Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 101 (2009)

Heft: 4

Artikel: Schäden an Stauanlagen und Flusskraftwerken infolge des Wenchuan-Bebens vom 12. Mai 2008 in China

Autor: Brenner, R. Peter / Wieland, Martin

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941953

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

Schäden an Stauanlagen und Flusskraftwerken infolge des Wenchuan-Bebens vom 12. Mai 2008 in China

■ R. Peter Brenner, Martin Wieland

Zusammenfassung

Das Wenchuan-Erdbeben vom 12. Mai 2008 in der Sichuan-Provinz in China hat unzählige Menschenleben und Verletzte gefordert und unermessliche Schäden an der Infrastruktur erzeugt. Zu den betroffenen Objekten gehört auch eine grosse Anzahl von Stauanlagen für Wasserkraft und Bewässerung. Eine internationale Expertengruppe besuchte im März/April 2009 einige dieser Anlagen und berichtet über das Ausmass und die Art der beobachtbaren Schäden. Dieser Aufsatz beschreibt die Situation bei drei besuchten Flusskraftwerken. Im Erdbebengebiet gibt es aber auch vier Sperren von über 100 m Höhe. Zwei davon wurden erst kürzlich gebaut und zwar nach dem neuesten Stand der Technik. Da aber die seismische Gefährdung in diesem Gebiet bis anhin unterschätzt wurde, sind alle vier Sperren bezüglich seismischer Belastung unterdimensioniert. Trotzdem haben sie das Erdbeben mit relativ geringfügigen Schäden, welche die Sicherheit der Sperre nicht in Frage stellen, überstanden. Ein besonderes Phänomen dieses Bebens waren die weitläufigen Massenbewegungen (Steinschlag, Bergstürze und Erdrutsche). Talflanken sind mit dicken Geröllmassen belegt, welche später Anlass zu Muren und Schlammströmen geben können. Die bei den besuchten Flusskraftwerken beobachteten Schäden umfassen Risse in den Betonstrukturen sowie Steinschlageffekte an Wehrpfeilern, Schützen und Einlaufbauwerken. Schäden infolge Steinschlag waren oft verheerender als jene von seismischen Erschütterungen. Alle Anlagen sind aber reparierbar. Massenbewegungen verursachten auch die Bildung von 33 Erdbebenseen, welche zum Teil eine grosse Gefahr für die stromabwärts gelegenen Siedlungen darstellten. Ferner wird auf die Frage eingegangen, ob das Wenchuan Erdbeben durch den Stausee des Zipingpu-Dammes ausgelöst wurde.

Abstract

The Wenchuan earthquake of May 12, 2008 in the Province of Sichuan in China has caused a high death toll, a large number of wounded people, and immense damage to settlements and infrastructure. Among the objects affected, there is also a large number of storage schemes for hydropower and irrigation. An international team of experts visited some of these facilities in March/April 2009 and reports on the extent and the nature of the observed damages. This paper describes the situation at three run-of-river plants. Within the earthquake-affected region, there are four dams higher than 100 m. Two of these have been constructed recently following state-of-practice procedures. Since the seismic risk in the region has previously been underestimated, these structures are underdesigned. Still, they have survived the quake with relatively small damages, which do not compromise their safety. A particular phenomenon was the wide-spread mass wasting (rock falls, rock avalanches and landslides). Valley flanks are covered with thick layers of debris which later may lead to mud flows. Damage at the three run-of-river plants visited comprised cracks in the concrete structures and effects of rock fall on guide walls, piers, gates and intake structures. The damages caused by rock falls and rock avalanches were often more severe than those produced by vibrations. However, all facilities can be repaired. Landslides caused the formation of numerous quake lakes. Some of these represented a serious threat to downstream settlements. Finally the question is discussed if the Wenchuan earthquake was triggered by the Zipingpu reservoir.

1. Einleitung

Im März/April 2009 besuchte eine Gruppe von Talsperren- und Erdbebenfachleuten aus sieben Ländern ein Internationales Seminar in Beijing und Chengdu, China, welches vom Erdbebenkomitee der Internationalen Talsperrenkommission (ICOLD), zusammen mit dem chinesischen Nationalkomitee für Grosse Talsperren (CHINCOLD), organisiert wurde. Damit verbunden war eine mehrtägige Exkursion ins nahe gelegene Erdbebengebiet von Wenchuan, um das Ausmass der an Stauanlagen durch das Erdbeben vom 12. Mai 2008 verursachten Schäden besichtigen zu können. Obwohl in den elf Monaten seit der Erdbebenkatastrophe viel Aufräum- und Instandstellungsarbeit geleistet wurde, sind die Spuren des Erdbebens doch allgegenwärtig, und viele der verursachten Schäden konnten noch nicht behoben werden.

Die Expertengruppe besuchte zwei Speicherkraftwerke und drei Flusskraftwerke. Dieser Bericht basiert auf Beobachtungen, welche während der Besichtigung der Objekte gemacht wurden. Im Vordergrund stehen hier Schäden an Flusskraftwerken sowie mit dem Erdbeben verbundene Naturgefahren wie Massenbewegungen und die Bildung von Seen infolge Flussblockierung durch Felsstürze und Schuttlawinen. Doch auch das Verhalten einiger grosser Dämme soll hier kurz erwähnt werden. Auch die mögliche Erdbebenauslösung infolge Reservoireinstau durch eine der grossen Sperren wird kurz diskutiert.

2. Das Wenchuan-Erdbeben vom 12. Mai 2008

Das Erdbeben vom 12. Mai 2008, welches hauptsächlich die Provinz Sichuan erfasste, war das stärkste Ereignis dieser Art, welches je in dieser Gegend von China

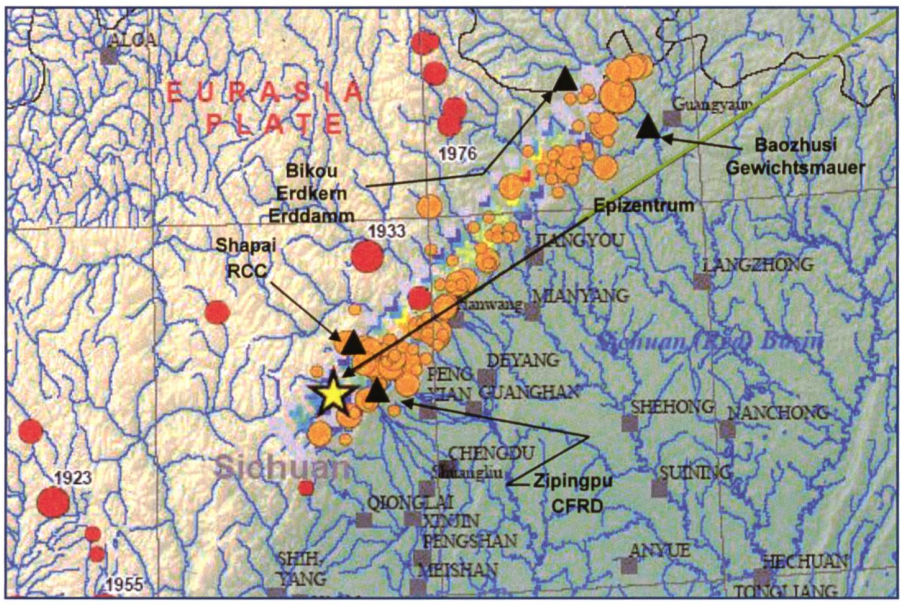

Bild 1. Longmenshan-Bruchzone mit Epizentrum und Nachbeben sowie der relativen Lage der vier Sperren höher als 100 m (Daten gemäss USGS 28/06/2008).

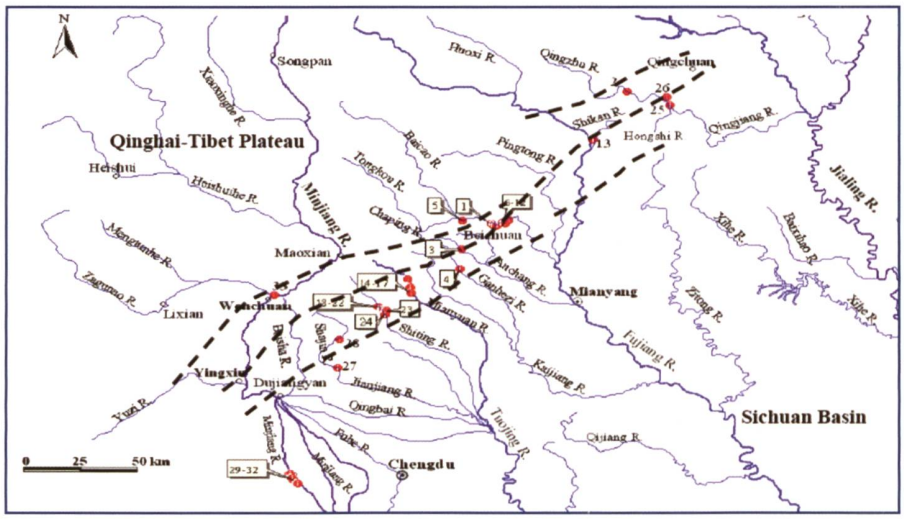

Bild 2. Longmenshan-Bruchzone mit drei Hauptzweigen. Das Erdbeben wurde im mittleren Zweig ausgelöst. Die roten Punkte zeigen den Standort grösserer Erdbebenseen (Wang et al., 2009).

Name der Talsperre	Sperren-typus (*)	Max. Höhe (m)	Installierte Leistung (MW)	Distanz zum Epizentrum (km)	Kürzeste Distanz zur seismogenen Verwerfung (km)	Geschätzte Intensität am Sperren-standort	Bemessungs-beben Bodenbe-schleunigung oder Standort-intensität
Zipingpu	CFRD	156	760	17	8	IX - X	0.26 g VIII
Shapei	RCC	130	36	38	12	-	0.138 g VII
Bikou	ECRD	102	360	260	16 (**)	IX	VII – VIII
Baozhuzi	CD	132	700	252	22 (***)	VII - VIII	VI

Tabelle 1. Daten von vier grossen Sperren im Wenchuan-Erdbebengebiet (Intensität gemäss chinesischer Intensitätsskala). (*) CFRD = Schüttdamm mit wasserseitiger Betonabdichtung; RCC = Walzbetonbogenmauer; ECRD = Schüttdamm mit zentralem Erdkern; CD = Betongewichtsmauer
(**) 20–30 km Entfernung von M6.4 Nachbeben; (***) 40 km Entfernung von M6.2 Nachbeben.

beobachtet wurde. Die Magnitude betrug 7.9 M_w (8.0 M_s) und das Epizentrum war im Longmen-Massiv, im Gebiet der Ortschaft Yingxiu im Bezirk Wenchuan, ca. 80 km WNW von der Provinzhauptstadt Chengdu *(Bild 1)*. Die Herdtiefe betrug 15 km.

Das sehr steile, SW-NE streichende Longmen-Gebirge (auch Drachentor-Berge genannt) bildet den östlichen Rand des Qinghai-Tibet-Plateaus. Die etwa 270 km lange, parallel zum Longmen-Massiv verlaufende seismogene Störung ist ein Überschiebungsbruch (thrust fault) und besteht im Wesentlichen aus drei Verwerfungen, wobei sich die seismische Aktivität auf den Mittelbruch konzentrierte *(Bild 2)*. Beim Bruchmechanismus handelt es sich nach Hubbard und Shaw (2009) um eine Stauchung der Erdkruste und eine damit verbundene Hebung des Tibet-Plateaus. Grossräumig gesehen wird die Seismizität in dieser Gegend mit dem Zusammentreffen der nach Norden vorstossenden Indischen Platte mit der Eurasischen Platte erklärt.

In der Epizentralgegend dauerten die Erschütterungen rund 120 Sekunden, und die Intensität nach der chinesischen Skala wird mit XI angegeben. Die chinesische Skala ist mit der modifizierten Mercalli-Skala (MM) vergleichbar. Die Isoseisten haben die Form langgezogener Ellipsen in Richtung der Longmenshan-Bruchzone. Nach dem Hauptstoss vom 12. Mai erfolgten entlang der Bruchzone, bis in den Monat August hinein, noch fast 300 relativ starke Nachbeben mit Magnituden bis zu 6.4.

Das Wenchuan-Beben forderte 87 000 Menschenleben, darunter befinden sich noch viele Vermisste, und Hunderttausende von Verletzten und verursachte enorme Schäden an Gebäuden und an der Infrastruktur. So wurden unter anderem auch 2666 Stauanlagen beschädigt; die meisten davon in Sichuan. Für 310 dieser Anlagen wurde die Situation nach dem Beben als «gefährlich» eingestuft. Unter den beschädigten Stauanlagen befinden sich sowohl Speicher- wie auch Flusskraftwerke. Die gebirgige Gegend von Sichuan ist ein ideales Gebiet für den Betrieb von Wasserkraftwerken, und die Dichte solcher Einrichtungen ist relativ hoch. Noch nie wurden bei einem Erdbeben so viele Stauanlagen in Mitleidenschaft gezogen.

3. Sicheres Verhalten grosser Talsperren

Unter der grossen Anzahl von Dämmen im Erdbebengebiet befinden sich vier Kraftwerke mit Sperren von über 100 m Höhe,

Bild 3. Durch Massenbewegungen zerstörte Vegetation an den Talflanken.

Bild 4. Wehr des Flusskraftwerkes Futan.

nämlich Zipingpu, Shapai, Bikou und Baozhuzi *(Bild 1)*. Die ersten beiden dieser Sperren sind kürzlich erstellt worden und konnten besucht werden. Bikou und Baozhuzi sind älteren Datums. Angaben über die Bemessungsannahmen und die relative Lage zur Erdbebenquelle dieser vier Anlagen sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Über die an diesen Talsperren entstandenen Schäden wird anderswo ausführlich berichtet (Xu, 2009; Wieland, 2009), aber es darf hier erwähnt werden, dass die Sicherheit dieser Talsperren in keinem Moment gefährdet war (Chen, 2008). Dies obwohl in allen Fällen die Erdbebengefährdung in dieser Gegend unterschätzt wurde. Das 2006 in Betrieb genommene Zipingpu-Reservoir war zur Zeit des Bebens allerdings um fast 50 m abgesenkt. Das Beben verursachte eine Setzung von 74 cm und eine 18 cm Verschiebung in Richtung talabwärts. Die Spitzenbeschleunigung auf der Krone wurde mit etwa 2 g gemessen, am Dammfuss fielen die Instrumente aus. Zipingpu ist ausserdem der erste grosse Schüttdamm mit wasserseitiger Betonabdichtung, der einem sehr starken Erdbeben ausgesetzt war. Aus seinem Verhalten kann daher für die erdbebensichere Bemessung solcher Dammtypen viel gelernt werden. Die Shapai-Staumauer ist die bisher höchste Bogenmauer in Walzbeton. Sie scheint das Beben praktisch unversehrt überstanden zu haben.

4. Massenbewegungen

Das vom Erdbeben betroffene Gebiet ist gebirgig, und der Hauptstoss wie auch die Nachbeben lösten weitreichende Massenbewegungen aus, d.h. Steinschlag, Bergstürze und Erdrutsche. Das Bruchmodell hängt bei gleichen topographischen Verhältnissen von der Gesteinsart ab. Erdrutsche und Bergstürze töteten Tausende von Personen, hauptsächlich in ländlichen Gegenden. Schuld an den Massenbewegungen waren neben der ungewöhnlich hohen Intensität der Bodenerschütterungen sowie deren Dauer vor allem die steilen Flanken in tief eingeschnittenen Tälern, wo das Flussbett weiter vertieft wird, da die tektonischen Bewegungen das Gefälle des Flusslaufes erhöhen. Viele Flüsse haben sich über 1000 m tief eingefressen. Gemäss Satellitenbildern hat das Erdbeben etwa 12 000 Massenbewegungen ausgelöst (Ouimet et al., 2007; Wang et al., 2009). Dadurch wurde die Vegetation über ganze Täler hinweg zerstört, und die ursprünglich grünen Flanken präsentieren sich heute in ödem Grau *(Bild 3)*. Massenbewegungen, welche durch Erdbeben ausgelöst wurden, unterscheiden sich von denjenigen, die durch Starkniederschlag verursacht wurden, durch eine gröbere Kornverteilung (Wang et al., 2009). Die auf den Talflanken lose gelagerten Geröllmassen können sich aber bei genügend starken Niederschlägen leicht in Muren und Schlammströme verwandeln, wie dies im September 2008 im Beichuan-Bezirk beobachtet wurde (Tang et al., 2009).

Stauanlagen in Sichuan sind von den Massenbewegungen nicht verschont geblieben. Man darf sogar behaupten, dass bei vielen Anlagen in Tälern mit steilen Flanken die durch Massenbewegung verursachten Schäden erheblich grösser waren als diejenigen, welche durch die Erdbebenerschütterungen entstanden sind. Mehrere Verkehrswege wurden durch Massenbewegungen blockiert. Wegen möglicher Nachbeben, welche zusätzliche Steinschläge auslösten, war es für mehrere Monate nicht möglich, die Strassen für den Transport schwerer Baumaschinen freizulegen.

5. Schäden an Flusskraftwerken

Ein gutes Beispiel für Schäden an einem Flusskraftwerk, und speziell infolge Massenbewegungen, ist das 31 m hohe und 190 m lange Futan-Wehr über den Minjiang-Fluss im Wenchuan-Bezirk *(Bild 4)*. Es hat vier Segmentschützen, eine Gleitschütze zur Sedimentspülung und eine Schütze für Geschwemmselablass. Die installierte Leistung ist 4×90 MW und das Stauvolumen beträgt rund 3 Mm^3. Das Wehr ist auf Alluvionen fundiert. Die Anlage wurde für einen Intensitätsgrad VIII bemessen.

Auf der linken Talseite befindet sich das Einlaufbauwerk mit dem Zuleitungsstollen zur ca. 20 km talabwärts liegenden, freistehenden Zentrale.

Im Schadensbild dominierten die Auswirkungen von Felsstürzen. Das rechte Widerlager grenzt an einen über 200 m hohen Felskopf. Ein Teil dieser Felsmasse ist beim Erdbeben zusammengebrochen. Die herunterrollenden Felsblöcke und Steine haben eine Stützmauer zum Kippen gebracht, einen Pfeilerkopf im Unterwasser gespalten und in einem weiteren massiven Pfeiler einen durchgehenden Schubriss verursacht (*Bilder 5* und *6*). Die Wehrkrone wurde durch herabstürzende Felsblöcke teilweise beschädigt, Die Räumlichkeiten mit den Kontrolleinrichtungen über den Schützen wurden zum Teil stark in Mitleidenschaft gezogen. Hingegen erlitten die Schützen und deren Auflager praktisch keinen Schaden. Die Schütze für den Einlauf in den Zuleitungsstollen wurde jedoch von Steinen getroffen und beschädigt. Andere Schäden, die noch sichtbar waren, umfassten kleinere Risse in Betonstrukturen (Wände, Treppen, usw). Im Zuleitungsstollen entstanden ebenfalls geringfügige Schäden (Risse). Die Zentrale wurde nicht

besucht. Ein zweites Beispiel ist die Anlage von Yingxiuwan mit einer installierten Leistung von 135 MW, ebenfalls am Minjiang Fluss gelegen. Sie wurde 1972 in Betrieb genommen. Das Wehr hat eine Höhe von 21.4 m, ist 156 m lang und ist mit fünf Schützen ausgerüstet. Eine davon kann als Flossdurchlass genutzt werden und eine andere dient der Sedimentspülung. Auf der linken Seite ist ein Durchlass für Schwemmholz. dessen Anteil von jährlich etwa 500 000 m^3 infolge der geänderten Waldnutzung allerdings gesunken ist. Das Bemessungshochwasser beträgt 3790 m^3/s und das maximale Hochwasser 5600 m^3/s. Ein rund 4.5 km langer Zuleitungsstollen führt zur unterirdischen Zentrale.

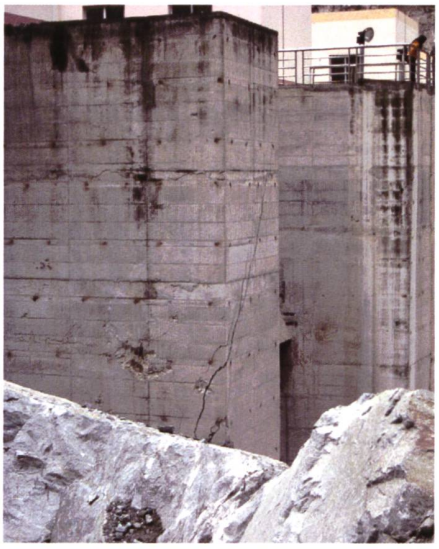

Bild 5. Futan: Schubriss (vermutlich durch Steinschlag) an einem der Wehrpfeiler.

Das Wehrbauwerk ist auf ca. 35–45 m mächtigen Alluvionen fundiert. Eine armierte Betonsohle und eine hängende, 25 m tiefe Dichtwand kontrollieren die Sickerströmung. Die Anlage wurde für den Intensitätsgrad VII gegen Erdbeben bemessen.

Am Wehr werden gegenwärtig umfangreiche Reparaturarbeiten durch Einheiten der Armee ausgeführt. Das Wehrgebäude mit seinen Einrichtungen zum Bedienen der Schützen ist stark beschädigt worden und zeigt zahlreiche Schubrisse und abgeplatzte Verkleidung *(Bild 7)*. Auch Setzungen und horizontale Verschiebungen sind festgestellt worden. Im Zuleitungsstollen entstanden zahlreiche Risse, und aus Wänden und Decke erfolgten Wasseraustritte. An Gehstegen bemerkte man oft kleine differenzielle Vertikalverschiebungen *(Bild 8)*. Zwischen dem Erddamm am rechten Widerlager und der Wehrbrücke ist ein Vertikalversatz von etwa 80 cm *(Bild 9)* beobachtbar. Auch Schaltanlage und Übertragungseinrichtungen erlitten Schäden.

Die meisten Schäden wurden durch seismische Kräfte verursacht, doch auch Erdrutsche haben ihren Teil beigetragen. Der Auslass von der Zentrale soll durch einen Erdrutsch blockiert worden sein, und am linken Widerlager erfolgte ein Bergsturz mit erheblichem Geröllvolumen und Schadenspotenzial.

Das dritte Beispiel betrifft das Taipingyi-Flusskraftwerk *(Bild 10a)*. Das Wehr ist 28 m hoch und mit Radialschützen ausgerüstet. Bei dieser Anlage wurden Schützen durch Felsbrocken blockiert. Dies führte zum Überströmen des Wehrs und zur Überflutung des Dieselaggregatraumes. Eine der Schützen wurde weggerissen *(Bild 10b)*. Im rechtsufrigen Teil der Anlage erfolgten bedeutende Setzungen in der aus Alluvionen bestehenden Fundation. Das Einlaufbauwerk wurde durch Steinschlag stark beschädigt.

Interessant ist die Tatsache, dass zahlreiche Flusskraftwerke nach dem Erdbeben überströmt wurden. Die Kraftwerke wurden aber dadurch nicht zerstört. Zusätzlich zu den oben erwähnten Anlagen wurden in dieser Gegend unter anderem auch die Kraftwerke Tongzhong, Jiyu und Jiangsheba überströmt. Ein wichtiger Grund für das Überströmen dieser Flusskraftwerke war, einerseits dass es sich um Kraftwerkkaskaden handelte und andererseits konnten wegen Stromunterbrüchen, Beschädigung von Notstromaggregaten, Blockierung durch Erdrutsche und umgestürzte Stützmauern, Beschädigung durch Steinschläge usw. die Schützen nicht mehr bedient werden. Aufgrund der starken Re-

(a) (b) (c)

Bild 6. Futan: (a) von Felssturz gespaltener Pfeilerkopf, (b) eingestürzte Stützmauer und (c) abgebrochene Felswand am rechten Widerlager.

Bild 7. Wehranlage Yingxiuwan: Schäden am Wehrbauwerk.

Bild 8. Yingxiuwan: Differentielle Bewegungen an Gehstegfugen.

genfälle nach dem Beben führten die Flüsse viel Wasser. Durch Felsstürze ausgelöste Impulswellen in den relativ kleinen Stauseen dieser Flusskraftwerke haben kaum zum Überströmen geführt. Das plötzliche Versagen der Schütze des Taipingyi-Wehres hat eine Flutwelle verursacht, die zu einem Überströmen der flussabwärts liegenden Anlagen geführt haben kann. Genauere Details über dieses Phänomen waren während des Besuchs nicht erhältlich.

6. Erdbebenseen

Die zahlreichen Massenbewegungen als Folge der starken Erschütterungen des Haupt- und auch der Nachbeben haben an zahlreichen Stellen auch Flüsse blockiert und dabei ein sekundäres Gefahrenpotenzial geschaffen. Der wohl dramatischste und auch überall publizierte Fall ist der Tangjianshan-Erdbebensee, 3.2 km stromaufwärts der Agglomeration Beichuan *(Bild 11)*. Der See wuchs auf eine Länge von bis zu 9 km, eine Breite von 200–250 m und eine Tiefe von etwa 40 m. Das aufgestaute Volumen betrug etwa 316 Mm^3. Der Damm selber ist 612 m lang (quer zum Fluss), 803 m breit (entlang dem Fluss) und 82–124 m hoch (Wang et al., 2009).

Für die Gemeinde Beichuan und Umgebung bestand ein grosses Gefahrenpotenzial, welches unverzüglich entschärft werden musste. Zu diesem Zweck wurde eine Hochwasserentlastung durch den Erdrutsch gegraben. Da die blockierte Stelle unzugänglich war, wurden Baumaschinen und Arbeiter mittels Helikopter transportiert.

Total wurden durch das Erdbeben 33 grössere Erdbebenseen geschaffen *(Bild 2)*. Einige dieser Seen mussten als gefährlich betrachtet werden, da das Wasser rasch anstieg und ein Überlaufen mit anschliessender Erosion und möglichem Dammbruch befürchtet werden musste. Diese Seen müssen mit einer Hochwasserentlastung stabilisiert werden. Andere Seen, welche flussmorphologisch günstige Bedingungen schaffen, d.h., welche es vermögen, die Flussbettvertiefung zu verlangsamen, können zur Stabilisierung des Längenprofils des Flusses beitragen und auch die Häufigkeit der Massenbewegungen vermindern. Für Seen, bei denen eine Hochwasserentlastung erstellt werden muss, empfehlen die Chinesen ein Stufenprofil mit Zwischenbecken (Wang et al., 2009). Die Stufen bestehen aus Blöcken und Steinen, sind erosionsresistent und stabilisieren den obersten Teil der Hochwasserentlastung. Das treppenför-

Bild 9. Differenzielle Setzung zwischen Betondamm (hinten) und seitlichem Erddamm (vorn) wird mit Brettern überbrückt.

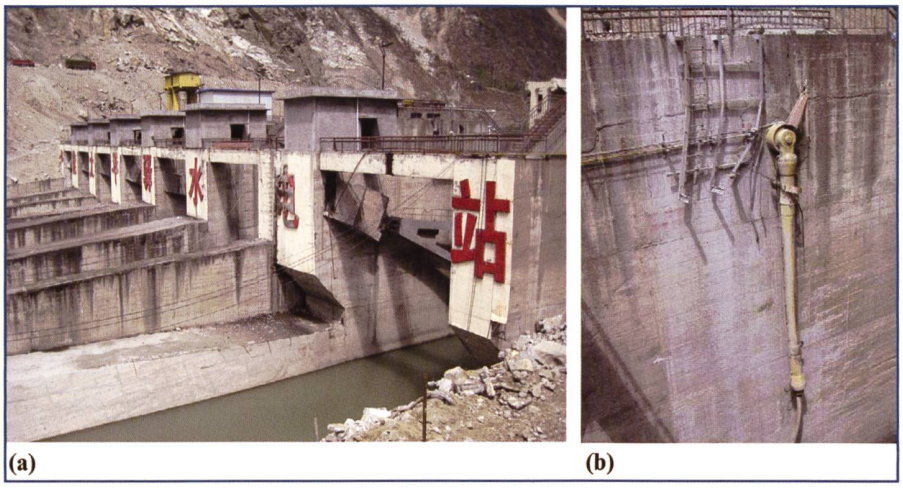

Bild 10. Wehranlage Taipingyi: (a) Wehröffnung mit Steinschlagschäden, (b) Pfeilerwand beim rechten Widerlager, wo Schütze durch Steinschlag abgerissen und weggeschwemmt wurde.

Bild 11. Tangjianshan-Erdbebensee wird durch künstlich geschaffene Hochwasserentlastung auf einem sicheren Niveau stabilisiert.

mige Längenprofil entwickelt sich mit der Zeit zu einer tiefen Rinne mit wirksamer Energievernichtung. Wichtig ist, dass die Hochwasserentlastung stabil ist, bevor das nächste Hochwasser den See erreicht.

7. Wurde das Wenchuan-Erdbeben durch den Zipingpu-Stausee ausgelöst?

Der Stausee, der durch den 2006 fertig gestellten, 156 m hohen Zipingpu-Damm gebildet wird, hat ein Volumen von 1.1×10^9 m^3 und eine maximale Tiefe von rund 150 m. In der Literatur sind mehrere Fälle bekannt, wo ein Reservoir mit derartigen Abmessungen Erdbeben ausgelöst hat. Durch Stauseen ausgelöste Beben sind unter dem englischen Begriff «Reservoir-Triggered Seismicity» (RTS) bekannt (ICOLD, 2009). Wichtige Faktoren, die RTS erzeugen können, sind in erster Linie die tektonischen Verhältnisse bzw. das Vorhandensein tektonisch aktiver Bruchzonen und hohe tektonische Spannungen. Je nach hydrogeologischen Verhältnissen kann sich in einer Bruchzone durch das Gewicht des aufgestauten Wassers und die Zunahme des Porenwasserdruckes eine geringfügige Änderung des Spannungszustands und eine Reduktion der Scherfestigkeit einstellen. In einer Tiefe von 15 km, was der Herdtiefe des Wenchuan-Erdbebens entspricht, sind die Spannungen infolge des Eigengewichts des Stausees im Vergleich zu denjenigen aus dem Eigengewicht des Materials der Erdkruste sehr klein.

Gemäss Chen et al. (2009) wurde 2004 ein umfassendes seismisches Netz mit sieben Stationen zur Überwachung der seismischen Aktivität installiert und in Betrieb genommen. Die seismische Aktivität sowohl bezüglich Häufigkeit als auch Magnitude blieb aber vor und nach dem Einstau mehr oder weniger unverändert. Ein Zusammenhang zwischen Wasserstandsschwankungen im Reservoir und Seismizität konnte nicht nachgewiesen werden. Im Weitern zeigte das Beben vom 12. Mai nicht den Charakter der stärksten bisher beobachteten RTS-Beben, wo die Erdstösse deutlich als Vor-, Haupt- und Nachbeben erkennbar sind.

Die Beichuan-Yingxiu-Verwerfung, welche das Erdbeben erzeugt hatte, durchquert den Mündungsbereich des Min-Flusses, aber nicht den Stausee. Diese liegt auf Kote 877.0. Der bis anhin maximal aufgestaute Wasserspiegel erreichte aber nur die Kote 875.4 m. Das bedeutet, dass das Reservoir die hydrogeologischen Verhältnisse in der Verwerfung kaum zu beeinflussen vermochte. Im Weiteren war am Tag des Erdbebens der Stausee auf Kote 828.95 m abgesenkt. Dabei betrug das Seevolumen nur noch 300 Mm^3 (bei Vollstau dagegen sind es 1100×10^6 m^3).

RTS ist ein Phänomen, das seit langem bekannt ist. Das stärkste Beben, wo RTS vermutet wird, war in Koyna, Indien, und hatte eine Magnitude von 6.3. Es vermochte an der Koyna-Gewichtsmauer einige Schäden (Risse) zu verursachen.

Es gibt keine handfesten Beweise, die einen direkten Zusammenhang zwischen dem Einstau des Zipingpu-Reservoirs und der Auslösung des Bebens vom 12. Mai 2008 zulassen würden. Es wird noch einige Zeit vergehen, bis man sich über eine mögliche Hypothese einigermassen einigen kann, doch die wahre Ursache wird immer verborgen bleiben.

8. Schlussfolgerungen

Das Wenchuan-Erdbeben kann für die im Epizentralbereich gelegenen Stauanlagen als Extremereignis betrachtet werden und entspricht etwa dem Sicherheitsbeben, das bei der Erdbebensicherheit von grossen Talsperren in dieser Gegend zu berücksichtigen ist. Aus dem Verhalten der verschiedenen Sperren und ihren Nebenbauwerken können daher äusserst wertvolle Erkenntnisse für den zukünftigen Entwurf von Stauanlagen in Gebieten mit hoher Seismizität abgeleitet werden. Trotz der hohen Anzahl von Stauanlagen, die sicher nicht alle den heutigen Anforderungen für Erdbeben genügen und 310 sogar als gefährlich eingestuft wurden, ist bisher nichts von einem Dammbruch bekannt geworden. Das Verhalten von zwei grossen Sperren neueren Datums (d.h. Zipingpu und Shapai) hat gezeigt, dass nach dem Stand der Technik konzipierte Anlagen auch sehr starken Beben zu widerstehen vermögen, zwar mit gewissen reparierbaren Schäden, aber die Integrität und damit die Sicherheit der Sperre bleibt gewährleistet.

Massenbewegungen scheinen sich vor allem bei sehr starken Beben (z.B. ab M7) zu häufen. Die Topographie und die geologischen Verhältnisse spielen dabei eine wesentliche Rolle. Deshalb sind Kraftwerkgebäude und andere Anlagen in gebirgigen Gegenden mit Vorteil unterirdisch anzuordnen. Hohe, steile Felswände bilden ein ernsthaftes Steinschlagrisiko.

Geologische Erkundungen während der Projektierung sollten bereits auf mögliche Erdrutschzonen hinweisen, welche bei starken Erschütterungen mobilisiert werden und zu Erdbebenseen führen könnten. Bei einer allfälligen Seenbildung müssen die Behörden imstande sein, schnelle Entscheidungen zu treffen. Die Damminstrumentierung muss erdbebensicher installiert werden, insbesondere auch Starkbebeninstrumente.

Bei Kraftwerken muss die Betriebssicherheit von Abflussorganen (Schützen, Schieber usw.) nach einem Beben gewährleistet sein, damit der See wenn nötig abgesenkt, aber auch die Stromerzeugung oder Wasserversorgung aufrecht erhalten werden kann. Bauwerke, die solche Organe beherbergen, müssen daher erdbebensicher bemessen und erstellt werden.

Literatur

Chen, Houqun, 2008: Consideration of dam safety after Wenchuan earthquake in China. Proc.14th World Conf. Earthquake Engineering, Beijing, 9p.

Hubbard, J. und *Shaw, J.H.,* 2009: Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan (M = 7.9) earthquake. Nature, 458, March 12,194–197.

ICOLD; 2009. Reservoirs and Seismicity; State of Knowledge. Bulletin 137, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris

Ouimet, W.B., Whipple, K.X., Royden, L.H., Sun Zhiming und *Chen Zhiliang,* 2007: The influence of large landslides on river incision in a transient landscape: Eastern margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China). Bulletin Geological Society of America, 119 (11/12), 1462–1476.

Tang, C., Zhu, J., Li, W.L. und *Liang, J.T.,* 2009. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68(2), 187–192.

Wang, Zhaoyin, Cui Peng und *Wang, Ruiyu,* 2009: Mass movements triggered by the Wenchuan earthquake and management strategies of quake lakes. Intl. J. River Basin Management, 7(1), 1–12.

Wieland, M., 2009: Die Auswirkungen des Wenchuan Erdbebens vom 12. Mai 2008 auf grosse Stauanlagen. Wasserwirtschaft, 99, (9) 10–15.

Xu, Zeping, 2009: Performance of the Zipingpu CFRD during the Wenchuan earthquake. The International Journal on Hydropower & Dams, 16(3), 89–92.

Anschrift der Verfasser

R. Peter Brenner
Consulting Engineer, ehemaliger Vorsitzender ICOLD Komitee für Talsperrenfundationen,
Rosenstrasse 8, CH-8057 Weinfelden
brenner.gde@sunrise.ch

Martin Wieland
Vorsitzender ICOLD Erdbebenkomitee
Pöyry Energy AG, Hardturmstrasse 161
CH-8037 Zürich
martin.wieland@poyry.com