

Andreas Bieberstein, Jost A. Studer, Thomas M. Weber und Gottfried Grünthal

Erdbebenbemessung von Stauanlagen gemäß DIN 19 700 – Arbeitshilfe für Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg existieren mehrere hundert Stauanlagen, und neue Anlagen werden geplant und gebaut. Zur Erdbebenbemessung dieser Anlagen gemäß DIN 19 700 fehlten bislang die erforderlichen Grundlagen. Die Einschätzung der Erdbebengefährdung entsprechend der Anforderungen der DIN 19 700 liegt nunmehr vor [1]. Auf dieser Basis wurde für Baden-Württemberg eine Arbeitshilfe zur Erdbebenbemessung von Stauanlagen gemäß DIN 19 700 erarbeitet. Dieser Beitrag stellt die Arbeitshilfe vor.

1 Einführung

In Baden-Württemberg existieren mehrere hundert Stauanlagen. Viele der bestehenden Anlagen sind nicht nach modernen Gesichtspunkten der Erdbebensicherheit ausgelegt und sollen in mittlerer Zukunft vertieft überprüft werden. Ferner werden neue Stauanlagen, vor allem Hochwasserrückhaltebecken, geplant und gebaut. Dass die Berücksichtigung von Erdbeben bei der Bemessung von Stauanlagen relevant ist, verdeutlicht unter anderem das Versagen des Lower-San-Fernando-Damms in Kalifornien, der im Jahre 1971 infolge eines Erdbebens mit der Magnitude M_w von 6,6 weitgehend zerstört wurde (**Bild 1**).

In Hinblick auf die Erdbebenbemessung von Stauanlagen gemäß DIN 19 700 [2] fehlten für Baden-Württemberg bislang die erforderlichen Bemessungsgrundlagen bzw. die Gefährdungsab-



Bild 1: Lower-San-Fernando-Damm nach dem Erdbeben von 1971 in San Fernando, Magnitude $M_w = 6,6$ (Quelle: R. E. Wallace, U. S. Geological Survey, 1971)

schätzungen. Die erdbebengerechte Auslegung für Bauwerke mit hohem Risikopotenzial, wie beispielsweise Talsperren, ist in Deutschland in der aktuellen Hochbau-Erdbebennorm DIN 4 149 [3] nicht geregelt. Für solche Bauwerke werden höhere mittlere Wiederholungsperioden entsprechender Erschütterungsparameter für den Nachweis der Erdbebensicherheit erforderlich.

Anhand einer Neueinschätzung der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland und somit auch für Baden-Württemberg nach modernen Erkenntnissen seitens des Deutschen GeoForschungsZentrums Potsdam, Sektion Erdbebengefährdung und Spannungsfeld, liegen nunmehr entsprechende Angaben zur seismischen Gefährdung vor [1]. Diese Erdbebengefährdungsanalyse bildet die Grundlage der zurzeit im Entwurf verfügbaren „Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg“ [4]. Ferner stützt sich die Arbeitshilfe auf verschiedene internationale und nationale Richtlinien [5], [6], [7].

2 Seismische Gefährdung in Baden-Württemberg

Mit Erscheinen der DIN 19 700 sind in Baden-Württemberg in Hinsicht auf die Erdbebenbemessung insofern offene Fragen entstanden, als die erforderlichen seismischen Lastannahmen für die gemäß DIN 19 700 nachzuweisenden Betriebs- und Bemessungserdbeben nicht verfügbar waren. In der Folge wurden in den letzten Jahren von unterschiedlichen Einrich-

tungen seismologische Gutachten für verschiedene Standorte von Stauanlagen angefertigt.

Seitens der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Baden-Württemberg wird jedoch angestrebt, die Bemessung der Stauanlagen auf Basis einheitlicher seismologischer Grundlagendaten entsprechend dem Stand der Technik durchzuführen. Daher wurde vereinbart, die vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam, Sektion Erdbebengefährdung und Spannungsfeld, auf probabilistischer Grundlage ermittelte seismische Gefährdungseinschätzung zugrunde zu legen [1]. Für das Zielgebiet der Bundesrepublik Deutschland erfolgten die probabilistischen Gefährdungsrechnungen mit einem Gitterpunktabstand von $0,1^\circ N \times 0,1^\circ E$. Insgesamt stehen Kartendarstellungen für vier Gefährdungsniveaus – ausgedrückt in mittleren Wiederholungsperioden T von Bodenbeschleunigungen für $T = 100, 500, 1\,000$ und $2\,500$ Jahren – zur Verfügung. Ferner wurden die zugehörigen gefährdungskonsistenten Antwortspektren berechnet und für jeden Standort bereitgestellt. Beispielhaft ist in **Bild 2** die Erdbebengefährdungskarte für Deutschland für die Spitzenbodenbeschleunigung PGA für Felsuntergrund, 50%-Fraktile und mittlerer Wiederholungsperiode von $2\,500$ Jahren dargestellt.

3 Ermittlung der Erdbebenanregung

Zur Ermittlung des Betriebs- und Bemessungserdbebens können die Spitzenbo-

denbeschleunigungen für den jeweiligen Standort von der Internetseite der Sektion Erdbebengefährdung und Spannungsfeld des GFZ ([www.gfz-potsdam.de/DIN 19 700](http://www.gfz-potsdam.de/DIN_19_700)) interaktiv abgerufen werden. Je nach geologischem Untergrund und Baugrund wird das entsprechende normierte Standortantwortspektrum nach DIN 4 149 bei der Spitzenbodenbeschleunigung eingehängt und mit dem Standortfaktor (Untergrund- und Baugrundfaktor) multipliziert. Fehlende Angaben zu geologischen Untergrundklassen von Standorten können beim Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg erhalten werden. Somit ist die Philosophie der DIN 4 149 bei der Erdbebenbemessung von Stauanlagen insgesamt beibehalten worden.

4 Nachweiskonzept

4.1 Allgemeines

Das Nachweiskonzept für Stauanlagen stützt sich auf DIN 19 700. In der Bemessung ist die Tragsicherheit der Stauanlage für zwei Erdbebenszenarien nachzuweisen, dem Betriebserdbeben und dem Bemessungserdbeben. Für Stauanlagen bis 40 m Bauwerkshöhe sind pseudostatische Nachweise sowohl für Erddämme als auch Staumauern zulässig. Für große Anlagen ist eine dynamische Berechnung erforderlich. Zusätzliche Angaben in Hinsicht auf die Berücksichtigung von Erdbebennachweisen bei Hochwasserrückhaltebecken sind in [7] enthalten.

4.2 Erddämme

Die pseudostatische Berechnung von kleinen und mittleren Erddämmen stellt eine starke Vereinfachung des wahren Erdbebenverhaltens der Konstruktion dar. Basierend auf Erfahrungen aus Ländern hoher Seismizität (z. B. USA und Japan) hat sich gezeigt, dass zum Vorgehen einer pseudostatischen Berechnung gemäß DIN 19 700 ergänzende Abklärungen der Anwendbarkeit dieser vereinfachten Betrachtung geboten sind. Die Schäden beim San-Fernando-Erdbeben 1971 verdeutlichen, dass bei durchströmten Erddämmen die alleinige Anwendung pseudostatischer Methoden nicht zulässig ist, wenn deren Materialien bei Erschütterungen zu einem Porenwasserdruckanstieg neigen. Der Lower-San-Fernando-Damm (Bild 1) war gemäß pseudostatischen Analysen rechnerisch erdbebensicher. Hieran wird deut-

lich, dass die Betrachtung erdbebeninduzierter Porenwasserüberdrücke bzw. der Nachweis gegenüber Bodenverflüssigung (Liquefaction) eine hohe Relevanz besitzt.

Ferner ist darauf hinzuweisen, dass beim Nachweis der Böschungstragsicherheit insbesondere bei Berücksichtigung der Einwirkung des Bemessungserdbebens ein Unterschreiten des geforderten Sicherheitsbeiwertes nicht auszuschließen ist. In diesem Fall ist nicht grundsätzlich von einem globalen Versagen der Stauanlage auszugehen. Vielmehr ist nicht alleinig der einzuhaltende Sicherheitsbeiwert maßgebend, sondern es sind die durch das Erdbeben induzierten Rutschungen in Hinsicht auf ihre Verträglichkeit zu bewerten. Aus diesem Grund sind in der Arbeitshilfe verschiedene Methoden empfohlen und Kriterien zur Beurteilung der Zulässigkeit von Gleitverschiebungen gegeben.

Weiter wird darauf hingewiesen, dass bei Dammhöhen um 20 m die Eigenfrequenz des Dammkörpers oft im Bereich des Plateaus des Bemessungsspektrums liegt. Deshalb kann ein Nachweis mit Verwendung der maximalen Bodenbeschleunigung, wie er nach DIN 19 700 zulässig ist, unter Umständen nicht zu konservativen Resultaten führen.

Ebenso verlangt die Forderung der DIN 19 700 nach einer dynamischen Analyse für Erddämme über 40 m Höhe eine zusätzliche Spezifizierung. Eine vereinfachte lineare Finite-Element-Analyse mit einem konstanten Schubmodul ist in der Regel ungenügend. Vielmehr gilt es, die Nichtlinearität des Bodenmaterials zu berücksichtigen und ebenso die Deformationen zu beurteilen. Aus Sicht der Autoren sind Methoden, wie z. B. von Newmark [8], welche die erdbebeninduzierten Deformationen berücksichtigen, gleichzeitig zu nichtlinearen FE-Berechnungen.

4.3 Staumauern

Bei Betonmauern ist das Vorgehen gemäß DIN 19 700 allgemein akzeptiert. Im Vergleich zu Erddämmen ergeben sich bei der Bewertung von Staumauern weniger häufig Fragen, da das Vorgehen bei der Erdbebenanalyse von Hochbauten ähnliche Methoden verlangt und auf Staumauern sinngemäß übertragen werden kann. Staumauern weisen im Allgemeinen keine Armierung auf, weshalb die Prüfung der zulässigen Spannungen auf Zug, Druck und Schub ein wesentliches Nachweiskriterium ist. Wenngleich das Kriterium der Begren-

zung der Zugspannungen in DIN 19 700 nicht angeführt ist, wird es in die Arbeitshilfe aufgenommen werden.

5 Erste Erfahrungen

Die im Entwurf vorliegende Arbeitshilfe wurde von drei Ingenieurbüros anhand von drei Stauanlagen überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Arbeitshilfe in ihren Grundlagen praktikabel und anwendbar ist, aber zusätzliche Erläuterungen benötigt.

Ein Problemschwerpunkt liegt bei der Analyse erdbebeninduzierter Porenwasserdruckanstiege bei locker gelagerten Sedimentschichten, z. B. bei Hochwasserrückhaltebecken in Flussauen. Diesem Phänomen wurde bislang kaum Beachtung geschenkt. Diesbezüglich werden sowohl Erkundungsmethoden als auch Bewertungskriterien angegeben. Es zeigte sich, dass oft wenig Erfahrung in den Bereichen dynamischer Bodenkennziffern, Schwingungsberechnungen und Festigkeitsuntersuchungen vorliegen. Es ist deshalb – insbesondere bei höheren Stauanlagen – zu empfehlen, rechtzeitig Sachverständige in den Nachweis bzw. die Überprüfung des jeweiligen Projektes mit einzubeziehen.

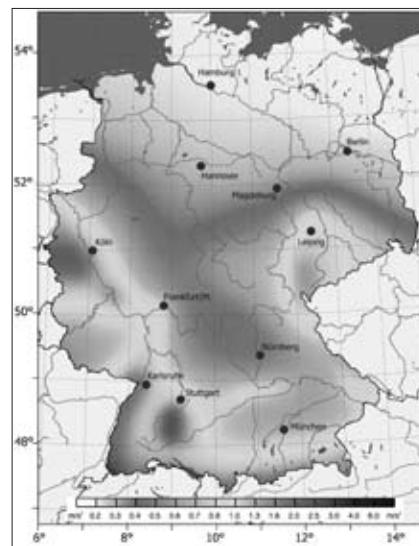


Bild 2: Erdbebengefährdungskarte für die Bundesrepublik Deutschland [1]: Spitzbodenbeschleunigungen PGA (Felsuntergrund, 50%-Fraktile) für 4 % Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von $4 \cdot 10^{-4}$, der eine mittlere Wiederholungsperiode von $T = 2\,500$ Jahren entspricht ($M_w = 6,6$)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Das Land Baden-Württemberg beabsichtigt die Erdbebenbemessung von Stauanlagen gemäß DIN 19 700 auf eine einheitliche Bemessungsgrundlage zu stellen. Hierzu wird zurzeit eine Arbeitshilfe geschaffen. Grundlage sind probabilistische Erdbebengefährdungskarten für die Bundesrepublik Deutschland für mittlere Wiederholungsperioden T der Bodenbeschleunigung für $T = 100, 500, 1\ 000$ und $2\ 500$ Jahre, die am GFZ berechnet wurden.

Die zurzeit im Entwurf vorliegende Arbeitshilfe soll Betreibern, Ingenieurbüros sowie Aufsichts- bzw. Genehmigungsbehörden in Baden-Württemberg eine einheitliche Vorgehensweise zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Stauanlagen gemäß DIN 19 700 ermöglichen.

Bisherige probeweise Anwendungen der Arbeitshilfe für verschiedene Stauanlagen

zeigen, dass insbesondere bei bestehenden Stauanlagen, für die im Rahmen von Vertieften Überprüfungen erstmals Nachweise gegen Erdbeben erforderlich werden, zusätzlicher Untersuchungs- bzw. Erkundungsaufwand nicht auszuschließen ist. Ferner ist darauf hinzuweisen, dass eine Abstimmung zwischen Betreiber, sachverständigem Ingenieur und Aufsichtsbehörde im jeweiligen Einzelfall unerlässlich ist. Insbesondere bei Stauanlagen mit geringer Höhe, die sich auf Lockergestein gründen, sind die Anforderungen in Hinblick auf erdbebeninduzierte Porenwasserüberdrücke im Untergrund u. U. eingehend zu bewerten.

Die Autoren regen an, zu prüfen, ob die hier zugrundeliegende seismische Gefährdungsabschätzung [1] für Stauanlagen ggf. bundesweit Anwendung finden kann. Vor dem Hintergrund, dass in verschiedenen Bundesländern bereits anderweitige Regelungen bzw. Vorgehensweisen zur behandelten Problematik bestehen (s. z. B. [6]), sollten Anstrengungen unternommen werden, ein bundesweit gültiges Regel-

werk zu schaffen, um die Erdbebenbemessung von Stauanlagen national zu vereinheitlichen.

Autoren

Dr.-Ing. Andreas Bieberstein

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Engler-Bunte-Ring 14, 76131 Karlsruhe
andreas.bieberstein@kit.edu

Dr. sc. techn. Jost A. Studer

Dr. sc. techn. Thomas M. Weber

Studer Engineering
Thujastrasse 4
CH-8038 Zürich, Schweiz
studer@studer-engineering.ch

Dr. Gottfried Grünthal

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion Erdbebengefährdung und Spannungsfeld
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
ggrue@gfz-potsdam.de

Literatur

- [1] Grünthal, G.; Bosse, D.; Stromeyer, D.: Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland. Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19 700:2004-07 „Stauanlagen“. In: Scientific Technical Report STR 09/07, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, 2009.
- [2] Norm DIN 19 700: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, Teil 11: Talsperren, Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [3] Norm DIN 4 149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [4] Studer, J. A., Weber T. M., Bieberstein, A.: Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg. Entwurfsfassung, 2009.
- [5] Bundesamt für Wasser und Geologie der Schweiz (BWG, Hrsg.): Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zu dem Nachweis der Erdbebensicherheit. Berichte des BWG, Serie Wasser, 2003.
- [6] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Berücksichtigung von Erdbebenbelastungen nach DIN 19 700 in Nordrhein-Westfalen. In: Merkblatt des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, 2006, Nr. 58.
- [7] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW, Hrsg.): Arbeitshilfe zur DIN 19 700 für Hochwasserrückhaltebecken. LUBW, 2007.
- [8] Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments. In: Géotechnique 15 (1965), Heft 2, S. 139-160.

Andreas Bieberstein, Jost A. Studer, Thomas M. Weber and Gottfried Grünthal

Earthquake Resistant Design of Dams According to the German Standard DIN 19 700 – Guidelines for Baden-Württemberg

Hundreds of dams are located in Baden-Württemberg and new dams are designed and constructed. The necessary earthquake design basis was lacking so far. The appropriate assessment of the earthquake hazard according to the requirements in the safety regulation DIN 19 700 has in the meanwhile been performed [1]. On the basis of this hazard analysis, a guideline for earthquake resistant design of dams has been prepared according to the German Standard DIN 19 700. The present paper gives a short introduction to the new guideline.

Андреас Биберштайн, Йост А. Штудер, Томас М. Вебер и Готтфрид Грюнталь

Расчет параметров водоподпорных сооружений для случаев землетрясения согласно стандарту DIN 19 700 – вспомогательные технические документы для Баден-Вюртемберг

В земле Баден-Вюртемберг имеется более сотни подпорных технических сооружений, планируются и строятся новые сооружения. Для расчета параметров сооружений для случаев землетрясения согласно стандарту DIN 19 700 до сих пор отсутствовал необходимый базис. В настоящий момент наконец-то представлена методика оценки повреждений для случаев землетрясения в соответствии с требованиями DIN 19 700 [1]. На этой основе для земли Баден-Вюртемберг были разработаны вспомогательные технические материалы с целью расчета параметров водоподпорных сооружений для случаев землетрясений в соответствии с DIN 19 700. Эта документация представлена в данной статье.