperre aktiviert werden.

■ Verschiebungen entlang einer aktiven Verwerfung im Stausee. Diese Gefährdung verursacht Impulswellen oder den Verlust des Freibords der Sperre.

■ Massenbewegungen in den Stausee. Sie verursachen Impulswellen, die zu einem Überströmen der Krone führen können. Dies ist vor allem bei Schüttdämmen zu vermeiden.

■ Felsstürze auf Stauanlagen. Gefährdet sind hier die Hochwasserentlastung mit Schützen und deren Antriebe sowie

sämtliche oberirdischen Nebenanlagen (Bilder 3 bis 7).

■ Bildung natürlicher Dämme durch Erdbeben. Die natürlichen Dämme versagen meistens innerhalb kurzer Zeit und verursachen eine Flutwelle, wenn der Stausee nicht kontrolliert entleert werden kann.

■ Setzungen und Deformationen des Untergrunds. Diese Gefährdung betrifft vor allem Lockergestein, bei dem durch die Erschütterungen Setzungen und durch Bodenverflüssigung grosse Bodenbewegungen auftreten können. Zudem ist im Lockergestein mit einer Verstärkung der Erschütterungen zu rechnen.

■ Andere mögliche Gefährdungen sind beispielsweise Trübestrome in Stauseen, die zu einem Verstopfen der Einlässe führen können.

Bei grossen Stauanlagen, die in tektonisch hochbeanspruchten Gebieten liegen, ist auch mit Beben, die durch den Stausee ausgelöst werden, zu rechnen.

Interessanterweise sind die Wellen in Stauseen, die durch die Bodenerschütterungen verursacht werden, für die Sicherheit der Talsperren kaum von Bedeutung. Die maximale Wellenhöhe entspricht in etwa derjenigen infolge Wind.

Bei jedem Starkbeben ist oft mit neuen Phänomenen zu rechnen, die aufgrund der bisherigen Erfahrung entweder übersehen oder unterbewertet wurden.

Beim Wenchuan-Erdbeben ist es die sehr grosse Anzahl von Steinschlägen und Erdbeben, die entlang der Flüsse in den sehr steilen Tälern ausgelöst wurden. Diese Massenbewegungen haben im Epizentralbereich des Bebens Schäden verursacht, welche diejenigen infolge der Bodenerschütterungen oft überstiegen. In der Schweiz ist aufgrund der Topografie ebenfalls mit zahlreichen Steinschlägen, Felsstürzen und Massenbewegungen zu rechnen.

Man muss sich bewusst sein, dass neben den Bodenerschütterungen weitere Erdbebeneinwirkungen möglich sind, die stark von den lokalen Verhältnissen abhängen.

### Talsperrensicherheit

Die Talsperrensicherheit basiert auf einem integralen Sicherheitskonzept mit folgenden Elementen:

■ Strukturelle Sicherheit. Bemessung der Stauanlage nach dem Stand der Technik und den einschlägigen Normen und Vorschriften. Massgebend ist die Hochwasser- und Erdbebensicherheit.



Martin Wieland

**Bild 3** Durch Steinschlag zerstörte und weggeschwemmte Schütze eines Flusskraftwerks; nur der Hydraulizylinder ist übrig geblieben (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).

■ Talsperrensicherheitsüberwachung. Visuelle Inspektionen, Talsperreninstrumentierung und Evaluation der Messdaten, Sicherheitsmanagement etc.

■ Betriebssicherheit. Vorschriften für Normalbetrieb des Reservoirs und Betrieb bei ausserordentlichen Verhältnissen, qualifiziertes Personal, Unterhalt sämtlicher Anlagen und Komponenten etc.

■ Notfallplanung. Notfallpläne mit Flutwellenkarten, Wasseralarm etc.

Die Aufzählung der einzelnen Sicherheitsaspekte ist nicht abschliessend, aber es ist ersichtlich, dass die Sicherheit sehr weit gefasst ist. Wenn wir deshalb über die Erdbebensicherheit sprechen, ist obiges Konzept zu verinnerlichen.

Bei der Erdbebenbemessung aller Strukturen und hydromechanischer und

elektromechanischer Komponenten sind folgende Punkte abzuklären:

■ Welche Erdbebeneinwirkungen müssen berücksichtigt werden (Erschütterungen, Felssturz etc.)?

■ Welches ist das Auslegungsbeben der Strukturen und Komponenten? Für sicherheitsrelevante Strukturen und Komponenten ist es das Sicherheitsbeben.

■ Welches Verhalten der Strukturen und Komponenten ist zulässig? Sicherheitsrelevante Komponenten müssen auch nach dem Sicherheitsbeben funktionstüchtig sein.

### Erdbebeneinwirkungen

Nach dem heutigen Stand der Technik sind für grosse Talsperren und ihre sicherheitsrelevanten Komponenten die Erdbebeneinwirkungen von Betriebs-

Martin Wieland



**Bild 4** Durch Steinschlag beschädigte Tafelschütze eines Flusskraftwerks (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).

Wang Renkun



**Bild 5** Versagen der Druckleitung der Shapai-Stauanlage verursacht Fontäne und Überschwemmung des Maschinenhauses, der umliegenden Gebäude und der Schaltanlage (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).

und von Sicherheitserdbeben zu berücksichtigen [1].

Bei Betriebserdbeben mit einer Wiederkehrperiode von mindestens 145 Jahren sollten keine strukturellen Schäden an der Sperre entstehen, und die sicherheitsrelevanten Komponenten müssen voll funktionstüchtig sein.

Bei Sicherheitsbeben sind gewisse strukturelle Schäden zulässig, solange gewährleistet ist, dass der Stausee sicher zurückgehalten werden kann. Die Bodenbewegungen des Sicherheitsbebens können auf probabilistische oder deterministische Weise ermittelt werden, wobei bei der probabilistischen Gefährdungsanalyse eine Wiederkehrperiode von 10 000 Jahren zu berücksichtigen ist und in den deterministischen Analysen die ungünstigsten Erdbebenszenarien zu untersuchen

sind. In der Schweiz, wo aktive Verwerfungen und Störzonen schlecht bekannt sind, verwendet man die Ergebnisse einer probabilistischen Gefährdungsanalyse.

Da es bei der Abschätzung der Erdbebengefährdung sehr grosse Unsicherheiten – besonders bei sehr seltenen Ereignissen mit langen Wiederkehrperioden – gibt, empfiehlt es sich, eine Bauweise mit einem gutmütigen Erdbebenverhalten zu verwenden. Man sollte nicht versuchen, die Erdbebengefährdung durch aufwendige Analysen zu reduzieren.

Neben den erwähnten sicherheitsrelevanten Strukturen und Komponenten gibt es natürlich noch eine Vielzahl anderer Bauten und hydromechanischer und elektromechanischer Komponenten, die weniger strengen Auflagen unterliegen. Für deren Erdbebenauslegung können beispielsweise die Erdbebennormen für Bauwerke verwendet werden, falls nichts anderes spezifiziert wurde. Die Baunormen sollten jedoch als Minimalanforderung erfüllt werden. Das gilt auch für Schaltanlagen etc.

### Grundablass der Zipingpu-Stauanlage

Während des Wenchuan-Erdbebens stürzte ein ungesicherter Schaltschrank für die Steuerung der Schütze der Hochwasserentlastung der Zipingpu-Stauanlage um. Das turmartige Einlaufbauwerk für die Hochwasserentlastung mit dem

darauf stehenden, mehrstöckigen Bedienungsgebäude ist in **Bild 2** dargestellt [3].

Die Stahlbetonkonstruktion des massiven Turms wurde nicht beschädigt, hingegen sind grössere Schäden am Bedienungsgebäude ersichtlich. Ein Grund dafür liegt in der Verstärkung der Erdbebenschütterungen von der Felsoberfläche bis zur Basis des Bedienungsgebäudes. Der umgestürzte Schaltschrank ist in **Bild 1** ersichtlich.

Der Zipingpu-Steinschüttdamm mit einer wasserseitigen Betonmembrane (CFRD) ist 156 m hoch und wurde erst 2006, d.h. zwei Jahre vor dem Beben, fertiggestellt. Es handelte sich um einen der modernsten Dämme dieses Typs in China. Der weltweit höchste CFRD, Shuibuya, befindet sich ebenfalls in China, ist jedoch mehrere 100 km von der Wenchuan-Erdbebenzone entfernt.

Zur Zeit des Bebens war der Zipingpu-Stausee nur rund 30% voll und stellte keine Gefahr für die Bevölkerung dar. Kurz nach diesem katastrophalen Beben, das rund 86 000 Menschenleben forderte, gab es jedoch ein Hochwasser, und der Stausee konnte wegen des umgestürzten Schaltschranks nicht mehr kontrolliert werden, da die Schütze nicht mehr bedient werden konnten. In relativ kurzer Zeit wurde deshalb kurz nach dem Beben aus einer sicheren Stauanlage eine unsichere. Die Techniker versuchten deshalb in den folgenden Tagen,



**Bild 6** Überschwemmtes Maschinenhaus der Shapai-Stauanlage und Beschädigung der Stirnwand und Dachkonstruktion sowie des Krans durch Steinschlag (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).



Martin Wieland

**Bild 7** Zerstörte Hochspannungslleitung der Sefid-Rud-Stauanlage (Manjil-Erdbeben 1990, Iran).

den Schaden zu beheben, was dann auch gelang.

Dieses Beispiel zeigt, wie ein kleiner Schaden, der leicht hätte vermieden werden können, extrem grosse Auswirkungen haben könnte, da über eine Million Einwohner von einer Flutwelle betroffen wären. Das Problem war, dass der Lieferant des Schaltschrankes die Erdbeben-

sicherheitsanforderungen nicht berücksichtigt hatte.

Es ist davon auszugehen, dass die Lieferanten von hydromechanischen und elektromechanischen Komponenten wenig über Erdbebengefährdung wissen und dass die Spezifikationen für solche Komponenten von Ingenieuren verfasst wurden, deren Kernkompetenz anderswo lag.

Auch heute werden in der Praxis Manuals und Lehrbücher verwendet, bei denen kein Unterschied zwischen den verschiedenen Sicherheitsanforderungen einer Stauanlage gemacht wird.

Die Lehren aus dem Ereignis von 2008 beim Zipingpu-Damm und aus anderen Ereignissen wären beispielsweise 2011 beim Tohoku-Erdbeben in Japan ebenfalls sehr nützlich gewesen.

### Fazit

Erdbeben stellen eine Mehrfachgefährdung von Talsperren und deren hydromechanischen und elektromechanischen Komponenten dar.

Gewöhnlich sind Fachleute für hydro-mechanische und elektromechanische Komponenten nicht ausreichend mit der Sicherheitsphilosophie grosser Stauanlagen vertraut. Die Erdbebenbemessungskriterien sind deshalb kritisch zu hinterfragen, denn sie nehmen oft keine Rücksicht auf die örtlichen Gegebenheiten.

Die grossen Talsperren in der Schweiz – inklusive der darin installierten hydromechanischen und elektromechanischen Komponenten – sind aus jetziger Sicht nach technisch überholten Bemessungskriterien und Berechnungsmethoden entworfen worden. Bei den dem Bund unter-



Wang Renkun

**Bild 8** Zugeschüttete Verbindungsstrasse zur Shapai-Bogenmauer (Wenchuan-Erdbeben 2008, Sichuan, China).

**Résumé****Sécurité parasismique des centrales hydroélectriques****Effets sur la sécurité des composants hydromécaniques et électromécaniques**

Dans le monde entier, les barrages de grande dimension sont conçus depuis les années 30 pour résister aux séismes. Les procédés utilisés par le passé étaient basés sur des calculs pseudostatiques et sur une description des effets des tremblements de terre par le biais de coefficients sismiques. Cependant, dans la mesure où de tels calculs ne satisfont pas au comportement dynamique d'un barrage, ils ont été remplacés en 1989 par la méthode relative aux « séismes d'exploitation et de sécurité » consistant à définir les séismes pour lesquels l'exploitation d'un barrage, respectivement sa sécurité, peuvent encore être assurées. Du point de vue actuel, les grands barrages de Suisse, y compris leurs composants hydromécaniques et électromécaniques, ont été construits selon des critères et des méthodes de calcul techniquement obsolètes. Les barrages rattachés à la Confédération font actuellement l'objet d'une vérification de la sécurité parasismique. En réalité, celle-ci devrait également porter sur les composants hydromécaniques et électromécaniques importants pour la sécurité, car lors d'un séisme, les différences d'accélération au niveau des supports des composants fixés au rocher et de ceux situés dans la zone de la couronne du barrage sont les plus marquées et doivent être considérées.

Il est primordial que les fournisseurs de composants prennent en compte les prescriptions données par les ingénieurs des barrages concernant la garantie de la sécurité parasismique afin que les composants électromécaniques et hydromécaniques d'un barrage importants pour la sécurité (vidange de fond et vannes de l'évacuateur de crue) demeurent en bon état de fonctionnement après un séisme de sécurité.

No

stellten Talsperren läuft zurzeit eine Erdbebensicherheitsüberprüfung. Eigentlich sollte dies auch bei den sicherheitsrelevanten hydromechanischen und elektro-mechanischen Komponenten geschehen,

denn die Diskrepanzen in den Auflagerbeschleunigungen bei Komponenten, die auf Fels befestigt sind, und denjenigen, die sich im Kronenbereich befinden, sind am grössten und sind zu berücksichtigen.

Die Komponentenlieferanten müssen sich bei der Erdbebensicherheit nach den Anforderungen der Talsperreningenieure richten.

Es sollte berücksichtigt werden, dass viele Talsperren in abgelegenen Gebieten liegen und dass die Zugangswege nach einem Starkbeben während längerer Zeit blockiert sind und Reparaturarbeiten deshalb erst nach mehreren Monaten durchgeführt werden können, wie im Fall des Wenchuan-Bebens 2008 (Bild 8).

**Referenzen**

- [1] ICOLD (2010): Revision of Bulletin 72; Selecting Seismic Parameters for Large Dams. Guidelines, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris (in press, approved 2010).
- [2] Wieland M. (2009): Die Auswirkungen des Wenchuan-Erdbebens vom 12. Mai 2008 auf grosse Stauanlagen, Wasserwirtschaft, 99. Jahrgang, 9/2009.
- [3] Wieland M. (2012): Seismic Design and Safety Aspects of Bottom Outlets, Spillways, Intake Structures, Penstocks and Switchyards of Large Storage Dams, Proc. 15<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Sep. 24–28, 2012.

**Angaben zum Autor**

Dr. **Martin Wieland** ist Vorsitzender des Erdbebenkomitees der Internationalen Talsperrenkommission (ICOLD).

Pöyry Energy AG, 8037 Zürich  
martin.wieland@poyry.com

Anzeige

**So baut man Energieverteilssysteme**

Hager ist der richtige Partner für effiziente Energieverteilssysteme. Unsere massgeschneiderten Lösungen sind typengeprüft, sicher, wirtschaftlich und zeichnen sich durch hohe Verfügbarkeit aus. **Mit Ihnen, für Sie.**

[hager.ch](http://hager.ch)

**hager**