

Die Linachtalsperre bei Vöhrenbach im Schwarzwald – Nachweis der Erdbebensicherheit

Werner Seim & Uwe Pfeiffer
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Universität Kassel, Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel

ZUSAMMENFASSUNG: Der Beitrag beschreibt und erläutert die Strukturberechnungen, die für den Nachweis der Erdbebensicherheit einer in den 1920er Jahren errichteten Eisenbeton-Talsperre durchgeführt wurden. Die angewandten Rechenverfahren sowie die Art und Größe der berücksichtigten Einwirkungen sowie die Stufen der Modellierung werden erläutert. Die wichtigsten Berechnungsergebnisse werden dokumentiert. Der Nachweis der Tragsicherheit erfolgt auf der Grundlage der DIN 19700-11 (2004).

1. EINLEITUNG

Die Linachtalsperre des Wasserkraftwerks Vöhrenbach im Schwarzwald wurde in den Jahren 1922 bis 1925 erbaut (Bild 1). Sie ist das wichtigste und imposanteste Element einer Gesamtanlage, die im Sinne einer Maßnahme zur Wirtschaftsförderung die Stromversorgung für die aufstrebende örtliche mittelständische Industrie sicherstellte (Seim et al., 2001). Äußere Form und Tragwerk des Sperrenbauwerks folgen einem Konstruktionsprinzip, das zu Beginn des 20. Jahrhunderts in den USA entwickelt und dort sowie in Europa bis in die 1935er Jahre hinein vielfach angewandt wurde.



a)



b)

Bild 1: a) Blick auf das Sperrenbauwerk vor der Sanierung b) nach der Sanierung, zu Beginn des Probetaus

Bei diesen Gewölbereihen-Staumauern in sogenannter aufgelöster Bauweise stützen sich zur Wasserseite geneigte, parallel angeordnete Tonnengewölbe auf einzelne Wandscheiben ab. Die Wandscheiben werden luftseitig untereinander durch Riegel stabilisiert. Der Materialaufwand reduziert sich so gegenüber einer massiven trapezförmigen Schwergewichtsmauer um ca. 80 %. Zu Zeiten, in denen Arbeitskräfte vergleichsweise billig waren, stellte dies, insbesondere für abgelegene Standorte, einen erheblichen Kostenvorteil dar.

2. GRUNDLAGEN

2.1 EINWIRKUNGEN

Im Einklang mit internationalen Standards unterscheidet die DIN 19700-11 (2004) die beiden Einwirkungen Betriebserdbeben und Bemessungserdbeben – in anderen Ländern und Regelwerken wird das Bemessungserdbeben auch als Sicherheitserdbeben bezeichnet. Die Linachtalsperre ist mit einer Gesamthöhe von über 15 m der Talsperrenklasse 1 zuzuordnen. In diesem Fall ist für die Ermittlung der Beschleunigungskennwerte für das Betriebserdbeben eine mittlere Wiederkehrperiode von 500 Jahren und für das Bemessungserdbeben von 2500 Jahren einzusetzen. Eine mittlere Wiederkehrperiode von 475 Jahren, wie sie für übliche Hochbauten im Allgemeinen angesetzt wird, entspricht einer 90%igen Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit der entsprechenden Intensität innerhalb von 50 Jahren (Schwarz et al., 1998). Diese Annahme stimmt mit dem für ein Betriebserdbeben tolerierbaren Risiko genügend genau überein, so dass entsprechende Normen (DIN 4149, 2002, EC 8, 1997), insbesondere hinsichtlich der dort festgelegten Erdbebenzonen, Antwortspektren und Beschleunigungswerte, auch für Talsperren beim Nachweis der Tragsicherheit für die Einwirkung Betriebsbeben angewandt werden können.

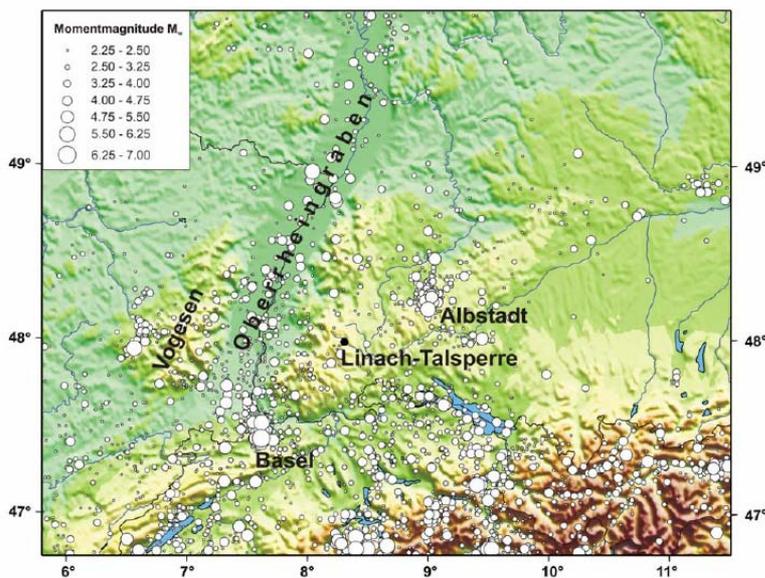


Bild 2: Seismizität der Umgebung der Linachtalsperre (aus Grünthal et al., 2004)

Eine vergleichbare, allgemein verfügbare Grundlage für das Bemessungsbeben fehlt für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Hier ist es erforderlich, die Beschleunigungswerte durch ein standortbezogenes seismologisches Gutachten festlegen zu lassen. Für den Standort der Linachtalsperre (Bild 2) wurde die Erdbebengefährdungseinschätzung vom Geoforschungszentrum in Potsdam durchgeführt (Grünthal et al., 2004).

2.2 BERECHNUNGSVERFAHREN UND STRUKTURMODELL

Obwohl streng genommen für die Linach-Talsperre gemäß DIN 19700-11 ein Erdbebenachweis aufgrund einer quasi-statischen Analyse als ausreichend angesehen werden kann, wurde für die Ermittlung der Beanspruchungen das multimodale Rechenverfahren angewandt. Dies ist dadurch zu begründen, dass aufgrund der gegliederten Konstruktionsform des Sperrenbauwerks nicht auszuschließen war, dass eine Beanspruchung in Querrichtung, d. h., senkrecht zur Tallängsachse, zum maßgebenden Lastfall wird. Und die Erfassung des dynamischen Verhaltens in Querrichtung war nur mit Hilfe einer modalen Analyse möglich.

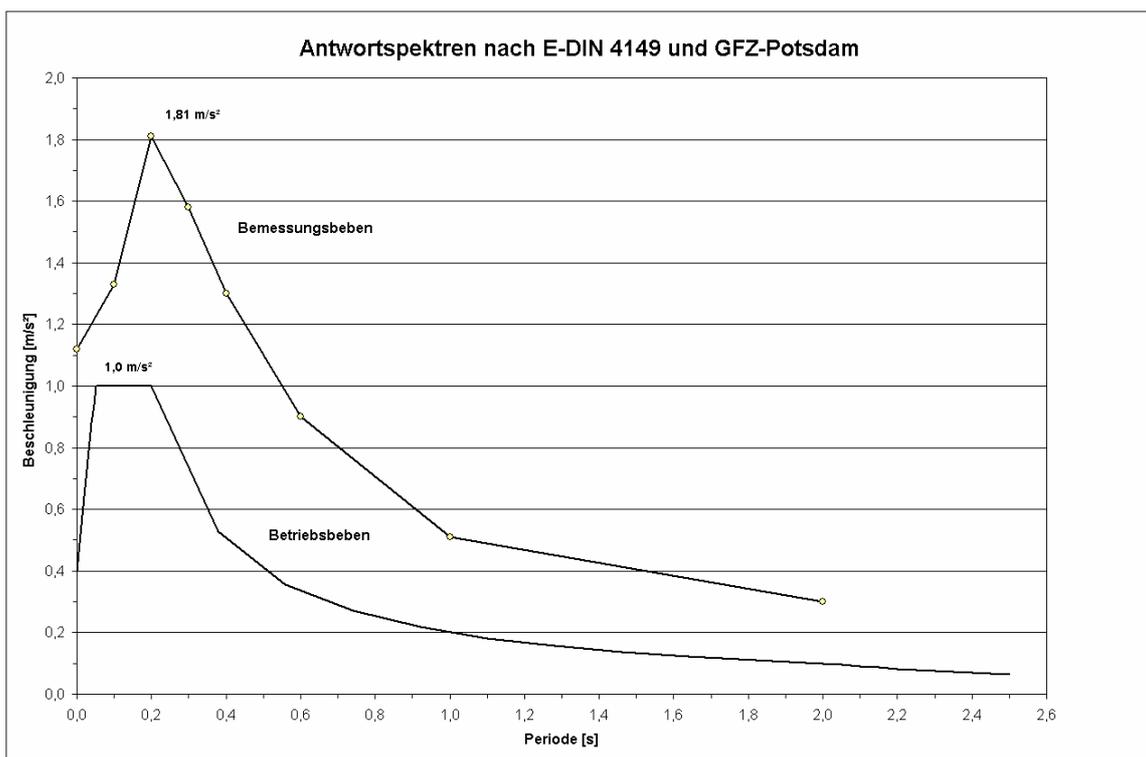


Bild 3: Antwortspektren nach E-DIN 4149 (2002) und Grünthal et al. (2004) für Betriebs- und Bemessungsbeben

In der Praxis ist die Interpretation der Rechenergebnisse, die mit Finite-Element-Berechnungen an komplexen räumlichen Tragwerken ermittelt wurden, häufig mit Schwierigkeiten verbunden. Aus diesem Grund wurde der vollständigen räumlichen Strukturberechnung der Linachtalsperre eine Studie zur Modellbildung vorgeschaltet.

In einer ersten Stufe wurden ausschließlich die Pfeiler betrachtet, die als primäre Tragelemente die Horizontallasten in den Baugrund ableiten. Der maßgebende mittlere Pfeiler wurde herausgegriffen. Diesem wurden sämtliche Massen der dem Abstand der Pfeiler entsprechenden Einflussbreite von 10,80 m zugewiesen. In einer zweiten Stufe wurde ein Teilsystem mit drei Gewölben untersucht, wie er bereits in einer früheren Studie zum Strukturverhalten unter Temperaturbeanspruchungen verwendet worden war. Bei diesem Modell ist bereits eine vollständige dreidimensionale Betrachtung möglich. Bild 6 und Bild 7 zeigen eine isometrische Darstellung der in der dritten Stufe modellierten kompletten Struktur mit dreizehn Gewölben.

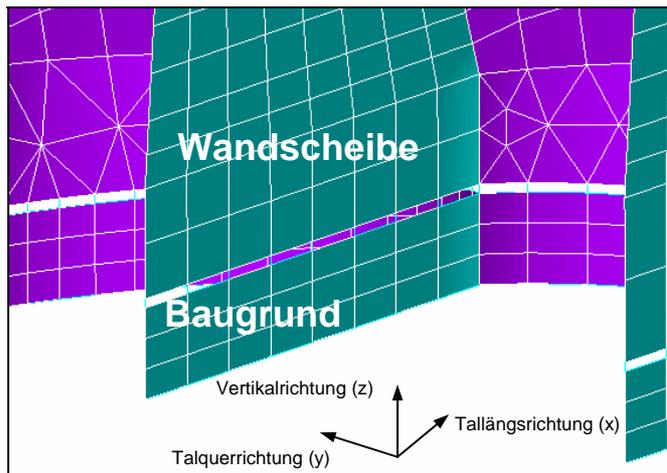


Bild 4: Modellbildung der Gründungsfuge

Besondere Aufmerksamkeit wurde bei allen drei Stufen auf eine realitätsnahe Modellierung der Gründungsfuge gelegt: Die Linachtalsperre ist im unverwitterten Granit gegründet. Die Klüftigkeit des Felses unterhalb der Gründungssohle beeinflusst die elastischen Eigenschaften nicht, so dass bei der Modellierung des Untergrundes von einem homogenen isotropen elastischen Material ausgegangen werden konnte. Für die modale Analyse wurden entsprechende Scheibenelemente eingeführt, die mit den Elementen des aufgehenden Bauwerks starr gekoppelt waren. Bei Vergleichsrechnungen mit statischen Ersatzlasten wurden zwischen Fundamenten und Untergrund Fugenelemente eingeführt, die bei Zugspannungen ein Aufgehen der Fuge zuließen (siehe Bild 4). Die vom Baugrundgutachter übermittelten Bettungswerte wurden auf eine 2 m dicke elastische Schicht umgerechnet.

Die Interaktion zwischen Bauwerk und aufgestautem Wasser wird durch einen Ansatz mitschwingender Wassermassen berücksichtigt, wie er bereits 1933 von Westergaard (Westergaard, 1933, DVWK, 1996) vorgeschlagen wurde.

3. ERGEBNISSE DER STRUKTURBERECHNUNG

Das dynamische Verhalten der Linachtalsperre bei einer Erregung in Querrichtung wird durch das Ausweichen der Gewölbe im Kopfbereich der Mauer sowie die Querverformung der Pfeiler bestimmt. Während die Pfeiler auch beim Erdbeben trotz Querbiegung überdrückt bleiben, treten in den Gewölben erhebliche Biegemomente auf.

Eine Bodenbeschleunigung in Tallängsrichtung, d. h. senkrecht zur Sperrenachse, stellt für übliche Dämme sowie für massive Schwergewichts-Staumauern die maßgebende Beanspruchung im Lastfall Erdbeben dar. Ein Versagen einzelner Bereiche des Bauwerks, infolge der auftretenden Massenträgheitskräfte, hätte katastrophale Folgen. Deshalb wurde diesem Lastfall auch im vorliegenden Fall besondere Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl bereits die Vorstudien zeigten, dass für die Linachtalsperre die größten Beanspruchungen des Bauwerks bei einem Erdbeben in Querrichtung auftreten. Die Überlagerung der mit dem multimodalen Verfahren berechneten Einzelergebnisse erfolgte mit der SRSS-Regel. Diese Überlagerungsvorschrift wurde angewandt, obwohl der Abstand der einzelnen Eigenfrequenzen die in der Literatur angegebene untere Grenze von 20 % unterschreitet. Allerdings zeigt eine Auswertung der Eigenformen, dass die Beanspruchungen aus nahe beieinanderliegenden Eigenfrequenzen im Bauwerk geometrisch klar abgegrenzt werden können.

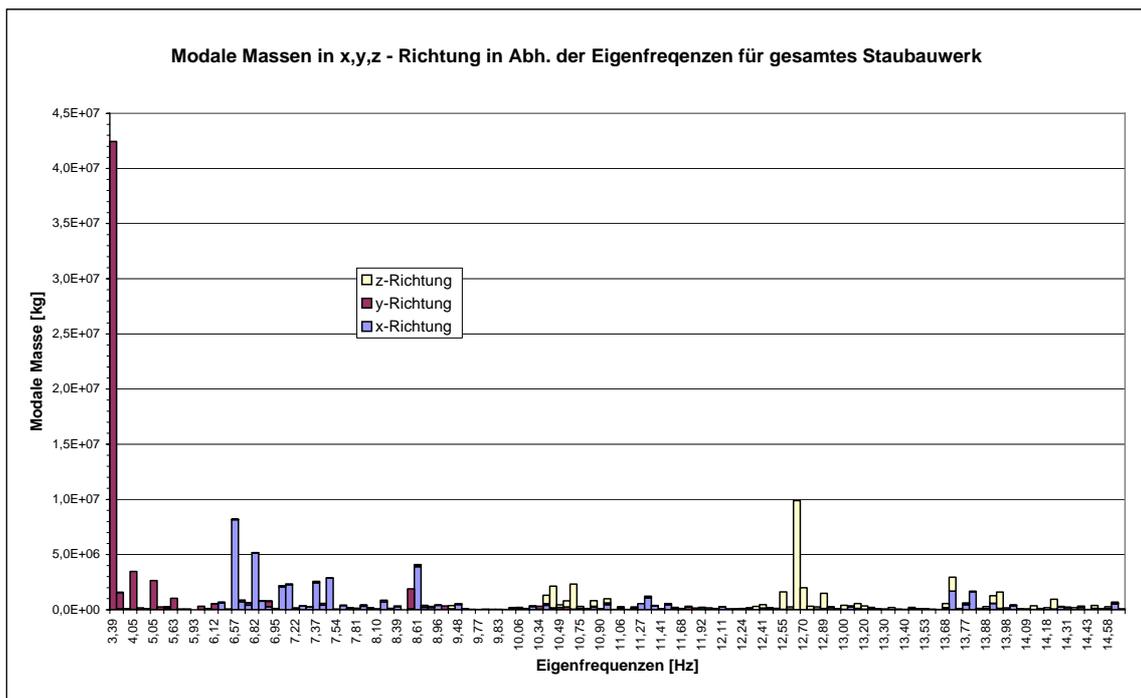


Bild 5: Eigenfrequenzen mit modalen Teilmassen und maßgebende Eigenformen für die Modellierungsstufe „vollständige Struktur“

Die Ergebnisse lassen sich nach Seim et al. (2006) wie folgt zusammenfassen:

- Die extremen Bodenpressungen (unter den hohen Pfeilerscheiben) nehmen beim Betriebsbeben um 3,4 % und beim Sicherheitsbeben um 7,4 % zu und liegen im Bereich von 1,2 MN/m². Beim Betriebsbeben treten in der Sohlfuge keine Zugspan-

nungen auf, beim Sicherheitsbeben geringfügige Zugspannungen, die sich lediglich über 8 % der Aufstandsfläche erstrecken.

- Die Gleitsicherheit zufolge Erdbeben nimmt um 24 % bzw. 28 % ab, liegt aber immer noch über den minimal geforderten Sicherheiten von 1,3 bzw. 1,2 je nach Lastfallkombination.
- Die maximalen Hauptdruckspannungen im luftseitigen Pfeilerbereich gelegen, nehmen infolge der Erdbebenbeanspruchung um 16 % bis 37 % zu und liegen im Bereich von 6 MN/m².
- Für Erdbeben in Tallängsrichtung erhöhen sich die Biegemomente um 13 % bis 52 % bei gleichzeitiger Zunahme der Druckkräfte um 38 % bis 14 %, was lediglich eine Erhöhung der Beanspruchung aus der statischen Last darstellt. Eine vollkommen andere Beanspruchung hingegen gibt das Beben in Querrichtung und ist somit nicht mit der vorhandenen Bewehrung konform. Hier gelingt der Nachweis nur derart, dass an Stellen der Überbeanspruchung Gelenke eingeführt werden und ein zulässiger Gleichgewichtszustand gesucht wird. Dieser Umstand tritt lediglich in den hoch gelegenen Gewölbebereichen auf.

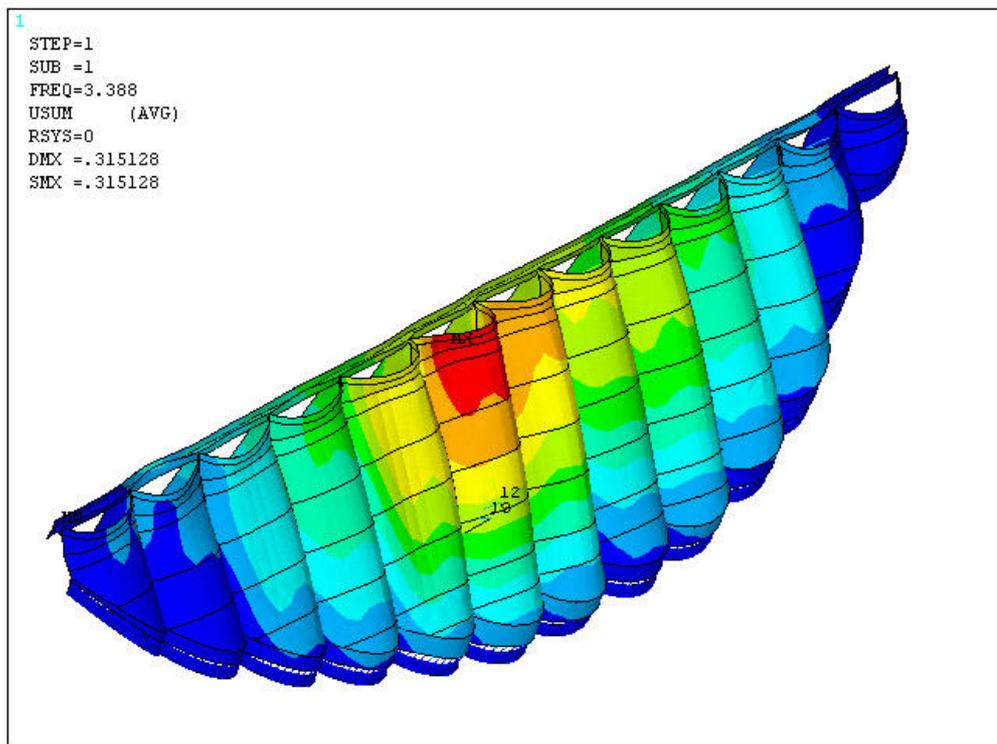


Bild 6: Eigenform bei 3,4 Hz in Talquerrichtung

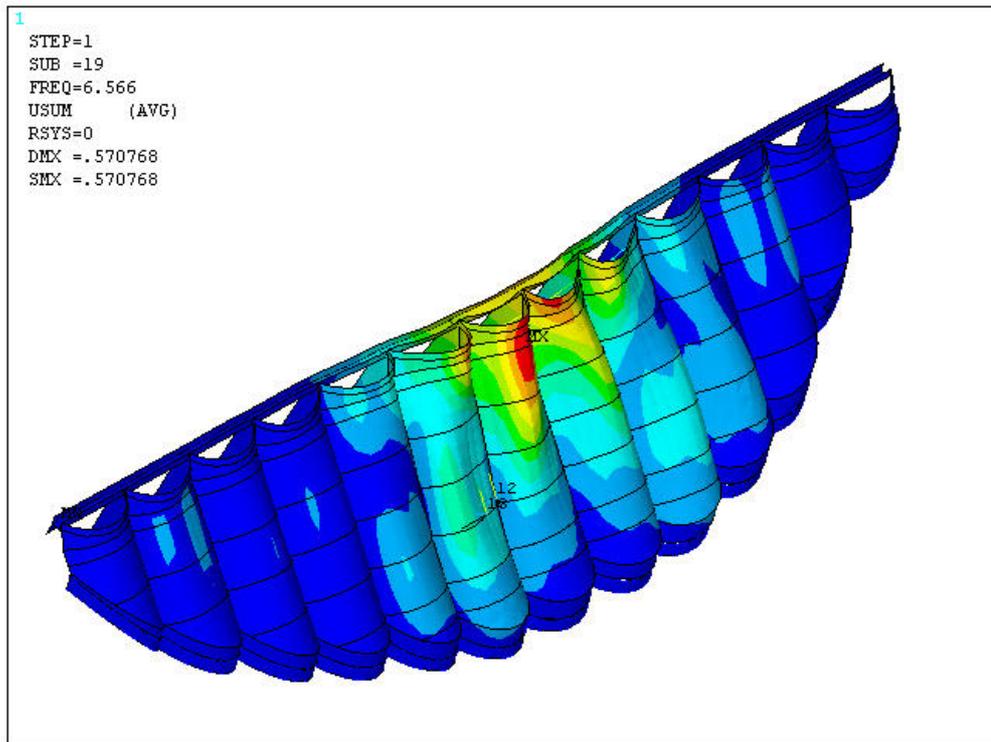


Bild 7: Eigenform bei 6,6 Hz in Tallängsrichtung

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die numerischen Berechnungen, die zum Nachweis der Erdbebensicherheit der Linach-Talsperre durchgeführt wurden, zeigen die Leistungsfähigkeit zeitgemäßer Rechenprogramme und der dabei verwendeten numerischen Verfahren. Die Behandlung schwieriger baodynamischer Fragestellungen, auch für große Bauwerke, ist auf Rechnern, wie sie heute in jedem Ingenieurbüro vorhanden sind, möglich.

Die Schwierigkeit der Aufgabe liegt weniger bei der Abbildung der Geometrie des Bauwerks oder der Beschreibung der Interaktion mit dem Baugrund. Auch die Eingabe der Parameter für die Beanspruchung sollte in der Regel keine Probleme bereiten. Die eigentliche Ingenieuraufgabe ist vielmehr die Interpretation und Bewertung der Ergebnisse. Im vorliegenden Fall wurden ausführliche Vorstudien zur Modellierung des Tragwerks sowie zum Einfluss von Bauwerks- und Baugrundsteifigkeiten durchgeführt. Darüber hinaus wurden für die Erdbebenerrregung in Tal-Längsrichtung die mit einem aufwendigen multimodalen Verfahren ermittelten Ergebnisse durch eine vereinfachte Berechnung mit statischen Ersatzlasten abgesichert. So wurde die Sicherheit des Sperrenbauwerks gegenüber einer Erdbebenbeanspruchung nicht nur zahlenmäßig erfasst, es wurde darüber hinaus die Schärfe dieser Sicherheitsaussage durch vergleichende Berechnungen eingegrenzt.

In diesem Zusammenhang soll ausdrücklich auf die gute Zusammenarbeit mit dem Tragwerksplaner Dr. Kurt Kratzer (Graz, Mitarbeiter Dipl.-Ing. Hans Nowotny), dem zu strukturdynamischen Fragen eingeschalteten Gutachter Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling (Kassel), dem von der verfahrensführenden Behörde beauftragten Prüfsingenieur Dipl.-Ing. Josef Steiner (Mannheim, Mitarbeiter Dipl.-Ing. Axel Bisswurm), den Geotechnikern Dipl.-Ing. Georg Geyer und Dr.-Ing. Klaus Maisch (Karlsruhe) und den

Geophysikern Dr. Gottfried Grünthal (Geoforschungszentrum Potsdam) und Dr. Wolfgang Brüstle (Landeserdbebendienst Baden-Württemberg) hingewiesen werden.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- DIN 19700-10, 2004. Stauanlagen: Gemeinsame Festlegungen. Beuth Verlag: Berlin.
- DIN 19700-11, 2004. Stauanlagen: Talsperren. Beuth Verlag: Berlin.
- DVWK Merkblatt 242, 1996. Berechnungsverfahren für Gewichtsmauern – Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Untergrund.
- E-DIN 4149, 2002. Bauten in deutschen Erdbebengebieten: Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Beuth Verlag: Berlin.
- Eurocode 8, 1997. Beuth Verlag: Berlin.
- Grünthal, G.; Bosse, C. 2005. Bericht zur Einschätzung der Erdbebengefährdung am Standort der Linach-Talsperre mit Angabe des gefährdungskonsistenten Antwortspektrums der Bodenbeschleunigung für das Sicherheitsbeben. Unveröffentlicht.
- Schwarz J., Grünthal, G., 1998. Zukunftsorientierte Konzepte zur Beschreibung seismischer Einwirkungen für das Erdbebeningenieurwesen. Bautechnik, 75, S. 737 – 752.
- Seim, W.; Pörtner, R., Klapp, H., 2001. Die Linach-Talsperre bei Vöhrenbach im Schwarzwald – Schadensanalyse und denkmalverträgliches Reparaturkonzept. Beton- und Stahlbetonbau, 96, S. 716 – 724.
- Seim, W., Kratzer, K., Pfeiffer, U., Nowotny, H., 2006. Die Linachtalsperre bei Vöhrenbach im Schwarzwald – Nachweis der Erdbebensicherheit. Bauingenieur, 81. S. 71 - 80.
- Westergaard, H. M., (1933). Water Pressures on Dams During Earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98. S. 418 – 433.