

## ERDBEBENINGENIEURWESEN UND BAUDYNAMIK

Eine gemeinsame Publikation von

## D G E B

Deutsche Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.dgeb.org

## O G E

Österreichische Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.oge.or.at

## S G E B

Schweizer Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
www.sgeb.ch

## Inhalt

## Aufsätze

- S 2 Basisisolation von empfindlicher Anlagentechnik gegen Erdbeben**  
H.Sadegh-Azar, M. Sadegh-Azar
- S 4 Erdbeben in der Bibel - eine geistesgeschichtliche Betrachtung für Erdbebeningenieure und Seismologen**  
H. Bachmann
- S 7 Assessment of Bridge Performance - Seismic Isolation versus Ductility**  
A. Fäcke, M. Baur, F.H. Schlüter, K. Thoma
- S 13 Erdbebenertüchtigung von Bauwerken - Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz**  
Th.Wenk

## EDITORIAL

Die Deutsche (DGEB), die Österreichische (OGE) und die Schweizer (SGEB) Gesellschaften für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik führen seit 1989 im zweijährigen Turnus gemeinsame Tagungen durch. Die 11. D-A-CH-Tagung *Erdbeben und Mauerwerk* fand am 10./11. September 2009 an der ETH Zürich statt. Die große Zahl der eingereichten Beiträge bestätigte die hohe Aktualität des Tagungsthemas Erdbeben und Mauerwerk in unseren Ländern. Insgesamt wurden 28 Vorträge ausgewählt, darunter 26 aus den D-A-CH-Staaten, einer aus Liechtenstein und ein eingeladener Vortrag aus Italien. Über 200 Teilnehmer werden erwartet. Der zugehörige Tagungsband D0251 erscheint in der Reihe der SIA-Dokumentationen und kann unter [www.webnorm.ch](http://www.webnorm.ch) bestellt werden. Auch ein in dieser Ausgabe aufgenommener Fachbeitrag widmet sich der Problemstellung Erdbeben und Mauerwerk.

Eine Weiterbildungsmöglichkeit auf dem interdisziplinären Gebiet der Erdbebensicherheit in der chemischen Industrie bietet eine gemeinsame Fachtagung der Schweizerischen Gesellschaft der Verfahrens- und ChemieingenieurInnen (SGVC) und der SGEB am 26. November 2009 in Basel. Fachleute aus Hochschule und Ingenieurpraxis sowie Vertreter der Aufsichtsbehörden und der Eigentümer referieren zum Thema „Erdbebensicherheit im Anlagenbau“. Das detaillierte Tagungsprogramm findet sich in dieser Ausgabe.

Die Internetseiten der drei Gesellschaften

<http://www.dgeb.org>

<http://www.oge.or.at>

<http://www.sgeb.ch>

bieten die Gelegenheit sich über die Arbeit der nationalen Gesellschaften zu informieren und eine Mitgliedschaft in Betracht zu ziehen. Der gemeinsame Tagungskalender wird unter [www.oge.or.at](http://www.oge.or.at) geführt. Für den Eintrag von geplanten Veranstaltungen in diesen Kalender bitten wir um Kontaktaufnahme mit einem der drei Sekretariate.

Carsten Könke  
Rainer Flesch  
Thomas Wenk

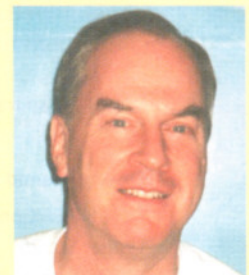
S1



Carsten Könke  
(Vorsitzender DGEB)



Rainer Flesch  
(Generalsekretär OGE)



Thomas Wenk  
(Vorsitzender SGEB)

# Basisisolation von empfindlicher Anlagentechnik gegen Erdbeben

H. Sadegh-Azar, M. Sadegh-Azar

S2

Die seismische Isolierung ist eine relativ einfache und meist kostengünstige Methode zur Reduzierung oder Beseitigung der Beanspruchungen aus Erdbeben für schwingungsempfindliche oder filigrane Anlagentechnik. Grundgedanke hierbei ist, ähnlich wie bei der Basisisolation von Bauwerken, dass die Bewegungen der Anlagentechnik/Komponenten von denen des Untergrunds bez. Gebäudes abgekoppelt werden. Bei den Komponenten der Anlagentechnik ist meist eine Verstärkung der Struktur oder der Bauweise nicht möglich oder sehr aufwendig. Das einzige Verfahren um diese Komponenten erdbebentauglich zu machen ist öfters nur die Basisisolation. Der Aufbau einer Basisisolation und die Zeitverläufe der Etagenantwort/Bemessungszeitverläufe (in rot) und der isolierten Platte (in blau) sind für ein Beispiel aus der Praxis in Bild 1 dargestellt.

Aus Bild 1 wird ersichtlich, wie stark die Maximalamplituden durch die Isolierung reduziert werden. Zudem wird der hochfrequente Anteil der Bewegung ausgefiltert.

Für die Basisisolierung können verschiedene Lagerarten zur Anwendung kommen. Typisch sind z.B. Federlager, Elastomerlager, Reiblager oder Reib-Pendel-Lager (Bild 2).

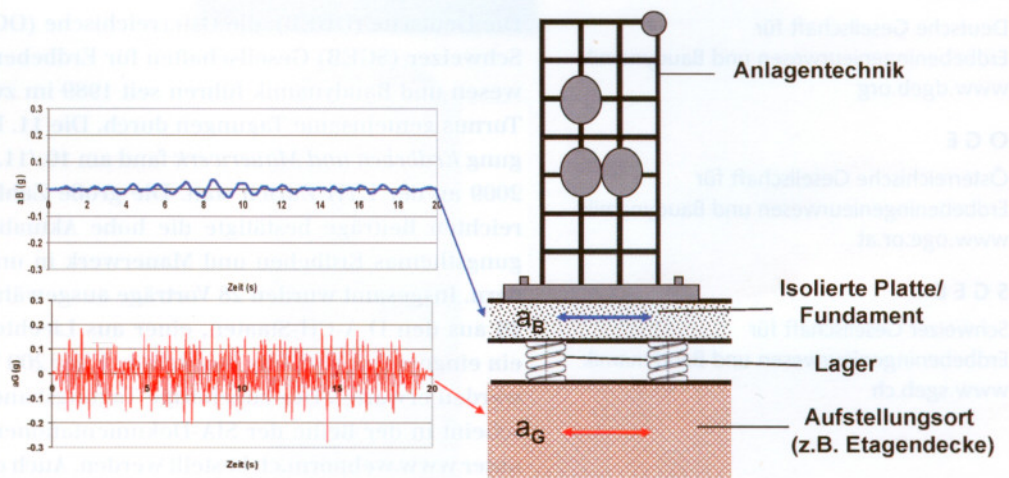


Bild 1. Aufbau einer Basisisolation und dessen Auswirkung auf die Schwingeigenschaften

In Bild 3 ist das ursprüngliche Bemessungsspektrum (rot) zusammen mit den Spektren auf der isolierten Platte/Fundament (blau) dargestellt. Aus diesem Bild erkennt man, dass sich durch die Isolierung eine enorme Reduzierung der Beanspruchungen aus Erdbeben im relevanten Frequenzbereich der Anlagentechnik (üblicherweise zwischen 1.0-10Hz) ergibt. Es ist zu erkennen, dass je niedriger die

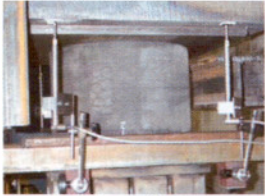
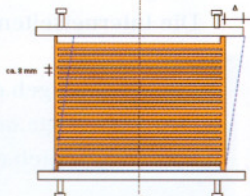
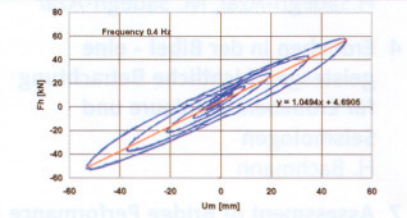
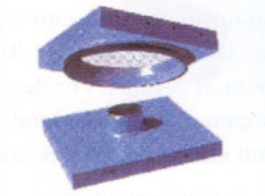
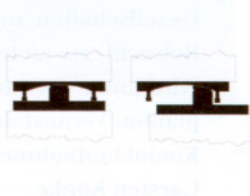
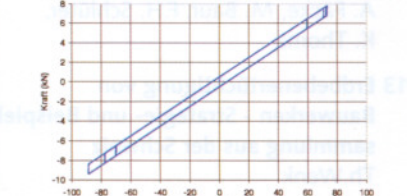
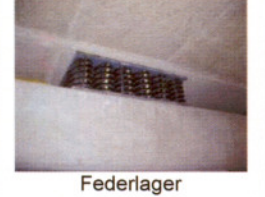
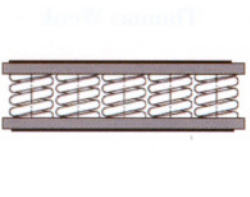
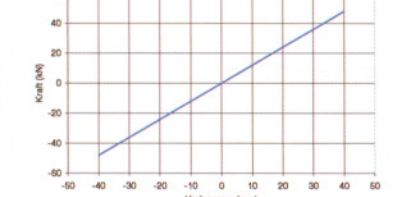
Lagerart	Aufbau/Querschnitt	Hystereseschleife der Lagers (Kraft-Verformungskurve)
 <p>Elastomerlager</p>	 <p>ca. 8 mm</p>	 <p>Frequency 0.4 Hz</p> <p>(aus Eignungsversuchen bei 0,4 Hz)</p>
 <p>Reib-Pendel-Lager</p>		
 <p>Federlager</p>		

Bild 2. Lagerarten für die Basisisolierung (Elastomerlager: Durchmesser 250 mm, Höhe 200 mm,  $G_{dyn} = 1.15$  MPa, Reib-Pendel-Lager: Reibbeiwert  $\mu = 0,01$ ,  $r = 0,5$  m, Federlager:  $k = 1200$  kN/m)

Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar  
 HOCHTIEF Consult IKS Energy  
 Lyoner Str. 25  
 60528 Frankfurt  
 hamid.sadegh-azar@hochtief.de  
 Prof. Dr.-Ing. M. Sadegh-Azar  
 Department of Civil Engineering  
 University of Tehran, Tehran  
 msadegha@chamran.ut.ac.ir

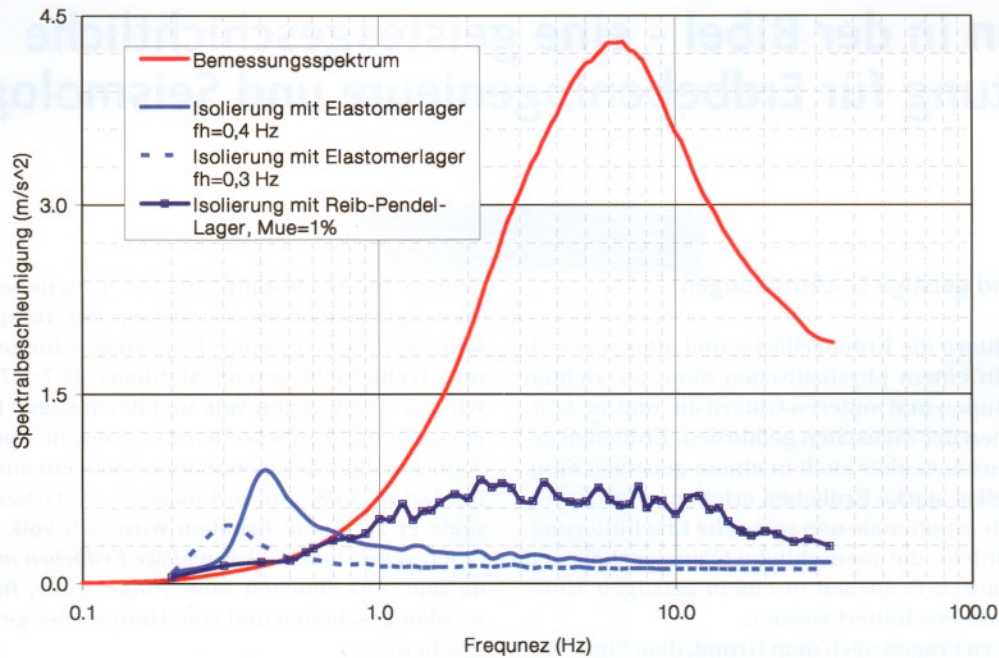


Bild 3. Einfluss der Basisisolierung und der Art der Lager auf die Anregungsspektren der Anlagentechnik

Steifigkeit der Lagerung und der daraus resultierenden Abstimmfrequenz  $f_n$  ist, desto höher ist auch die Isolierwirkung (s. Bild 5, Vergleich  $f_n=0,5$  und  $0,4$  Hz).

Dieses Bild zeigt auch, dass die Isolierwirkung (oder Effizienz) von Reib- oder Reib-Pendel-Lagern etwas niedriger als die von Feder- oder Elastomerlagern in diesem Frequenzbereich ist. Die Kosten der Lager und ggf. erforderlichen Unterkonstruktion sind in den meisten Fällen überschaubar, so dass diese Möglichkeit bei Projekten in Erdbebengebieten nicht außer Acht gelassen werden sollte.

#### Literatur

- [1] DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben-Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, April 2006
- [2] DIN EN 1337-3: Lager im Bauwesen, Teil 3-Elastomerlager, Juli 2005
- [3] DIN EN 15129: Erdbebenvorrichtungen, Juli 2007

## DGEB-FÖRDERPREIS 2009

Die Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V. verleiht in zweijährigem Rhythmus einen Preis in Höhe von **2.000,- Euro für innovative Dissertationen in Deutschland aus den Gebieten des Erdbebeningenieurwesens, der Ingenieurseismologie und der Baudynamik.**

Mit diesem Preis sollen vor allem junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ausgezeichnet werden, die mit ihrer Arbeit einen wesentlichen Beitrag zu den oben umrissenen Forschungsgebieten leisten.

Bewerbungen (mit Kurzlebenslauf und einem Exemplar der Arbeit) sind bis zum **31. November 2009** zu richten an den Vorstand der DGEB:

Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V.  
 Institut für Strukturmechanik  
 Bauhaus-Universität Weimar  
 Marienstrasse 15  
 99423 Weimar  
 dgeb@bauing.uni-weimar.de  
 Tel: +49 (0) 3643-584501  
 Fax: +49 (0) 3643-584514

# Erdbeben in der Bibel - eine geistesgeschichtliche Betrachtung für Erdbebeningenieure und Seismologen

H. Bachmann

S4

## Physikalische und geistige Erschütterungen

Erdbeben erschüttern die Erdoberfläche und alles was sich darauf befindet in einem physikalischen Sinn. Sie richten Schäden an Gebäuden und anderen Gütern an, und sie können Leib und Leben der Menschen gefährden. Erdbeben erschüttern die Menschen aber auch in einem geistigen Sinn. Menschen, die selbst starke Erdbeben erleben, erfahren eine oft tiefgreifende emotionale und seelische Erschütterung. Und auch das Umfeld, die menschliche Gemeinschaft und Gesellschaft, ist durch Erdbeben in einem geistigen Sinne immer wieder stark erschüttert worden.

Erdbeben führen zu Fragen nach dem Grund, dem Sinn oder gar dem Zweck dieser Ereignisse. Solche Fragen haben die Menschheit seit eh und je beschäftigt. Erdbeben und deren Auswirkungen wurden und werden oft in einen Zusammenhang mit existentiellen Fragen gebracht und dadurch in einen religiösen Kontext gestellt. Deshalb haben Erdbeben in der älteren und neueren Geistesgeschichte immer wieder markante Spuren hinterlassen. Auch im Buch der Bücher, in der Bibel, gibt es solche Spuren. Für Erdbebeningenieure und Seismologen mag es deshalb seinen besonderen Reiz haben, mal nachzuspüren, in welchen Zusammenhängen Erdbeben in der Bibel erwähnt werden und was für eine „Rolle“ sie dabei spielen.

### Erdbeben im neuen Testament.....

In der Bibel werden Erdbeben an mindestens 20 Stellen und in sehr unterschiedlichen Zusammenhängen erwähnt. Im neuen Testament findet sich die wohl bekannteste Stelle im Bericht über Jesu Leiden und Sterben am Kreuz nach Matthäus 27.50–54: „50 Jesus aber schrie noch einmal mit lauter Stimme und verschied. 51 Und siehe da: Der Vorhang im Tempel riss entzwei von oben bis unten, und *die Erde bebte*, und die Felsen barsten, 52 und die Gräber taten sich auf (... 53 ...). 54 Als aber der Hauptmann und seine Leute, die Jesus bewachten, *das Erdbeben sahen* und was da geschah, fürchteten sie sich sehr und sagten: Ja, der war wirklich Gottes Sohn!“ \*)

Und später, im Zusammenhang mit Jesu Auferstehung, beschreibt Matthäus in 28.2,3 die berühmte Szene am Grab: „2 Und siehe da: *Es gab ein starkes Erdbeben*, denn ein Engel des Herrn stieg vom Himmel herab, kam und wälzte den Stein weg und setzte sich darauf. 3 Seine Erscheinung war wie ein Blitz und sein Gewand weiss wie der Schnee.“

Früher im neutestamentlichen Geschehen, nach seiner Weissagung über die Zerstörung des Tempels von Jerusalem, sagt Jesus in seiner Rede zu den Jüngern über Endzeit und Weltgericht gemäß Matthäus 24.7: „7 Denn erheben wird sich Volk gegen Volk und Reich gegen Reich, und Hungersnöte und *Erdbeben wird es geben* da und dort.“

Zum gleichen Geschehen findet sich ein ähnlicher Wortlaut in Markus 13.8, und in Lukas 21. 10,11 heißt es: „10 Dann sagte er zu ihnen: Erheben wird sich Volk gegen Volk und Reich gegen Reich, 11 *gewaltige Erdbeben wird es geben* und da und dort Seuchen und Hungersnöte, furchtbare Dinge werden geschehen und vom Himmel her gewaltige Zeichen erscheinen.“

Über ein besonderes Erlebnis von Paulus auf seiner zweiten Missionsreise in Kleinasien und Griechenland berichtet die Apostelgeschichte. Er war zusammen mit seinem Begleiter Silas wegen Unruhestiftung verhaftet und ins Gefängnis geworfen worden. Dann geschah nach Apg. 16.25,26 folgendes: „25 Um Mitternacht aber beteten Paulus und Silas zu Gott und stimmten Lobgesänge an, und die anderen Gefangenen hörten ihnen zu. 26 *Da gab es auf einmal ein starkes Erdbeben*, und die Grundmauern des Gefängnisses wankten; unversehens öffneten sich alle Türen, und allen Gefangenen fielen die Fesseln ab.“

Im letzten Teil des neuen Testaments, in der Offenbarung des Johannes, werden Erdbeben an mehreren Orten erwähnt. Eine bemerkenswerte Stelle steht in Offenbarung 11.15. Nachdem sich das Volk über die Hinrichtung von zwei warnenden Propheten gefreut und nicht einmal eine Bestattung derselben zugelassen hatte, und nach deren Auferweckung und Himmelfahrt, geschah folgendes: „13 Und in jener Stunde *gab es ein starkes Erdbeben*; ein Zehntel der Stadt stürzte ein, und siebentausend Menschen kamen um bei dem Erdbeben. Und die Überlebenden wurden von Furcht ergriffen und gaben dem Gott des Himmels die Ehre.“

Eine andere Stelle in der Offenbarung, wo ebenfalls konkrete Folgen aus Erdbeben erwähnt werden, findet sich im Zusammenhang mit der „Ausgießung der sieben Schalen des Zornes Gottes über die Erde“ in Offb. 16.18,19: „18 Und es erhob sich ein Getöse, Blitz und Donner, und *die Erde bebte so stark, wie sie noch nie gebebt hatte*, seit es Menschen gibt auf Erden, so gewaltig war dieses Beben. 19 Und die große Stadt zerbarst in drei Teile, und die Städte der Völker fielen in sich zusammen“. An weiteren Stellen der Offenbarung werden Erdbeben mehr nur summarisch in einer Aufzählung zusammen mit andern Naturgewalten wie Blitz, Donner und Hagel erwähnt, so in Offb. 8.5 und 11.19.

Prof. Dr. sc. techn. Dr. h.c. Hugo Bachmann

Emeritierter Professor der ETH Zürich  
Sunnhaldenstrasse 19  
CH 8600 Dübendorf  
hu.ma.bachmann@emeritus.ethz.ch

\*) Wo nichts anderes angegeben stammen die Zitate aus der neuen Übersetzung der Zürcher Bibel 2007 [1]

## .... und im alten Testament

Im alten Testament kommen Erdbeben ziemlich häufig vor. Eine markante Stelle findet sich in I. Könige, 11–13. Der Gottesmann und Prophet Elija war auf der Flucht und um sein Leben zu retten am Gottesberg Choreb in eine Höhle hineingegangen und erlebte folgendes: „11 Da sprach er (Gott): Geh hinaus und stell dich auf den Berg vor den Herrn! Und sieh – da ging der Herr vorüber. Und vor dem Herrn her kam ein großer und gewaltiger Sturmwind, der Berge zerriss und Felsen zerbrach, in dem Sturmwind aber war der Herr nicht. Und nach dem Sturmwind *kam ein Erdbeben, in dem Erdbeben aber war der Herr nicht.* 12 Und nach dem Erdbeben kam ein Feuer, in dem Feuer aber war der Herr nicht. Nach dem Feuer aber kam das Flüstern eines sanften Windhauchs. 13 Als Elija das hörte, verhüllte er sein Angesicht mit seinem Mantel. Dann ging er hinaus und trat an den Eingang der Höhle. Und sieh, da sprach eine Stimme zu ihm: Was tust Du hier, Elija?“

In andern Büchern des alten Testaments gibt es – ähnlich wie in der Offenbarung des Johannes – Stellen, wo Erdbeben summarisch zusammen mit anderen Naturgewalten erwähnt werden, so in Jesaja 29.6. Mehrfach gibt es Stellen, wo Erdbeben in Zusammenhang mit dem „Zorn Gottes“ gebracht werden, zum Beispiel in 4. Mose 16.20–35, und in Samuel 22.8, wo es in Davids Danklied heißt: „Da *wankte und schwankte die Erde*, und die Grundfesten des Himmels erbebten, sie wankten, denn er war zornigerbrannt.“ Und in Jeremia 10.10 heißt es: „Der Herr aber ist wahrhaftig Gott, er ist ein lebendiger Gott und ewiger König. Vor seinem Zorn *erbebt die Erde*, und gegen seine Wut kommen die Nationen nicht an.“

Eine recht eigenständige Stelle findet sich in Ezechiel 38.19, wo Gott selbst spricht: „18 Und an jenem Tag (...) wird mein Zorn in mir aufsteigen. 19 Und in meinem Eifer, im Feuer meines Zorns spreche ich: Wahrlich an jenem Tag *wird es ein großes Beben geben* auf Israels Boden! 20 *Da erbeben* vor mir die Fische im Meer und die Vögel am Himmel und die Tiere auf dem Feld und alle Kriechtiere, die auf dem Boden kriechen, und alle Menschen, die auf dem Erdboden sind. Und die Berge werden niedergedrückt und die Berghänge rutschen ab, und jede Mauer stürzt zu Boden.“ In der Übersetzung der Luther-Bibel [2] heißt es allerdings nur von „großem Zittern“: „19 Und ich rede solches in meinem Eifer und im Feuer meines Zorns. Denn zur selben Zeit *wird großes Zittern sein* im Lande Israel. 20 Dass vor meinem Angesicht *zittern* sollen die Fische im Meer, die Vögel unter dem Himmel, die Tiere auf dem Felde und alles was sich regt und bewegt auf dem Lande, und alle Menschen, so auf der Erde sind; und sollen die Berge umgekehrt werden und die Felswände und alle Mauern zu Boden fallen.“ Die Beschreibung der Folgen legt aber den Schluss nahe, dass ein Erdbeben gemeint ist.

### Vielfalt und unterschiedliche Merkmale

Wer die zitierten Textstellen der Bibel aufmerksam liest und versucht, sie sozusagen zu verinnerlichen, ihren Sinn zu erspüren, kann unterschiedliche Merkmale und Zusammenhänge erkennen. Aus allen Zitaten geht hervor, dass ein starkes Erdbeben immer etwas Außergewöhnliches und auch weitgehend Einmaliges ist. Für die direkt Beteiligten und meist auch für die Um- und Mitwelt, ja für die ganze davon

betroffene Gemeinschaft und Gesellschaft, ist es ein wichtiges und nachhaltig wirkendes Ereignis. Darüber hinaus gibt es aber wesentliche Unterschiede. Somit besteht eine gewisse Vielfalt, wie Erdbeben in der Bibel erwähnt und sozusagen „eingesetzt“ werden.

Die erstgenannten drei Bibelstellen nach Matthäus 27.50–54, 28.2,3 und 24.7 (bzw. Markus 13.8 und Lukas 21.10,11) haben das gemeinsame Merkmal, dass das Erdbeben jeweils im Zusammenhang mit einem anderen, noch wichtigeren Ereignis geschieht. Das Erdbeben hat sozusagen die Funktion, ein solches Ereignis, das an sich schon dramatisch ist, noch weiter zu dramatisieren: Jesu Tod am Kreuz, Jesu Auferstehung, die Not von Kriegen mit Hunger und – gemäß einigen Übersetzungen – auch Pestseuchen. Dabei ist das Erdbeben aber nicht das „Hauptereignis“; vor allem löst es dieses nicht aus. Das Erdbeben ist nur ein – wenn auch wichtiges – „Begleitereignis“; in der Theatersprache würde man wohl sagen: Ein dramaturgisches Mittel, um das Hauptereignis noch stärker zu betonen und aus dem mehr gewöhnlichen Geschehen herauszuheben.

Anders ist dies in der Geschichte der Befreiung von Paulus und Silas aus dem Gefängnis (Apg. 16.25,26). Hier ist das Erdbeben offensichtlich kein Begleitereignis, sondern eines, das gewissermaßen für sich allein steht und unmittelbare Folgen hat. Gott erhört die Gebete der Gefangenen und greift direkt ins Geschehen ein. Das Erdbeben erschüttert das Gefängnis derart stark, dass (am Mauerwerk) erhebliche Schäden entstehen, die Türen aufspringen und die fesselnden Ketten sich aus ihren Verankerungen lösen (oder lösen lassen), und somit die Befreiung der Insassen ermöglichen. Zumindest diesen „physikalischen Teil“ der Geschichte können auch wir Heutigen uns recht gut und konkret vorstellen. Besondere Merkmale hat die Stelle in I. Könige 11–13. Sie schildert eine direkte Gottesbegegnung. Für den Gottsucher Elija kommt Gott nicht in einem Erdbeben, auch nicht im Feuer und nicht im Sturmwind. Die Bedeutung von Naturgewalten bei der Begegnung mit Gott wird im Vergleich zu andern Bibelstellen stark zurückgenommen. Gott kommt in der Stille, als sanfter Hauch, als feine Ahnung; aber doch als etwas, das unverhofft erlebt wird. Und was durch die klaren Worte am Schluss des Zitats bestätigt wird.

Und nochmals andere Merkmale haben die Textstellen in Offenbarung 11.13 und 16.18,19. Zwar greift auch hier Gott unmittelbar ein, ähnlich wie in der Geschichte von der Befreiung von Paulus und Silas. Aber hier ist das Erdbeben ganz klar eine Strafe Gottes. Ähnliches gilt für Ezechiel 38.19. Das „Beben“ oder „Zittern“ der Fische, Vögel, Tiere und Menschen und die weiteren katastrophalen Folgen sind ein Ausdruck des Zornes Gottes über das schlechte und gottesferne Handeln der Menschen. Gott ruft sich mit dem Erdbeben auf drastische Weise wieder in Erinnerung; oder man könnte auch sagen, Gott ruft mit dem Erdbeben die Menschen zur Raison.

### Erdbebenwirkungen in der neueren Geistesgeschichte

Ob Gott „im Erdbeben kommt“, ob Erdbeben eine Strafe Gottes sind, und damit im Zusammenhang, ob Gott allmächtig ist und trotzdem das Elend vieler Menschen auf der Welt zulässt oder gar zornig herbeiführt (Theodizeefrage), dies waren und sind immer wiederkehrende Fragen. Oder ist Gott „nur“ der liebende Gott, der oft auch ohnmächtig und mitleidend ist? Oder hat Gott tatsächlich auch dunkle Seiten, ist

er manchmal ein richtender und strafender Gott? Solche und ähnliche Fragen bewegten immer und immer wieder auch prominente Dichter und Denker nicht nur in der Bibel und im Altertum, sondern ebenso in der neueren Geistesgeschichte [3][4]. Nach dem verheerenden Erdbeben von Lissabon 1755 verfasste Voltaire sein berühmtes (Lehr-) „Gedicht über die Katastrophe von Lissabon“. Darin wehrt er sich vor allem gegen die These „Alles ist gut“. Jean-Jacques Rousseau widersprach ihm dann in einem längeren „Brief über die Vorsehung“. Und Immanuel Kant stellte nüchtern fest: „So ist der Mensch im Dunkeln, wenn er die Absichten erraten will, die Gott in der Regierung der Welt vor Augen hat“ [3].

Solch unterschiedliche Deutungen und Meinungen hängen wohl vor allem mit unterschiedlichen Gottesbildern zusammen. Entgegen dem Gebot in 2. Mose 20,4 „Du sollst Dir kein Gottesbild machen ...“ machen sich religiöse Menschen – oder müssen sie sogar? – ihre persönlichen Vorstellungen und damit Bilder von Gott. Auch die Vielfalt und die Merkma-

le des „Einsatzes“ von Erdbeben in der Bibel stehen in Zusammenhang mit den Gottesbildern der Verfasser der betreffenden Textstellen. Und die sich daraus ergebenden Fragen werden bestimmt immer wieder gestellt werden, solange es Menschen gibt.

#### Literatur

- [1] Zürcher Bibel 2007. Genossenschaft Verlag der Zürcher Bibel beim theologischen Verlag Zürich, 2007.
- [2] Die Bibel nach der deutschen Übersetzung D. Martin Luthers. Privilegierte Württembergische Bibelanstalt Stuttgart, 1960.
- [3] Breidert W. (Hrsg.): Die Erschütterung der vollkommenen Welt – Die Wirkung des Erdbebens von Lissabon im Spiegel europäischer Zeitgenossen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 1994.
- [4] De Boer J.Z. and Saunders D.T.: Earthquake in Human History – the Far Reaching Effects of Seismic Disruptions. Princeton University Press, Princeton and Oxford, 2005.

56

#### Fachtagung: Erdbebensicherheit im Anlagenbau 26. November 2009 bei Clariant in Münchenstein bei Basel

Die Schweizerische Gesellschaft der Verfahrens- und ChemieingenieurInnen SGVC und die Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEb organisieren zusammen eine Fachtagung in Basel zur Erdbebensicherheit in der chemischen, pharmazeutischen und petrochemischen Industrie sowie bei Tanklagern. Die Tagung soll einen Überblick über den Stand der Technik geben und praxisnahe Ansätze aufzeigen, wie eine effiziente Erdbebenvorsorge zu realisieren ist. Die Tagung richtet sich an alle, die in diesem Bereich Verantwortung tragen oder Lösungen suchen.

#### Themen und Fragestellungen

- Phänomene bei Erdbeben
- Erdbebenverhalten von Anlagen
- Normative Grundlagen
- Vorgaben der Behörden
- Erdbebenberechnung und -bemessung von Anlagen
- Praktische Erfahrungen bei der Umsetzung
- Wirtschaftlichkeit von Präventionsmassnahmen

#### Programm Donnerstag, 26. November 2009 9.00 – 16.30 Uhr

Erdbeben, Erdbebengefährdung und seismologische Grundlagen  
*D. Fäh, Zürich*

Wo liegen die typischen Schwachstellen bei Anlagen?  
*M. Koller, Genf*

Erdbebennormen für den Anlagenbau  
*T. Wenk, Zürich*

#### Die Anforderungen der Behörden

Erdbebensicherheit und Anlagen-Installationsklassen  
*L. Polasek, Basel*

Umsetzung der Erdbebenanforderungen in Projekten  
*M. Schuchert, Basel*

Erfahrung im In- und Ausland  
*J. Studer, Zürich*

Erdbebensicherheit und Wirtschaftlichkeit  
Podiumsdiskussion  
*Moderation: M. Koller, Genf*

#### Anmeldung

Der Tagungsflyer mit dem Anmeldeformular steht ab Ende September auf den Webseiten der SGVC [www.sgvc.ch](http://www.sgvc.ch) bereit. Anmeldeschluss ist der 5. November 2009.

#### Tagungsbeiträge

Mitglieder SGVC oder SGEb	CHF 150.-
Andere Teilnehmer	CHF 200.-
Studierende	CHF 50.-

#### Informationen

Weitere Informationen erhalten Sie beim Tagungssekretariat  
Marie Louise Rickenbacher  
SGVC-Administration  
c/o MLR OFFICE  
Rebgartenweg 25  
CH-4104 Oberwil  
[mlr.office@intergga.ch](mailto:mlr.office@intergga.ch)  
Tel.: +41 61 401 46 05.

#### Aktuelle Informationen

# Assessment of Bridge Performance – Seismic Isolation versus Ductility

A. Fäcke, M. Baur, F.H. Schlüter, K. Thoma

**Abstract** Severe earthquake events are still marked by the collapse of bridges due to an inductile structural performance. In order to reach a high level of seismic safety and an economical design these structures should be able to dissipate a significant amount of the input energy, so that seismic forces are reduced. Energy dissipation can either be achieved by a ductile structural performance via plastic hinges in the piers or by seismic isolation using specific high damping rubber bearings. To both problems, which are linked together in practice, enhanced material laws were formulated describing the nonlinear material behavior of reinforced concrete and elastomer subjected to cyclic loading. The nonlinear behavior of reinforced concrete piers is modeled using the fibre beam theory. That theory was extended by a bond-slip approach, so that e. g. anchorages of reinforcement can more realistically be considered. In order to facilitate an objective simulation of large deformations with material softening a nonlocal damage approach from continuum mechanics was implemented. For the modeling of the high damping rubber bearings an enhanced finite visco-elastic material law with an isotropic damage function was developed. Due to the fact, that elastomer is almost incompressible, the constitutive law is based on the uncoupling of the stress response into a linear volumetric and into a nonlinear deviatoric part. The latter is described mathematically by a relaxation function and a distortion-supported damage function. In this work the upgrading procedures and the effectiveness of both approaches will be discussed on the basis of realistic earthquake scenarios.

## 1 Introduction

The last strong earthquakes have again shown that bridges are still highly vulnerable due to an inductile structural performance. In particular bridges which are part of important infrastructure are necessary for rescue work and recovering measures and should therefore have a high level of seismic safety. In order to reach this aim these structures should be able to dissipate a significant amount of the input energy in order to reduce seismic forces and allow an economical design. Energy dissipation can either be achieved by a ductile structural performance thru the formation of plastic hinges in the piers or by seismic isolation using specific high damping rubber bearings. To both problems, which are linked together in practice, enhanced material laws could be formulated describing the nonlinear material behavior of reinforced concrete (RC) and elastomer subjected to cyclic loading.

The nonlinear behavior in plastic hinges of reinforced concrete piers is modeled using the fibre beam theory. The conventional fibre theory was extended by a bond-slip approach, so that slip e. g. at anchorages of reinforcement can more realistically be considered. In order to facilitate an objective simulation of large pier deformations with material softening a nonlocal damage approach from continuum mechanics was implemented in the fibre beam element. With that approach the model shows good agreement to experimental results up to complete failure of the piers. For the modeling of the high damping rubber bearings an enhanced finite visco-elastic material law with an isotropic damage function was developed. Due to the fact, that elastomer is almost incompressible, the constitutive law is based on the uncoupling of the stress response into a linear volumetric and into a nonlinear deviatoric part. The latter is described mathematically by a relaxation function and a distortion-supported damage function. In this work the effectiveness for the assessment and the upgrading procedure using both approaches will be discussed on the basis of realistic scenarios.

## 2 Modeling of RC Piers

The primary cause of nonlinearity in RC structures is cracking in tension and crushing in compression of concrete and yielding of reinforcement. The bond resistance between concrete and steel contributes to nonlinearity especially in the region of cracks and at anchorages of reinforcement. These characteristics were considered in a combined plasticity and damage model, which is briefly summarized below. A detailed description of the model can be taken from [6] and [7].

### 2.1 Concrete

The stress strain relation for first loading in compression is described acc. to [9]:

$$\sigma = \frac{E_0 \cdot \varepsilon}{1 + \left( \frac{f_{cm} \cdot E_0}{\varepsilon_1} - \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right) + \frac{1}{n-1} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^n} \quad (1)$$

where  $E_0$  is the tangent modulus at the origin of the stress-strain curve,  $f_{cm}$  is the mean cylinder compressive strength,  $\varepsilon_1$  is the strain at compressive strength, and  $n$  is a factor for calibration to test data. This function also represents the envelope for all further un- and reloading cycles. The un- and reloading in compression is approximated linear elastically and decreases with increasing compression strain. The reduced tangent modulus  $E_{red}$  for un- and reloading takes the increasing damage due to concrete crushing into account. Loading in tension is first linear elastic and than an exponential law is used for strain softening. Strain softening

Dr.-Ing. A. Fäcke, Dr.-Ing. F.H. Schlüter  
SMP Ingenieure im Bauwesen GmbH, Karlsruhe  
Dr.-Ing. M. Baur, Dr.-Ing. K. Thoma  
Dept. of Structural Engineering, University of  
Applied Sciences and Arts, Lucerne, Switzerland

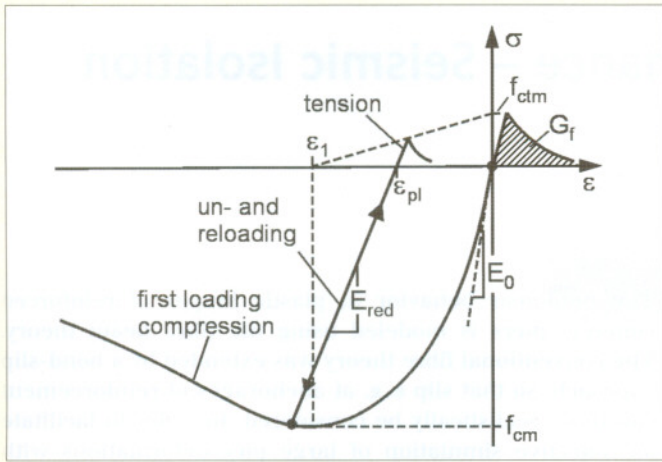


Fig. 1. Cyclic stress strain relation of concrete

is based on the fictitious crack model proposed by Hillerborg using the fracture energy  $G_f$ . The tensile strength is linearly reduced from  $f_{ctm}$  to zero with increasing plastic compression strain  $\epsilon_{pl}$  acc. to Fig. 1. The origin of the characteristic stress-strain curve in tension always moves to the actual plastic strain  $\epsilon_{pl}$ . Contact effects in cracks are considered with an increase of compression stress before complete closure of cracks respectively before  $\epsilon_{pl}$  is reached.

**2.2 Steel**

A nonlinear stress-strain curve for first loading is implemented in the constitutive equations of reinforcement that is basically based on the Ramberg Osgood curve for cold-formed steel. Because there is no distinct transition from elastic to plastic response at first loading, the yield point  $f_y$  is defined at 0.2% plastic strain. The stress strain characteristic for cyclic loading is based on the model of Ma et al. [11] In this model an early yielding upon load reversal is considered constituting the Bauschinger effect. Further load reversals again consider the early yielding by following the stress strain curve of the previous load cycle rotated by 180°.

**2.3 Bond Resistance**

The idealized inelastic and nonlinear bond-slip relation for generalized excitation was implemented acc. to [4]. It reproduces the successive deterioration of bond due to slip parallel to the bar axis. It starts from adhesion between steel and concrete over initiation of cone-shaped cracks around

the reinforcing bar up to crushing of concrete in front of the bar ribs. A sufficient confinement through stirrups is anticipated so that no brittle splitting failure has to be expected. A complete crushing of the surrounding concrete results in a small frictional resistance. Deterioration through cyclic loading is dependent on maximum slip and dissipated energy.

**2.4 Finite Element Model**

Except for the confining pressure at the stirrups and potential torsional effects the stress field in slender piers is mainly unidirectional and parallel to its centerline. Hence the fibre beam element is a computationally effective formulation for the representation of the seismic pier performance. The cross section of that beam element is divided into a grid of integration points (fibres). Because different stress-strain curves can be assigned to the integration points, it is possible to consider the confining effect of the stirrups. Integration points inside the confined core of the section have a stress strain relation with higher strength and ductility than the integration points of the concrete cover.

Generally the reinforcement is considered by assigning a steel stress-strain curve to the corresponding integration points. However in this way it is not possible to assess the damage of bond through slip between steel and concrete. Hence in this work the reinforcement was considered by extra truss elements. The truss elements are connected to four node bond elements that are once more linked by rigid connections to the fibre elements. The pier is divided into sections that always contain the same set of elements (Fig. 2).

The model is implemented in the FE-code ABAQUS. However, it can be implemented in any FE-code that offers the following features. For the fibre elements the number of section integration points of conventional beam elements must be selectable. For the 4-node bond element user defined elements can be implemented via subroutines.

**2.5 Failure and Material Softening**

The investigation of earthquake loading at RC structures involves large deformations close to structural failure. The macroscopic behavior of concrete then exhibits strain softening (i.e. a decrease of stress at increasing strain) in compression due to crushing and in tension due to crack initiation. In the classical finite element theory the negative tangential stiffness modulus causes a localization of damage or strain into a band of single elements or in the present case of one-dimensional problems in one

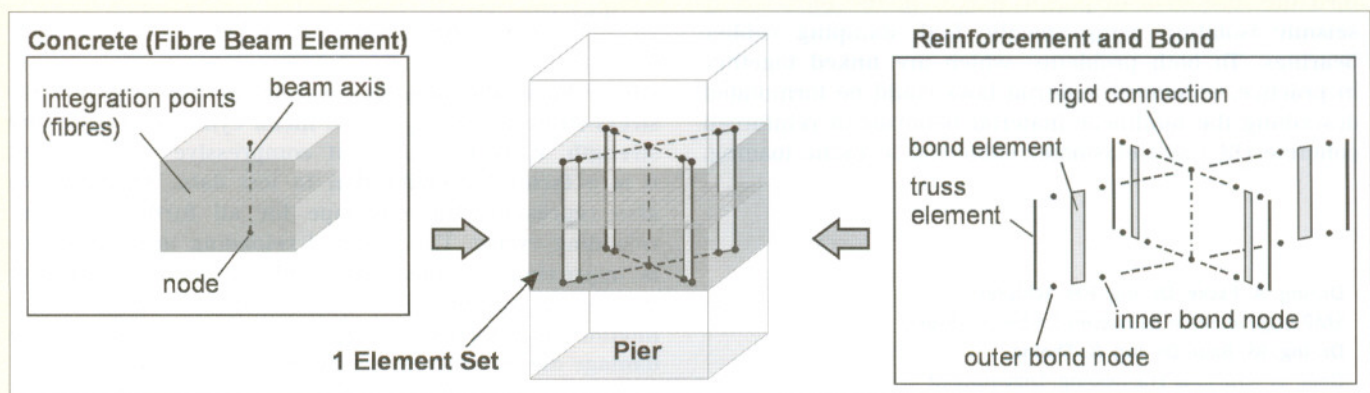


Fig. 2. Finite element model of RC pier considering slip of main reinforcement.



Table 1. Material parameters for the constitutive law of rubber

K <sup>0</sup> [MPa]	G <sup>0</sup> [MPa]	G <sup>∞</sup> [MPa]	ζ <sub>1</sub> [-]	ζ <sub>2</sub> [-]	α [-]	β [-]	δ [-]
2550	4.0	1.3	0.6	-0.9	0.1	0.3	0.02

element set. This leads to spurious mesh sensitivity, where the failure of the model occurs earlier and faster with increasing mesh refinement.

In order to avoid mesh sensitivity the nonlocal concept acc. to [1] was adapted to the fibre beam element for strain softening in compression. In this concept the stress in one integration point not only depends on the strain in this point but also from the strain in the neighboring points. In the present model the strain in the integration points of one element n is averaged with the corresponding strains of the elements above and below using a bell-shaped weight function. Therefore the influence of the surrounding elements on element n decreases with increasing distance and vanishes at distance R. The characteristic length R mainly depends on the material and on structural dimensions and was chosen in the simulations with 0.25m.

### 3. Constitutive Equations for Elastomeric Bearings

The conventional methods for earthquake-resistant structural design use high strength or high ductility concepts to mitigate damage from seismic impacts. In the first case, corresponding to shear wall structures, generally the design is problematic in that their fundamental frequency of vibration is in the range of frequencies where earthquake energy is strongest. The second, the capacity design method, incorporates that a part of the energy transmitted into the structure by an earthquake is dissipated by plastic deformations. The capacity method is mostly used for flexible structures like frames, provided that plastic deformations occur in structural elements, which are designed to undergo such large deformations. Therefore, the design of such yielding zones has to be planned carefully. An alternative approach consists in isolating the structure from the ground by using rubber bearings. Some basic knowledge of seismic isolation principles using elastomeric bearings are presented in [2] and [3]. Also, an overview of the testing program for high damping rubber bearings (HDRB) under various loading conditions is given.

Beside the testing program, another task consisted of the formulation of a constitutive law which is able to describe the highly nonlinear behavior of elastomeric bearings under cyclic loading numerically. For that purpose, an already existing finite visco-elastic material law acc. to [10] with an isotropic damage function was chosen. Due to the fact that elastomer is almost incompressible, the constitutive law is based on the uncoupling of the stress response into a linear volumetric and into a non-linear deviatoric part. The latter is described mathematically by a relaxation function and a distortion-supported damage function. To take into account the increase in stiffness at large strains, the original formulation has been extended by adding a deviatoric strain-hardening function.

However, the verification of the model has clearly shown that the material behavior with the above-mentioned model can be numerically reproduced only in a very limited range. Therefore, an enhanced formulation became necessary.

This formulation consists of the introduction of a strain- and time-dependent relaxation function and an extended strain-history function for describing the strain-hardening for the unloading case [2]. Thus, the enhanced fully three-dimensional constitutive law takes the form:

$$\sigma(t) = \underbrace{K^0 \ln J}_{\text{linear volumetric part}} \mathbf{1} + \underbrace{\int_0^t \mu(t-\tau) \frac{d}{d\tau} g(\varphi_D, \tau) h(\kappa, \tau) \text{dev}[\bar{C}](\tau) d\tau}_{\text{non-linear deviatoric part}} \quad (2)$$

Here, the deformation gradient **F** is decomposed into a pure volumetric J<sup>1/3</sup>**1** and isochoric deformation **F̄**. Furthermore, the right Cauchy-Green-Tensor **C̄** for the isochoric deformation is given by **C̄** = J<sup>-2/3</sup>**C** = **F̄**<sup>T</sup>**F̄**. The relaxation function μ(t) and the time-dependent relaxation time ν(φ,t) are defined as μ(t) = (G<sup>0</sup> ± (G<sup>0</sup> - G<sup>∞</sup>) e<sup>-t/ν</sup>) and ν(φ,t) := ζ<sub>1</sub> · φ<sup>ζ<sub>2</sub></sup> with φ(t) = ||dev[C̄](τ)|| and φ(t) ∈ [0.05,50.0]. Here, G<sup>0</sup> and G<sup>∞</sup> are the short and the long time shear modulus. For describing the decrease of stiffness a damage function g(φ<sub>D</sub>,t) = (β + (1 - β) (1 - e<sup>-φ<sub>D</sub>/α</sup>)) with an enhanced time history function g φ<sub>D</sub>(t) = ||dev[C̄](τ)|| is implemented. Finally, a strain-hardening function h(κ,t) = δ · κ + 1 with κ(t) = ||dev[C̄](τ)||<sup>2</sup> and a scalar parameter δ is formulated to take into account the increase of the stiffness at large deformations. The material parameters that were used in the simulations are listed in Table 1.

The enhanced model is implemented in the FE-Code ABAQUS using an algorithm specified in [8]. In [2] it could be demonstrated, that the highly nonlinear material behavior under various loading conditions can be realistically reproduced with the enhanced model.

### 4 Seismic performance of a girder bridge

In dynamic simulations the influence of pier ductility and seismic isolation on the seismic bridge performance will be discussed on the example of a two span girder bridge (Fig. 5). The study is confined on the seismic excitation in longitudinal direction. There are sliding bearings at both abutments, so that horizontal seismic forces are transferred at the two piers only. The total mass of the superstructure amounts 832 000 kg. Two models – one non-isolated and one base isolated model – were generated for the comparison. The first model considers the nonlinear behavior of the ductile piers with 48 fibre elements per pier. The second model considers the nonlinear behavior of two circular laminated elastomeric bearings at the piers. The bearing diameter is 800 mm and the elastomeric layers have a total thickness of 70 mm. The bearings are modeled with 200 continuum elements each. The remaining parts in both models are generated with beam elements and linear elastic material behavior.

In order to consider the nonlinear behavior in the piers respectively in the elastomeric bearings realistic earthquake simulations have been performed using the nonlinear dynamic time history analysis in the FE-code ABAQUS. For that purpose spectrum compatible ground motion time histories have been generated using the SIMQKE code (Vanmarcke and Gasparini, 1976). Fig. 4 (left) shows the normalized design spectrum according to the German code DIN 4149-1 for medium subsoil conditions. Three different ground motion histories were generated with

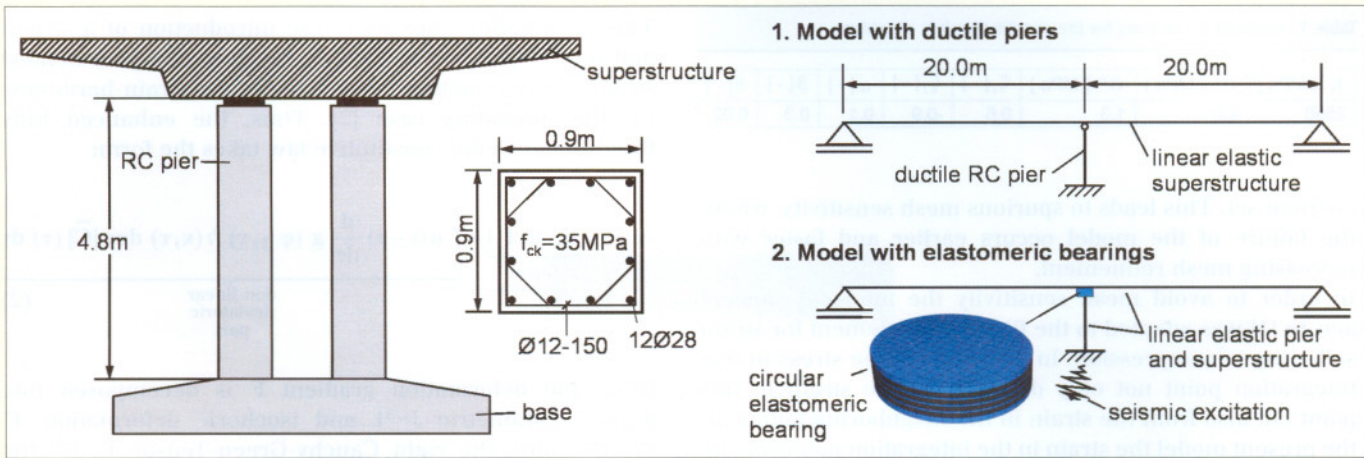


Fig. 3. Girder bridge with RC pier cross section and the two FE-models

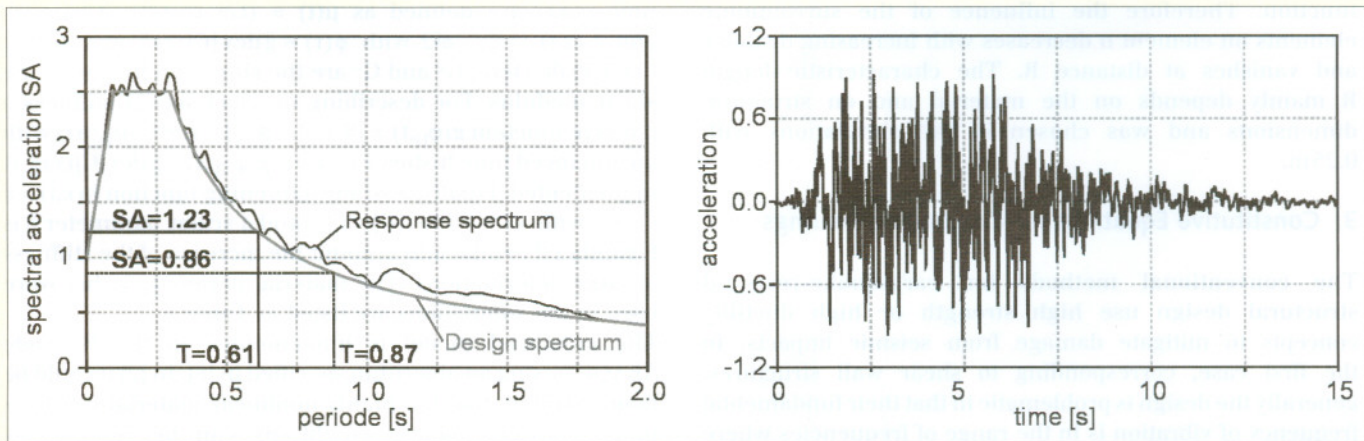


Fig. 4. Normalized design spectrum (left), spectrum compatible accelerogram (right) and the corresponding response spectrum (left)

SIMQKE that match closely the above mentioned design spectrum. The main difference between these ground motion representations is the random phase angle of their sinusoidal components. One representation is shown in Fig. 4 (right) and for checking purposes its generated response spectrum is shown in Fig. 4 (left). Each ground motion history was scaled by 1.0, 2.4, or 4.8 m/s<sup>2</sup> representing areas with low mean or high seismicity.

The fundamental eigenperiod of the non-isolated bridge was determined with a linear elastic model. Using a Young's modulus of  $E_{cm} = 29\,900\text{ MPa}$  for the piers results in a longitudinal eigenperiod of  $T = 0.61\text{ s}$ . According to Eurocode 8 [5] cracked sections can be considered by a reduction of the concrete Young's modulus by 50%. The stiffness reduction results in an eigenperiod of  $T = 0.87\text{ s}$ . These periods lead to an ordinate of  $SA = 1.23$  in the normalized design spectrum for the bridge with uncracked sections and  $SA = 0.86$  for the bridge with cracked sections. According to Eurocode 8 part 2 [5] the maximum base shear force can be approximated with the rigid deck model. Hence the maximum shear force per pier at the bridge with uncracked sections for low seismicity ( $1.0\text{ m/s}^2$ ) is:

$$F_{\max} = \text{PGA} \cdot SA \cdot \text{mass} = 1.0 \cdot 1.23 \cdot 416\,000/1000 = 512\text{ kN} \quad (3)$$

The shear force  $F_{\max}$  can analogously be calculated for mean and high seismicity and for the bridge with cracked sections. These results of the linear elastic analysis are shown in Table 2, line 1 and 2.

For each PGA three nonlinear time history analysis were performed according to the three representations of ground motion from SIMQKE. For the ductile pier model the maximum base shear forces at one pier and the maximum relative displacements of the superstructure (pier deformations) were averaged for each PGA and written to Table 2, line 3. An analogous approach was carried out for the seismic-isolated model. Here, the averaged maximum base shear force per pier and the averaged maximum horizontal deformation of the elastomeric bearing are written to Table 2, line 4.

The forces in the piers with cracked sections from linear analysis are in comparison to uncracked sections ~30% smaller due to the reduced fundamental period while the displacements increase ~40%. Certainly forces and displacements increase linearly with the PGA of the input ground motion. In contrast to the linear analysis the forces in the ductile piers only increase slightly with increasing PGA. That is because at low seismicity almost no plastic

Table 2. Shear forces per pier and deformations from linear analysis and nonlinear simulations

Ground motion	Low (1.0 m/s <sup>2</sup> )		Mean (2.4 m/s <sup>2</sup> )		High (4.8 m/s <sup>2</sup> )	
	d [mm]	F [kN]	d [mm]	F [kN]	d [mm]	F [kN]
Linear elastic (T=0.61s)	12	512	28	1 228	55	2 456
Linear elastic (T=0.87s)	17	361	39	866	78	1 731
Ductile pier model	19 ( $\mu \leq 1.0$ )	394 ( $q=1.0$ )	54 ( $\mu \approx 1.8$ )	513 ( $q=1.7$ )	118 ( $\mu \approx 3.9$ )	587 ( $q=3.0$ )
Seismic-isolated model	28	121	84	207	150	410

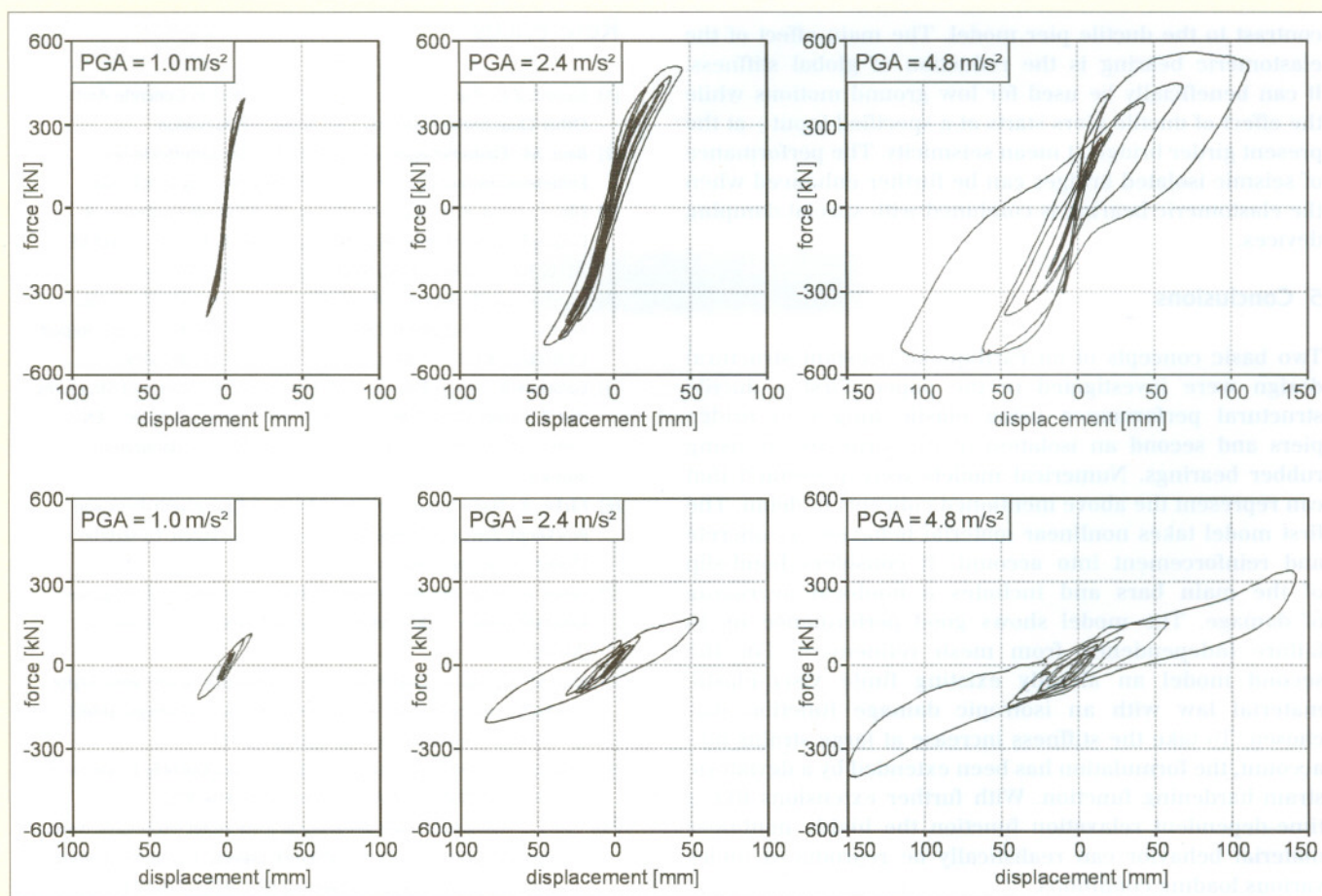


Fig. 5. Hysteresis of ductile pier (top) and elastomeric bearing (bottom) for different PGAs

deformations occur while at high seismicity large plastic deformations occur in concrete and steel. Therefore at low seismicity the maximum force at the ductile pier is in the range of the linear analysis with the better fit to the one with cracked sections. The behavior factor  $q = F_{el}/F_u$  with the force  $F_{el}$  from the linear analysis with cracked sections and the force  $F_u$  from the ductile pier simulation is evaluated and shown in Table 2, line 3. The behavior factor varies from  $q = 1.0$  at low seismicity to  $q = 3.0$  at high seismicity. That corresponds to an essentially elastic to ductile behavior according to Eurocode 8 [5].

For low seismicity the displacements show a better agreement to the linear analysis with cracked sections, too. The amount of plastic deformations is quantified by the global displacement ductility  $\mu_\Delta = d_u/d_y$  with the ultimate displacement  $d_u$  and the yield displacement  $d_y$ . Generally the displacement where the main bars start to yield and the global pier stiffness significantly reduces is defined as  $d_y$ . Preliminary static simulations have shown that the piers have an approximate elastic displacement of  $\approx 30$  mm. The evaluated displacement ductility is written to Table 2, line 3. For bridges, which generally have relative high eigenperiods the behavior factor  $q$  equals the displacement ductility  $\mu_\Delta$ . The evaluation shows a good agreement between  $q$  and  $\mu_\Delta$  for low and mean seismicity. However for high seismicity  $\mu_\Delta$  is larger than  $q$  – the ductility demand increases faster. This is because the pier already shows concrete crushing with significant strain softening.

The nonlinear simulations with elastomeric bearings show smaller forces and larger displacements for all ground motions. The forces decrease by a factor 4 while

displacements increase by a factor 1.5 to 2.0 compared to the linear analysis with cracked sections. The difference to the ductile pier simulations is most noticeable at low seismicity. While the piers at this bridge only reduce seismic forces via ductility starting from a specific level of seismic input the elastomeric bearings significantly reduce forces even at low seismicity. That is because the elastomeric bearings cause a seismic isolation that increase the bridge eigenperiod. However it must be kept in mind, that relative large displacements can occur due to non seismic forces, too.

Fig. 5 (top) shows the hysteresis shear force per pier versus horizontal deformation of piers for the ductile-pier model for one representation of ground motion with different PGAs. In Fig. 5 (bottom) the corresponding hysteresis shear force per pier versus deformation of elastomeric bearing for the isolated model are shown. The ductile pier model for low excitation shows an extremely narrow hysteresis. The performance is almost linear elastic with no energy dissipation. With increasing PGAs the maximum force only becomes slightly larger while the area under the hysteresis significantly rises. That is the reason for the significant reduction of forces compared to the linear elastic analysis at mean to high seismic input. The hysteresis of the low-excitation simulation with the seismic-isolated model shows only moderate energy dissipation, too. However the average slope of the hysteresis respectively the global stiffness is smaller leading to the high reduction of forces. The hysteresis of the elastomeric bearing stays relatively narrow even for strong motions. Therefore the force reduction is almost independent from the PGA in

contrast to the ductile pier model. The main effect of the elastomeric bearing is the reduction of global stiffness. It can beneficially be used for low ground motions while the effect of ductile piers starts at a specified input – at the present girder bridge at mean seismicity. The performance of seismic isolated bridges can be further enhanced when the elastomeric bearing is combined with special damping devices.

## 5 Conclusions

Two basic concepts of an earthquake-resistant structural design were investigated in the paper. First a ductile structural performance using plastic hinges in bridge piers and second an isolation of the structure by using rubber bearings. Numerical models were presented that can represent the above mentioned concepts in detail. The first model takes nonlinear material behavior of concrete and reinforcement into account. It considers bond-slip of the main bars and includes a nonlocal averaging of damage. The model shows good performance up to failure independently from mesh refinement. For the second model an already existing finite visco-elastic material law with an isotropic damage function was chosen. To take the stiffness increase at large strains into account, the formulation has been extended by a deviatoric strain-hardening function. With further extensions like a time-dependent relaxation function the highly nonlinear material behavior can realistically be reproduced under various loading conditions.

The difference of ductile pier performance versus seismic isolation with elastomeric bearings was investigated at a practical example. For this purpose dynamic simulations at a two span girder bridge have been carried out. The simulations have shown that a significant force reduction at bridges with ductile piers starts at a specific level of seismicity. At the considered girder bridge this reduction starts at mean seismicity. The main reason for the force reduction is the energy dissipation inside plastic hinges. At low seismicity where the ductile pier shows almost no energy dissipation the results agree best to simplified linear analysis when cracked sections are considered in linear analysis by reducing the Youngs-Modulus. The simulations at the seismic-isolated bridge have shown much smaller forces compared to the linear analysis even at low seismicity. The main effect of the elastomeric bearing is the reduction of global stiffness. Therefore the force reduction is significant at low seismicity but it only slightly increases with increasing seismicity. Elastomeric bearings can effectively be used for all levels of ground motion, but large displacements can occur even due to non seismic forces. The presented numerical models have shown an efficient runtime behavior so that it is possible to optimize the performance of new bridges or to investigate the performance of existing bridges.

## References

- [1] *Bazant, Z.P.; Planas, J.*: Fracture And Size Effect In Concrete And Other Quasibrittle Materials. CRC Press (1998) Boston.
- [2] *Baur, M.*: Elastomerlager und nichtlineare Standorteffekte bei Erdbebeneinwirkung. Dissertation (2003) University of Karlsruhe.
- [3] *Eibl, J.; Hehn, K.H.; Baur, M.; Böhm, M.; Schmidt-Hurtienne, B.*: Detailed numerical models of bearings. Brite EuRam II. Project BE 7010, Technical Report No. 6 (1996) University of Karlsruhe.
- [4] *Eligehausen, R.; Popov, E.P.; Bertero, V.V.*: Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations. Report UCB/EERC-83/23 (1983) University of California, Berkeley.
- [5] Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 2 bridges ENV 1998-1-2 (1994), ENV 1998-1-3 (1995), ENV 1998-2 (1994), CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [6] *Fäcke, A.*: Numerische Simulation des Schädigungsverhaltens von Brückenpfeilern aus Stahlbeton unter Erdbebenlasten. Dissertation, (2006) University of Karlsruhe.
- [7] *Fäcke, A.; Baur, M.*: Assessment of Bridge Ductility for Earthquake Resistant Design. (2007) Munich Bridge Assessment Conference (MBAC).
- [8] *Kim, M.; Gupta, A.; Marchertas, A.H.*: Utilization of the Simo-Taylor constitutive model for the simulation of isolations bearings. SMIRT Conference, Transactions Vol. K, (1991) 169–174.
- [9] *Salse, E.A.B.; Fintel, M.*: Strength, Stiffness and Ductility Properties of Slender Shear Walls. 5<sup>th</sup> WCEE, Rom (1973) 919–928.
- [10] *Simo, J.*: On a fully three dimensional finite strain viscoelastic damage model: Formulation and computational aspects. Computer methods in applied mechanics and engineering 60 (1987) 153–173.
- [11] *Ma, S.Y.M.; Bertero, V.V.; Popov, E.P.*: Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams. Report UCB/EERC-76-2 (1976) University of California, Berkeley.

# Erdbebenertüchtigung von Bauwerken - Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz

Th. Wenk, Zürich

Im Umgang mit dem Erdbebenrisiko bei bestehenden Bauten stellen sich immer wieder Fragen wie: Welche Ertüchtigungsstrategie ist zweckmäßig? Wie viel kostet es? Wie sind andere vorgegangen? Beispiele der Erdbebenertüchtigung aus hochseismischen Ländern wie Kalifornien oder Japan gibt es viele, doch lassen sie sich nicht direkt auf mitteleuropäische Verhältnisse übertragen. Als Antwort auf diese Fragestellungen hat die Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge im Bundesamt für Umwelt unter Leitung von Herrn Blaise Duvernay kürzlich eine Broschüre *Erdbebenertüchtigung von Bauwerken - Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz* veröffentlicht.

Der zentrale Teil der Broschüre bildet eine Beispielsammlung von 24 Bauten, die in den letzten Jahren in der Schweiz erdbebenertüchtigt wurden. Aufgenommen wurden nur effektiv ausgeführte Bauten, Projekte wurden bewusst nicht berücksichtigt. Jedes Bauwerk wird auf einer Doppelseite mit typischen Fotos und Skizzen der wesentlichen konzeptionellen und konstruktiven Aspekte der Ertüchtigung vor-

gestellt. In kurzen Textabschnitten gegliedert in die Themen *Ist-Zustand, Schwachstellen, Ertüchtigungskonzept, Besonderes* und *Veranlassung* wird das Vorgehen beschrieben. Zum Abschluss werden die wichtigsten Kenndaten tabellarisch zusammengefasst, darunter auch die Ertüchtigungskosten absolut und relativ zum Gebäudeversicherungswert. Als Beispiel wird weiter unten auszugsweise die Ertüchtigung



Bild 1. Ansicht an das Feuergebäude während den Ertüchtigungsarbeiten

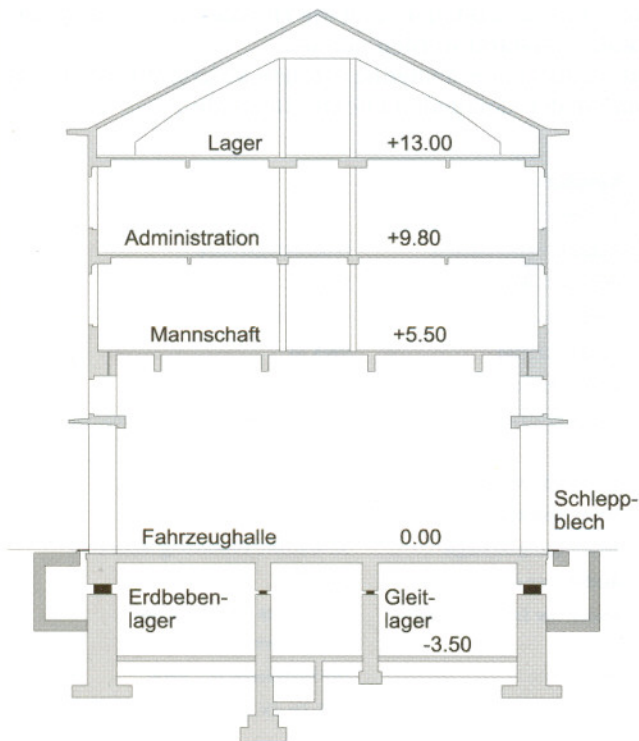


Bild 2. Querschnitt durch das Gebäude mit den neuen Erdbebenlagern im Untergeschoss (Bachmann & Zachmann 2008).



Bild 3. Rings um das Gebäude wird eine Dilatationsfuge eingebaut, damit eine freie, horizontale Schwingung auf den neuen Erdbebenlagern möglich wird.



Bild 4. Einbau eines Erdbeben-Gummilagers unter einer Stütze in der Aussenwand des Untergeschosses.



Bild 5. Unter dem stützenfreien Innenbereich werden Gleitlager eingebaut.

des Feuerwehrgebäudes in Basel mittels seismischer Isolation wiedergegeben.

Für die Beispielsammlung wurden unterschiedliche Bauten bezüglich Nutzung, Bauweise, Baugrund, Erdbebenzone und Ertüchtigungskonzept ausgewählt, um ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Neben Gebäuden wurden je ein Beispiel der Erdbebenertüchtigung einer Brücke und eines Tanks aufgenommen. Den Abschluss bilden drei Gebäude, deren Ist-Zustand als genügend erdbebensicher akzeptiert werden konnte – ein durchaus häufiges Resultat in der Schweiz. Ergänzend zur Beispielsammlung werden die Themen Anlass und Vorgehen bei einer risikobasierten Überprüfung bezüglich Erdbeben sowie Strategien zur Erdbebenertüchtigung in einführenden Kapiteln erläutert.

Die Beispielsammlung richtet sich primär an Bauingenieure, Architekten und Hauseigentümer erhalten ebenfalls wertvolle Informationen. Sie kann als PDF-Datei von der Webseite der Koordinationsstelle des Bundes für Erdbebenvorsorge in Deutsch und Französisch heruntergeladen werden: [www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01013/](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01013/). Der Publikationspraxis des Bundesamts für Umwelt folgend ist keine gedruckte Fassung verfügbar.

## Beispiel Feuerwehrgebäude in Basel - Ist-Zustand

Das Hauptgebäude der Berufsfeuerwehr Basel-Stadt, der Lützelhof, wurde in den 1940-er Jahren als Stahlbetonbau erstellt. Im Erdgeschoss weist es über die ganze Grundrissfläche von 44 m x 11 m eine Einstellhalle mit beidseitig 11 Toren auf. Darüber befinden sich 3 Obergeschosse mit Aufenthalts- und Schlafräumen sowie Administration und Lager der Feuerwehr.

### Schwachstellen

Die Einstellhalle im Erdgeschoss mit relativ schlanken Stützen zwischen den Toren bildet ein typisches weiches Geschoss (Soft-Storey). Bereits ein relativ schwaches Erdbeben würde ein Versagen der Stützen verursachen. Auch die Wände und Decken in den Obergeschossen sind zur Aufnahme der Erdbebenbeanspruchungen nicht genügend.

### Ertüchtigungskonzept

Das Gebäude wird durch eine seismische Isolation ertüchtigt. Unterhalb der Bodendecke des Erdgeschosses werden die oberen Geschosse mittels eines horizontalen Schnitts vom Kellergeschoss abgetrennt und auf Erdbebenlager gestellt. Damit sich das Gebäude bei einem Erdbeben horizontal frei bewegen kann, wird rundum ein entsprechender Spielraum geschaffen. Dazu werden die stirnseitigen Nachbargebäude um 15 bis 18 cm gekürzt (Bachmann & Zachmann 2008).

Durch die Wahl einer seismischen Isolation muss die Nutzung der Einstellhalle nicht eingeschränkt werden, und der Betriebsunterbruch während der Bauarbeiten lässt sich auf ein Minimum beschränken. Bei einer konventionellen Verstärkung des Erdgeschosses mit Stahlbetonwänden wären je zwei Tore weggefallen, und die Obergeschosse hätten aufwendig verstärkt werden müssen.

Die Erdbebenertüchtigung erfolgte aufgrund einer Risikoanalyse der kantonalen Lifeline-Gebäude.

#### Kenndaten

Baujahr	1942
Nutzung des Gebäudes	Feuerwehrgebäude
Personenbelegung	PB = 60
Gebäudewert	13 Mio. CHF
Bauwerksklasse	BWK III
Erdbebenzone	Z3a
Baugrundklasse	standortspezifische bodendynamische Studie
Erfüllungsfaktor bisher	$\alpha_{eff} = 0,2$
Erfüllungsfaktor neu	$\alpha_{int} = 1,0$
Ertüchtigungsstrategie	Schwächen, Einwirkung reduzieren
Ausführung der Ertüchtigung	2007
Kosten der Ertüchtigung	3 Mio. CHF oder 23 % des Gebäudewertes
Ingenieur	ZPF Ingenieure AG, Basel
Experte	Prof. Dr. Dr. h.c. Hugo Bachmann

#### Literatur

Bachmann H. & Zachmann A. (2008): Schwimmende Lagerung. Tec21, Heft 35/2008 26–28, Zürich.