

17. Dresdener Brückenbau Symposium
Dresden, 12.-13. März 2007

Erdbebenauslegung im Brückenbau
nach EN 1998-2 und DIN 4149

Dr.-Ing. F.-H. Schlüter
Dr.-Ing. Slobodan Kasic

SMP Ingenieure im Bauwesen GmbH
(ehem. Prof. Eibl + Partner GbR)
Stephanienstr. 102, 76133 Karlsruhe
www.smp-ing.de

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland wird sowohl in der Bevölkerung als auch in Fachkreisen der Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben wenig Bedeutung beigemessen. Große Schadensbeben sind in der letzten Zeit glücklicherweise nicht aufgetreten, so dass im Erfahrungsbereich der Bevölkerung das Bewusstsein hierfür nicht ausgeprägt ist. Sicherlich ist Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern als Schwachbebengebiet zu bezeichnen, dennoch ist die Gefahr und das damit verbundene Schadenspotential nicht zu vernachlässigen.

Für den "üblichen Hochbau" liegt seit April 2005 die neue Erdbebennorm DIN 4149:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten“ [1] als Weißdruck vor und ist zwischenzeitlich auch bauaufsichtlich eingeführt. Sie muss sowohl bei neuen Bauvorhaben als auch bei Umbau- und Erweiterungsmaßnahmen entsprechend angewandt werden. Gegenüber der Vorgängernorm aus dem Jahr 1981 haben sich eine Reihe von Änderungen ergeben, wie der gestiegene Umfang von 12 Seiten auf über 80 Seiten verdeutlicht. Parallel hierzu entstand der Eurocode 8 "Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben" in verschiedenen Teilen [2]. Der Teil 1 (EN 1998-1:2004) mit 229 Seiten beinhaltet die Auslegung üblicher Hochbauten einschl. Beschreibung der Einwirkung und übergeordneter Regelungen, vergleichbar mit DIN 4149. In den anderen Teilen des EC 8 (vgl. z.B. [4], [5]) wird immer wieder hierauf Bezug genommen. Das NAD hierzu wird derzeit erarbeitet.

Die neue DIN 4149 wurde erstellt, obwohl fast zeitgleich die zweite Generation des EC 8 entwickelt wurde. Die grundlegenden Philosophien und Vorgehensweisen in beiden konkurrierenden Vorschriften sind zwar ähnlich, jedoch sollten in der DIN 4149 die für das Schwachbebengebiet Deutschland typischen Besonderheiten berücksichtigt werden, verbunden mit zahlreichen Vereinfachungen gegenüber den Europäischen Erdbebenvorschriften, die insbesondere für Starkbebengebiete konzipiert sind (siehe [21] bis [24]). Aus dieser Tatsache ergibt sich die Schwierigkeit, dass viele Grundlagen der DIN 4149 nicht ohne Probleme in das NAD des EC 8 übertragen werden können. Damit ist auch der Bezug von anderen Teilen des EC 8 auf den Teil 1 oft nicht ohne weiteres möglich, da hier wichtige Grundlagen wie z.B. eine kompatible Definition der Einwirkungen und Einteilungen in Erdbebenzonen fehlen. So ist auch die Anwendung des EC 8, Teil 2 für Brücken nur eingeschränkt möglich.

Im vorliegenden Beitrag soll ein Überblick über die neuen Regelungen des EC 8, Teil 2 bzgl. der Auslegung von Brücken sowie prinzipielle Vorgehensweisen gegeben werden. Auf die Probleme bei der Umsetzung soll hingewiesen werden.

2 Entwicklung von Erdbebennormen im Brückenbau

Die ersten Erdbebennormen für Brückenbauwerke wurden in den USA entwickelt. Das Erdbeben von San Fernando 1971 war der Anstoß für umfangreiche Forschungsaktivitäten mit dem Ziel, das Verhalten von Brücken unter Erdbebenbelastung besser verstehen und einschätzen zu können [14].

1973 wurden die ersten Erdbebennormen für Brückenbauwerke vom California Department of Transportation (Caltrans) herausgegeben. Ein weiterer Schritt erfolgte 1978 durch die US Federal Highway Administration, dem Applied Technologie Council. Hier wurden neue und verbesserte Erdbebenrichtlinien für Autobahnbrücken (ATC-6) entwickelt. Diese ATC-6 Richtlinien wurden erstmals 1983 im AASHTO übernommen. Nach dem Erdbeben von 1989 in Loma Prieta wurde AASHTO durch das National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) revidiert. Ebenfalls beeinflusst durch dieses Erdbeben sowie dem von Northridge 1994 entwickelte das Applied Technologie Council 1996 eine neue Erdbebennorm ATC-32.

Auch in Japan und Neuseeland erschienen in den 80er Jahren erste Erdbebennormen für Brückenbauwerke. In der Schweiz erfolgten ebenfalls erste diesbezügliche Entwicklungen.

In Deutschland ist bislang kein eigenes nationales Regelwerk zur Auslegung von Brückenbauwerken gegen Erdbeben vorhanden. Die angesprochene DIN 4149 behandelt ausschließlich übliche Hochbauten. Sie kann nicht für direkt auf Brückenbauwerke übertragen werden, da das Verhalten von Brücken unter seismischer Beanspruchung sich erheblich von dem Verhalten üblichen Hochbauten unterscheidet. Bei Brücken sind andere Rechenverfahren und Konstruktionselemente erforderlich. Auch unterscheiden sich die Auslegungs- und Schutzziele.

Auf europäischer Ebene wurde im Rahmen der Vereinheitlichung der technischen Regeln im Bauwesen bereits 1994 mit dem Eurocode 8 mit den Teilen 1 und 2 eine erste sog. Vornorm (ENV) zur Erdbebenauslegung geschaffen [3]. Darauf aufbauend wurde 10 Jahre später die zweite Generation herausgegeben. Mit der EN 1998-2:2005 [4] liegt erstmalig ein speziell für den Brückenbau konzipiertes Regelwerk zur Erdbebenauslegung mit dem Status einer Norm (EN) vor. Einen Terminplan für Entwicklung und Einführung des EC8 T2 ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Terminplan für den Eurocode 8, Teil 2

	1994	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2010
Vornorm ENV 1998-2									
Erarbeitung von Entwürfen für EN 1998-2									
Definitiver Entwurf prEN (Stage 34)									
Abstimmung prEN (Stage 51)									
Veröffentlichung EN (Stage 64)									
Erarbeitung nationaler Anwendungsdokumente									
Veröffentlichung NAD									

3 Überblick über Eurocode 8 Teil 2

Der Teil 2 des EC 8 baut auf den Teil 1 auf und befasst sich mit speziellen Anforderungen der seismischen Auslegung von Brücken, bei denen die horizontalen Erdbebeeinwirkungen im wesentlichen durch die Biegung der Pfeiler oder an den Widerlagern aufgenommen werden, d.h. von Brücken, die aus lotrechten oder fast lotrechten Pfeilern bestehen, die den Fahrbahnüberbau tragen. Er ist zwar auch auf die seismische Auslegung von Schrägseilbrücken und Bogenbrücken anwendbar, es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass seine Regeln diese Fälle vollständig abdecken. Der Anwendungsbereich erstreckt sich ausdrücklich nicht auf Hängebrücken, Holzbrücken, Brücken aus Mauerwerk, bewegliche Brücken und Schwimmbrücken.

Die EN 1998-2:2005, im Folgenden mit EC8-2 bezeichnet, umfasst 141 Seiten Normtext und untergliedert sich in folgende Bereiche:

- Grundlegende Anforderungen und Konformitätskriterien
- Erdbebeneinwirkung
- Berechnungsverfahren
- Festigkeitsnachweis
- Bauliche Durchbildung
- Brücken mit seismischer Isolation

Die 11 Anhänge befassen sich mit folgenden Themen:

- Der informative Anhang A liefert Informationen über die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Referenz-Erdbeben und Empfehlungen für die Wahl der Bemessungs-Erdbebeneinwirkung während der Bauphase.
- Der informative Anhang B beschreibt den Zusammenhang zwischen der Verschiebungsduktilität und der Krümmungsduktilität von plastischen Gelenken in Betonpfeilern.
- Im informativen Anhang C werden Angaben zur Abschätzung der effektiven Steifigkeit von duktilen Stahlbetonbauteilen gemacht.
- Der informative Anhang D liefert Informationen für die Modellierung und rechnerische Erfassung der räumlichen Veränderlichkeit der erdbebeninduzierten Bodenbewegung.
- Der informative Anhang E befasst sich mit wahrscheinlichen Werkstoffeigenschaften und plastische Verformungskapazitäten von Fließgelenken für nichtlineare Berechnungen.
- Der informative Anhang F liefert Informationen und Anleitungen zur zusätzlichen Masse infolge mitgeführten Wassers in eingetauchten Pfeilern.
- Anhang G enthält Regeln zur Ermittlung von Kapazitätsbemessungszustandsgrößen.
- Der informative Anhang H gibt eine Anleitung und Informationen für statische nichtlineare Berechnung (pushover).
- Der informative Anhang JJ enthält Informationen über λ -Beiwerte für übliche Isolator-typen.
- Der Informative Anhang K beschreibt Anforderungen an Versuche zur Überprüfung der Bemessungseigenschaften von seismischen Isolationsvorrichtungen.

4 Grundlegende Anforderungen

Die Entwurfsphilosophie der Norm EC8-2 besteht darin, die Anforderungen des Grenzzustands der Tragfähigkeit für die Bemessungs-Erdbebeneinwirkung A_{Ed} mit ausreichender Zuverlässigkeit zu erfüllen, wobei für A_{Ed} gilt:

$$A_{Ed} = \gamma_I A_{Ek}$$

mit

A_{Ek} Referenz-Erdbebeneinwirkung, verbunden mit einer Referenz-Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren

γ_I Bedeutungsbeiwert der Brücke

Hieran erkennt man, dass die für die Bemessung anzusetzende Erdbebeneinwirkung von der Bedeutung der Brücke abhängig ist. Bei wichtigen Brücken werden über den Bedeutungsbei-

wert höhere Erdbebenlasten angesetzt, wodurch die Zuverlässigkeit im Erdbebenfall angehoben wird. Demzufolge müssen Brücken in Bedeutungsklassen eingestuft werden, in Abhängigkeit von den Folgen ihres Versagens auf menschliches Leben, ihrer Wichtigkeit zur Aufrechterhaltung von Verkehrsverbindungen und den wirtschaftlichen Konsequenzen eines Zusammenbruchs. Dies muss von den nationalen Behörden erfolgen. Regelungen sollen im NAD festgelegt werden.

Im EC8-2 sind drei Bedeutungsklassen mit zugeordneten Bedeutungsbeiwerten vorgesehen. Der empfohlene Wert für Faktor γ_I beträgt 1.3 für eine Brücke der Klasse III, d.h. für eine Brücke, die für die Aufrechterhaltung des Verkehrs wichtig ist. Neben dieser Bedeutungskategorie werden für die weiteren Klassen II und I die Werte für γ_I von 1.0 bzw. 0.85 empfohlen. Autobahnbrücken wären beispielsweise der Klasse II zuzuordnen.

Die Bemessungsvorschriften des EC8-2 haben nicht das Ziel, eine Brückenkonstruktion so auszulegen, dass sie ein Erdbeben ohne jeglichen Schaden übersteht. Das Bemessungsprinzip ist vielmehr, eine Brücke mit wichtiger Verbindungsfunktion so zu bemessen, dass unter der Einwirkung des Bemessungsbebens diese Brücke mit einer gewissen Zuverlässigkeit ihre Funktion weiterhin erfüllen kann. Dies bedeutet, dass einerseits die Brücke nicht zusammensinkt und andererseits der eventuell entstandene Schaden reparabel bleibt. Die Brücken sollen jedoch schwache bis mittlere Erdbeben ohne Schaden überstehen.

Im EC8-2, Kapitel 2.2.1 werden zwei grundlegende Anforderungen gestellt: Erfüllung der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, d.h. Schadensbegrenzung.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nachzuweisen, dass es bei starken Erdbeben mit geringer Auftretenswahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer des Bauwerks nicht zu einem örtlichem oder globalen Versagen des Tragwerks kommen darf. Schäden werden dabei jedoch in Kauf genommen. Insbesondere ist sicherzustellen, dass Menschen nicht gefährdet werden und die Aufrechterhaltung eines Notverkehrs für Rettungs- und Wiederaufbaumaßnahmen mit reduzierter Verkehrslast möglich ist.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit darf ein Erdbeben mit höherer Auftretenswahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer nicht zu einer Einschränkung des regulären Verkehrs führen. Außerdem sind nur geringe Schäden an den untergeordneten Komponenten und an den für die Energiedissipation vorgesehenen Teilen der Brücke erlaubt.

4.1 Übereinstimmungskriterien

Eine Brücke kann unter Erdbebenbeanspruchung so ausgelegt werden, dass sie sich duktil, beschränkt duktil oder im Wesentlichen elastisch verhält. Die Art der beabsichtigten Auslegung sollte aus ökonomischen und Sicherheitsgründen abhängig sein von der Größe der Erdbebeneinwirkung.

In Regionen mit einer mittleren bis hohen Seismizität wird üblicherweise duktileres Verhalten angestrebt. Die Brückenunterbauten sollten derart ausgestattet sein, dass bei starken Erdbeben ein Großteil der aufgenommenen Energie zuverlässig dissipiert werden kann.

In Regionen mit geringer bis mittlerer Seismizität kann beschränkt duktileres Verhalten ohne wesentlichen Plastifizierung angestrebt werden, ohne dass die Wirtschaftlichkeit hiervon stark beeinträchtigt wird. Dennoch soll eine gewisse Energiedissipation durch eine Abweichung vom linear elastischen Verhalten ermöglicht werden.

Im Wesentlichen elastisches Verhalten kann in Regionen mit niedriger Seismizität angestrebt werden. In diesem Fall soll die Brücke so konzipiert werden, dass potentielle plastische Gelenke leicht zugänglich sind für Reparaturarbeiten.

Im EC8-2, Abs. 2.3 sind Anforderungen an lokale und globale Duktilität sowie die erforderlichen Nachweise definiert. Auch werden vereinfachte Kriterien angesprochen, nach denen Brücken in Gebieten niedriger Seismizität entworfen werden können. Entsprechende Festlegungen müssen jeweils im NAD getroffen werden, liegen aber bislang noch nicht vor.

4.2 Konzeptioneller Entwurf

Soll das Tragwerk während eines Erdbebens im elastischen Zustand verbleiben muss es für die maximal auftretende Erdbebeneinwirkung ausgelegt werden. Bei großen seismischen Einwirkungen führt dies zu hohen Beschleunigungen und Trägheitskräften in der Struktur. Das Ergebnis wird in der Regel ein unwirtschaftliches Bauwerk, da das Tragwerk und mögliche Anbauteile für diese hohen Kräfte bemessen werden müssen. Oft ist es sinnvoller, die Auslegung für eine reduzierte Erdbebeneinwirkung vorzunehmen bei gleichzeitiger Sicherung der Verformbarkeit. Bild 1 verdeutlicht dieses Prinzip.

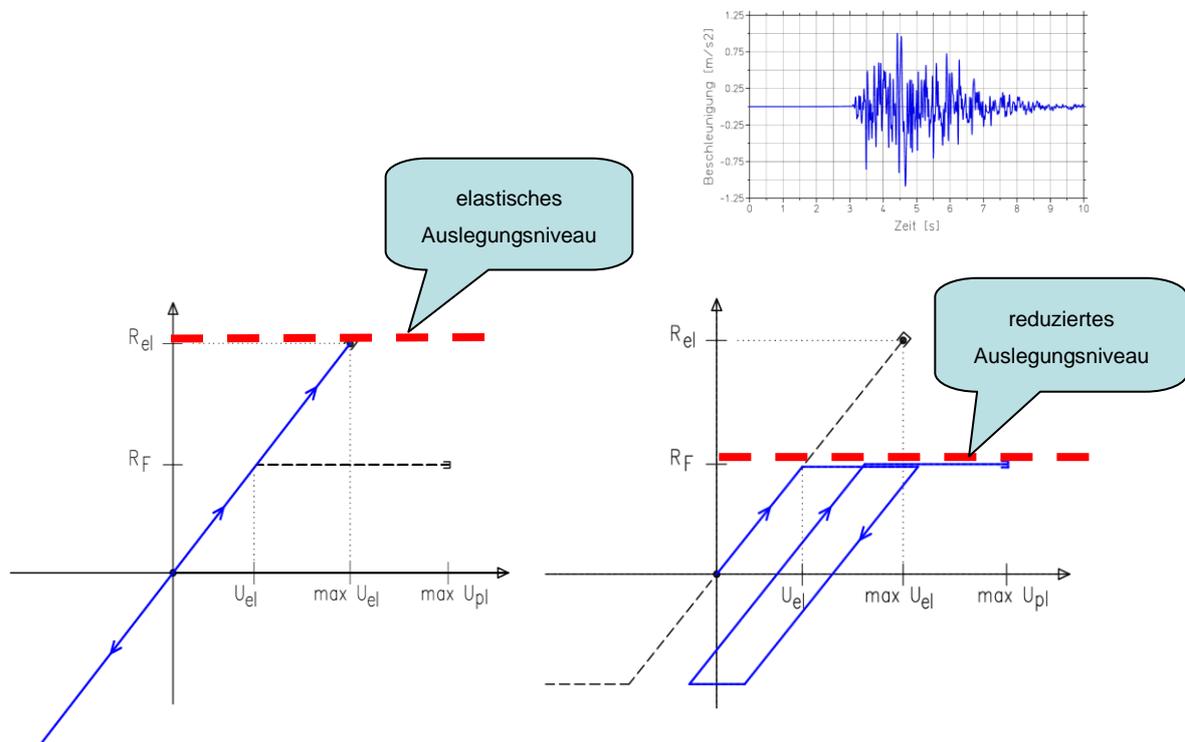


Bild 1: Elastische und duktile Auslegung (Verhaltensbeiwert q)

Grundsätzlich sollten solche Brückensysteme gewählt werden, die entweder der Beanspruchung infolge eines Erdbebens widerstehen können oder durch geeignete Maßnahmen wie Lagerung, entsprechende konstruktive Durchbildung und dissipierende Elemente den Erdbebenkräften ausweichen zu können. Ein erdbebengerechter Entwurf von Brücken lässt sich durch das Energieerhaltungsgesetz erläutern:

$$E_i = E_e + E_k + E_h + E_v$$

mit

E_i in das System durch Bodenbewegung eingeführte Energie

E_e elastische Verformungsenergie

E_k geschwindigkeitsabhängige kinetische Energie

E_h Energieanteil aus hysteretischen bzw. plastischen Verformungen

E_v Energieanteil aus viskose Dämpfung

Die Energie E_i entspricht der Einwirkung, während die folgenden vier Ausdrücke die möglichen Widerstände des Bauwerks wiedergeben.

Durch geeignete weiche Zwischenschichten, sog. Basisisolierungssysteme, welche den Überbau vom Baugrund trennen, kann eine Abminderung der in die Struktur eingetragene Energie E_i erreicht werden. Im Brückenbau bietet sich dafür eine sog. schwimmende Lagerung mittels Elastomerlager an. Die Anwendung und Bemessung von Elastomerlagern werden in Kapitel 7.5.2.3.3 der EC8-2 behandelt.

Mit der Verstärkung der Tragelemente wird hauptsächlich auf die Ausdrücke E_e und E_k eingewirkt. Damit werden die Tragelemente so bemessen, dass im Erdbebenfalle Schäden vermieden werden können. Dies ist nur bei Erdbebeneinwirkung geringer Intensität sinnvoll.

Durch große plastische Verformung mittels der speziell ausgebildeten plastischen Gelenke kann Energie in den Tragelementen dissipiert und damit die hysteretische Energie beeinflusst werden. Diese plastischen Gelenke haben oft nur eine sehr begrenzte Ausdehnung. Jedoch führt die Ausnutzung der plastischen Verformungen zu bleibenden Schäden und möglicherweise zu aufwendigen Reparaturarbeiten. Die Bemessung der plastischen Gelenke erfolgt nach Kapitel 5 der EC8-2.

In speziellen Fällen können hysteretische und viskose Dämpfer für die Dissipation eingesetzt werden. Sie müssen so konzipiert sein, dass sie sich bei Starkbeben plastisch verformen, womit eine hohe Dissipation einhergeht. Die Bemessung von diesen Erdbebenvorrichtungen erfolgt nach Kapitel 7 des EC8-2.

Da die deutschen Erdbebengebiete zu den Gebieten mit schwacher bis mittlerer Seismizität gehören, werden im Nachfolgenden nur auf die relevanten Punkte für die Bemessung dieser Bereiche eingegangen. Hierfür wird eine Auslegung unter Berücksichtigung von duktilem Verhalten unter gewissen Randbedingungen empfohlen.

In stark erdbebengefährdeten Gebieten ist es häufig wirtschaftlicher, zusätzliche Mechanismen zur Energiedissipation einzubauen. Hierfür kommen spezielle Brückenlager/Erdbebenvorrichtungen zum Einsatz, die durch starke Verformungen Energie dissipieren. Da in Deutschland diese Erdbebenvorrichtungen keine wesentliche Rolle spielen, werden diese nachfolgend nur informativ behandelt.

5 Erdbebeneinwirkung

Im Falle eines Erdbebens bewegt sich die Erdoberfläche innerhalb weniger Sekunden zyklisch in horizontaler und vertikaler Richtung in einer Größenordnung von Zentimetern bis

Dezimetern, je nach Intensität. Als Folge geraten Bauwerke in Schwingung und können mehr oder weniger schwere Schäden erleiden, bis hin zum Einsturz. Dies ist abhängig von den einwirkenden Schwingungsamplituden, dem Frequenzgehalt und der Dauer der Schwingungen sowie der Bauart und den Gründungsverhältnissen.

Allgemein kann die Erdbebeneinwirkung durch Zeitverläufe der drei Verschiebungs- bzw. Beschleunigungskomponenten beschrieben werden. Für die praktische Auslegung als Basis des Antwortspektrumverfahrens wurden hieraus Bemessungs-Antwortspektren abgeleitet. Diese sind abhängig vom Standort des Gebäudes und werden durch die Höhe der seismischen Einwirkung sowie den lokalen und globalen Untergrundverhältnissen bestimmt.

Im EC8-2 werden keine Antwortspektren angegeben. Hier wird auf den entsprechenden Teil 1 des EC 8 verwiesen. Hier ergibt sich für die praktische Anwendung eine Schwierigkeit. Auch im Teil 1 gibt es keine konkreten Angaben für die Einwirkung. Es wird auf den nationalen Anhang verwiesen, wo entsprechende Festlegungen, d.h. Definition von Erdbebenzonen mit zugehörigen Beschleunigungen, zu treffen wären. Dieser Anhang ist jedoch momentan noch nicht verfügbar.

Hier kann nur hilfswise auf die aktuelle DIN 4149 verwiesen werden, wo sowohl Erdbebenzonen als auch Untergrundabhängige Antwortspektren angegeben sind (vgl. Bild 2 und Bild 3). Jedoch sind diese Beschreibungen primär abgestimmt auf die Anwendung im üblichen Hochbau unter Berücksichtigung typischer deutscher Bauweisen. Die dort verwendeten Beschleunigungen entsprechen nicht den Peak-Ground-Acceleration (PGA), wie sie als Grundlage des Eurocode verwendet werden sollen. Allgemein kann man feststellen, dass die Beschleunigungen des DIN 4149 im Vergleich zu den Festlegungen anderer Länder relativ gering sind. Einige Erläuterungen zu den Einwirkungen der DIN 4149 sind in [21] angegeben.

Weiter sei darauf hingewiesen, dass der Einfluss des Untergrundes in DIN 4149 und dem Eurocode unterschiedlich behandelt wird. Die im EC vorgesehene Einteilung in die Untergrundklassen A bis E sowie S_1 und S_2 sind in DIN 4149 anders umgesetzt. Hier ist die Kombination von geologischen und lokalen Untergrund maßgebend und ein direkter Vergleich nicht möglich. An vielen Stellen des EC8-2 wird jedoch direkt auf die Untergrundklassen des EC Bezug genommen, was jedoch in Kombination mit DIN 4149 ins Leere läuft. Für die praktische Anwendung bleibt bis auf weiteres nur die Möglichkeit, in Abstimmung mit Bauherrn und zuständigen Behörden Festlegungen im Einzelfall zu treffen.

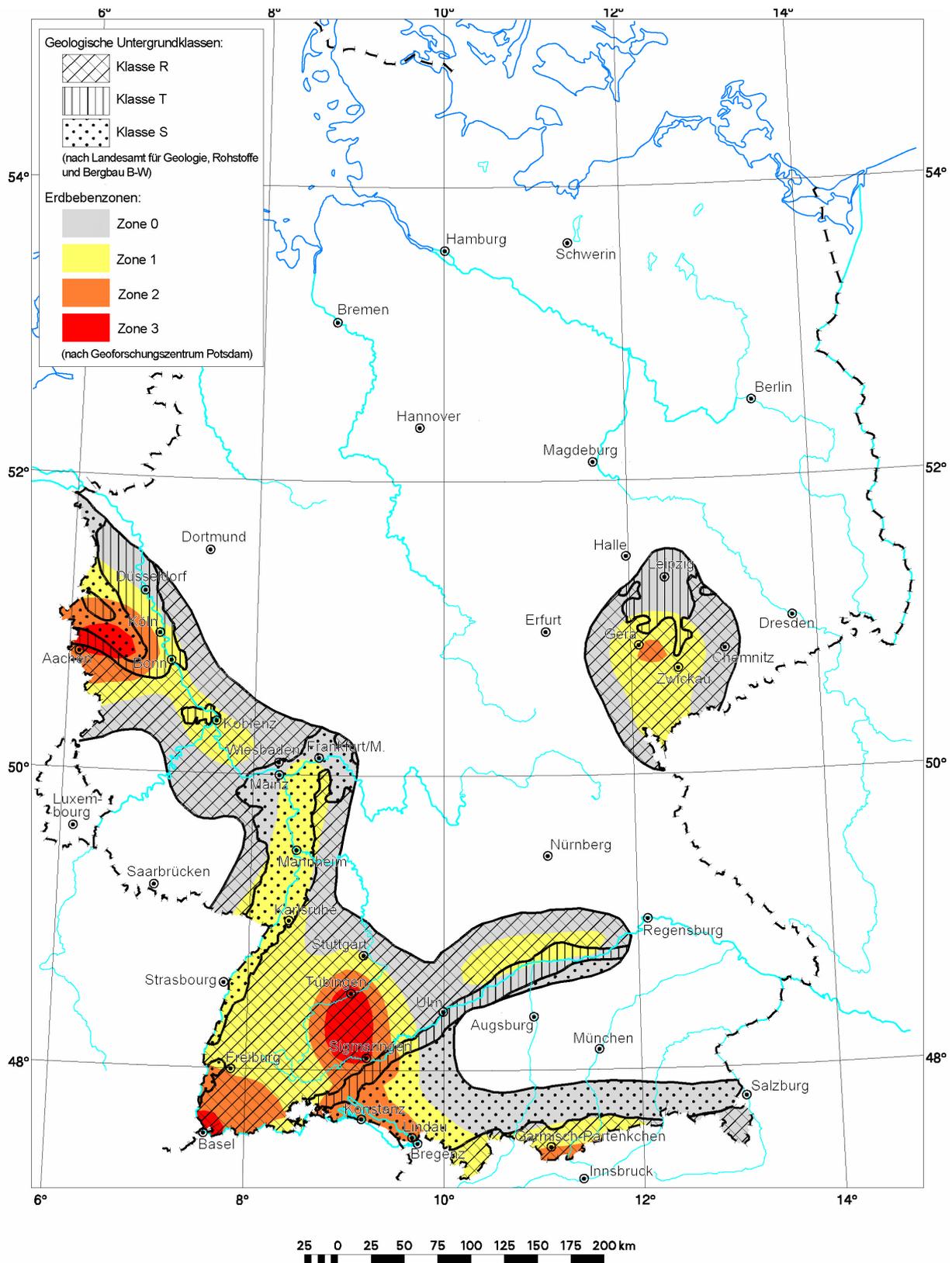


Bild 2: DIN 4149:2005-11, Karte der Erdbebenzonen und geologische Untergrundklassen

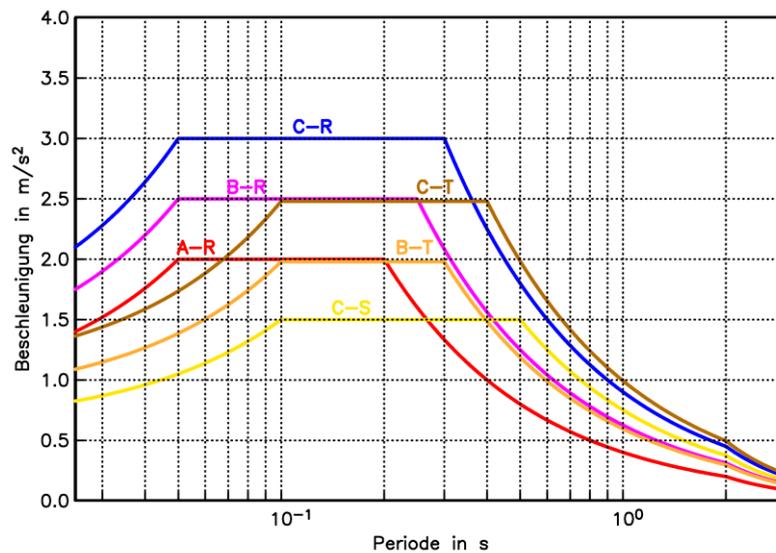


Bild 3: DIN 4149:2005-11, Untergrundabhängige Antwortspektren in der Erdbebenzone 3

6 Berechnungsmethoden

In EC8-2 sind folgende Berechnungsverfahren vorgesehen:

- Lineare dynamische Berechnung – Antwortspektrumsmethode
- Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren
 - Modell mit starrem Überbau
 - Modell mit flexiblem Überbau
 - Modell des Einzelpfeilers
- Lineare Zeitverlaufsberechnung
- Nichtlineare Zeitverlaufsberechnung
- Statische nichtlineare Berechnung (Pushover-Berechnung)

Das Standardverfahren beim EC8-2 ist die Antwortspektrenmethode. Unter gewissen Voraussetzungen sind jedoch Vereinfachungen (Beschränkung auf die kleinste Eigenform, Verwendung von Pfeiler-Ersatzmodellen) ausreichend. Das Antwortspektrenverfahren ist ein lineares dynamisches Verfahren. Es werden die Bauwerksreaktionen aus den einzelnen maßgebenden Eigenschwingungsformen ermittelt und die Beanspruchung des gesamten Tragwerks durch geeignete Superposition erhalten. Außer der Grundschwingungsform werden also auch höhere Eigenschwingungsformen der Brücke berücksichtigt. Die Erdbebeneinwirkung wird dabei abhängig vom Standort durch die sog. Antwortspektren beschrieben. Die Anregung kann gleichzeitig in allen Richtungen erfolgen.

Im EC8-2 werden unter bestimmten Voraussetzungen quasistatische Verfahren bzw. vereinfachtes Antwortspektrenverfahren zur Berechnung zugelassen. Beim vereinfachten Antwortspektrenverfahren werden aufgrund der dynamischen Belastung des Erdbebens statische Erdbebenersatzkräfte berechnet, welche auf die Brücke wirken. Ein Nachteil des vereinfachten Antwortspektrenverfahrens ist, dass damit nur die Grundfrequenz der Brücke berücksichtigt werden kann. Bei Brücken mit einer einigermaßen homogenen Massen- und Steifigkeitsverteilung ist dieses Verfahren genügend, weil in solchen Fällen die erste Eigenschwingungsform tatsächlich gegenüber den höheren Eigenschwingungsformen dominierend ist. In anderen Fällen wird jedoch der Einfluss der höheren Eigenfrequenzen zu groß, so dass diese nicht vernachlässigt werden dürfen. Die Bedingungen, unter denen eine vereinfachte Modellierung ausreichend genau ist, sind in EC8-2 nicht vorgegeben. Eine Einteilung, welches Rechenverfahren für welchen Brückentyp geeignet ist, ist in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Rechenverfahren in Abhängigkeit von Brückentypen

Rechenverfahren	Brückentyp
Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	gerade, mehrfeldrige Brücken mit gleichen Spannweiten und gleichmäßigen Steifigkeitsverhältnissen
Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren Antwortspektrenverfahren	gerade, mehrfeldrige Brücken mit ungleichmäßigen Spannweiten und Steifigkeitsverhältnissen
Antwortspektrenverfahren	Stark schiefwinklige Brücken, gekrümmte Brücken, mehrfeldrige Brücken mit im Verhältnis zum Überbau relativ steifen Stützen und Fundamenteinspannungen, Schrägseilbrücken und Hängebrücken

Eine weitere Möglichkeit zur dynamischen Analyse einer Brücke ist, direkt von der Bewegungsdifferentialgleichung auszugehen und Zeitverlaufsberechnungen durchzuführen. Hier wird die Differentialgleichung der Bewegung in kleinen Schritten über die Zeit integriert. Die Antwort des Systems, d.h. die Schnittgrößen und Verschiebungen, können so zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Bei den Zeitverlaufsberechnungen lassen sich auch nichtlineare Effekte wie das nichtlineare Materialverhalten berücksichtigen. Die Berechnungen werden üblicherweise mit der Methode der Finite Elemente durchgeführt.

Voraussetzung für eine genaue Berechnung, unabhängig von der Art des Verfahrens, ist die Diskretisierung eines Modells, das die tatsächlichen Verhältnisse möglichst gut beschreiben soll. Die wichtigsten Faktoren, die das dynamische Verhalten einer Brücke beeinflussen, sind:

- Brückenform
- Die Steifigkeit der einzelnen Bauteile
- Geometrische Nichtlinearitäten bei hohen, schlanken Brücken
- Das Dämpfungsverhalten der einzelnen Bauteile
- Materialeigenschaften
- Dehnungsfugen
- Auflagerbedingung
- Boden-Bauwerks-Interaktion
- Baugrundverhältnisse

7 Nachweise

7.1 Festigkeitsnachweise

Um die Standsicherheit eines Brückenbauwerks im Erdbebenfall zu gewährleisten, müssen Festigkeitsnachweise geführt werden. Diese sind in Kapitel 5 des EC8-2 geregelt. Sie betreffen das Tragsystem für den Erdbebenwiderstand von Brücken, die mit Hilfe einer äquivalenten linearen Methode bemessen wurden, wobei duktiles oder beschränkt duktiler Verhalten angenommen wurde. Für Brücken mit Isolationsvorrichtung muss EC8-2 Kapitel 7 angewendet werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass für Brücken mit duktilem Verhalten bei Verwendung von Verhaltensbeiwerten $q > 1.5$ Stahl der Klasse C EN 1992-1-1:2004 verwendet werden muß. Dieser höchstduktile Stahl ist auf dem deutschen Markt in der Regel nicht verfügbar, so dass diese Betrachtung in Deutschland nicht angewendet werden kann. Dies gilt insbesondere für die Nachrechnung und Bewertung von bestehenden Brücken. In Deutschland wird und wurde üblicherweise Stabstahl Klasse A und B eingesetzt.

7.2 Kombination der seismischen Einwirkung mit anderen Einwirkungen

Die Definition der Einwirkungen infolge Erdbeben nach EC8-2 stimmen mit derjenigen in DIN Fachbericht 101 [6] überein. Im DIN Fachbericht 101 wird die Kombination der seismischen Lasten mit anderen Einwirkungen geregelt. Im EC8-2 und im DIN Fachbericht 101 werden die Beanspruchungen aus Erdbeben mit derjenigen aus ständigen Lasten und 20 % der Verkehrslasten überlagert. Die Erdbebenbeanspruchung ergibt sich aus

$$E_d = G_k + P_k + A_{Ed} + \psi_{21} Q_{1k} + Q_2$$

- "+" bedeutet "zu kombinieren mit"
- G_k sind die charakteristischen Werte der ständigen Einwirkungen
- P_k ist der charakteristische Wert der Vorspannung nach allen Verlusten
- A_{Ed} ist die seismische Bemessungseinwirkung
- Q_{1k} ist der charakteristische Wert der Verkehrslast
- ψ_{21} ist der Kombinationsbeiwert für Verkehrslast gemäß 4.1.2(3)
 die empfohlenen Werte für Straßenbrücken $\psi_{21} = 0.2$
- Q_2 ist der quasi-ständige Wert der Einwirkungen von langer Dauer
 (z.B. Erddruck, Auftrieb, Strömungen, ...)

7.3 Kapazitätsbemessung

Für starke Erdbeben ist es aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen heraus wichtig, ein duktiler Verhaltens der Brücke anzustreben. Die durch das Erdbeben eingetragene Energie sollte durch große plastische Verformungen in speziell dafür ausgebildete Bereiche, den plastischen Gelenken, dissipiert werden. Diese plastischen Gelenke bilden sich in der Regel aus am Pfeilerfuß und bei einer monolithischen Verbindung mit dem Überbau auch am Pfeilerkopf. Alle anderen Bauteile wie Fundamente, Pfähle, Lager und Überbau werden elastisch für diejenigen Schnittkräfte bemessen (EC8-2, 5.8.1, EC8-2, 2.3.2.2 (4), die sich im Tragwerk einstellen, wenn die plastischen Bereiche ihre Überfestigkeit (Kapazität) erreichen.

Bei Anwendung der Kapazitätsmethode wird die Struktur so ausgebildet, dass bei seismischer Einwirkung Plastifizierungen nur in vorher definierten Bereichen auftreten. Um dies sicherzustellen, muss eine Rangordnung der Tragwiderstände am gesamten Brückentragwerk unter Berücksichtigung möglicher Überfestigkeiten entwickelt werden. Diese sind so anzuordnen, dass ein stabiler Verformungsmechanismus mit hoher Energiedissipation ermöglicht wird.

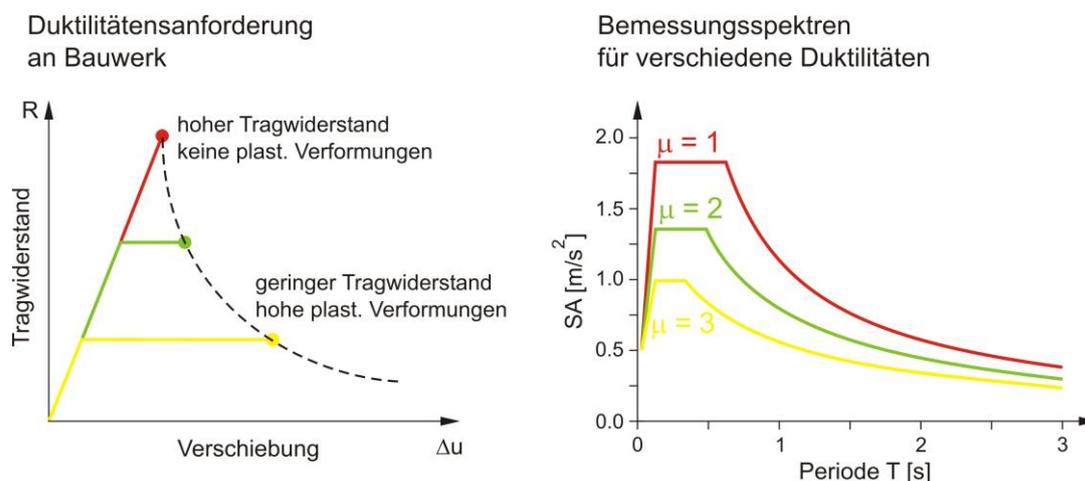


Bild 4: Qualitativer Zusammenhang zwischen der Duktilität und dem resultierenden Tragwiderstand

In Abhängigkeit der gewählten Duktilität lässt sich der erforderliche Tragwiderstand eines Bauwerks fast beliebig einstellen. Dabei gilt der Grundsatz, dass mit zunehmender Duktilität zwar der Tragwiderstand abnimmt (Bild 4), die Verformungen und der ggf. erforderliche Reparaturaufwand nach einem schweren Erbeben hingegen zunehmen. Genauere Berechnungen sind beispielsweise in [12] wiedergegeben.

Für die Kapazitätsbemessung eines Brückenpfeilers müssen mehrere Nachweise durchgeführt werden. Hierfür wird im Folgenden beispielsweise der prinzipielle Ablauf der Berechnung einer Brücke mit Kapazitätsbemessung eines Brückenpfeilers dargestellt:

1. Erfassung der Geometrie der Brücke, Querschnitte
2. Bestimmung Bauwerksstandort, Erdbebenzone und damit den Grundwerte der Bodenbeschleunigung
3. Festlegung der Bedeutungskategorie (EC8-2, 2.1)
4. Festlegung des Bemessungsspektrums für lineare Berechnung (EC8-1, DIN 4149)
5. Wahl der Berechnungsmethode z. B. lineare dynamische Berechnung – Antwortspektrummethode (EC8-2, 4.2.1)
6. Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens (Duktilität) durch einen Verhaltensbeiwert q – begrenzt duktil und duktil (EC8-2, 4.1.6)
7. Einwirkungskombination (EC8-2, 5.5, 4.1.2, DIN Fachbericht 101)
8. Ermittlung der mitwirkenden Massen (EC8-2, 4.1.2)
9. Ermittlung der Steifigkeiten
10. Berechnung in Längsrichtung / Querrichtung
11. Ermittlung der Grundschwingzeiten
12. Maßgebliche Eigenformen (EC8-2, 4.2.1.2)
Die Summe der effektiven modalen Massen der berücksichtigten Modalbeiträge muss mindestens 90% der Gesamtmasse der Brücke betragen
13. Ermittlung der inneren Schnittkräften N_{Ed} , $M_{Ed,z}$ und $M_{Ed,y}$
14. Kombination der Komponenten der Erdbebeneinwirkung (EC8-2, 4.2.1.4)
z.B. für Längsrichtung $E_{Edx} + 0.30 E_{Edy} + 0.3 E_{Edz}$
15. Pfeilerbemessung für zweiachsige Biegung mit Normalkraft
16. Kapazitätsbemessung erfolgt aus der ermittelten Bewehrung, Querschnittsabmessung und Normalkraft

17. Ermittlung des Überfestigkeitsmoments eines Querschnitts (EC8-2, 5.3) zur Berücksichtigung der Streuung der Festigkeitskennwerte des Werkstoffs sowie des Verhältnisses von Bruchfestigkeit zur Streckgrenze
18. Ermittlung der Länge möglicher plastischer Gelenke (EC8-2, 5.3 (5) und 6.2.1.5)
19. Bestimmung des Einflusses der Theorie 2. Ordnung (EC8-2, 5.4)
20. Überprüfung der ausreichenden Biegetragfähigkeit von Querschnitten außerhalb des Bereichs von Fließgelenken nach EC8-2, 5.3.(5) und 5.6.3.2
21. Nachweis der Schubtragfähigkeit von Fließgelenken;
hierbei müssen folgende Regelungen beachtet werden:
 - a) Die Bemessungszustandgrößen müssen gleich den Kapazitätsbemessungszustandgrößen angenommen werden
 - b) Die Tragfähigkeitswerte $V_{Rd,c}$, $V_{Rd,s}$ und $V_{Rd,max}$ müssen durch einen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert γ_{Bd} gegen Sprödversagen geteilt werden.
22. Schubtragfähigkeit von Bauteilen außerhalb des Bereichs von Fließgelenken:
Die Nachweise der Schubtragfähigkeit erfolgt analog den Bereichen der Fließgelenke.
Hierfür werden die Stegbreite b_w und Querschnittshöhe d stat b_w und d_c verwendet
22. Detailausbildung im Bereich der Fließgelenke:
Bestimmung der minimalen Menge der Umschnürungsbewehrung gemäß EC8-2, 6.2.1.4
23. Maßnahmen zur Verhinderung des Ausknickens der Druckbewehrung in Längsrichtung (EC8-2, 6.2.2)

8 Bauliche Durchbildung

8.1 Absturzsicherung

Eine der wichtigsten Aufgaben des erdbebengerechten Entwurfes besteht in der Ausbildung einer Absturzsicherung der Brückenträger infolge Relativverschiebung in Längsrichtung bei Widerlagern mit Fugen sowie bei zwei Brückenabschnitten mit Fugen. Die Beschädigung durch Anprall des Überbaus auf die Widerlager, Beschädigung der Fahrbahnübergänge, eventuelle Beschädigung fester und beweglicher Lager kann unter Umständen in Kauf genommen werden.

Die Gefahr des Absturzes ist bei Brücken mit großen Abschnittslängen zwischen benachbarten Fugen besonders groß. Infolge der sich im Untergrund ausbreitenden Erdbebenwellen bewegen sich zwei verschiedene Bodenpunkte im Allgemeinen nicht synchron, sondern sie können sich bei langen Bauwerken zu einem bestimmten Zeitpunkt in entgegengesetzte Rich-

tungen bewegen. Dies ist bei der Wahl der Auflagerlängen zu berücksichtigen. Am Auflager sind noch zusätzlich die Verformungen der Stützen und die Mindestauflagerlängen zu berücksichtigen.

Im EC8-2 werden minimale Auflagerlängen definiert, welche sowohl von der Geometrie der Brücke als auch von den erwarteten relativen Verschiebungen zwischen gestützten und stützenden Bauteilen abhängen. Der Mindestwert für die Übergreifungslänge l_{ov} an einem Endauflager wird gemäß EC8-2, 2.3.6.1,(6), 2.3.6.3(2) und 6.6.4 bestimmt aus der Mindestlänge des Auflagers, die eine sichere Übertragung der vertikalen Reaktion ermöglicht (nicht weniger als 40 cm), dem Effektivwert der Verschiebung der beiden Teile infolge unterschiedlicher seismischer Bodenbewegung sowie der effektiven Verschiebung des Auflagers infolge der Tragwerksverformungen unter Erdbeben.

8.2 Fahrbahnübergänge

Bei Brücken mit schwimmender Lagerung sind die Fugenbreiten ausreichend zu wählen, um einen Zusammenstoß der Überbauten und einen Anprall der Überbauten auf die Widerlagerseitenwände und Kammerwände zu vermeiden. Bei längeren Brücken erfordert die Längenänderung infolge von Temperatur, Schwinden, Kriechen aus Vorspannung usw. meist einen Spielraum. Ein Zerquetschen der Fahrbahnübergänge und eventuell weitere Schäden in den angrenzenden Bereichen der Fahrbahnplatte durch Stosswirkung sind im Erdbebenfall möglich.

Während eines Erdbebens sollten die Fahrbahnübergänge die erforderliche Bewegungskapazität in Längs- und Querrichtung besitzen. Die wesentlichen Anforderungen sind:

- Die Aufrechterhaltung der Bauwerksnutzbarkeit nach dem Erdbeben zumindest für Notfahrzeuge.
- Der Schutz des Bauwerks vor Anprallschäden

Für diese Zwecke hat die Firma Maurer Söhne [7] eine sog. „fuse box“ entwickelt. In Bild 5 und Bild 6 sind die Funktionsprinzipien der „fuse box“ gezeigt. Die Dehnfuge ist so ausgelegt, dass bei Erdbeben keine Schäden an der Verankerung sowie am Überbau entstehen. Bei schließenden Bewegungen wird die sog. „fuse box“ aktiviert. Sollbruchstellen an der Dehnfuge schützen das Bauwerk vor Schäden, die Dehnfuge gleitet entlang einer Rampe aus der Aussparung. Nach dem Erdbeben wird die Randkonstruktion temporär arretiert, um eine behelfsmäßige Nutzung des Bauwerks zu ermöglichen. Einfache Instandsetzungsarbeiten machen die Dehnfuge wieder gebrauchstauglich.

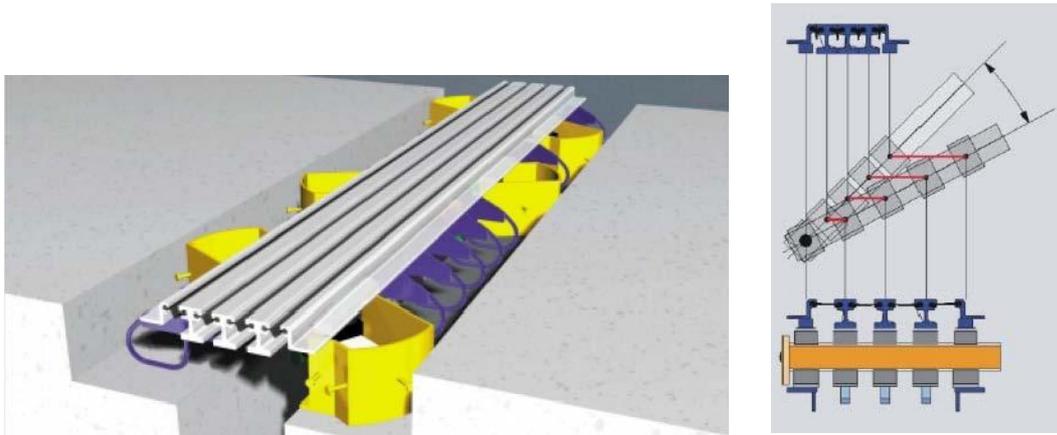


Bild 5: Erdbeben-Dehnfugen sog. „fuse box“ gemäß [7]

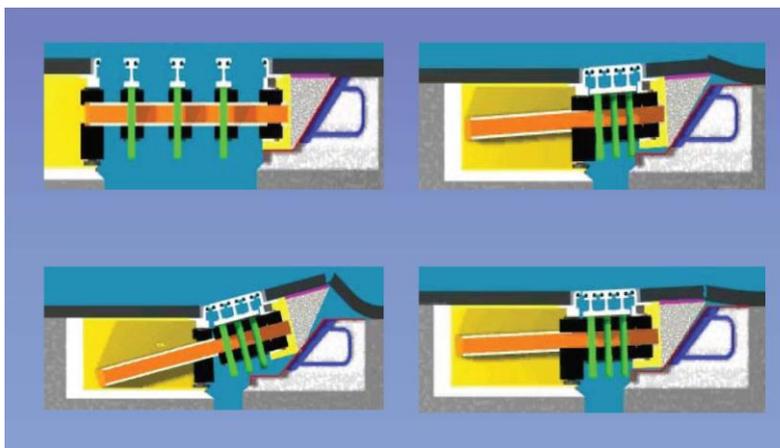


Bild 6: Funktionsprinzipien der „fuse box“ Erdbebenfuge gemäß [7].

8.3 Gründungen und Boden-Bauwerk-Interaktion

Die Brückengründungssysteme sind so zu bemessen, dass die grundlegenden Anforderungen gemäß Abschnitt EC8-2, 5.8 und EC8-5, 5.1 [5] erfüllen. Brückengründungen dürfen nicht gezielt als Möglichkeit der hysteretischen Energiedissipation benutzt werden. Somit müssen sie, so weit es möglich ist, so bemessen werden, dass sie unter Erdbebeneinwirkungen unbeschädigt verbleiben.

Alle Arten von direkten Gründungen wie Einzelfundamente, Plattengründungen oder Senkkastengründungen dürfen unter der Bemessungs-Erdbebeneinwirkung keine plastische Verformungen erfahren. Die Fundamente sollten immer elastisch bleiben, da eine plastische

Verformungen im Allgemeinen zu einem unübersichtlichen Verhalten und zu zusätzlichen Verschiebungen und Beanspruchungen im Überbau führen und die Reparaturen in den Fundamenten schwieriger auszuführen sind als im Überbau.

Das Verhalten von Pfahlgründungen bei einem Erdbeben hängt von vielen Faktoren ab. Im Bild 7 sind einige Einflussgrößen dargestellt, die den Baugrund, die Pfähle, das Bauwerk und die Belastung durch Erdbeben betreffen. Beim Pfahl spielt neben seiner Länge, der Biegesteifigkeit, einer möglichen Einspannung in die Pfahlkopfplatte und der Größe der Schnittkräfte beim Bruch und Duktilität eine besondere Rolle. Bei Pfahlgründungen werden durch die Horizontalkraft infolge von Erdbeben Querkräfte, Biegemomente und aufgrund des Hebelsarms auch Normalkräfte in den Pfählen erzeugt. Die Vertikalkraft V verursacht dagegen fast ausschließlich Normalkräfte.

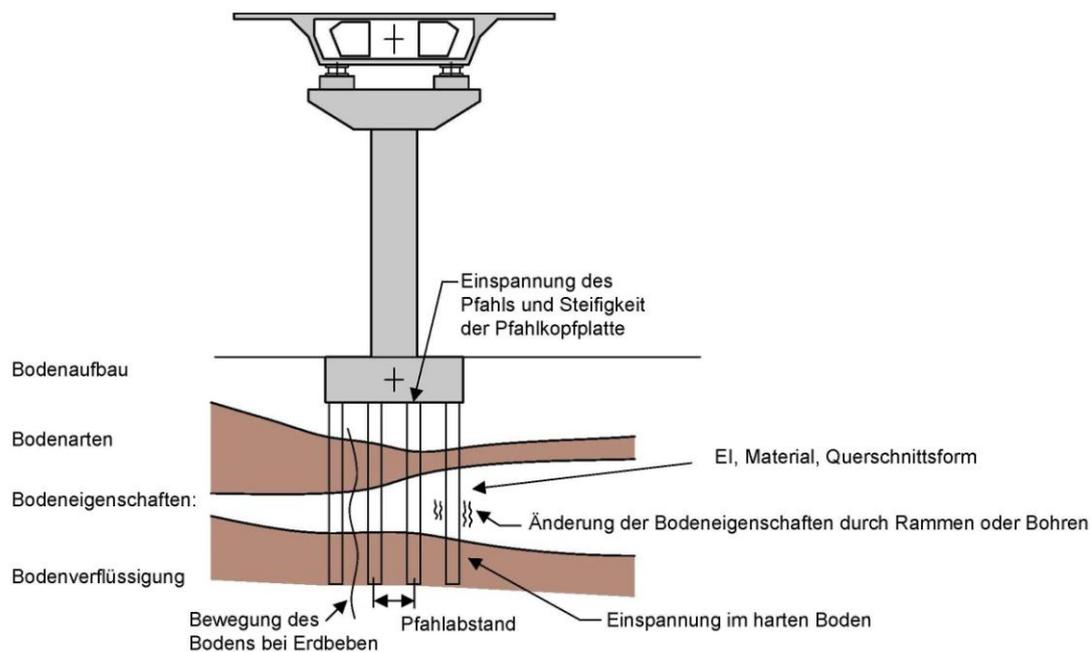


Bild 7: Einflüsse auf das Verhalten von Pfahlgründungen bei Erdbeben nach [15]

Die Kräfte aus Erdbeben müssen bis in den Baugrund verfolgt und sicher abgetragen werden. Über die Fundamente gibt es zwischen dem Bauwerk und dem umliegenden Baugrund, der ebenfalls ein schwingungsfähiges Medium ist, eine Wechselwirkung. Die Baugrund-Bauwerk-Interaktion wird in EC8-5, 6 behandelt. Bei der Boden-Bauwerk-Interaktion spielen mehrere Faktoren eine Rolle, wie die Form des Baukörpers, die Art der Gründung, die Heterogenität der Bodeneigenschaften, das Geländeprofil und die Art der Belastung. Die mechanischen Eigenschaften des Baugrundes sind infolge der Schichtung, seiner plastischen Eigenschaften, des veränderlichen Grundwasserstandes und anderer Parameter auch schwer zu erfassen.

Für die Analyse der Boden-Bauwerk-Interaktion werden in der Praxis mehrere Modelle verwendet. Stellvertretend seien das Bettungszahlmodell nach Winkler, das Kugelstumpfmmodell nach Wolf und das Wolf, das Somaini Modell, ein semiempirisches Modell, das für die Berechnung mit dem Zeitverlaufsverfahren geeignet ist, genannt.

9 Brücken mit seismischer Isolation

In stark erdbebengefährdeten Gebieten ist es häufig wirtschaftlicher, zusätzliche Mechanismen zur Energiedissipation einzubauen. Hierfür kommen spezielle Brückenlager – Erdbebenvorrichtungen zum Einsatz, die durch starke Verformungen Energie dissipieren können. Da Deutschland nicht zu diesen Gebieten gehören, wird es im folgendem Kapitel nur ein informativer Überblick über diese Systeme dargestellt.

9.1 Basisisolierte Systeme

Mit einer Basisisolierung wird versucht, das Bauwerk vom Untergrund zu entkoppeln. Die konsequenteste Basisisolierung wäre eine reibungsfreie Rollenlagerung. Sie ist technisch unrealistisch, müssen doch Windkräfte, Bremskräfte etc. abgetragen werden. Die verbreitete Form der Basisisolierung ist die Lagerung auf Elastomerkissen.

In der Regel wird als Rohstoff für Elastomerlager Naturkautschuk verwendet, sowie synthetischer Kautschuk, auch als Neoprene bekannt. Es werden Füllstoffe und Additive beigemischt. Die Dämpfungskapazität wird stark vom Rußanteil bestimmt. Das Lager besteht aus Elastomerschichten, Bewehrungsblechen und zwei äußeren Stahlplatten zur Verankerung. Die Körper sind rund oder rechteckig und mit einvulkanisierten Stahlplatten bewehrt. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 8 dargestellt.

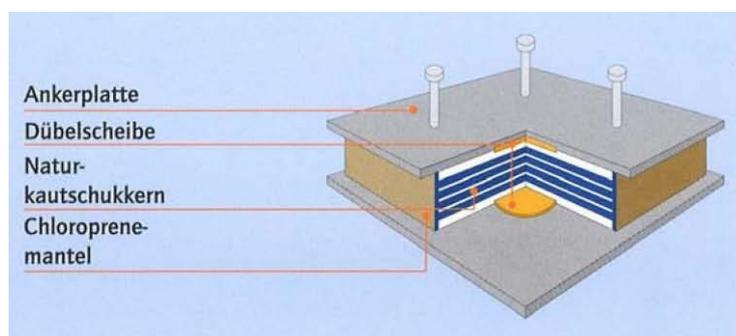


Bild 8: Aufbau des Elastomerlagers der Firma Maurer Söhne

Bei kleinen Verformungen durch Einwirkungen von Wind, Temperatur und Bremslasten ist die Steifigkeit hoch. Bei großen Verformungen infolge von Starkbeben fällt die Steifigkeit ab. Die Grundschwingzeit, der auf Elastomerlager aufgelagerten Struktur mit unterschiedlicher Dämpfung ξ , wird in Richtung eines geringeren Energiehalts verschoben (Bild 9).

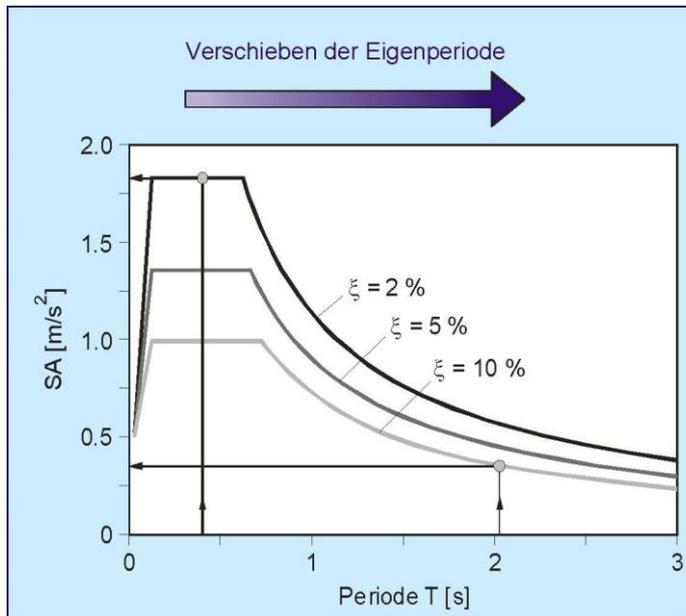


Bild 9: Grundprinzip einer seismischen Basisisolierung

9.2 Hochdämpfende Elastomere

Das Dämpfungsvermögen kann durch spezielle Elastormischungen gesteigert werden. Diese sind in der Praxis als „High Damping Rubber“ bekannt. Bei einer Verzerrung von 100% werden Dämpfungsraten $\xi = 0.10$ bis 0.20 erreicht. Beim normalen Elastomer, liegt ξ im Bereich 0.04 bis 0.06 . Die Abhängigkeit der Horizontalkraft vom Schubmodul $\tan \gamma$ mit der zugehörigen Hysterese eines hochdämpfenden Elastomerlagers aus den Versuchen [2], die am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie in Karlsruhe durchgeführt wurden, ist im Bild 10 dargestellt.

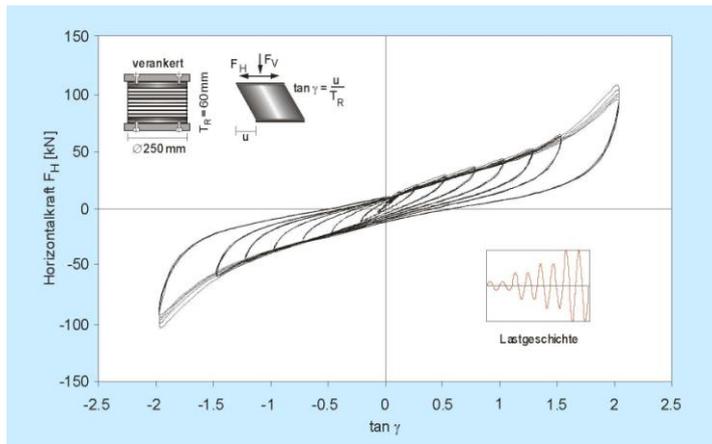


Bild 10: Scherversuch an einem verankerten Lager [11]

Ein direkter Vergleich zwischen dem Bemessungsniveau und den Versuchsergebnissen ist im Bild 11 zu sehen. Hierbei ist eine große Reserve festzustellen. Normalerweise erfolgt die Bemessung der Lager für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß der Normen DIN 4141-14 und EN 1337-1.

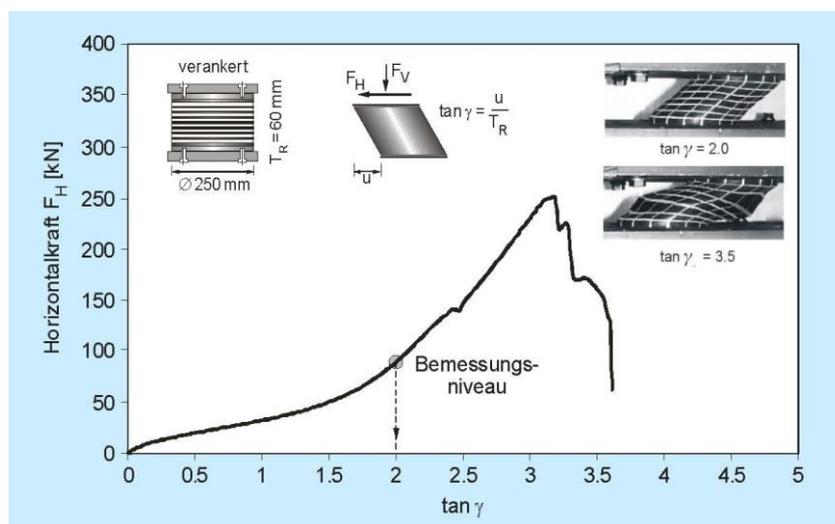


Bild 11: Verformungsverhalten bis zum Bruchversagen nach [10]

9.3 Weitere Erdbebenvorrichtungen

Zum Schutz der Brücken vor Schäden infolge von Erdbeben werden außer hochdämpfende Elastomerlager, die zu den Isolatoren gehören, weitere Erdbebenvorrichtungen angewandt. Brückenlager und Erdbebenvorrichtungen dienen zur Verstärkung und Isolierung der Brücke

sowie zur Dissipation von Energie. Folgende Erdbebenvorrichtungen nach CEN/TC 340 [8], [7], [3], [13] werden unterschieden:

- Starre Verbindungen
- Lineare Vorrichtungen
- Nicht lineare Vorrichtungen
- Viskose Dämpfer
- Isolatoren

Die Erdbebenvorrichtungen im Brückenbau können mit einer einfachen Klassifikation produktorientiert auf folgende Weise unterteilt werden:

- Hochdämpfende Elastomerlager
- Hysteretische Dämpfer
- Hydraulische Dämpfer
- Viskose Dämpfer
- Shock Transmission Units

Werden nur dissipierende Eigenschaften der Erdbebenvorrichtungen gefordert, kommen hysteretische und hydraulische Dämpfer zum Einsatz. Die hysteretischen Dämpfer sind so konzipiert, dass sie sich bei Erdbeben plastisch verformen, womit eine hohe Dissipation einhergeht. Ein solches System zeigt das Bild 12. In Längsrichtung sind Vermittler sog. Shock-Transmitter angeordnet, die eine langsame Bewegung zwangsfrei zulassen. Bei stoßartiger Bewegung blockieren sie, die Dämpfer werden aktiviert. Die hysteretischen Dämpfer können in Verbindung mit Topf-, Kalotten- oder Elastomerlagern verwendet werden.



Bild 12: Hysteretischer Dämpfer gemäß [9]

Die stählernen Elemente von Stahl-Hysterese-Dämpfern verformen sich bei einem starken Erdbeben plastisch. Im Bild 13 ist ein Dämpfer in der Aufsicht im Urzustand und im extremen Verschiebungszustand gezeigt. Die Dissipationskapazität ist hoch, wie das Kraft-Verschiebungsdiagramm zeigt.

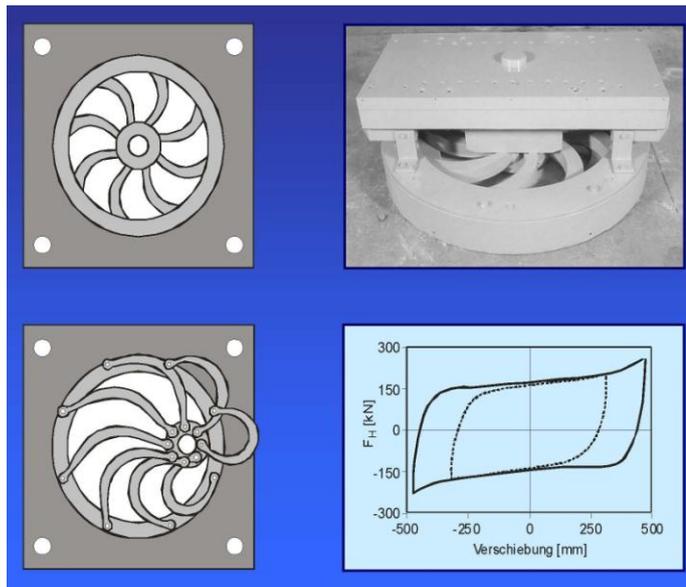


Bild 13: Stahl-Hysterese-Dämpfer gemäß [9]

Starre Verbindungen werden häufig als Shock Transmission Units (STU) bezeichnet. Shock-Transmitter sind hydraulische Vorrichtungen, die bei schneller Bewegung blockieren und damit eine starre Verbindung zwischen Überbau und Untergrund gewährleisten. Langsame Bewegungen jedoch lassen sie nahezu widerstandslos zu.

10 Zusammenfassung

Seit der Einführung der EN 1998-2:2005 liegt erstmalig eine Vorschrift für die Auslegung von Brücken gegen Erdbeben in Deutschland vor. Dieses Regelwerk ist sehr umfangreich und wurde in erster Linie für die Neuauslegung von Brücken in europäischen Gebieten mit hoher Seismizität konzipiert. Der Teil 2 des EC8 kann jedoch nur in Verbindung mit den anderen Teilen, insbesondere dem Teil 1 und Teil 5 verwendet werden. Nationale Bezüge und Anwendungsdokumente hierzu fehlen jedoch noch. Auf die deutsche Erdbebennorm DIN 4149:2005-04 kann in diesem Zusammenhang nur hilfsweise mit großen Einschränkungen Bezug genommen werden. Bis auf weiteres bleibt für die praktische Anwendung nur die Festlegung im Einzelfall in Abstimmung mit Bauherrn Behörden und Planern. Hier kann der Eurocodes 8 vorerst nur als Orientierung dienen. Dies gilt insbesondere für die Nachbewertung bestehender Brücken.

11 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 4149:2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten
- [2] DIN EN 1998-1:2004-11: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkung und Regeln für Hochbauten
- [3] ENV 1998-2:1998-07: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Teil 2: Brücken
- [4] EN 1998-2:2005-11: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges
- [5] DIN EN 1998-5:2006-03: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte
- [6] DIN Fachbericht 101 – Einwirkung auf Brücken. Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [7] Braun, C.: Die Brückenausrüstung von Brücken. Stahlbau 2001, Heft 8, S. 532–539
- [8] CEN/TC: 2004-09: Anti-Seismic Devices
- [9] Marioni, A.: Innovative Anti-seismic Device for Bridges. Aktuelle Probleme der Brückendynamik. D-A-CH-Tagung 2003, Dok. D 0198. Zürich: SIA 2003, S. 89-100
- [10] Eibl, J, Hehn, K.-H., Baur, M., Böhm, M., Schmidt-Hurtienne, B.: Detailed numerical model of bearings. Brite-EURam II Project BE 7010, Technical Report No. 6. University of Karlsruhe, Germany 1996
- [11] Baur, M.: Elastomerlager und nichtlineare Standorteffekte bei Erdbebeneinwirkung. Dissertation Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe 2003
- [12] Fäcke, A.: Numerische Simulation des Schädigungsverhaltens von Brückenpfeilern aus Stahlbeton unter Erdbebenlasten. Dissertation Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe 2005
- [13] Petersen, C: Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau. Fa. Maurer Söhne, München, 2001
- [14] Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges. New York: John Wiley & Sons, 1996
- [15] Hartmann, H.G.: Pfahlgruppen in geschichtetem Boden unter horizontaler dynamischer Belastung. Mitteilung des Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 26, April 1986
- [16] Bachmann, Hugo: Erdbebensicherung von Bauwerken. 2., überarbeitete Auflage. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2002.
- [17] Bachmann, H.: Neue Tendenzen im Erdbebeningenieurwesen. Beton- und Stahlbetonbau 99, 2004, Heft 5, pp. 356-371.
- [18] Müller, F.P., Keintzel, E.: „Erdbebensicherung von Hochbauten“. Berlin: Ernst, Verlag für Architektur und techn. Wiss., 1984.
- [19] Eibl, J., Henseleit, O., Schlüter, F.-H.: Baudynamik. Betonkalender 1988. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1988.
- [20] Meskouris, K., Hinzen, K.-G.: Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2003.

- [21] Meskouris, Brüstle, Schlüter: Die Neufassung der Norm DIN 4149. Der Bauingenieur 79, 2004. Berlin: Springer Verlag, 2004.
- [22] Schlüter, F.-H.: Die neue DIN 4149 "Bauten in deutschen Erdbebengebieten" — Hintergründe, praktische Anwendung im Stahlbetonbau, erste Erfahrungen. Massivbauseminar Fachhochschule Biberach. Biberach, 2006.
- [23] Schlüter, F.-H.: Auslegung von Betonbauten. TWTH-LBB/Uni Köln/DIN Gemeinschaftstagung "Erdbebensicheres Bauen – Hilfestellung für die Anwendung der neuen DIN 4149". Köln, 2006.
- [24] Schlüter, F.-H.: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben nach neuer DIN 4149 – Praktische Umsetzung. Beitrag 50. Ulmer Betontage. Ulm, 2006