

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 Mas-

senbewegungen 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 Reservoirstau 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



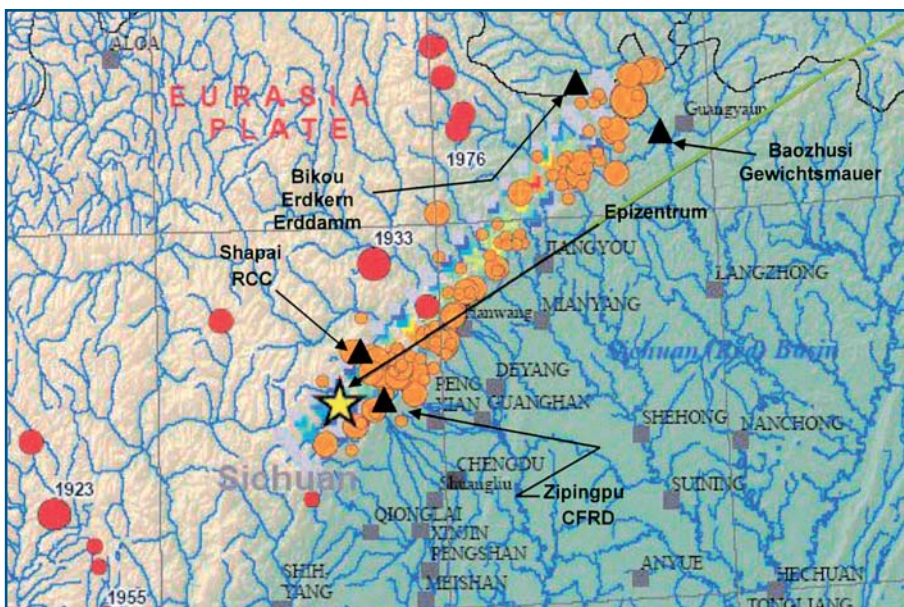


Bild 1. Longmenshan-Bruchzone mit Epizentrum und Nachbeben sowie der relativen Lage der vier Sperren höher als 100 m (Daten gemäss USGS 28/06/2008).

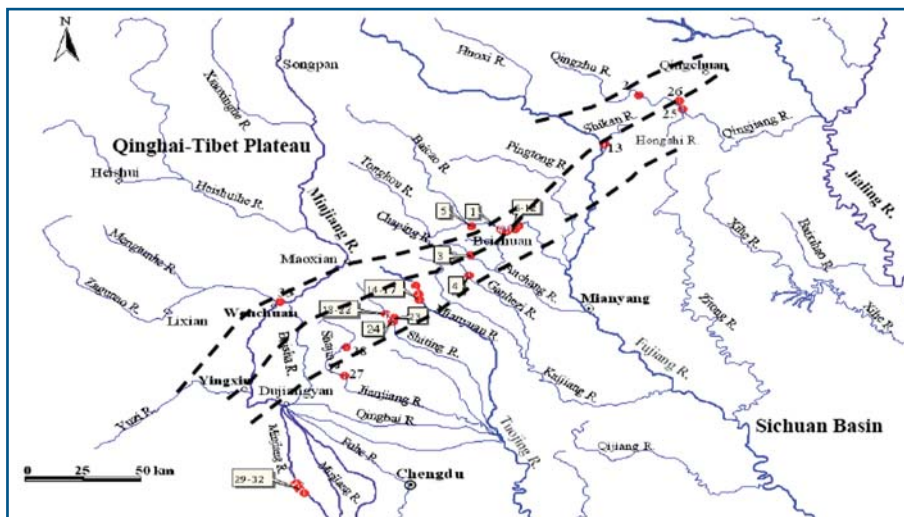


Bild 2. Longmenshan-Bruchzone mit drei Hauptzweigen. Das Erdbeben wurde im mittleren Zweig ausgelöst. Die roten Punkte zeigen den Standort grösserer Erdbebenseen (Wang et al., 2009).

Name der Talsperre	Sperrentypus (*)	Max. Höhe (m)	Installierte Leistung (MW)	Distanz zum Epizentrum (km)	Kürzeste Distanz zur seismogenen Verwerfung (km)	Geschätzte Intensität am Sperrenstandort	Bemessungsbeben Bodenbeschleunigung oder Standortintensität
Zipingpu	CFRD	156	760	17	8	IX - X	0.26 g VIII
Shapai	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. Steinerschlag, 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 4x90 MW und das Stauvolumen beträgt rund 3 Mm³. 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



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

andere dient der Sedimentspülung. Auf der linken Seite ist ein Durchlass für Schwemmholtz, dessen Anteil von jährlich etwa 500 000 m³ infolge der geänderten Waldnutzung allerdings gesunken ist. Das Bemessungshochwasser beträgt 3790 m³/s und das maximale Hochwasser 5600 m³/s. Ein rund 4.5 km langer Zuleitungsstollen führt zur unterirdischen Zentrale.

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 Erdbeben haben ihren Teil beigetragen. Der Auslass von der Zentrale soll durch einen Erdbeben 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 Diesellagertraumes. 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 Kraftwerkaskaden handelte und andererseits konnten wegen Stromunterbrüchen, Beschädigung von Notstromaggregaten, Blockierung durch Erdbeben und umgestürzte Stützmauern, Beschädigung durch Steinschläge usw. die Schützen nicht mehr bedient werden. Aufgrund der starken Re-

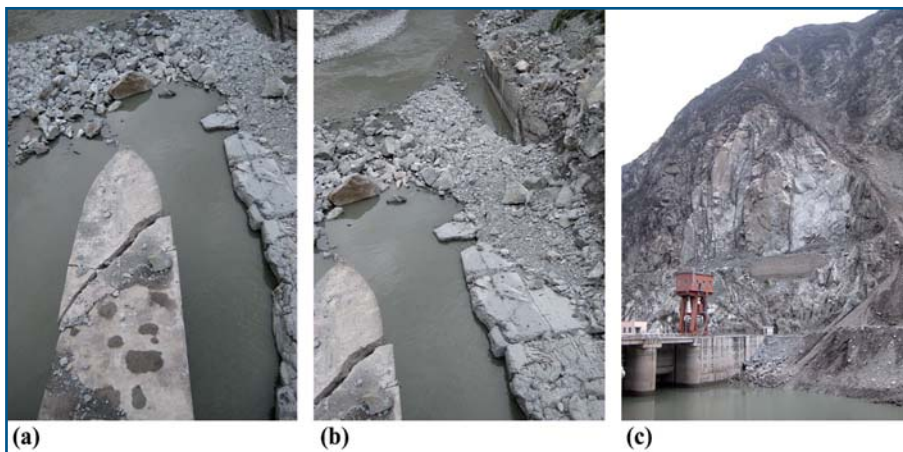


Bild 6. Futan: (a) von Felssturz gespaltenen Pfeilerkopf, (b) eingestürzte Stützmauer und (c) abgebrochene Felswand am rechten Widerlager.



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 Mm³. 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 Erdbeben 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 Dammbbruch 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.

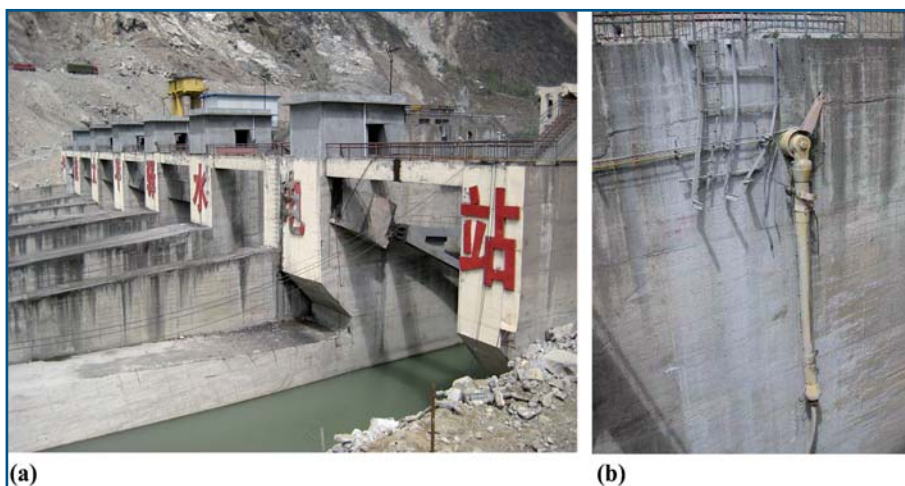


Bild 10. Wehranlage Taipingyi: (a) Wehrröffnung mit Steinschlagschäden, (b) Pfeilerwand beim rechten Widerlager, wo Schütze durch Steinschlag abgerissen und weggeschwemmt wurde.



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 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 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 Weiteren 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 $1100 \times 10^6 \text{ m}^3$).

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 Dambruch 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

Martin Wieland

Die Auswirkungen des Wenchuan-Erdbebens vom 12. Mai 2008 auf große Stauanlagen

Das Wenchuan-Erdbeben vom 12. Mai 2008 hat an rund 2 650 Stauanlagen und Stauseen Schäden verursacht, die Mehrzahl davon in der Provinz Sichuan in China. Kein Beben hat bisher nur annähernd so viele Stauanlagen betroffen. Der Aufsatz beschreibt die Auswirkungen des Bebens auf den 156 m hohen Zipingpu-Damm, der eine wasserseitige Betonabdichtung aufweist und die 132 m hohe Shapai-RCC-Bogenmauer. Das Problem der Erdbebenauslösung durch Stauseen wird diskutiert. Verschiedene Stauanlagen wurden im April 2009 im Rahmen einer gemeinsamen Mission des chinesischen Talsperrenkomitees mit ICOLD besucht.

1 Das Wenchuan-Beben vom 12. Mai 2008

Am frühen Nachmittag des 12. Mai 2008 ereignete sich in der Sichuan-Provinz im Südwesten Chinas ein starkes Erdbeben mit einer Magnitude von 7,9 bis 8,0. Das Epizentrum lag im Wenchuan-Distrikt. Insgesamt wurden 8 Provinzen und autonome Regionen von diesem Erdbeben betroffen und die Erschütterungen wurden in weiten Teilen Chinas und auch in Vietnam verspürt. Bei diesem Beben mit einer Herdtiefe von 14 km brach ein rund 240 km langes Segment der Longmenshan Verwerfungszone am Fuß des Tibetplateaus. Die Hauptcharakteristiken des Bebens waren die große Magnitude und die Dauer der

starken Erschütterungen, die je nach Standort 90 s betrug. In einer Epizentralentfernung von 22 km wurden maximale horizontale und vertikale Bodenbeschleunigungen von 0,98 g bzw. 0,97 g gemessen. Details über das Beben sind in einem umfassenden Bericht zu finden, der von der China Earthquake Administration in Harbin zusammengestellt wurde [1]. Neben seismologischen Angaben und Daten enthält dieser Bericht einerseits eine Beschreibung der Schäden an Gebäuden, Verkehrswegen und Kunstbauten, Telekommunikationseinrichtungen, Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssysteme, Gasleitungen, Industrieanlagen und historischen Bauten sowie andererseits eine Übersicht über Schäden an Flusskraftwer-

ken, Hochspannungsleitungen, Schaltanlagen sowie Talsperren. Die folgende Diskussion beschränkt sich auf die Auswirkungen des Wenchuan-Bebens auf große Stauanlagen und auf die standortspezifischen Gefahren von Erdbeben.

Während dem Wenchuan-Beben sind insgesamt 2 666 Stauanlagen und Stauseen beschädigt worden (**Tabelle 1**). Mit Abstand am stärksten betroffen war die Sichuan-Provinz, wo 1 996 Schadenfälle registriert wurden. Sichuan kann auch als das Wasserschloss Chinas bezeichnet werden, denn dort sind einige sehr große Stauanlagen in der Planung oder im Bau. Im Bau befinden sich insbesondere die 278 m hohe Xiluodu-Bogenmauer am Jinsha (Oberlauf des Yangtse) mit einer ge-

Tab. 1: Zusammenstellung der Erdbebenschäden an Stauanlagen und Stauseen [1]

Provinz bzw. Autonome Region	Gesamtanzahl Stauanlagen	Anzahl beschädigter Stauanlagen	Klassifizierung der betroffenen Stauanlagen		
			Hohe Gefährdung Sperrenbruch	Hohe Gefährdung	Gefährliche Situation
Sichuan	6 678	1996	69	310	1 617
Chongqing	2 824	352		2	350
Shaanxi	1 036	126		17	109
Yunnan	5 422	51		2	49
Gansu	297	81			81
Guizhou	2 105	12			12
Hubei	5 804	25			25
Hunan	11 435	23			23
Total	35 601	2 666	69	331	2 266



Bild 1: Felssturz auf dem Kraftwerksareal der Shapai-Stauanlage (April 2009)

planten Leistung von 12,6 GW und der 186 m hohe Pubugou-Schüttdamm am Fluss Dadu mit einer Leistung von 3,3 GW. Diese Großprojekte und auch das Dreischluchtenprojekt, die bereits relativ weit vom Epizentrum entfernt liegen, wurden nicht betroffen. Der Autor hatte bereits früher die Gelegenheit diese Stauanlagen zu besuchen.

Starke Erdbeben können je nach Standort für eine Stauanlage eine mehrfache Gefährdung darstellen. Diese Gefährdungen sind wie folgt:

- (1) Bodenerschütterungen: Dies ist die Gefährdung für die jeder Erdbebeningenieur seine Bauwerke bemisst. Es besteht die Gefahr, dass andere Gefährdungen vernachlässigt werden.
- (2) Verschiebungen entlang einer aktiven Verwerfung in der Fundamentierung von Talsperren: Für Betonstrukturen ist dies die wichtigste Gefährdung, da diese in Kombination mit (1) auftritt und zu einer unkontrollierten Rissbildung in einer Staumauer führt.
- (3) Verschiebungen entlang Diskontinuitäten in der Fundamentierung von Talsperren, die durch ein Starkbeben in unmittelbarer Nähe der Sperre aktiviert werden. Die Auswirkungen sind gleich wie (2).
- (4) Verschiebungen entlang einer aktiven Verwerfung im Stausee: Diese Gefährdung verursacht Impulswellen oder den Verlust des Freibords der Sperre (Vertikalverschiebung).
- (5) Massenbewegungen in den Stausee: Diese Gefährdung verursacht Impuls-

wellen, die zu einem Überströmen der Krone führen können; dies ist vor allem bei Schüttdämmen zu vermeiden.

- (6) Felsstürze auf Stauanlagen: Gefährdet sind hier die Hochwasserentlastung mit insbesondere Schützen und deren Antriebe sowie sämtliche oberirdischen Nebenanlagen (**Bild 1**).
- (7) Bildung natürlicher Dämme durch Erdbeben: Diese Gefährdung ist bekannt. Die natürlichen Dämme versagen meistens innerhalb kurzer Zeit und verursachen eine Flutwelle, wenn der Stausee nicht kontrolliert entleert werden kann. Beim Wenchuan-Erdbeben entstanden 34 größere natürliche Stauseen.



Bild 2: Unterbrochene Verkehrswege infolge Erdbeben und Steinschläge (April 2009)

- (8) Setzungen und Deformationen des Untergrunds: Diese Gefährdung betrifft vor allem Lockergestein, bei dem durch die Erschütterungen Setzungen und durch Bodenverflüssigung große Bodenbewegungen auftreten können. Im Weiteren ist im Lockergestein mit einer Verstärkung der Erschütterungen zu rechnen.

- (9) Andere mögliche Gefährdungen sind beispielsweise Änderungen in den hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund (Karst, Klüfte) oder Trübestrome in Stauseen, die zu einem Verstopfen der Einlässe führen können.

Bei großen Stauanlagen, die in tektonisch hoch beanspruchten Gebieten liegen, ist zudem mit dem Phänomen der Beben, die durch den Stausee ausgelöst werden, zu rechnen. Auch beim Wenchuan-Erdbeben stellten sich derartige Fragen, die in einem separaten Kapitel diskutiert werden.

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 Schäden verursacht, welche diejenigen infolge der Bodenerschütterungen oft überstiegen haben. Die Anzahl dieser lokalen Ereignisse betrug mehrere tausend.

Neben den direkten Schäden an den Stauanlagen und der Bildung natürlicher Stauseen verursachten diese Massenbewe-



Bild 3: Luftseite des Zipingpu-Schüttdamms mit Bruchstücken des Geländers (April 2009)

gungen auch den Zusammenbruch der Verkehrswege (**Bild 2**). So war es nicht möglich Stauanlagen nach dem Beben zu inspizieren, da das nur mit Helikoptern möglich gewesen wäre, die jedoch für andere Einsätze verwendet wurden. Wegen Nachbeben und neuen Steinschlägen war es nicht möglich, diese Straßen zu öffnen. So konnten schwere Baumaschinen erst Anfang 2009 in abgelegene Seitentäler transportiert werden, um die verschütteten Nebenstraßen freizulegen. Aus diesem Grund waren die Schäden an den Stauanlagen im am stärksten betroffenen Gebiet auch fast ein Jahr nach dem Beben noch sehr gut erkennbar, da man mit den Reparaturarbeiten erst kürzlich begonnen hatte.

2 Erkundungsmission ins Erdbebengebiet

Aufgrund der ersten Meldungen über das Wenchuan-Beben wurde klar, dass durch dieses Beben auch eine beträchtliche Anzahl von Stauanlagen beschädigt wurde. Darunter befanden sich der 156 m hohe Zipingpu-Damm mit einer wasserseitigen Betonabdichtung (CFRD-Damm) sowie die 132 m hohe Shapai-RCC-Bogenmauer. Von diesen beiden Talsperrentypen gab es bisher keine Beobachtungen über deren Verhalten während Starkbeben. Man erkannte rasch, dass es sich hier in Sachen Erdbebenverhalten von Stauanlagen um das wichtigste Erdbeben handelte, das sich seit der Schaffung des Erdbebenkomitees der Internationalen Talsperrenkommissi-

on (ICOLD) vor bald 40 Jahren handelte. ICOLD hat deshalb bereits im Mai 2008 beim Chinesischen Nationalkomitee für Große Talsperren (CHINCOLD) sondiert, ob eine Erkundungsmission ins Erdbebengebiet möglich sei. Das war damals nicht der Fall, da wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, dies aus logistischen und sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich war. An der Veranstaltung zum 80-jährigen Jubiläum von ICOLD in Paris wurde dann mit dem Präsidenten von CHINCOLD, Mr. Wang Shucheng, dem vormaligen Minister für Wasserwirtschaft, vereinbart, eine gemeinsame Erkundungsmission in kleinem Rahmen durchzuführen

ren, mit dem Ziel, einerseits Lehren aus den beobachteten Schäden zu ziehen und andererseits zu diskutieren, wie ICOLD CHINCOLD bei Fragen der Instandsetzung der beschädigten Stauanlagen, der Verstärkung bestehender Anlagen und bei der Revision der bestehenden Erdbebenvorschriften unterstützen kann.

Eine gemeinsame Erkundungsmission fand vom 29. März bis 4. April 2009 statt. Diese bestand aus einem Seminar in Beijing, wo die maßgebenden chinesische Erdbeben- und Talsperrenexperten einen Überblick über die Auswirkungen des Wenchuan-Erdbebens auf Talsperren gaben und einem Seminar in Chengdu, der Hauptstadt von Sichuan, wo weitere Stauanlagen vorgestellt wurden, die durch das Wenchuan-Beben beschädigt wurden. Hydrochina Chengdu, das größte Ingenieurbüro für Talsperren in China, gab eine Präsentation über das kontrollierte Absenken des Tangjiashan-Stausees, der durch einen Erdbeben mit einem Volumen von 20 Mio. m³ geschaffen wurde. Während Tagen war dieser Stausee, der eine sehr große Anzahl Menschen bedrohte, in der internationalen Presse. Beim Entleeren des Stausees betrug der maximale Abfluss 6 500 m³/s, was etwa dem Abfluss eines 200-jährlichen Hochwassers entspricht. Dadurch entstanden keine weiteren katastrophalen Schäden. Hydrochina war auch der Ingenieur für die Shapai-RCC-Bogenmauer, die ebenfalls im Detail vorgestellt wurde. Der Eigentümer des Zipingpu-CFRD-Damms, die Sichuan Province Zipingpu Development Co., gab ei-



Bild 4: Wasserseite der Shapai-RCC-Bogenmauer bei abgesenktem Stausee (April 2009)

ne umfassende Präsentation über die Erdbebenschäden an der wasserseitigen Betonabdichtung und die bereits durchgeführten Reparaturarbeiten.

Während des Seminars in Chengdu hatten auch die ausländischen Teilnehmer die Gelegenheit, relevante Themen vorzutragen. In einem anschließenden Workshop wurden die Erfahrungen, Lehren und Vorschläge für eine zukünftige Zusammenarbeit von allen Teilnehmern erarbeitet, die als Grundlage für ein gemeinsames Dokument dienen sollen. Im Weiteren wurde eine Pressemitteilung über den Zusammenhang zwischen dem Wenchuan-Erdbeben und dem Zipingpu-Stausee vorbereitet und verabschiedet.

Vom 31. März bis 2. April wurden der Zipingpu-CFRD-Damm (**Bild 3**), die Shapai-RCC-Bogenmauer (**Bild 4**) und verschiedene Flusskraftwerke am Minjiang (**Bild 5**), einem der wichtigsten Nebenflüsse des Yangtse in Sichuan, besucht. Während des Besuchs wurde an den meisten Verkehrswegen im Erdbebengebiet gebaut. Dadurch entstanden mehrstündige Warteschlangen. An vielen Stellen waren die Straßen immer noch steinschlaggefährdet. Die Besuche erfolgten mit einem Konvoi aus Geländefahrzeugen. Mit der Fahrweise konnte man sich nicht gerade anfreunden, diese stellte ein größeres Risiko dar als allfällige Nachbeben.

Dreizehn Teilnehmer aus sieben Nationen nahmen teil, dazu kamen die chinesischen Kollegen, welche vom China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) in Beijing stammten.

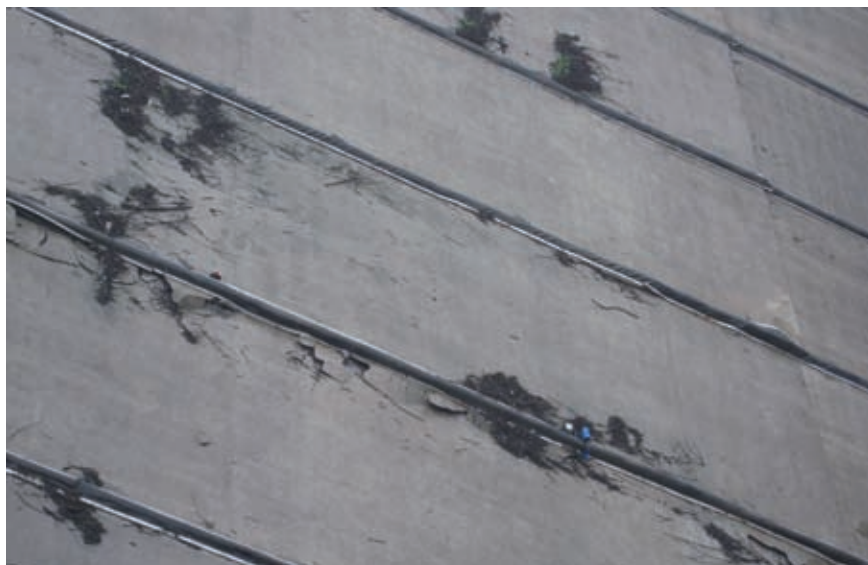


Bild 6: Schäden entlang den Vertikalfugen der Betonabdichtung des Zipingpu-Damms (Mai 2008)



Bild 5: Abscheren des rechten Wehrpfeilers und Kippen der Seitenstützmauer eines Flusskraftwerks infolge Bergsturz (April 2009)

Die CHINCOLD-ICOLD-Mission wurde vom Vizepräsidenten von CHINCOLD, Jia Jinsheng, geleitet. Man darf ohne weiteres sagen, dass trotz anfänglicher Bedenken wegen des späten Zeitpunktes der Veranstaltung diese Mission aus Sicht aller Teilnehmer ein voller Erfolg war.

3 Zipingpu-Schüttdamm mit wasserseitiger Betonabdichtung

Der Zipingpu-Schüttdamm wurde 2006 fertig gestellt und ist einer der weltweit größten Dämme mit einer wasserseitigen

Betonabdichtung. Dies ist der erste CFRD-Damm, der einem starken Beben ausgesetzt war, vergleichsweise etwa mit dem Sicherheitsbeben, das für die Bemessung maßgebend ist. Von Interesse war vor allem das Verhalten der Betonabdichtung. Zum Zeitpunkt des Bebens lag der Stauseespiegel rund 46 m unterhalb des maximalen Stauseespiegels vom Oktober 2006. Schäden in der Betonabdichtung entstanden vorwiegend oberhalb des Wasserspiegels und waren deshalb gut sichtbar. Des Weiteren traten diese entlang der Vertikalfugen (Abplatzungen und Fugenabdichtung) (**Bild 6**) und auch entlang einer Längsfuge (Überschiebung) zwischen der 2. und 3. Betonieretappe der Betonabdichtung auf (**Bild 7**). Diese hatten ihre Ursache wahrscheinlich in den großen Scheibenkräften in den Betonelementen, die während des Bebens aktiviert wurden (Verformungen und Setzungen, Erdbebenkomponente quer zur Flussrichtung).

Des Weiteren traten auf der Dammkrone maximale Setzungen von 735 mm und flussabwärts gerichtete Horizontalverschiebungen von 180 mm auf. Die Verschiebungen in Richtung der Dammachse betragen an den Widerlagern 102 mm (Talverengung). Im Kronenbereich trennte sich das Schüttmaterial von der Betonkonstruktion. Auf der Krone waren zudem 3 Starkbebenmessgeräte installiert, die Spitzenbeschleunigungen um 2 g anzeigten. Aufgrund der Befestigung der Messgeräte am Betonteil der Krone und der Eigendynamik dieses Damnteils (hochfrequente

Schwingungskomponenten), ist es schwierig, diese Aufzeichnungen auszuwerten. Die anderen drei Starkbebengeräte wurden während des Bebens beschädigt. Zukünftige Studien werden zeigen, welche Mechanismen für die Schäden an der Betonabdichtung verantwortlich waren. Es ist jedoch bereits jetzt klar, dass eine monolithische Betonplatte, die auf Lockermaterial gelagert ist, ein anderes Verformungsverhalten in der sehr steifen Plattenebene aufweist als das Lockermaterial und deshalb Kräfte via Reibung anzieht. Es handelt sich deshalb um Zwängungsspannungen, die am effizientesten durch breite vertikale und auch horizontale Fugen weitestgehend eliminiert werden können. Der Fugenausbildung ist deshalb vermehrt Achtung zu schenken. Hinzu kommt, dass unter seismischer Einwirkung die Fugen sowohl unter Druck als auch Zug stehen können.

Inzwischen sind die Schäden an der Betonabdichtung behoben worden und der Stausee wird wieder normal betrieben, obwohl die Schäden im Kronenbereich und diejenigen bei den Wasserfassungen noch behoben werden müssen.

Ein interessanter Aspekt ist auch, dass die Leute aus dem Einzugsgebiet des Stausees durch Boote zum Zipingpu-Damm evakuiert wurden, da die Straßen nach dem Erdbeben nicht mehr passierbar waren. Der Dammeigentümer hat auch erwähnt, dass durch die Umsiedlung während des Baus mehrere tausend Menschenleben gerettet werden konnten, denn viele Ortschaften entlang der Flussläufe haben sich infolge von Massenbewegungen als tödliche Fallen herausgestellt.

4 Shapai-RCC-Bogenmauer

Die 132 m hohe Shapai-RCC-Bogenmauer ist die weltweit höchste Mauer dieses Typs und wurde 2003 fertig gestellt. Die Kronenlänge beträgt 250 m, die Kronenbreite 9,5 m und die maximale Mauerstärke 28 m. Die Mauer weist vier Vertikalfugen im Abstand von jeweils 50 m auf. Zur Kompensation des Schwindens wurde MgO als Betonzusatzmittel verwendet. Die Epizentralentfernung betrug 30 km und die Mauer wurde für eine Bemessungsbeschleunigung von 0,138 g ausgelegt. Bei der Besichtigung konnte der Autor keine sichtbaren Schäden an der Mauer feststellen. Das Liftgebäude auf der Mauerkrone wurde jedoch beschädigt.



Bild 7: Schäden entlang der Horizontalfuge der Betonabdichtung des Zipingpu-Damms (Mai 2008)

Das Kraftwerksgebäude, das rund 10 km von der Mauer entfernt liegt, wurde durch Steinschläge schwer beschädigt; dasselbe gilt für die elektro-mechanischen Einrichtungen. Trotzdem wird versucht, die Schäden zu beheben und das Kraftwerk bis Ende 2009 wieder in Betrieb zu nehmen. Durch Felsstürze und Relativbewegungen wurde ein Kompensator in unmittelbarer Nähe des Kraftwerkgebäudes zerstört. Das Wasser schoss deshalb als Fontäne aus der Druckleitung und verursachte eine Überschwemmung des Kraftwerks. Aufgrund des sehr schwierigen Zugangs zu dieser Stauanlage hat man mit den Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten erst wenige Tage vor unserem Besuch begonnen. In diesem sehr steilen Gebiet stellen sich alle Oberflächenbauten als Schwachstellen heraus.

5 Das Wenchuan-Erdbeben und der Zipingpu-Stausee

Im Januar 2009 erschienen in der Presse zahlreiche Artikel, in welchen der Zipingpu-Stausee als Auslöser des Wenchuan-Erdbebens präsentiert wurde. In der Tat gibt es einige Stauanlagen, wo während des Auffüllens und Betriebs des Stausees Erdbeben ausgelöst wurden. Dieses Phänomen ist auch bekannt unter dem Begriff RTS (reservoir-triggered seismicity). Der erste dokumentierte Fall von RTS stammt aus dem Jahr 1935, wo beim Auffüllen des Stausees der 220 m hohen Hoover-Bogen-

gewichtsmauer eine Erdbebenaktivität festgestellt wurde. Seitdem haben sich in Indien, China, Griechenland und Zambia verschiedene stärkere Beben ereignet, bei denen RTS vermutet wurde. Bis heute betrug die maximale Magnitude eines RTS-Bebens 6,3. Die genaue Anzahl von Stauanlagen, bei denen RTS beobachtet wurde, ist nicht bekannt und schwankt zwischen 40 und 100. Ein erhöhtes Risiko von RTS besteht bei über 100 m tiefen Stauseen und in Gebieten mit hohen tektonischen Spannungen (Einsturzbeben werden hier nicht behandelt, da deren maximale Magnitude geringer ist als bei tektonischen Beben) [2]. Die Beziehung zwischen Stauseen und Erdbeben ist ein Forschungsthema, das weiter untersucht wird.

Für die Sicherheit moderner Stauanlagen stellt RTS keine zusätzliche Gefährdung dar, da Talsperren die Bodenbewegungen des sogenannten Sicherheitserdbebens widerstehen müssen und das maximale RTS-Ereignis das Sicherheitsbeben nicht übersteigen kann.

Der genaue Auslösemechanismus eines Bebens in einer Verwerfung mit tektonischen Spannungen, die bereits in der Nähe der Bruchspannungen sind, ist nicht bekannt und benötigt weitere Studien. Aufgrund der Vielzahl der Faktoren, die bei einem Bruch eine Rolle spielen könnten und die zudem große Unsicherheiten aufweisen, ist es nicht möglich, eine wissenschaftlich fundierte Beziehung zwischen dem Wenchuan-Erdbeben und dem Zipingpu-Stausee herzustellen.

Beim Zipingpu-Stausee sind folgende wichtigen Faktoren zu berücksichtigen die gegen eine solche Beziehung sprechen:

- (i) Der maximale Wasserspiegel des Stausees (875,4 m) liegt unterhalb des Wasserspiegels (877 m), wo ein Zufluss die Beichuan-Yinxu-Verwerfung überquert. Die hydrogeologischen Verhältnisse in der Bruchzone haben sich deshalb durch den Stausee nicht verändert.
- (ii) Dreizehn Monate vor dem Auffüllen des Stausees wurde ein mikroseismisches Netzwerk im Projektgebiet installiert. Dabei wurde die seismische Aktivität vor, während sowie nach dem Bau der Anlage überwacht und es wurde keine markante Änderung in der Seismizität festgestellt, wie das sonst bei den anderen Fällen von RTS der Fall war.
- (iii) Im Oktober 2006 lag der Reservoirspiegel bei 875,4 m und am 30. April 2008, d. h. kurz vor dem Beben, bei 828,95 m. Das Stauseevolumen be-

trug 300 Mio. m³ während dieses bei Vollstau rund 1 100 Mio. m³ beträgt.

Weitere Charakteristiken von starken RTS-Ereignissen können aus dem ICOLD-Bulletin „Reservoirs and Seismicity“ [2] entnommen werden.

6 Folgerungen

Das Wenchuan-Erdbeben vom 12. Mai 2008 hat sehr viele Stauanlagen beschädigt und große Schäden an Infrastrukturbauten verursacht. Ein in diesem Ausmaß kaum erwartetes Phänomen ist die extrem große Anzahl von Steinschlägen und Erdbeben, die in den stark betroffenen Gegenden ähnlich große Schäden verursacht haben wie die Erdbebenerschütterungen. Zudem entstanden weitere Gefahren durch die Bildung natürlicher Dämme und Stauseen.

Die Shapai-RCC-Bogenmauer weist keine sichtbaren Schäden auf. Das Stahlbetongebäude auf der Mauerkrone weist

Schäden infolge plastischer Deformationen auf.

Die wasserseitige Betonabdichtung und der Kronenbereich des Zipingpu-Damms wurden beschädigt. Die Betonabdichtung wurde repariert und die Anlage ist wieder in Betrieb, obwohl noch weitere Reparaturarbeiten im Kronenbereich und bei den Einlaufbauwerken erforderlich sind.

Es gibt keine eindeutigen Indikatoren für die anfangs 2009 in der Presse erschienene Vermutung, dass das Wenchuan-Erdbeben durch den Zipingpu-Stausee oder andere große Stauseen in der Region ausgelöst wurde.

Die Hauptmerkmale des Wenchuan-Bebens im Hinblick auf Stauanlagen sind wie folgt:

- (i) Die Dauer der starken Erschütterungen betrug über 90 s und die maximal registrierten Bodenbeschleunigungen erreichten Werte von bis zu 0,98 g.
- (ii) In den steilen Tälern wurden durch das Beben sehr viele Steinschläge und Erdrutsche ausgelöst. An 34 Stellen wurden durch Erdrutsche Flüsse gestaut. Zahlreiche Zufahrtsstraßen zu beschädigten Wasserkraftwerken waren während längerer Zeit unterbrochen.
- (iii) Steinschläge und Erdrutsche beschädigten Flusskraftwerke (Pfeiler, Schütze, Schützenantriebe) und oberirdische Kraftwerksgebäude.
- (iv) Das Beben verursachte große Beanspruchungen in der Ebene der Betonabdichtung, die mit herkömmlichen 2-D-Rechenmodellen für Schüttdämme nicht erfasst werden können.

Martin Wieland

The Effects of the May 12, 2008 Wenchuan Earthquake on Large Storage Dams

The Wenchuan earthquake of May 12, 2008 has affected some 2 650 dams and reservoirs, most of the are located in Sichuan province in China. Up to now no earthquake has affected that many dams and reservoirs. The earthquake effects on the 156 m high Zipingpu-concrete face rockfill dam (CFRD) and the 132 m high Shapai roller compacted concrete (RCC) arch dam are described. In addition, the problem of reservoir-triggered seismicity is discussed. The dams and power plants were visited during a joint mission of the Chinese Committee on Large Dams and ICOLD's Committee on Seismic Aspects of Dam Design in early April 2009.

Мартин Виланд

Последствия воздействия землетрясения, произошедшего в округе Венчуань 12 мая 2008 года, на крупные водоподпорные сооружения

От землетрясения в округе Венчуань значительно пострадали 2 650 водоподпорных сооружения и водохранилища, большей частью в китайской провинции Сичуань. Никогда еще землетрясение не наносило такого ущерба подпорным гидротехническим сооружениям. В статье описываются последствия воздействия землетрясения на 156-метровую насыпную дамбу Зипингпу, облицованную бетоном со стороны верхнего бьефа, и 132-метровую арочную плотину Шапай из укатанного бетона. Обсуждается проблема инициирования землетрясений подпорными гидротехническими сооружениями. Различные водоподпорные сооружения были посещены в апреле 2009 года в рамках совместной акции китайского Комитета по плотинам и водохранилищам и Международной Комиссии по большим плотинам (ICOLD).

Hinweis

Dieser Beitrag ist in Kooperation mit dem Deutsche TalsperrenKomitee e. V. (DTK) entstanden, dessen Organ die Wasserwirtschaft ist.

Literatur

- [1] Wang, Z. et al.: General introduction to engineering damage during Wenchuan earthquake. In: Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (2008), Vol. 28.
- [2] International Commission on Large Dams (ICOLD, Hrsg.): Reservoirs and seismicity: State of knowledge. Bulletin 137, Paris, 2009.

Autor

Dr. Martin Wieland

Präsident des ICOLD-Erdbebenkomitees
Pöyry Energy AG
Hardturmstrasse 161, CH-8037 Zürich, Schweiz
martin.wieland@poyry.com