

# Bauingenieur

Die richtungweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen



www.bauingenieur.de

## Bauwerke vor Erdbeben isoliert

*F. Weber, L. Meier, J. Distl, C. Braun*

**Gleitpendellager: Bestimmung des optimalen Reibwertes und der Einfluss von Abweichungen auf die Bauwerksbeschleunigung**



## Bauwerke vor Erdbeben isoliert

A 24



Das neue Krankenhaus in Kocaeli ist gegen Erdbeben gesichert.

Abb.: MAURER

Die Erdbebengefahr in der Türkei ist sehr hoch. Daher wurde im türkischen Gesetz festgelegt, dass alle Krankenhäuser neuerer Konstruktion erdbebenisoliert sein müssen. Dies betrifft auch das neue Krankenhaus in Kocaeli, 100 Kilometer süd-östlich von Istanbul.

Mit einem Auftragswert von circa fünf Millionen Euro machen die Isolatoren zwei Prozent der Gesamtinvestition (270 Millionen Euro) aus. Die erzielte Preisersparnis im Vergleich zu einer nicht isolierten Struktur liegt bei circa fünf Prozent der Gesamtbaukosten, was neben der erhöhten Bauwerkssicherheit auch ein Beleg für die finanzielle Rentabilität der Bauwerksisolation ist. Wie weitere Krankenhäuser wird auch dieses als PPP (Public-Private-Partnership) Modell betrieben: die türkische Firma Gama-Türkerler, eine Arbeitsgemeinschaft aus den gleichnamigen Firmen, hat das Bauwerk gebaut und wird es für 25 Jahre betreiben.

Die Lieferung zur Bauwerksisolation umfasste 1 069 MAURER Gleitpendellager SIP-D mit zwei Gleitflächen, die die Übertragung der Vertikallasten sicherstellen, wobei seitliche Bewegungen und die damit verbundene Energiedissipation erlaubt werden. Durch die Krümmung der Gleitflächen ist gewährleistet, dass die Struktur nach einem Beben wieder in die Mitte rückt. Der Schlüssel zur Stabilität der Funktion und der Dissipation ist neben einer professionellen Auslegung die Verwendung von Gleitmaterialien wie dem MAURER Sliding Material (MSM). Das Gleitmaterial



zeichnet sich durch seine Eigenschaften in Bezug auf zulässige Pressung, Temperaturbeständigkeit, Langlebigkeit und Alterung aus.

Zusätzlich zu der extrem engen Terminalschiene lag die Herausforderung des Projektes darin, zehn Prototypen und 30 Prozent aller Isolatoren auf Wunsch des Bauherrn (türkischen Gesundheitsministeriums) Versuchen zu unterziehen. Hierfür wurden vier unabhängige europäische Institute miteinbezogen. Die Time-History Analyse zur Ermittlung der seismischen Bewegungen gehörte ebenso zum Lieferumfang.

[www.maurer.eu](http://www.maurer.eu)

# Gleitpendellager: Bestimmung des optimalen Reibwertes und der Einfluss von Abweichungen auf die Bauwerksbeschleunigung

F. Weber, L. Meier, J. Distl, C. Braun

S 7

**Zusammenfassung** Die Isolationswirkung von Bauwerken gegen Erdbebenanregung mittels Gleitpendellager beruht auf zwei Effekten: Der effektive Radius der sphärischen Gleitfläche verschiebt die natürliche Schwingperiodendauer des Bauwerks in den Bereich geringerer Erdbebenanregungsenergie und die Reibdämpfung reduziert zusätzlich die Bauwerksbeschleunigungen. In der Regel wird zuerst die Isolationsperiodendauer gewählt, was den effektiven Radius ergibt, und danach werden Reibwert und Wegkapazität des Gleitpendellagers mit der Methode des elastischen Antwortspektrums so bestimmt, dass die Schubkräfte von Gleitpendellager und Bauwerk gleich sind, was jedoch nicht notwendigerweise auch die Bauwerksbeschleunigung minimiert. Dieser Aufsatz beschreibt zuerst die gesamte Menge gültiger Designs von Gleitpendellagern und das optimale Design für minimale Bauwerksbeschleunigung als Bestandteil dieser Menge. Es wird gezeigt, dass die Bauwerksbeschleunigung nicht bei maximal zulässiger effektiver Dämpfung des Gleitpendellagers minimiert ist. Der zweite Teil des Aufsatzes beschreibt quantitativ, um wie viel die Bauwerksbeschleunigung zunimmt, wenn der tatsächliche Reibwert des realen Gleitpendellagers von seinem optimalen Designwert abweicht. Die Sensitivitätsstudie zeigt, dass die Zunahme der Bauwerksbeschleunigung in etwa eine Größenordnung kleiner ist als die angenommene Abweichung des Reibwertes.

## 1 Einführung

Bauwerke mit einer Grundsichwingperiodendauer um 1 s, was häufig mit einer Bauwerkshöhe von etwa 55 m korreliert [1], liegen im Bereich höchster Anregungsenergie horizontaler Erdbeben. In diesem Anregungsbereich ist die Bauwerksbeschleunigung je nach Spektrum des Erdbebens 2,5-mal bis 4,5-mal größer als die Bodenbeschleunigung. Eine effektive Methode, das Bauwerk von der Erdbebenanregung zu entkoppeln, stellen Gleitpendellager dar. Durch ihren effektiven Radius verschieben Gleitpendellager die

Grundsichwingperiodendauer des isolierten Bauwerks zu Werten von typischerweise 3,5 s bis 4,5 s, womit die resultierende Bauwerksbeschleunigung (Antwort des 1-Massenschwingers) kleiner als die Bodenbeschleunigung (Anregung) ist [1]. Die Reibdämpfung des Gleitpendellagers, welche durch die Relativbewegung zwischen Gleiter und Gleitfläche entsteht, reduziert die Bauwerksbeschleunigung zusätzlich. Die Wirkung der Gleitpendellagerdämpfung – ob linearisiert oder nicht-linear – auf die resultierende Bauwerksbeschleunigung und Wegkapazität des Lagers wurde vielfach untersucht, wovon die Arbeiten [2], [3], [4] eine Auswahl darstellen.

Häufig werden Gleitpendellager trotz ihrer nicht-linearen Reibdämpfung mit der Methode des linearen Antwortspektrums ausgelegt [1], [5]. Basierend auf der Wahl der Isolationsperiodendauer von typischerweise 3,5 s bis 4,5 s werden Reibwert und Wegkapazität des Gleitpendellagers iterativ für gleiche Schubkräfte des Isolators und Bauwerks bestimmt. Ist die resultierende Wegkapazität groß und damit das Gleitpendellager teuer, wird die Iteration für die Wegkapazität mit einem höheren Reibwert wiederholt. Zwar resultiert aus diesem Verfahren immer ein gültiges Gleitpendellagerdesign, jedoch minimiert dieses nicht notwendigerweise auch die Bauwerksbeschleunigung, da der Fokus der Iteration auf dem Abgleich der Schubkräfte von Isolator und Bauwerk liegt.

Dieser Aufsatz beschreibt zuerst alle gültigen Gleitpendellagerdesigns als Trajektorie im Antwortspektrum, welche die optimale Lösung für minimale Bauwerksbeschleunigung beinhaltet. Der zweite Teil des Artikels befasst sich mit der Sensitivität des Reibwertes auf die Bauwerksbeschleunigung. Die Sensitivitätsstudie ist für diverse Isolationsperiodendauern und für alle horizontalen Erdbebenspektren durchgeführt. Die Resultate können vom planenden Ingenieur genutzt werden, um maximal tolerierbare Abweichungen des Reibwertes von seinem optimalen Designwert zu spezifizieren, welche immer noch zu akzeptablen Bauwerksbeschleunigung führen.

## 2 Gleitpendellager mit optimiertem Reibwert

### 2.1 Methode des linearen Antwortspektrums

Das lineare Antwortspektrum stellt die Enveloppe der maximalen Beschleunigungsantworten eines 1-Massenschwingers für diverse Werte seiner natürlichen Periodendauer  $T$  dar; die modale Dämpfung  $\zeta_s$  des 1-Massenschwingers wird dabei zu 5 % angenommen [1] (**Bild 1**). Die maximale Beschleunigung  $S_e$  des 1-Massenschwingers wird in der Regel mit der maximalen Bodenbeschleunigung  $a_g$  normiert und die Erdbebenanregung wird durch die Parameter Typ (1 oder 2) und Bodenklasse (A, B, C, D, E) spezifiziert, welche die Periodenbereiche  $T_B$  bis  $T_C$  mit konstanter Beschleunigung,  $T_C$  bis  $T_D$  mit konstanter Geschwindigkeit und  $> T_D$  mit konstanter Verschiebung bestimmen. Ist ein Bauwerk durch Gleitpendellager isoliert, so stellt die Spektrumlinie die maximale Beschleunigung der Bauwerksmasse auf dem Gleitpendellager ohne die Betrachtung der

#### Dr. Ing. Felix Weber

Entwicklungsingenieur, MAURER Switzerland GmbH  
Neptunstrasse 25, 8032 Zürich, Schweiz  
F.Weber@maurer.eu

#### Dr. Ing. Leopold Meier

Entwicklungsingenieur, MAURER ENGINEERING GmbH  
Frankfurter Ring 193, 80807 München  
L.Meier@maurer.eu

#### Dipl. Ing. Johann Distl

Leiter Entwicklung, MAURER ENGINEERING GmbH  
Frankfurter Ring 193, 80807 München  
J.Distl@maurer.eu

#### Dr. Ing. Christian Braun

Geschäftsleiter, MAURER SE  
Frankfurter Ring 193, 80807 München  
C.Braun@maurer.eu

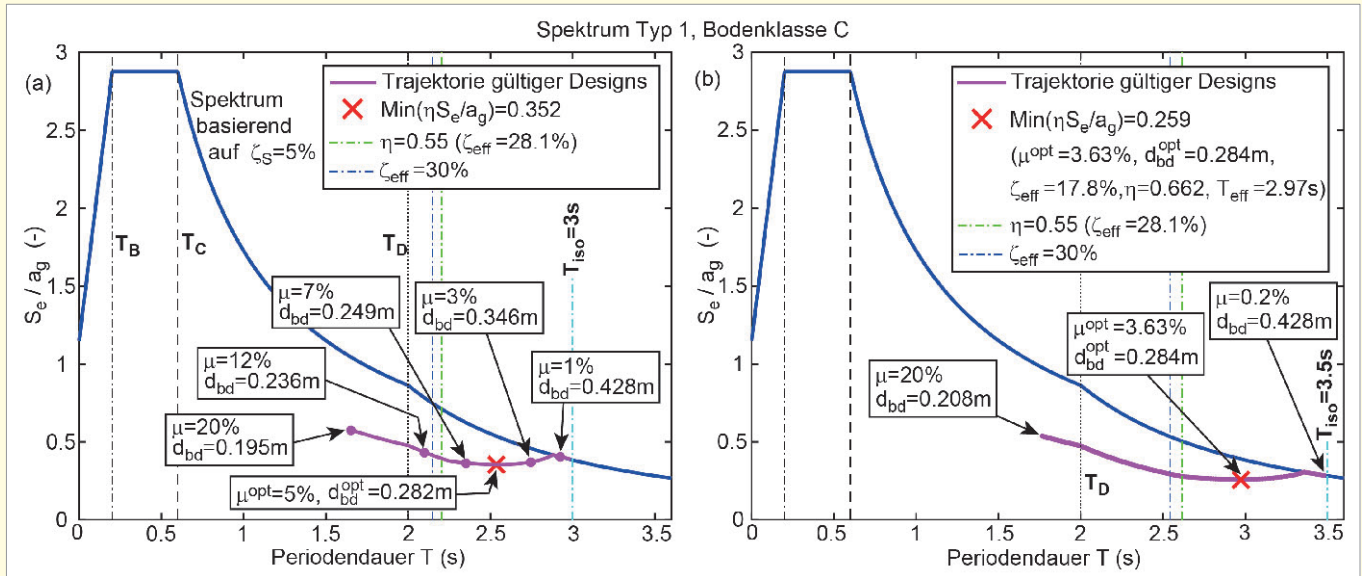


Bild 1. Gültige und optimale Gleitpendellagerdesigns für (a)  $T_{iso} = 3,0s$  und (b)  $T_{iso} = 3,5s$ .

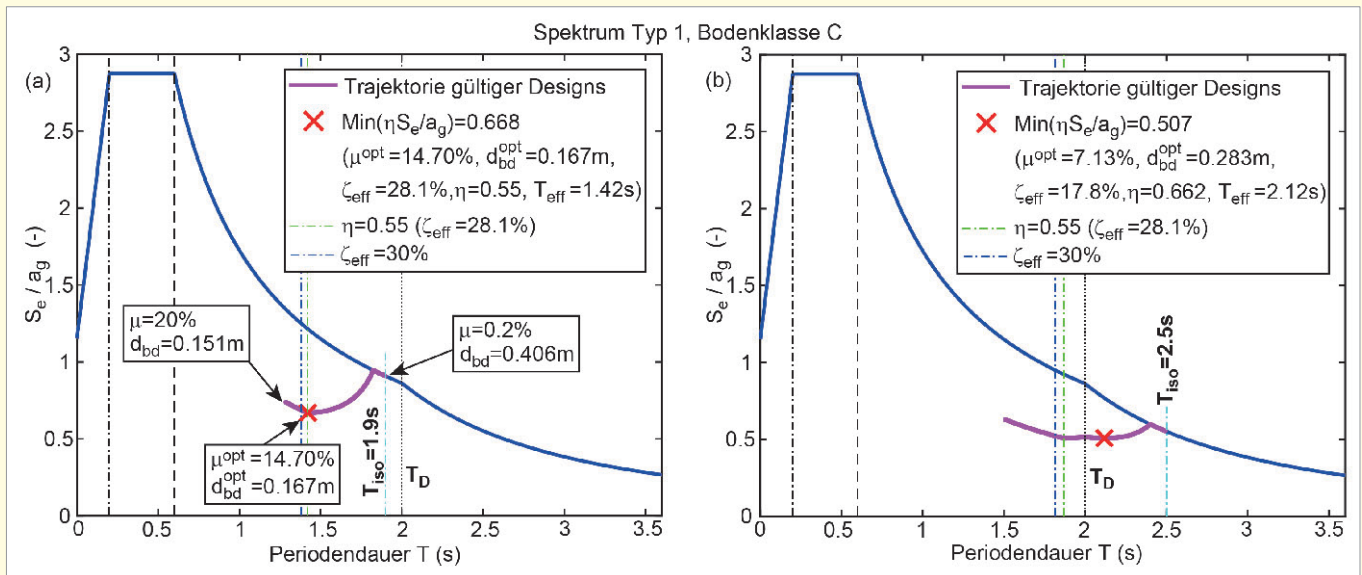


Bild 2. Gültige und optimale Gleitpendellagerdesigns für (a)  $T_{iso} = 1,9s$  und (b)  $T_{iso} = 2,5s$ .

effektiven Dämpfung durch das Gleitpendellager dar. Die Beschleunigung ist dann bei der Periodendauer der Isolationsperiodendauer  $T_{iso}$  abzulesen (Bild 1a), die den effektiven Radius  $R_{eff}$  des Gleitpendellager wie folgt bestimmt

$$R_{eff} = g(T_{iso}/(2\pi))^2 \quad (1)$$

Üblicherweise wird  $T_{iso} > T_D$  angesetzt, damit die Beschleunigungsantwort bezogen auf die Bodenbeschleunigung  $S_e/a_g$  des isolierten Bauwerks signifikant kleiner als 1 ist. Für eine angenommene Kombination aus Reibkoeffizient  $\mu$  und Wegkapazität  $d_{bd}$  werden dann folgende Größen mithilfe des Antwortspektrums berechnet:

– maximale Schubkraft des Isolators:

$$F_b = \mu N_S + d_{bd}(N_S/R_{eff}) \quad (2)$$

– effektive Steifigkeit:  $k_{eff} = F_b/d_{bd}$  (3)

– effektive Periodendauer:  $T_{eff} = 2\pi \sqrt{N_S / (g k_{eff})}$  (4)

– effektives Dämpfungsmass:

$$\zeta_{eff} = \frac{2\mu}{\pi(\mu + d_{bd}/R_{eff})} \quad (\zeta_{eff} \leq 30\%) \quad (5)$$

– Reduktionsfaktor:

$$\eta = \sqrt{0,10 / (0,05 + \zeta_{eff})} \quad (0,55 \leq \eta \leq 1) \quad (6)$$

– reduzierte Bauwerksbeschleunigungsantwort bei

$$T = T_{eff}: \eta S_e(T = T_{eff}) \quad (7)$$

– maximale Schubkraft des Bauwerks (1-Massenschwinger):  $F_S = \eta S_e(N_S/g)$  (8)

wo  $N_S$  die Kraft der Bauwerksmasse auf dem Lager darstellt. Die Berechnungen (2)–(8) liefern ein gültiges Design eines Gleitpendellagers falls  $F_b \approx F_S$ , was dadurch erreicht wird, dass zum Beispiel der angenommene Wert von  $\mu$  festgehalten und  $d_{bd}$  iterativ verändert wird.

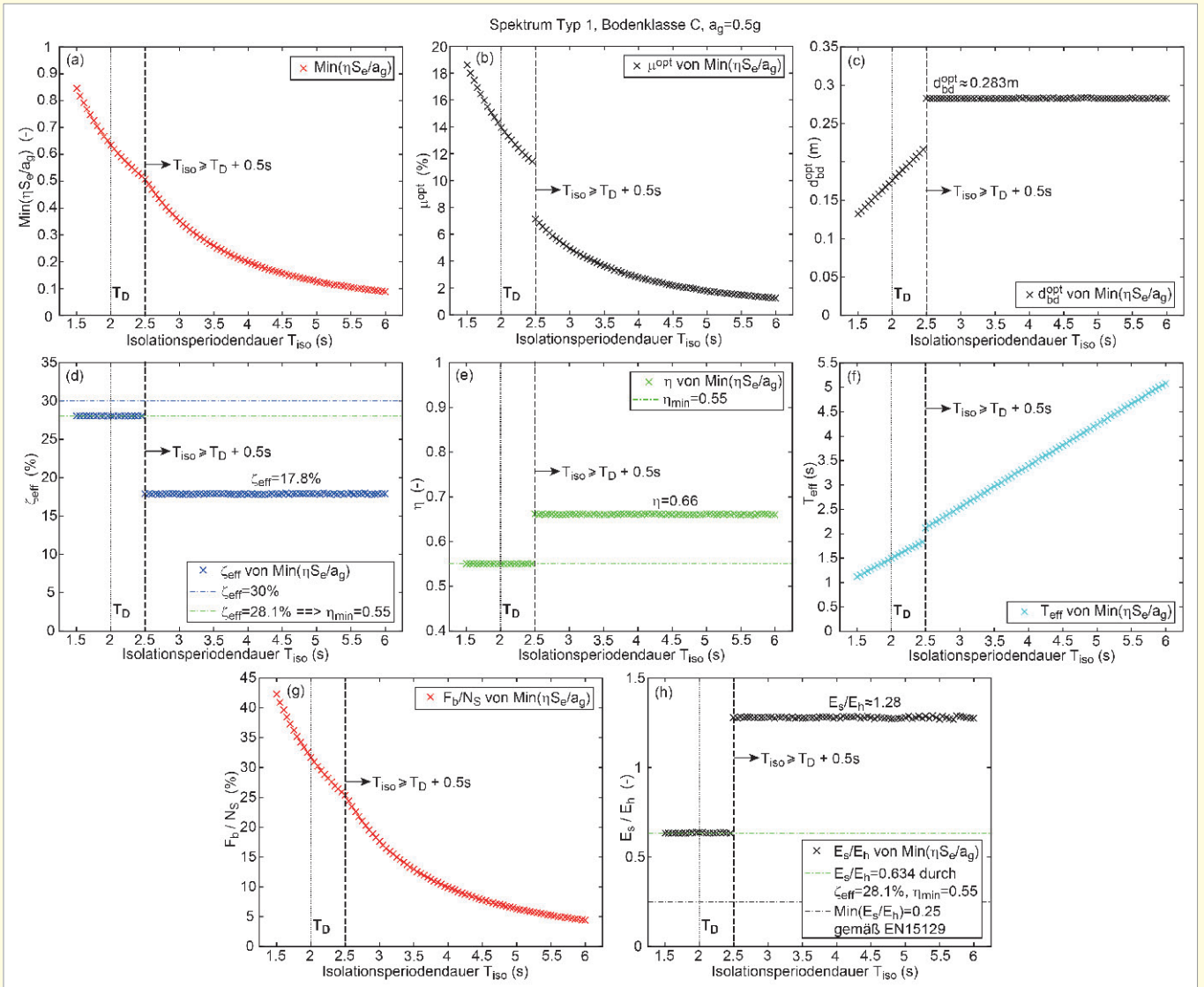


Bild 3. Parameter optimaler Gleitpendellager für minimale Bauwerksbeschleunigung als Funktion der Isolationsperiodendauer für Spektrum Typ 1, Bodenklasse C und  $a_g = 0,5g$ .

### 2.2 Gültige Designs und optimales Design für minimale Bauwerksbeschleunigung

Trägt man für aufsteigende Werte von  $\mu$  die resultierenden gültigen ( $F_b \approx F_s$ ) Gleitpendellagerdesigns in der Ebene des Antwortspektrums ein, so entsteht eine Trajektorie (Bild 1 und Bild 2). Die Trajektorie beginnt bei  $T = T_{iso}$  wegen verschwindender Dämpfung im Gleitpendellager, folgt dann der Spektrumlösung, solange die effektive Dämpfung  $\zeta_{eff}$  durch das Gleitpendellager größer als die Strukturdämpfung  $\zeta_s$  ist und demzufolge die Spektrumsantwort nicht reduziert werden darf, und läuft für  $\zeta_{eff} > \zeta_s$  unterhalb der Spektrumlösung, weil dann  $S_e$  mit  $\eta$  reduziert (multipliziert) werden darf. Wie sich die Wertepaare von  $\mu$  und  $d_{bd}$  entlang der Trajektorie gültiger Designs verändern, ist in Bild 1a mit einigen herausgegriffenen Designs verdeutlicht. Die Tatsache, dass die Trajektorie für zunehmende  $\mu$  „stark nach links“ zu tieferen Periodendauern läuft, ist darin begründet, dass  $T_{eff}$  mit zunehmende  $\mu$  signifikant abnimmt. Betrachtet man die Trajektorie der gültigen Designs und das optimale Design für minimale Bauwerksbeschleunigung (Bild 1 und Bild 2), wird folgendes ersichtlich (auch gültig für Typ 2 und andere Bodenklassen):

- Für gewählte  $T_{iso}$  gibt es eine optimale Kombination von  $\mu$  und  $d_{bd}$ , welche die Bauwerksbeschleunigung minimiert.
- Mit Ausnahme ungewöhnlich tiefer  $T_{iso}$  (1,9s ist unrealistisch für Spektrum Typ 1) ist das Minimum der Trajektorie flach, was bedeutet, dass ein vom optimalen Wert abweichender Reibwert die Bauwerksbeschleunigung nur geringfügig erhöht.
- Für  $T_{iso} = 2,5s$  entsteht eine Trajektorie mit zwei lokalen Minima mit dem globalen Minimum von  $S_e/a_g$  im Bereich  $T_{eff} > T_D$ ; für  $2,36s \leq T_{iso} < 2,5s$  entstehen ebenfalls zwei lokale Minima mit dem globalen Minimum bei  $T_{eff} < T_D$  (nicht gezeigt in Bild 2). Der Grund für die Entstehung zweier lokaler Minima ist, dass die Trajektorie in etwa hälftig in die Periodenbereiche  $> T_D$  (mit  $S_e \sim 1/T^2$ ) und  $T_C \dots T_D$  (mit  $S_e \sim 1/T$ ) fällt.

### 2.3 Optimale Designs in Abhängigkeit der Isolationsperiodendauer

Im letzten Abschnitt wurde das optimale Gleitpendellagerdesign für vier ausgewählte Isolationsperiodendauern  $T_{iso}$  gezeigt. Für den Ingenieur von Interesse ist nun, wie sich die Parameter des optimalen Gleitpendellagers für minima-

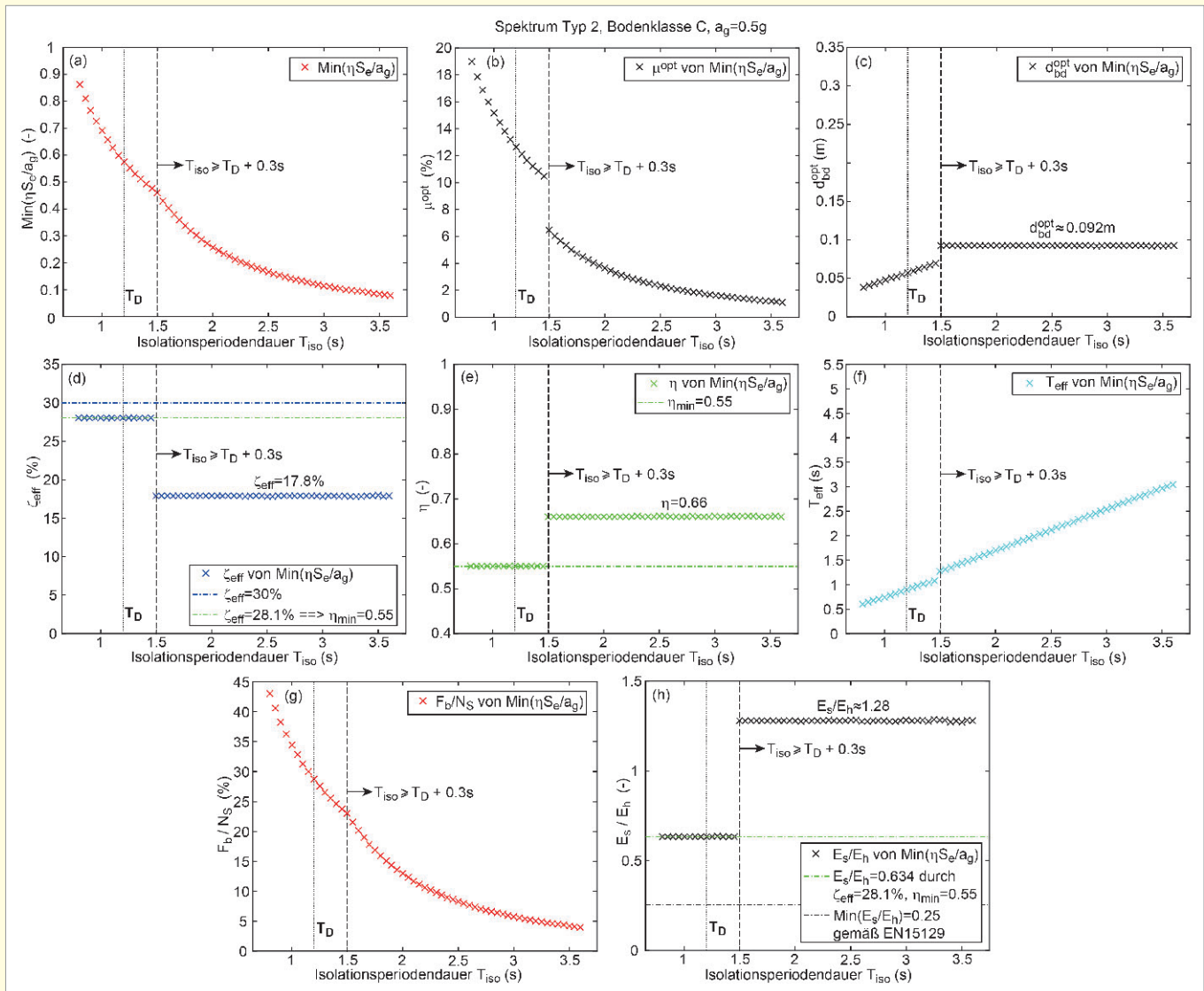


Bild 4. Parameter optimaler Gleitpendellager für minimale Bauwerksbeschleunigung als Funktion der Isolationsperiodendauer für Spektrum Typ 2, Bodenklasse C und  $a_g = 0,5 g$ .

le Bauwerksbeschleunigung in Abhängigkeit aller möglichen Isolationsperiodendauern  $T_{iso}$  verhalten. Hierzu sind die Parameter der optimierten Gleitpendellager als Funktion von  $T_{iso}$  für die Spektren Typ 1 und Typ 2 mit Bodenklasse C und für  $a_g = 0,5 g$  berechnet und in Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Tabelle 1 zeigt zudem, welche Parameter von welchen Inputgrößen (Typ, Bodenklasse,  $a_g$ ,  $N_s$ ) abhängig respektive nicht abhängig sind. Der Sprung in den Kurven in Bild 3 bei  $T_{iso} = T_D + 0,50 s$  ist durch die Tatsache bedingt,

Tabelle 1. Abhängigkeiten der Parameter des optimalen Gleitpendellagers für minimale Bauwerksbeschleunigung.

Abhängig: Ja / Nein	Typ	Bodenklasse	$a_g$	$N_s$
$S_e / a_g$	Ja	Ja	Nein	Nein
$\mu$	Ja	Ja	Ja	Nein
$d_{bd}$	Ja	Ja	Ja	Nein
$\zeta_{eff}$	Nein	Nein	Nein	Nein
$\eta$	Nein	Nein	Nein	Nein
$T_{eff} (T_{iso} \geq T_D + 0,5(0,3))$	Nein	Nein	Nein	Nein
$F_b / N_s$	Ja	Ja	Ja	Nein
$E_s / E_h$	Nein	Nein	Nein	Nein

dass für  $T_{iso} = 2,5 s$  das Minimum von  $\eta S_e / a_g$  bei  $T_{eff} > T_D$  liegt (Bild 2b), während  $Min(\eta S_e / a_g)$  für  $2,36 s \leq T_{iso} < 2,5 s$  bei  $T_{eff} < T_D$  ist. Der Sprung tritt bei den Parametern für Spektrum Typ 2 aus dem gleichen Grund aber bei  $T_{iso} = T_D + 0,30 s$  auf (Bild 4). Die Analyse der Parameter der optimalen Gleitpendellager zeigt folgendes:

- $T_{iso} < T_D + 0,50 s$  (0,30 s Typ 2): Der optimale Wert von  $\zeta_{eff} \approx 28,1 \%$  ist durch die untere Begrenzung des Reduktionsfaktors  $\eta_{min} = 0,55$  gegeben, siehe Gleichung (9).
- $T_{iso} \geq T_D + 0,50 s$  (0,30 s Typ 2): Für realistische Isolationsperiodendauern ist das optimale Gleitpendellagerdesign durch  $\zeta_{eff} \approx 17,8 \%$  und  $\eta \approx 0,66$  charakterisiert.
- Weil die optimale effektive Dämpfung und damit der optimale Reduktionsfaktor im Bereich  $T_{iso} < T_D + 0,50 s$  (0,30 s Typ 2) konstant sind, wird die Spektrumslinie im Periodenbereich  $\sim 1/T$  (konstante Geschwindigkeit) mit konstantem Reduktionsfaktor reduziert, womit die Bewegung  $d_{bd}$  linear ansteigt.
- Weil die optimale effektive Dämpfung und damit der optimale Reduktionsfaktor im Bereich  $T_{iso} \geq T_D + 0,50 s$  (0,30 s Typ 2) konstant sind, wird die Spektrumslinie im Periodenbereich  $\sim 1/T^2$  (konstante Verschiebung) mit

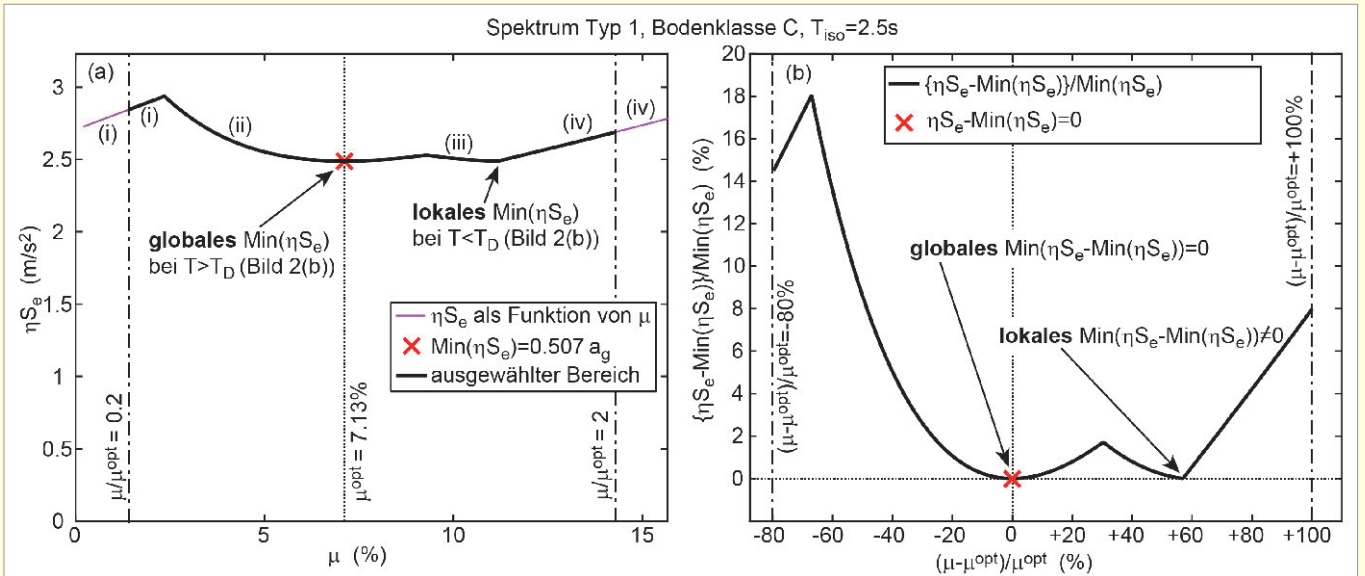


Bild 5. Bauwerksbeschleunigung gültiger Gleitpendellagerdesigns als Funktion des Reibwertes (a) und resultierende Sensitivitätskurve (b).

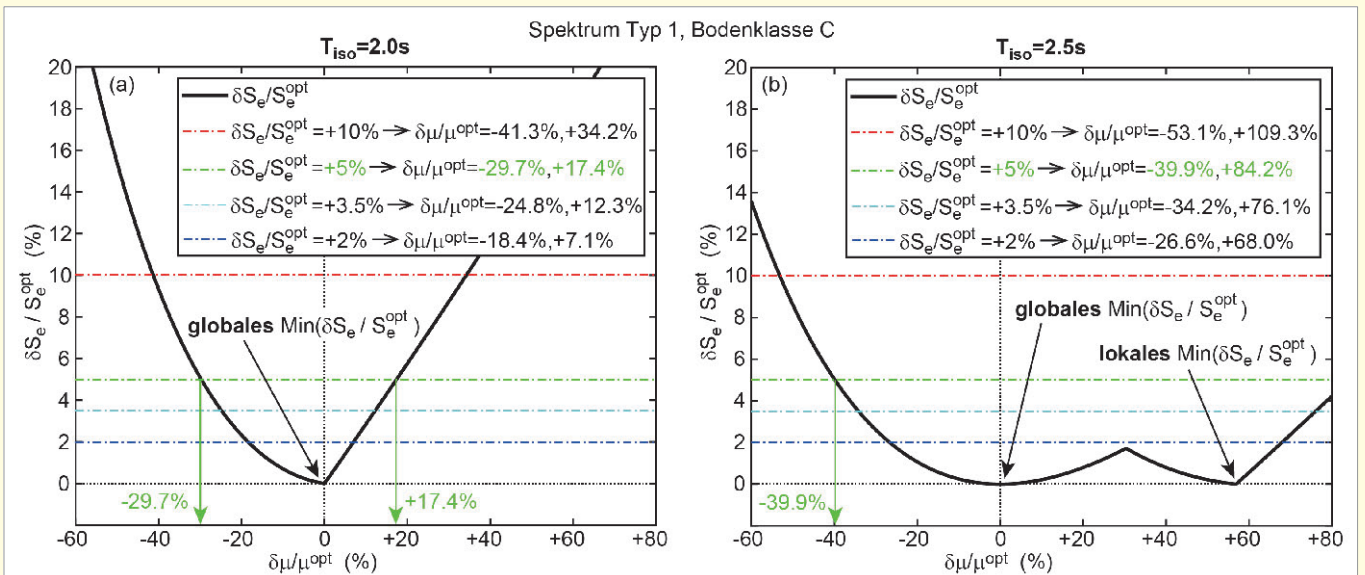


Bild 6. Sensitivitätskurven für Spektrum Typ 1 und Bodenklasse C für unrealistisch tiefe Isolationsperiodendauern ( $T_{iso} = 2.0s = T_D, 2.5s$ ).

konstantem Reduktionsfaktor reduziert, womit die Bewegung  $d_{bd}$  konstant ist.  
 – Das Rückzentrierkriterium  $E_h/E_s$ , gemäß [6] ist für alle optimalen Gleitpendellager automatisch erfüllt.

$$\zeta_{eff} = 0,10 / \eta_{min}^2 - 0,05 \approx 28,1\% \quad (9)$$

### 2.4 Hauptresultate

Zusammenfassend lässt sich für Gleitpendellager, die für minimale Bauwerksbeschleunigung optimiert sind, deren Isolationsperiodendauer typischerweise signifikant oberhalb  $T_D$  liegt und die mit der Methode des linearen Antwortspektrums ausgelegt sind, folgendes sagen:

- 1) Das optimale effektive Dämpfungsmass beträgt unabhängig von Spektrum und Bodenbeschleunigung circa 17,8%.
- 2) Die Wegkapazität ist unabhängig von der gewählten Isolationsperiodendauer (aber abhängig von Spektrum und Bodenbeschleunigung).

3) Die Rückzentrierbedingung ist unabhängig von Spektrum und Bodenbeschleunigung immer erfüllt.

### 3 Sensitivität des Reibwertes auf Bauwerksbeschleunigung

#### 3.1 Sensitivität

Die Sensitivität eines Parameters auf das Resultat beschreibt, um wie viel sich das Resultat relativ zu seinem Nominalwert ändert, wenn sich der Parameter relativ zu seinem Nominalwert ändert. Somit berechnet sich die Sensitivität des Reibwertes auf die Bauwerksbeschleunigung wie folgt

$$\text{Sensitivität} = \frac{\{\eta S_e - \text{Min}(\eta S_e)\} / \text{Min}(\eta S_e)}{\{\mu - \mu^{opt}\} / \mu^{opt}} = \frac{\delta S_e / S_e^{opt}}{\delta \mu / \mu^{opt}} \quad (10)$$

Die Berechnung der Sensitivitätskurve sei hier anhand des Beispiels für Spektrum Typ 1, Bodenklasse C,  $a_g = 0,5g$  und



**Tabelle 2. Maximale Reibwertabweichungen für + 5 % und + 2 % Erhöhung der Bauwerksbeschleunigung für alle Spektrum Typ 1 und diverse Isolationsperiodendauern.**

$T_{iso}(s)$	Bodenklasse	$\delta S_e / S_e^{opt}$	$\delta \mu / \mu^{opt}$	$\delta S_e / S_e^{opt}$	$\delta \mu / \mu^{opt}$
2 (= $T_D$ )	A	+ 5 %	- 29,6 %, + 17,7 %	+ 2 %	- 18,3 %, + 7,3 %
	B	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,4 %	+ 2 %	- 18,4 %, + 7,0 %
	C	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,4 %	+ 2 %	- 18,4 %, + 7,1 %
	D	+ 5 %	- 29,6 %, + 17,5 %	+ 2 %	- 18,3 %, + 7,1 %
	E	+ 5 %	- 29,6 %, + 17,6 %	+ 2 %	- 18,3 %, + 7,2 %
2,5	A	+ 5 %	- 39,8 %, + 84,4 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 68,1 %
	B	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,0 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 67,8 %
	C	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,2 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 68,0 %
	D	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,1 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 67,9 %
	E	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,2 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 67,9 %
3	A	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,9 %, + 32,7 %
	B	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,7 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,0 %
	C	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,9 %
	D	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,5 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,8 %
	E	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,4 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,8 %
3,5	A	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,2 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
	B	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,1 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
	C	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,1 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
	D	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,3 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,7 %
	E	+ 5 %	- 40,1 %, + 55,1 %	+ 2 %	- 26,9 %, + 32,5 %
4	A	+ 5 %	- 40,3 %, + 54,5 %	+ 2 %	- 27,2 %, + 32,0 %
	B	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,7 %
	C	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,1 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
	D	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,8 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,1 %
	E	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,5 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,8 %
4,5	A	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 32,9 %
	B	+ 5 %	- 39,5 %, + 56,6 %	+ 2 %	- 26,2 %, + 33,8 %
	C	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,9 %
	D	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,6 %
	E	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,0 %	+ 2 %	- 26,5 %, + 33,3 %
5	A	+ 5 %	- 39,4 %, + 56,7 %	+ 2 %	- 26,1 %, + 33,9 %
	B	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,4 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,8 %
	C	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,1 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
	D	+ 5 %	- 40,2 %, + 54,9 %	+ 2 %	- 27,0 %, + 32,3 %
	E	+ 5 %	- 39,6 %, + 56,2 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %

$T_{iso} = 2,5s$  erläutert, also für den interessanten Fall, dass die Trajektorie aller möglichen Gleitpendellagerdesigns zwei lokale Minima zeigt (Bild 2b). Die Bauwerksbeschleunigung dieser Trajektorie als Funktion des Reibwertes  $\mu$  ist in Bild 5a gezeigt. Im Ast (i) geht die Trajektorie entlang der Spektrumslinie wegen  $\zeta_{eff} \leq \zeta_s$  (Bild 2b), dann fällt die Trajektorie zum globalen Minimum von  $\eta S_e$  (ii), im Bereich (iii) fällt die Trajektorie zum lokalen Minimum von  $\eta S_e$  und steigt im Bereich (iv), weil die Spektrumslinie steigt und  $\eta$  konstant bleibt. Auf diese Linie wird die Operation (10) angewendet, was auf die Sensitivitätskurve dargestellt in Bild 5b führt. Die untere und obere Grenze von  $\mu / \mu^{opt}$  für die Bestimmung der Sensitivitätskurve sind so gewählt, dass die relative Erhöhung der Bauwerksbeschleunigung maximal für die Fälle bestimmt werden kann, dass der tatsächliche Reibwert fünfmal kleiner oder doppelt so groß wie sein optimaler Designwert ist. Wäre zum Beispiel  $\mu^{opt} = 5\%$ , so würde die Sensitivitätsberechnung die maxi-

malen relativen Erhöhungen der Bauwerksbeschleunigung für  $\mu = 1\%$  sowie  $10\%$  liefern.

### 3.2 Resultate

Exemplarisch sind sechs Sensitivitätskurven in Bild 6 und Bild 7 für Spektrum Typ 1 und Bodenklasse C für folgende Isolationsperiodendauern dargestellt:

- $T_{iso} = 2,0s$  (=  $T_D$ ): unrealistisch tiefe  $T_{iso}$ , wodurch das Minimum in den Periodenbereich konstanter Geschwindigkeit fällt, wo die Trajektorie nicht flach verläuft und somit Abweichungen des tatsächlichen Reibwertes von seinem optimalen Designwert einen signifikanten Impact auf die Bauwerksbeschleunigung hat.
- $T_{iso} = 2,5s$ : unrealistisch tiefe  $T_{iso}$ , aber interessant wegen der zwei lokalen Minima.
- $T_{iso} = 3,0s, 3,5s, 4,0s, 4,5s$ : typische Isolationsperiodendauern (3,0s eher tief).

**Tabelle 3. Maximale Reibwertabweichungen für + 5 % und + 2 % Erhöhung der Bauwerksbeschleunigung für alle Spektren Typ 2 und diverse Isolationsperiodendauern.**

$T_{iso}(s)$	Bodenklasse	$\delta S_e / S_e^{opt}$	$\delta \mu / \mu^{opt}$	$\delta S_e / S_e^{opt}$	$\delta \mu / \mu^{opt}$
1,2 (= $T_D$ )	A	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,6 %	+ 2 %	- 18,3 %, + 7,1 %
	B	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,5 %	+ 2 %	- 18,4 %, + 7,1 %
	C	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,4 %	+ 2 %	- 18,4 %, + 7,1 %
	D	+ 5 %	- 29,6 %, + 17,6 %	+ 2 %	- 18,3 %, + 7,2 %
	E	+ 5 %	- 29,7 %, + 17,4 %	+ 2 %	- 18,4 %, + 7,1 %
1,5	A	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,1 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 67,9 %
	B	+ 5 %	- 39,8 %, + 84,4 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 68,2 %
	C	+ 5 %	- 39,8 %, + 84,3 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 68,0 %
	D	+ 5 %	- 39,9 %, + 84,0 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 67,8 %
	E	+ 5 %	- 39,8 %, + 84,3 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 68,1 %
1,8	A	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,2 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,5 %
	B	+ 5 %	- 39,7 %, + 55,9 %	+ 2 %	- 26,5 %, + 33,2 %
	C	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,9 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,1 %
	D	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,0 %
	E	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,8 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,1 %
2,1	A	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,9 %, + 32,5 %
	B	+ 5 %	- 40,1 %, + 55,0 %	+ 2 %	- 27,0 %, + 32,4 %
	C	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,3 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,6 %
	D	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,3 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,7 %
	E	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,2 %	+ 2 %	- 26,4 %, + 33,4 %
2,4	A	+ 5 %	- 39,7 %, + 56,0 %	+ 2 %	- 26,5 %, + 33,3 %
	B	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,6 %
	C	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,4 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,7 %
	D	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,8 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,1 %
	E	+ 5 %	- 40,1 %, + 55,0 %	+ 2 %	- 27,0 %, + 32,4 %
2,7	A	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,7 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 33,1 %
	B	+ 5 %	- 40,1 %, + 54,9 %	+ 2 %	- 27,0 %, + 32,4 %
	C	+ 5 %	- 40,1 %, + 55,0 %	+ 2 %	- 27,0 %, + 32,4 %
	D	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,2 %	+ 2 %	- 26,9 %, + 32,6 %
	E	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,9 %
3	A	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,6 %	+ 2 %	- 26,6 %, + 32,9 %
	B	+ 5 %	- 39,8 %, + 55,8 %	+ 2 %	- 26,5 %, + 33,2 %
	C	+ 5 %	- 40,3 %, + 54,5 %	+ 2 %	- 27,2 %, + 32,0 %
	D	+ 5 %	- 39,9 %, + 55,5 %	+ 2 %	- 26,7 %, + 32,8 %
	E	+ 5 %	- 40,0 %, + 55,3 %	+ 2 %	- 26,8 %, + 32,7 %

Die Sensitivitätskurven sind so ausgewertet, dass für angenommene maximal akzeptierte relative Erhöhungen der Bauwerksbeschleunigung  $\delta S_e / S_e^{opt}$  von + 2 %, + 3,5 %, + 5 % und + 10 % die daraus resultierenden maximal tolerierten relativen Reibwertabweichungen berechnet sind.

Mit Ausnahme der Resultate für die unrealistisch tiefe Isolationsperiodendauer  $T_{iso} = 2,0s$  zeigt die Auswertung, dass die relative Erhöhung der Bauwerksbeschleunigung circa eine Größenordnung kleiner als die relative Reibwertabweichung ist. Die Auswertung der Sensitivitätskurven für Spektrum 2 (nicht als Bild dargestellt) zeigt auch dieses Verhältnis.

Für alle Erdbebenspektren und für einen sehr großen Bereich der Isolationsperiodendauer zeigen die **Tabelle 2** und **Tabelle 3** die maximal tolerierbaren Reibwertabweichungen unter der Annahme, dass eine Erhöhungen der Bauwerksbeschleunigung relativ zu ihrem Minimum von + 5 % und + 2 % akzeptabel sei. Betrachtet man die Resultate häufig gewählter, also realistischer Isolationsperiodendauern

(grau hinterlegt) und für  $\delta S_e / S_e^{opt} = + 5 \%$ , was eine messbare aber wohl kaum spürbare relative Erhöhung darstellt, so dürfte der Reibwert um circa - 39 % und + 54 % (gültig für Typ 1 und Typ 2) von seinem optimalen Designwert abweichen. Nimmt man an, dass nur die geringfügige Erhöhung von  $\delta S_e / S_e^{opt} = + 2 \%$  akzeptabel sei, dürfte der Reibwert um circa - 26 % und + 32 % (gültig für Typ 1 und Typ 2) von seinem optimalen Designwert divergieren. Dieses eventuell erstaunliche Resultat ist die direkte Folge des flachen Minimums der Trajektorien der gültigen Gleitpendellagerdesigns (Bild 1 und Bild 2). Die normierte Bauwerkbeschleunigung  $S_e/a_g$  erhöht sich fast nicht, wenn der Reibwert signifikant kleiner (nach rechts auf der Trajektorie) oder größer (nach links auf der Trajektorie) als sein optimaler Wert ist. Es sei angemerkt, dass die Feststellung der sehr tiefen Sensitivität des Reibwertes auf die Bauwerksbeschleunigung nicht für die Sensitivität des Reibwertes auf die Wegkapazität des Gleitpendellagers zutrifft.

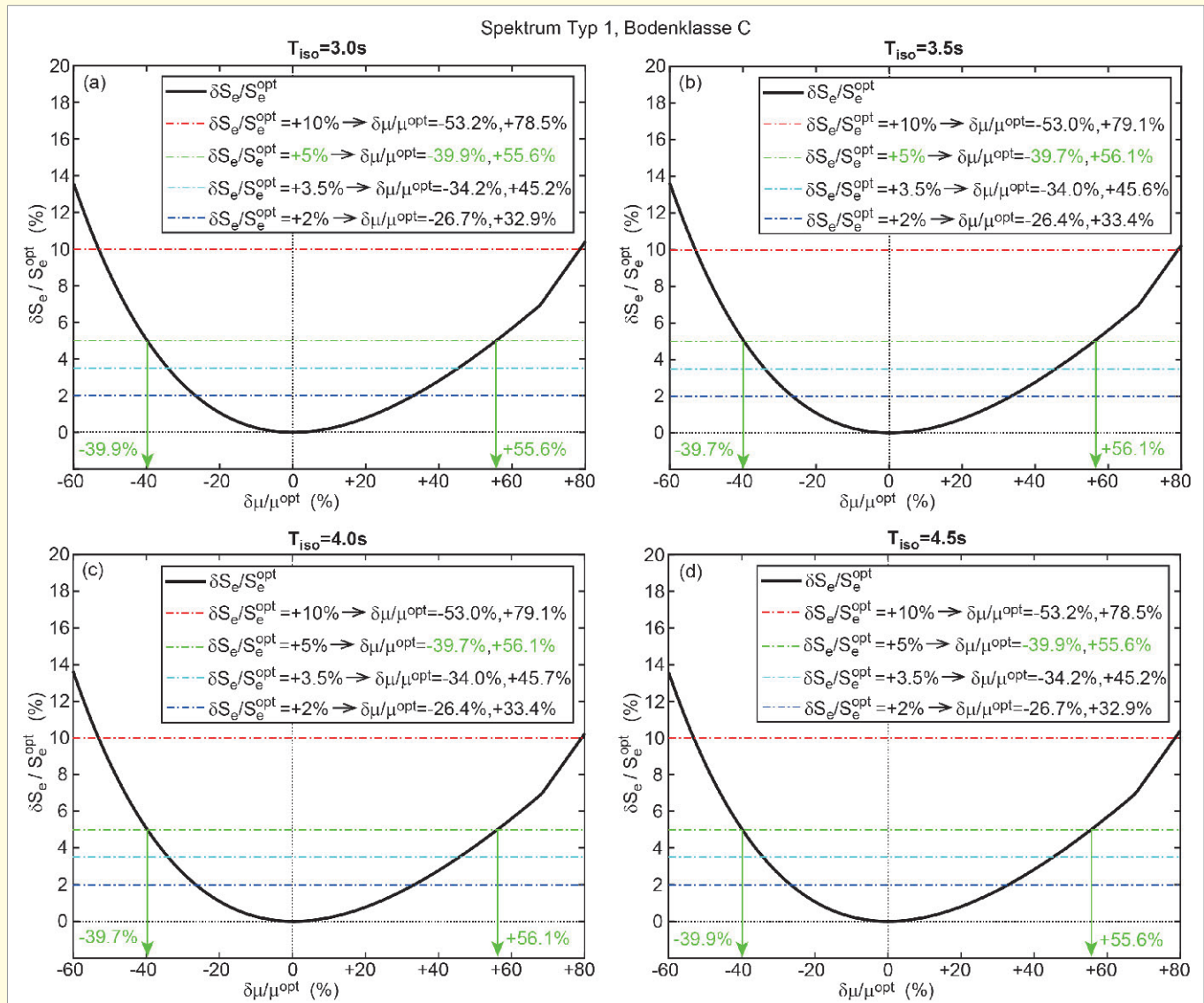


Bild 7. Sensitivitätskurven für Spektrum Typ 1 und Bodenklasse C für realistische Isolationsperiodendauern ( $T_{iso} = 3,0\text{ s}$  (eher tief),  $3,5\text{ s}$ ,  $4,0\text{ s}$ ,  $4,5\text{ s}$ ).

## 4 Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt die Sensitivität des Reibwertes von Gleitpendellager auf die Bauwerksbeschleunigung für alle genormten Erdbebenspektren und für diverse Isolationsperiodendauern. Die Sensitivitätsstudie ist mit der oft angewendeten Methode des linearen Antwortspektrums durchgeführt. Die Sensitivitätsstudie zeigt, dass die Erhöhung der Bauwerksbeschleunigung relativ zu ihrem Minimum circa eine Größenordnung kleiner ist als die Abweichung des tatsächlichen Reibwertes relativ zu seinem optimalen Designwert. Dieses Resultat wird anschaulich mit der Trajektorie gültiger Gleitpendellager in der Ebene des Antwortspektrums begründet. Das Beschleunigungsminimum der Trajektorie verläuft flach, weshalb Abweichungen des Reibwertes von seinem optimalen Wert nur geringfügig die Bauwerksbeschleunigung erhöhen.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der MAURER SE, der MAURER ENGINEERING GmbH und der MAURER Switzerland GmbH für die Finanzierung dieser Studie.

### Literatur

- [1] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004 + AC:2009.
- [2] Inaudi, J. A.; Kelly, J. M.: Optimum damping in linear isolation systems. In: Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 22 (1993), Iss. 7, pp. 583–598.
- [3] Bucher, C.: Probability-based optimization of friction damping devices. In: Structural Safety, Vol. 31 (2009), Iss. 6, pp. 500–507.
- [4] Nigdeli, S.M.; BekdaÖ, G.; Alhan, C.: Optimization of seismic isolation systems via harmony search. In: Engineering Optimization, Vol. 46 (2014), Iss. 11, pp. 1553–1569.
- [5] Weber, F.; Meier, L.; Distl, J.; Braun, C.: Optimum design of curved surface sliders based on site-specific seismic input and its sensitivity. In: Geoscience, Vol. 8 (2018), Iss. 3, doi:10.3390/geosciences8030083.
- [6] DIN EN 15129: Erdbebenvorrichtungen. Deutsche Fassung EN 15129:2009.

**MAURER SE**

Frankfurter Ring 193  
80807 München  
Deutschland

Postfach 440145  
80750 München  
Deutschland

Tel. +49.89.323 94-0  
Fax +49.89.323 94-338

[info@maurer.eu](mailto:info@maurer.eu)  
[www.maurer.eu](http://www.maurer.eu)

---

**German Engineering** since 1876

