

# Korrelation von Erdbebenbeschleunigung und der Antwort von schwingungs isolierten Brücken

Mario Rinke

*Whitbybird Ltd., London, UK*

**ZUSAMMENFASSUNG:** In diesem Beitrag wird die seismische Antwort von erdbebenisolierten Brücken untersucht, die mit Bleikern-Elastomerlagern (LRB) oder Topfgleitlager (FPS) ausgestattet sind und unterschiedlich starken Erdbeben ausgesetzt werden. Das Materialgesetz dieser Isolierungssysteme wird als bilineare Funktion berücksichtigt. Das Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss der seismischen Isolierung auf die Maximalantwort von Brücken zu bewerten, die Bodenbeschleunigungen von 0,05g bis 0,5g in Horizontalrichtung quer zur Brückenachse ausgesetzt sind. Dadurch kann ein gewisses Effektivitätsmaß aufgezeigt werden in Abhängigkeit von der speziellen Lagermodifikation. Außerdem wird der Einfluss der Unterbausteifigkeit (Stützensteifigkeit, Stützenanordnung) auf die Effektivität der Isolatoren genauer untersucht. Die Bestimmung der Erdbebenantwort im Finiten Elemente Modell der isolierten Mehrfeldträgerbrücken wird durch die schrittweise inkrementelle Lösung der fundamentalen Bewegungsgleichung erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Dimensionierung der Isolierungssysteme entscheidenden Einfluss auf die Erdbebenantwort der isolierten Brücken hat. Die Effektivität der untersuchten LRB war bei schwacher seismischer Aktivität verhältnismäßig kleiner, da der Bleikern noch im elastischen Bereich bleibt, während die FPS sogar eine unzureichende Effektivität für kleine Erdbeben zeigen. Das LRB kann hier noch keine hysteretische Dämpfung beitragen, was jedoch eigentlich aus Planersicht sein großer Nutzen wäre. Bei schwacher Seismizität kann die durch das FPS übertragene Kraft kaum die Reibungskraft überwinden, und so reagiert das Lager fast wie eine feste Verbindung. Steifere Strukturen tendieren dazu, die Effektivität der Isolatoren positiv zu beeinflussen und zeigen generell ein günstigeres Verhalten im Bereich der geringen Dämpfung.

## 1. EINLEITUNG

Über die Kontrolle von Strukturen zur Verbesserung ihres Erdbebenverhaltens wurde schon vor mehr als einem Jahrhundert nachgedacht. Jedoch gelang es erst in den letzten 30 Jahren, Tragwerke mit Systemen auszustatten, die sie gegen Erdbeben wirksam schützen. Heute reichen diese Systeme von einfachen passiven bis hin zu voll aktiven Anlagen. Wesentliche Entwicklungen in Theorie, Hardware, Dimensionierung und der Einrichtung dieser Systeme haben entscheidende Anwendungen bei Gebäuden, Brücken und Industriebauwerken ermöglicht. Ihre Anwendung ist daher in allen seismisch

gefährdeten Ländern überall auf der Welt zu finden, allen voran in Italien, Japan, Neuseeland und den USA. Jedoch gibt es Hindernisse in der Einsatzmöglichkeit von passiven Systemen, die genauere Untersuchungen notwendig machen. So gibt es noch Ungewissheiten bei der Erdbebenantwort im Bereich von aktiven Störzonen, ein noch nicht optimales Verhalten von passiven Systemen bei sowohl schwachen als auch starken Beben und ungenaue Erkenntnisse über die Versagensgrenze in unerwartet starken Erdbebenfällen. Diese Studie soll zu einem besseren Verständnis vom Verhalten von passiven Isolationssystemen bei unterschiedlich starken Erdbeben beitragen.

In der Vergangenheit gab es verschiedene analytische Untersuchungen, um die Effektivität von Isolierungssystemen für die erdbebensichere Bemessung von Brücken zu demonstrieren. Li (1989) entwickelte eine Methode zur optimalen Bemessung von Brückenisolierungssystemen mit hysteretischen Dämpfern. Er schloss daraus, dass hysteretische Dämpfer umso effektiver funktionieren, je steifer der Brückenunterbau ist, an den sie befestigt werden. Ihre Effektivität nimmt daher ab, wenn die Flexibilität des Unterbaus zunimmt. Darüber hinaus stellt er fest, dass je größer die mögliche Isolatorverformbarkeit ist, desto effektiver ist das Isolationssystem.

Iemura et. al. (1998) hat demonstriert, dass eine entsprechende inelastische Bemessungsmethode benötigt wird, wenn Erdbebenisolationssysteme installiert werden. Es wird eine Bemessungsprozedur für isolierte Brücken vorgeschlagen, die sich auf das Verhältnis der Energiedissipation von Isolationssystem und Stützen bezieht.

Es wurden auch Parameterstudien durchgeführt, um die optimalen Eigenschaften von seismisch isolierten Strukturen zu ermitteln. Diese Parameter umfassten meistens die Zeitperiode des Brückenüberbaus und die Zeitperiode, Dämpfungseigenschaften und Streckgrenze des Isolators, sowie das Verhältnis der vorherrschenden Anregungsfrequenz zur Frequenz des Isolators.

Ghobarah (1988) untersuchte die seismische Antwort von Ein- und Zweifeldträgerbrücken mit LRB, die als bilineare Federn modelliert wurden. Der Einfluss von Parametern wie die Isolatorsteifigkeit, die Stützensteifigkeit und die Stützenexzentrizität auf die Effektivität von seismischer Isolation wurde untersucht. Ghobarah und Ali (1988) betrachteten den Effekt der Brückendecksteifigkeit bei der Erdbebenantwort.

Reinhorn et. al. (1998) überprüfte den Effekt der Variation der Fließgrenzenrelation von Isolator und Stützen auf die Antwort von isolierten Brücken. Es konnte festgestellt werden, dass isolierte Brücken wegen der geringen Redundanz im System und der dominierenden Frequenz des Decks sehr sensitiv gegenüber der Charakteristik von Bodenbeschleunigung sind.

Kawashima und Shoji (1998) präsentierten eine Untersuchung über die Interaktion mit Schwerpunkt auf die Fließgrenze des Isolators. Es konnte herausgefunden werden, dass die Steifigkeit im plastischen Bereich und die Fließgrenze wichtig sind, um die nichtlineare Antwort der Stützen vorherzusagen.

Koh et. al. (2000) entwickelte eine Methode, die Wirtschaftlichkeit von Erdbebenisolationen für Brücken in schwachen und moderaten seismischen Regionen zu bestimmen. Damit sollte die minimale Lebensdauer von seismisch isolierten Brücken unter spezifischen Beschleunigungsstärken bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erdbebenisolierung in schwachen und moderaten Erdbebengebieten wirtschaftlicher ist als in Regionen mit starken Beben.

## 2. BERECHNUNGSMETHODE

Da das inelastische Verhalten der Lager im Mittelpunkt steht, muss die entsprechende Lagerreaktion auf die seismische Last zu jeder Zeit der Erdbebenbelastung gemessen werden. Zum Zwecke der inelastischen dynamischen Analyse wurde deshalb das Zeitschrittverfahren gewählt. Es bietet realistische Messergebnisse, da das inelastische Modell auch interne Kraftumlagerungen wegen des nichtlinearen Kraft-Verformungsverhaltens berücksichtigt. Nichtlineare Dämpfung wird genauso berücksichtigt wie nichtlineare Steifigkeiten und das Last-Verformungsverhalten der Tragglieder.

Für die nichtlineare dynamische Analyse ist die schrittweise Integration die mächtigste und wirkungsvollste Methode. Die wichtigste Annahme ist, dass die Beschleunigung linear variiert, während die Systemeigenschaften wie Dämpfung und Steifigkeit während des Zeitintervalls konstant bleiben. Ein nichtlineares System wird hierbei als eine Serie von linearen Systemen angenommen abgeschätzt. Die Antwort wird dann für eine Serie von kleinen Intervallen der Zeit  $\Delta t$  und dem Gleichgewicht zu Beginn und am Ende jedes Intervalls hergestellt. Die Genauigkeit der Methode hängt stark von der Länge des Zeitinkrements  $\Delta t$  ab. Es sollte klein genug sein, um die Veränderung der Last  $p(t)$ , der nichtlinearen Dämpfung, der Steifigkeitseigenschaften und der Eigenperiode zu berücksichtigen.

Die Eigenschaften eines Einmassenschwingers sind die beteiligten Kräfte, Feder- und Dämpfungskraft, die Massenkraft und jede beliebige andere Kraft, die auf das System wirkt. Das Kräftegleichgewicht kann dargestellt werden als:

$$f_i(t) + f_d(t) + f_s(t) = p(t) \quad (1)$$

wobei  $f_i(t)$  die Kraft ist, die auf die Masse wirkt, und  $f_s(t)$  die Federkraft bzw.  $f_d(t)$  die Dämpfungskraft ist.

$$m\Delta\ddot{u}(t) + c(t)\Delta\dot{u}(t) + k(t)\Delta u(t) = \Delta p(t) \quad (2)$$

Die aktuelle Dämpfung  $f_d(t)$  und elastischen Kräfte  $f_s(t)$  werden dann mithilfe der Ausgangsgeschwindigkeit  $\dot{u}(t)$ , der Verschiebung  $u(t)$ , den nichtlinearen Eigenschaften des Systems, der Dämpfung  $c(t)$  und der Steifigkeit  $k(t)$  für das Intervall berechnet.

Zu Beginn jedes Zeitschritts werden die neuen Struktureigenschaften auf der Grundlage des deformierten Zustandes berechnet. Die vollständige Antwort wird dann mithilfe der Verschiebungen und Geschwindigkeiten, die am Ende eines jeden Zeitschritts berechnet wurden, als Anfangsbedingungen des nächsten Zeitintervalls ermittelt bis eine gewünschte Endzeit erreicht wird.

Allgemein dargestellt heißt das

$$\begin{bmatrix} K & K_R \\ K_R^T & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ U_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ F_R \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Der Index R steht dabei für die Reaktionskräfte. Die obere Hälfte der Gleichung (3) wird benutzt um nach  $\{U\}$  aufzulösen.

$$\{U\} = -[K]^{-1} [K_R] \{U_R\} + [K]^{-1} \{F\} \quad (4)$$

Die Reaktionskräfte  $\{F_R\}$  werden mit der unteren Hälfte der Gleichung berechnet.

$$\{F_R\} = [K_R]^T \{U\} + [K_{RR}] \{U_R\} \quad (5)$$

Die Gleichungen (4) und (5) müssen dabei miteinander im Gleichgewicht stehen.

### 3. ENTWICKLUNG DES MODELLS

#### 3.1 MODELLKONFIGURATIONEN

Um die Auswirkungen der Brückengeometrie in Längsrichtung (symmetrisch und asymmetrisch) und der Unterbausteifigkeit systematisch zu untersuchen und die Ergebnisse mit denen von nicht isolierten Brücken zu vergleichen wurden sechs verschiedene Brückentypen entwickelt. Alle Brücken sind einfache sechsfeldrige Balkenbrücken und als Durchlaufträger ausgebildet. Sie besitzen Brückenpfeiler aus Stahlbeton und vorgespannte Hohlkastenträger. Das Isolierungskonzept wird durch besondere Brückenlager zwischen Stützenkopf und Brückenträger realisiert. Die Brücken werden am Stützenfuß als fest eingespannt betrachtet und an den Widerlagern in alle Richtungen festgehalten. Die Brückentypen sind wie folgt:

1. Regelmäßige Brücke. Symmetrische Geometrie in Längsrichtung, harmonisch variierende Pfeilerlängen wie in Abbildung 1 zu sehen
2. Regelmäßige Brücke mit doppelter Stützensteifigkeit. Wie Typ 1, aber die Stützen haben doppeltes Flächenträgheitsmoment für beide Richtungen
3. Regelmäßige Brücke ohne Isolierung. Wie Typ 1, aber mit fester Verbindung zwischen Stützen und Brückenträger
4. Unregelmäßige Brücke. Asymmetrische Geometrie in Längsrichtung, unproportional variierende Pfeilerlängen wie in Abbildung 1 zu sehen
5. Unregelmäßige Brücke mit doppelter Stützensteifigkeit. Wie Typ 4, aber die Stützen haben doppeltes Flächenträgheitsmoment für beide Richtungen
6. Unregelmäßige Brücke ohne Isolierung. Wie Typ 4, aber mit fester Verbindung zwischen Stützen und Brückenträger

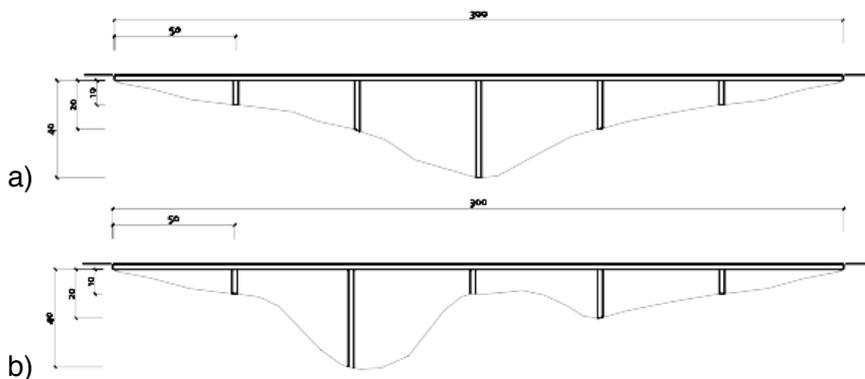


Abbildung 1: Längsschnitt der regelmäßigen (a) und unregelmäßigen (b) Brücke

Tabelle 1: Geometrische und physikalische Eigenschaften der Brücken

	<i>Deck</i>	<i>Pier</i>	<i>Modif. Pier</i>
<i>Querschnittsfläche (m<sup>2</sup>)</i>	6,88	4,16	4,16
<i>Flächenträgheitsmoment x/y (m<sup>4</sup>)</i>	87,24	7,39	14,78
<i>Flächenträgheitsmoment z (m<sup>4</sup>)</i>	5,26	0,67	1,34
<i>Max. Dimensionen (m)</i>	14 x 2,30	4 x 2,20	4,90 x 2,50
<i>Massendichte (kg/m<sup>3</sup>)</i>	2500	2500	2500

### 3.2 MATERIALVERHALTEN DER LAGER

Für die vorliegende Studie wurden Bleikernlager und Topfgleitlager als Isolationssysteme verwendet. Bleikernlager sind Elastomerlager mit horizontal eingebauten Stahlplatten mit einem eingesetzten Bleikernzylinder in der Mitte. Bei einem Topfgleitlager gleitet ein Stahlstempel auf einer konkav gekrümmten rotationssymmetrischen Stahlfläche.

Da die vertikale Steifigkeit der beiden Lager sehr groß ist wird sie als unendlich hoch angenommen, d.h. es wird keine relative Verschiebung zwischen Stützenkopf und Brückenträger zugelassen. Die Horizontalsteifigkeit ist neben dem Dämpfungsgrad die eigentliche Systemeigenschaft der Lager. Sie steuert entscheidend die Isolierung des Brückenträgers.

Die horizontale Lagersteifigkeit wird durch ein bilineares Materialgesetz abgebildet, das für jedes der beiden Isolationssysteme eine diskrete Trennung von elastischen und postelastischen Materialzustand erlaubt. Das Dämpfungsverhältnis für Elastomerlager liegt für gewöhnlich im Bereich zwischen 5 und 8 % und wird hier mit 7% festgelegt. Das Topfgleitlager liefert eigentlich keine nennenswerte viskose Dämpfung, weshalb sie hier zu 2% gesetzt wird. Die Dämpfung der globalen Struktur bei einem ungedämpften System wird häufig mit 5% angesetzt. Für diese Studie wird nur 1,5% globale Dämpfung gewählt, da anders als in einem typisch ungedämpften System isolierte Strukturen so bemessen werden, dass ihre Tragglieder möglichst im elastischen Bereich bleiben und so auch weniger Energie während eines Erdbebens dissipieren. Die Grenzkraft bei der Fließgrenze des Bleikernlagers wird mithilfe eines gesetzten Verhältnisses von Fließgrenze/Brückenträrgewicht = 0.1 ermittelt. Für typische Erdbebengeschwindigkeiten und typische Drücke bei Brückenlagern wird bei Topfgleitlager ein Reibungskoeffizient von 0.06 angesetzt, weshalb die Grenzkraft 0.3 MN ergibt.

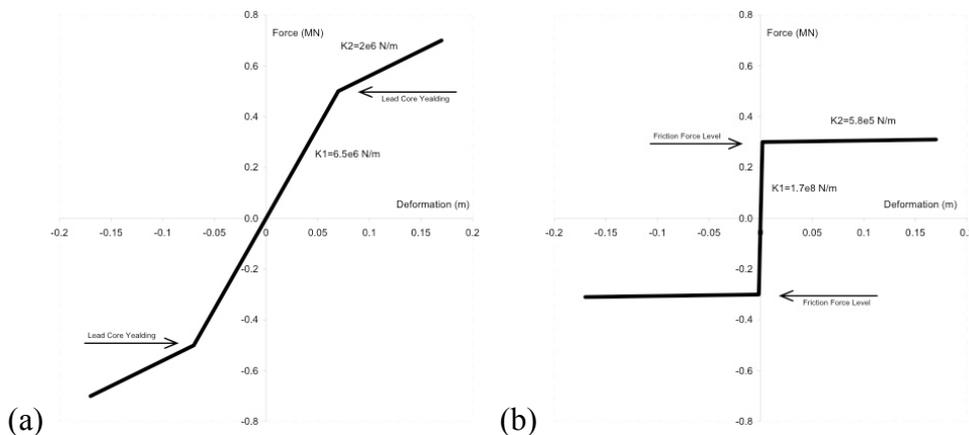


Abbildung 2: Materialgesetze für Bleikernlager (a) und Topfgleitlager (b)

### 3.3 FINITE ELEMENTE MODELL

Für die Analyse der sechs Brückentypen unter dynamischen Lasten wird ein einfaches Finite Elemente Modell entwickelt mit dem alle gewünschten Eigenschaften abgebildet werden können. Die gewählte Software ist ANSYS (Version 10.0). Für die Pfeiler und den Brückenträger werden 3D-Balkenelemente benutzt. Jeder Knoten besitzt sechs Freiheitsgrade, eine Translation in jede Richtung und eine Rotation um jede Achse.

Die nichtlinearen Isolationssysteme werden durch spezielle Elemente repräsentiert, die eine Kombination aus zwei verschiedenen parallelen Federn und einem Dämpfer darstellen. Die Anfangssteifigkeit ist die Summe aus beiden Federsteifigkeiten, wenn beide Federn noch aktiv sind. Ist eine gewisse Federkraft (Grenzkraft) in Feder 1 erreicht, kann sie keine höhere Kraft aufnehmen. Durch die kleinere verbleibende Reststeifigkeit reagiert das System viel weicher und es kommt zu deutlich größeren Verformungen. Die Isolationssysteme haben keine Massen und in ihrem Ausgangszustand haben sie keine Länge, d.h. Anfangs- und Endknoten liegen zunächst übereinander.

Insgesamt wurden für jedes Modell 31 Elemente und 32 Knoten benutzt mit einem numerischen Gesamtumfang von 143 Freiheitsgraden (inklusive Festhaltungen). Die Berechnung berücksichtigt geometrische Nichtlinearitäten, aber keine physikalischen nichtlinearen Effekte bis auf die bilinearen Bleikernlager.

### 3.4 BODENBESCHLEUNIGUNGEN

Vier verschiedene Magnituden von Bodenbeschleunigungen werden betrachtet: 0,5g, 0,2g, 0,1g und 0,05g. Diese Bodenbeschleunigungen sind künstlich generierte Zeit-Beschleunigungs-Verläufe, die auf Beschleunigungsspektren des Eurocode 8 basieren. In Anbetracht der für gewöhnlich höheren Eigenperiode von isolierten Strukturen werden Spektren gewählt, die den Bodentyp C berücksichtigen. Dieser verschiebt das Beschleunigungsspektrum zu höheren Eigenperioden hin, die denen von isolierten Strukturen näher sind und somit die seismische Antwort deutlich beeinflussen. Für jede Erdbebenmagnitude wurden drei verschiedene Beschleunigungszeitverläufe generiert, um ein gewisses Maximum der drei Kurven mit zufälligen Spitzen jeweils sicherzustellen. Obwohl alle drei Zeitverläufe einer Magnitude immer auf einem Spektrum basieren, weichen ihre Werte um bis zu 40% voneinander ab. Um das Lastszenario und die Lastkombinationen zu vereinfachen, werden die Brücken für die Untersuchungen nur in eine Richtung beschleunigt und zwar quer zur Brückenachse.

## 4. ERGEBNISSE

### 4.1 VERGRÖßERUNG DER ANTWORTBESCHLEUNIGUNG

Die Vergrößerung der Antwortbeschleunigung gibt das Verhältnis zwischen Boden- und Antwortbeschleunigung der Struktur an. Gemessen wird die Antwort an verschiedenen Stellen des isolierten Brückenträgers. Das ermittelte Verhältnis ist ein Indikator, inwieweit die Bodenbeschleunigung tatsächlich reduziert wird und ist damit auch ein Hinweis für die Effizienz der Isolation bei einer bestimmten Magnitude. Abbildungen 3 und 4 geben einen Überblick über dieses Verhältnis für beide

Isolationssysteme. Zum Vergleich zeigt Abbildung 5 dieses Verhältnis für die nicht isolierten Brücken.

Es kann hierbei festgestellt werden, dass das generelle Verhalten aller Brücken innerhalb eines Isolationskonzeptes sehr ähnlich ist. Während die mit Bleikernlager isolierten Brücken im Verlaufe der verschiedenen Magnituden eher linear reagieren, kann man bei den Topfgleitlagern stark nichtlineare Reaktionen beobachten mit starkem Anstieg im Bereich niedriger Magnituden und viel kleineren Änderungen bei starken Beschleunigungen.

Die niedrigen Magnituden bis 0,1g sind in gewisser Weise charakteristisch für beide Brückengeometrien. Bis hierhin gibt es keine relevanten Änderungen im Verhältnis der Antwort- zur Bodenbeschleunigung bei den mit Bleikernlagern isolierten Brücken. Für die Topfgleitlagerbrücken gibt es bei niedrigen Magnituden bis 0,1g immer Verstärkungen der Beschleunigungen. Erst bei größeren Beschleunigungen wird eine Verringerung beobachtet, die bei 0,5g sogar ein Verhältnis von 0,3 erreicht. Bei den Bleikernlagern wird bei der größten Magnitude durchschnittlich ein Verhältnis der Beschleunigungen von 0,5 erreicht.

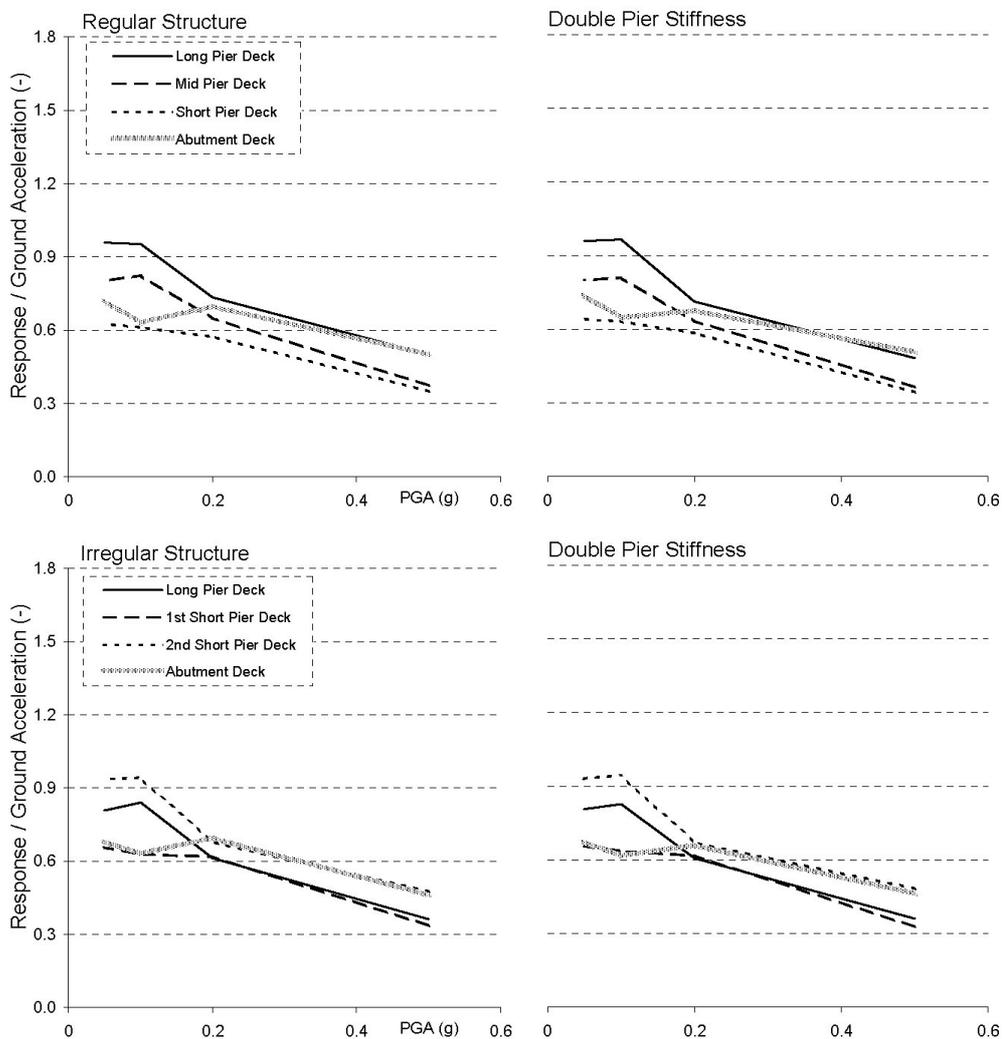


Abbildung 3: Verhältnis Antwort-/Bodenbeschleunigung für das Bleikernlager

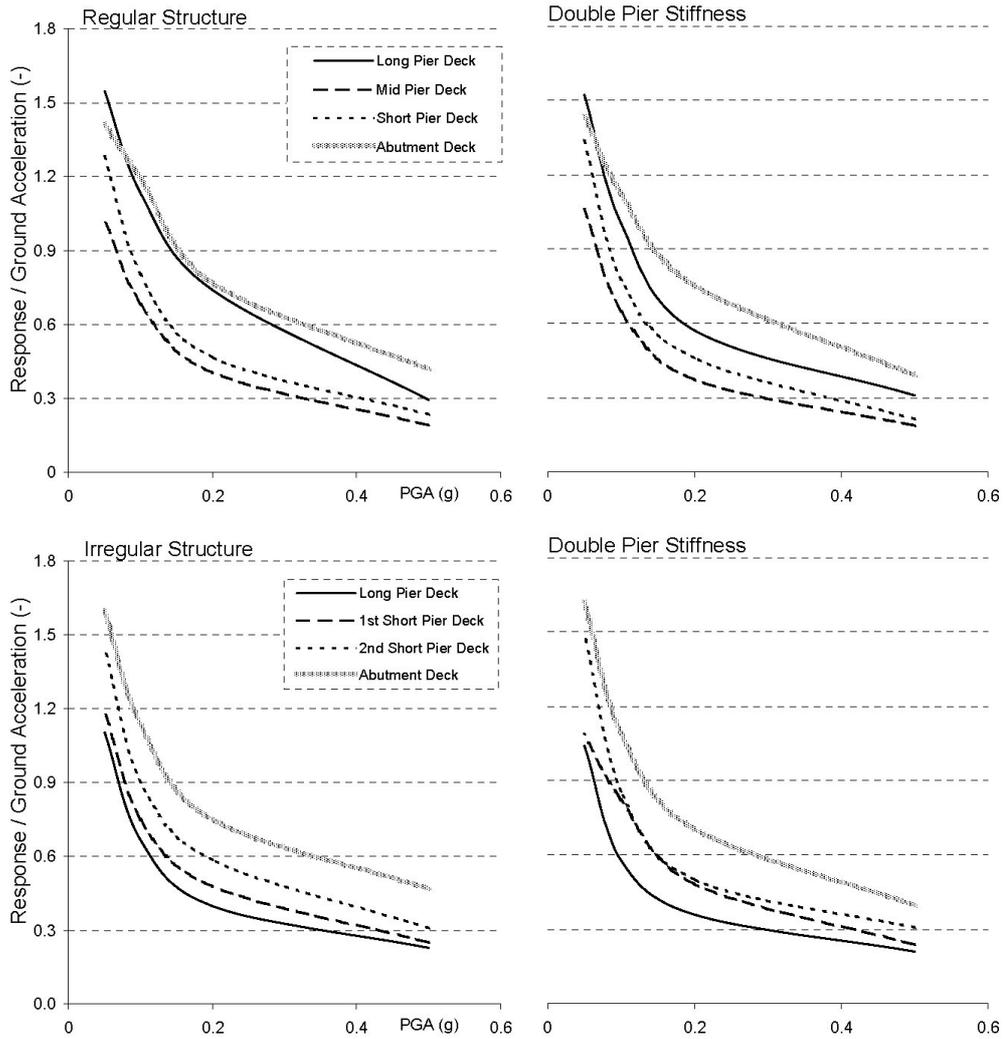


Abbildung 4: Verhältnis Antwort-/Bodenbeschleunigung für das Topfgleitlager

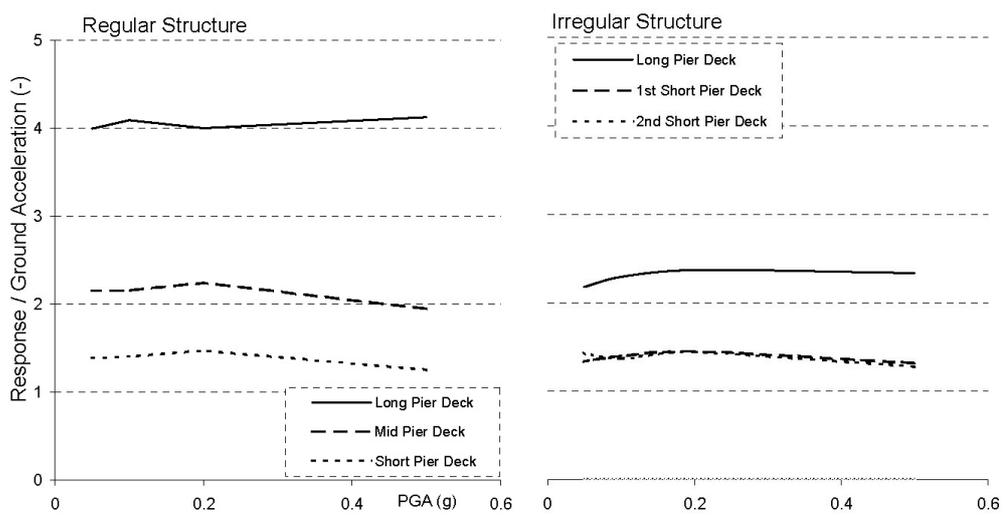


Abbildung 5: Verhältnis Antwort-/Bodenbeschleunigung ohne Isolierung

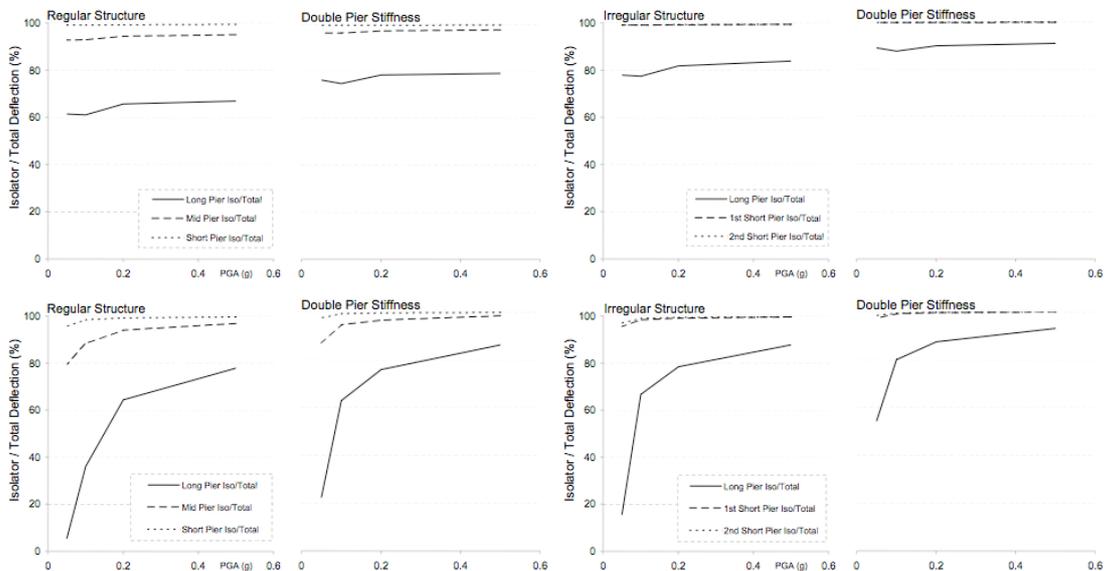
Im Vergleich mit den nicht isolierten Brücken (Abbildung 7) erkennt man deutlich den Effekt der Isolierung. Die Antwort des nicht isolierten Brückenträgers ist über der kürzesten Stütze mindestens 140% der Bodenbeschleunigung und erreicht sein Maximum über der längsten Stütze von 250% bzw. 420% für die unregelmäßige bzw. regelmäßige Brücke. Ohne Dämpfung, abgesehen von der globalen Dämpfung der Gesamtstruktur, gibt es keine weitere Reduzierung des Beschleunigungsverhältnisses, d.h. das Verhältnis von Antwort- zu Bodenbeschleunigung ist nahezu konstant für alle Magnituden.

Die logische Schlussfolgerung die aus diesen Ergebnissen abgeleitet werden kann, ist, dass keine nennenswerte Reduzierung der Antwort im elastischen Bereich des Bleikernlagers stattfindet bzw. sogar eine Verstärkung der Beschleunigung beim Topfgleitlager bei niedrigen Beschleunigungen, wenn es noch nicht durchweg gleitet. Sobald hysteretische Dämpfung durch das Lager beigetragen werden kann, also sobald die Reibungskraft beim Topfgleitlager überwunden ist und ein permanentes Gleiten stattfindet bzw. der Bleikern permanent plastifiziert, ist die Isolierung deutlich effektiver (stärkere Reduzierung der Beschleunigung).

## 4.2 VERFORMUNGSANTEIL DER ISOLIERUNG

Direkt abgeleitet von den Verformungsergebnissen wurde das Verhältnis von Isolator- zu Gesamtverformung an einer jeweiligen Stütze, was einen konkreten Hinweis auf die lokale Wirkung der Isolierung geben soll. Die ermittelten Verhältnisse können in Abbildung 6 abgelesen werden.

Prinzipiell gibt das Verhältnis Auskunft für die Effizienz eines bestimmten Isolators für eine gegebene Stützenkonfiguration. Ein übliches Bemessungsprinzip wäre normalerweise die individuelle Abstimmung der Isolatorsteifigkeit, um ein ähnliches Verhältnis von Isolator- zu Stützenverformung zu erhalten. Die Diagramme zeigen eine deutlich niedrigere Beteiligung des Isolators über der längsten Stütze an der Gesamtverformung (Stütze und Isolator) bei allen Brücken. Bei den Bleikernlagern ändert sich das Verhältnis im Laufe der Magnituden kaum, wohingegen bei den Topfgleitlagern enorme Unterschiede festzustellen sind. Bei den niedrigsten Erdbebenbeschleunigungen reicht die Isolatorbeteiligung bei den Topfgleitlagern von 5 bis 53% der Gesamtverformung, während es bei den Bleikernlagern bereits mindest 62% sind.



Bei großen Bodenbeschleunigungen tragen beide Systeme ähnliche Verformungen bei. Je kürzer die Stütze unter dem Isolator und damit steifer der Unterbau an der Stelle, desto höher ist der Anteil des Isolators. Während die Isolatorenbeteiligung für beide Systeme bei den mittellangen und kurzen Stützen meist weit über 80% liegen, steigt der Anteil bei den Isolatoren über den langen Stützen etwa bei den Bleikernlagern von 80% (regelmäßig) auf 90% (unregelmäßig mit doppelter Stützensteifigkeit). Die Topfgleitlager über den langen Stützen tragen zunächst bei schwachen Bodenbeschleunigungen nur 5 bis 23%, für starke Beschleunigungen dann 18 bis 53% der Verformungen bei.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Berücksichtigung der Stützensteifigkeit und Stützenanordnung ergab nur einen geringen Einfluss auf die resultierende Antwort. Eine höhere Unterbausteifigkeit (doppelte Stützensteifigkeit, unregelmäßige Stützenlängen) führt zu einer höheren Isolatoreffizienz durch eine Reduzierung der Stützenverformung. Die unregelmäßige Stützenanordnung führt grundsätzlich zu einer Lastkonzentration bei einzelnen Stützen und ist deshalb gut geeignet für das Prinzip der Schwingungsisolierung.

Die Antwortkurven haben einen explizit bilinearen Charakter, der durch den Einfluss der hysteretischen Dämpfung und der Abnahme der Lagersteifigkeit entsteht. Es gibt keine nennenswerte Reduzierung der Antwort während die Lager im elastischen Bereich sind, also der Bleikern noch nicht fließt bzw. das Topfgleitlager noch nicht gleitet, da hier noch keine hysteretische Dämpfung beigetragen wird. Die resultierende Antwort ist bis dahin bei den Topfgleitlagern viel höher, da die Anfangssteifigkeit zunächst konstant bleibt und gar keine Dämpfung vom Lager beigetragen wird. Sobald hysteretische Dämpfung beigetragen wird, kann die Antwort deutlich reduziert werden und die Isolatoren sind wesentlich effizienter. Dieser Punkt muss deshalb möglichst bald erricht werden. Um die hohe hysteretische Dämpfung zu nutzen, aber den starken Auslenkungen entgegenzuwirken, scheint eine Kombination von Dämpfungssystemen sinnvoll.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004. AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications. GmbH, München
- Kiureghian, A. E. ; Keshishian, P. ; Hakobian, A., 1997. Multiple support response spectrum analysis of bridges including the site-response effect and the MSRS Code. In: Report No. UCB/EERC-97/02, University of California, Berkeley
- Wilson, E. L. , der Kiureghian, A., Bayom, E. P., 1981. A replacement for SSRS method in seismic analysis. In: Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics 9, S. 187
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., Seible, F., 1996. Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons, Inc.
- Naeim, F., Kelly, J. M.. 1999. Design of seismic isolated structures - From theory to practice. John Wiley & Sons, Inc.