

# Erdbebenberechnung von Silobauwerken mit der Response-Spektrum- und Time-History-Methode

Hampe, E.; Bohn, W.; Schwarz, J.

In der dynamischen Erdbebenberechnung lassen sich drei, nicht unabhängig voneinander zu betrachtende Aufgaben ableiten:

- die Modellierung der Erregung
- die Modellierung des zu untersuchenden Bauwerks sowie
- die Lösung der Bewegungsgleichung.

Eine Betrachtung kann deterministisch oder stochastisch erfolgen.

In diesem Beitrag werden die Erdbebenuntersuchungen eines Doppelstocksilos mit deterministischen Lösungsverfahren vorgestellt.

## 1. Erdbebenberechnungsverfahren

Zur Beschreibung der **Erdbeben**erregung können aktuelle, generierte oder artifizielle Erdbebenzeitverläufe (Time Histories) und Antwort-(Response)Spektren herangezogen werden.

Eine Berechnung mit Time-History-Methoden ist zeitaufwendig und setzt zur Ableitung repräsentativer Aussagen die Berücksichtigung mehrerer Erdbebenverläufe voraus.

In den Response-Spektren drückt sich der Frequenzinhalt der Erdbeben aus. Einmassenschwinger unterschiedlicher Eigenfrequenz und festgelegter Dämpfung werden der zeitveränderlichen Erregung ausgesetzt und die Maxima der Bewegungsgrößen als Funktion der Frequenz bzw. Schwingungsdauer aufgetragen. Werden mehrere Erdbebenzeitverläufe ausgewertet und die Spitzenwerte geglättet, spricht man von Entwurfs-(Design)Spektren. Breite Anwendung haben in diesem Zusammenhang die Vorschläge von Newmark und Housner gefunden.

Die **Lösung der Bewegungsgleichung** linear-elastischer Systeme, bei denen der Hauptanteil der Erdbebenenergie in den unteren Eigenfrequenzen umgesetzt wird, kann nach der Modalen Analysis durchgeführt werden. In einem ersten Schritt werden dabei die Eigenfrequenzen und Eigenformen des dynamischen Systems ermittelt. Entsprechend der weiteren Behandlung der Eigenwerte unterscheidet man die **Response-Spektrum-Modale-Analysis** und die **Time-History-Modale-Analysis**.

Nichtlineare Systeme können durch direkte Integration der Bewegungsgleichung untersucht werden (Step-by-Step-Methode). Zur Berechnung linear-elastischer Systeme, bei denen höhere Schwingungsformen bedeutsam sind, sollte ebenfalls die **allgemeine Time-History-Analysis** herangezogen werden.

Eine Übersicht der deterministischen Lösungsverfahren und der Grob Ablaufplan der Bearbeitungsschritte kann Tabelle 1 entnommen werden. Eine vergleichende Betrachtung der drei Berechnungsverfahren anhand ausgewählter Kriterien gibt Tabelle 2.

In der **Modellbildung** des Bauwerkes gelten die Grundsätze von Wirklichkeitsnähe und Wirtschaftlichkeit.

Zur Berechnung eines Doppelstocksilos nach der Modalen Analysis wurde das Bauwerk in finite Schalenelemente diskretisiert.

Für die Erdbebenuntersuchung nach dem Response-Spektrum-Verfahren wurde das Bauwerk außerdem in ein Punktmass-Stubmodell überführt, eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise wird in [1] gegeben.

## 2. Erdbebenuntersuchung an einem Doppelstocksilo

### 2.1. Response-Spektrum-Verfahren am Punktmass-Stubmodell

Zur Berechnung eines Einzelsilos ( $L/D = 3,7$ ,  $h/D = 0,017$ ) wurden die Response-(Antwort)Spektren ausgewählter Erdbeben (Taft, El Centro, Parkfield, Friaul OW und NS) aufbereitet. Außerdem wurden nach dem Verfahren von Newmark ermittelte Entwurfsspektren berücksichtigt. Für das Bauwerk wird eine Dämpfung von 0,02 angenommen (Stahlbeton). Die Schnittkräfte des Punktmass-Stubmodells infolge markanter Erdbebenaufzeichnungen werden in Tabelle 3 gegeben.

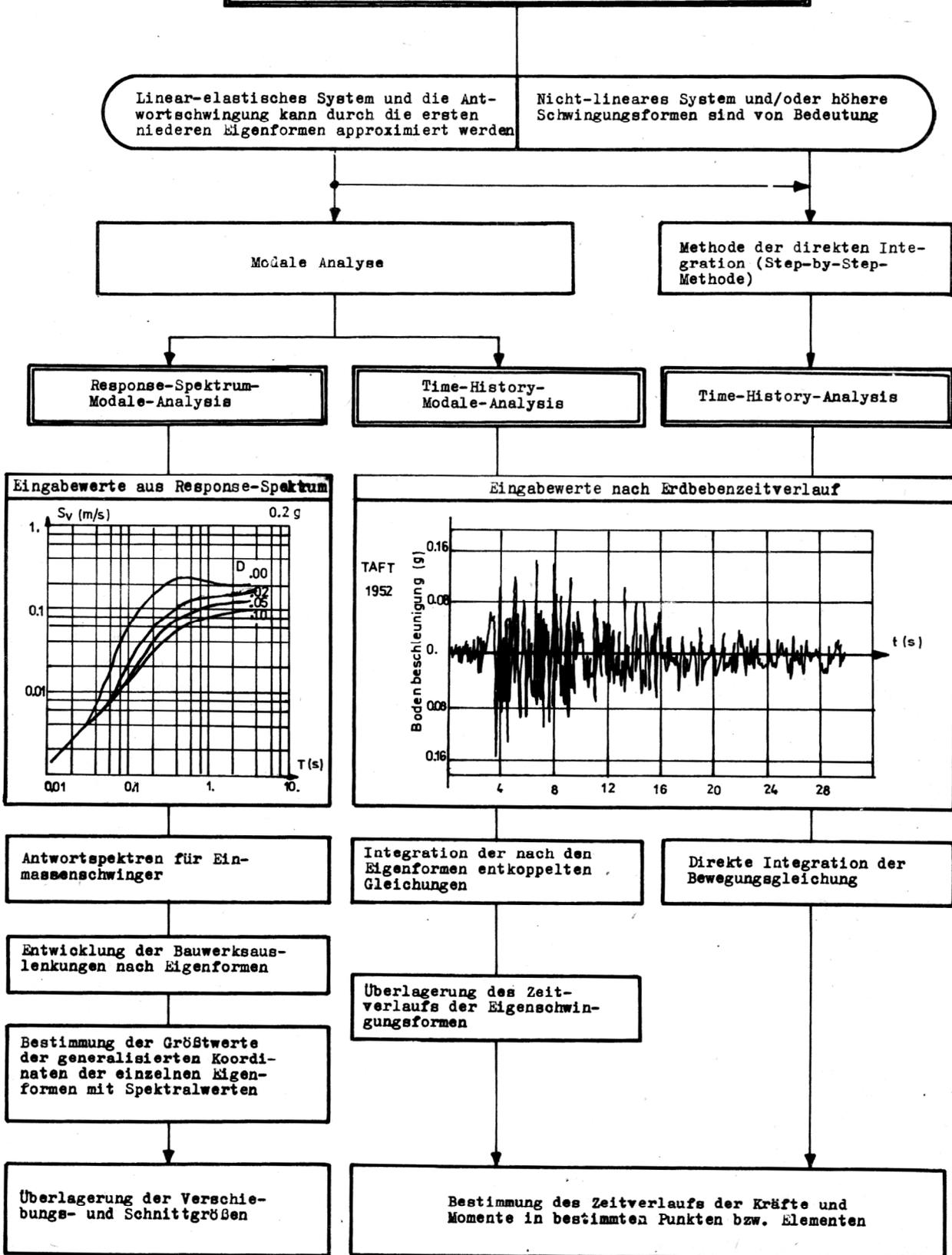
Tabelle 4 zeigt die Newmark-Spektren für Grundbeschleunigungen von 0,05 g, 0,02 g, 0,4 g, 0,6 g, 1,0 g ( $g$  – Erdbeschleunigung), wobei A, B, C, D die Eckpunkte des bei logarithmischer Darstellung geradlinig zu verbindenden Spektralverlaufes bilden.

A, B und C werden durch Vergrößerungsfaktoren der Beschleunigung, D unter Einbeziehung eines Vergrößerungsfaktors der Verschiebung ermittelt.

Der am Punktmassenmodell berechnete Querkraft- bzw. Momentenverlauf wird den Spektren zugeordnet.

In Tabelle 5 werden die Antwortspektren aktueller Erdbebenaufzeichnungen mit den Newmark-Spektren verglichen. Die schraffierten Flächen repräsentieren dabei die Bereiche, in denen die Designspektren trotz gleicher bzw. größerer Grundbeschleunigung zur Unterschätzung des Antwortverhaltens unter Berücksichtigung der fünf markanten strong-motion-Verläufe (Starkbeben) führen können. Das betroffene Frequenzintervall liegt zwischen

**DETERMINISTISCHE BERECHNUNG  
DER ERDBEBENBEANSPRUCHUNG**



**Tabelle 1**  
Deterministische Verfahren der Erdbebenberechnung

**Tabelle 2**  
Vor- und Nachteile der  
Berechnungsverfahren

		TIME HISTORY ANALYSIS	TIME HISTORY MODALE ANALYSIS	RESPONSE SPEKTR. MODALE ANALYSIS
Rechentechischer Aufwand	gering			
	hoch			
Zusammensetzung der Dämpfungsmatrix	beliebig			
	beschränkt			
Werkstoffverhalten	linear			
	nichtlinear			
Berechnung mit mehreren charakteristischen Erdbebenverläufen erforderlich				
zeitlicher Bezug der Ergebnisse	vorhanden			
	nicht vorhanden			

0,5 und 3,0 Hz (Parkfield). In diesem Bereich liegt auch die Grundfrequenz der untersuchten Silobauwerke. Aufgrund des hohen modalen Anteils dieser Eigenform an der Gesamtantwort des Systems können somit Fehler entstehen. Das in Tabelle 5 ebenfalls aufgeführte Newmark/Hall-Spektrum zeigt für das genannte Frequenzband eine günstigere Näherung. In den Tabellen 6 bis 8 werden die resultierenden Schnittkräfte aus dem Punktmassemodell des Doppelstocksilos nach den verschiedenen Spektren gegenübergestellt, wobei auch deren Verlauf verglichen wird. Folgende Aussagen lassen sich ableiten:

- Das 0,2 g-Newmark-Spektrum liefert für das 0,155 g Taft-Erdbeben konservative Ergebnisse (Tabelle 6).
- Die 0,33 g-Friaul NS-Komponente (0,33 g Spitzenwert der Beschleunigung) wird durch das 0,2 g Design-Spektrum gut repräsentiert; die Werte des 0,4 g Spektrums überschätzen das Friaul-Ergebnis um nahezu 100 %. Die OW-Komponente führt zu Schnittkräften, die in den oberen Bauwerksregionen die 0,4 g-Newmark-Werte unter-, mit abnehmender Höhe aber überschreiten (eine Ausnahme bildet die Fußquerkraft, die unter der Designgröße liegt, Tabelle 7).
- Die Werte aus dem zerstörungsreichen 0,33 g Erdbeben von El Centro (1940) werden am Beispiel sicher durch die 0,4 g-Designkomponente umhüllt, der Momentenverlauf ist den 0,2 g-Werten nahe. Eine 0,3 g Newmark-Spektrumdarstellung erscheint zweckmäßig.
- Das 0,4 g Parkfield-Spektrum ruft wesentlich größere Schnittkräfte als das 0,4 g Designspektrum hervor und entspricht einer Auslegung mit vergrößerter Entwurfgrundbeschleunigung von 0,5 bis 0,6 g. Eine Erklärung wurde mit Tabelle 5 gegeben (Tabelle 8).

In den Berechnungen wurden drei Eigenformen berücksichtigt und nach SRSS (Quadratwurzel aus Summe der Quadrate) überlagert [1].

Die durchgeführten Untersuchungen zum Vergleich der Response-Spektren sind bauwerksspezifisch und können nicht beliebig verallgemeinert werden. Es wird jedoch deutlich, daß das Response-Spektren-Verfahren nicht nur auf maximale Grundbeschleunigungen orientiert werden darf. Die Response-Spektren repräsentieren den Frequenzgehalt der Erdbeben. Die Beanspruchung des Bauwerks ist jedoch auch in Abhängigkeit von seinen dynamischen Charakteristika zu betrachten.

Auf das Schadenspotential des ursprünglichen Time-History-Verlaufes kann kein direkter Bezug mehr genommen werden.

## 2.2. Time-History-Modale-Analysis am Finite-Elemente-Modell

Unter Anwendung des Programmsystems ASHSD II wurde der in 2.1. untersuchte Doppelstocksilos nach der Time-History-Modale-Analysis berechnet, wobei eine Diskretisierung in finite Schalenelemente erfolgte und die Silomasse, in verschiedenen Höhen konzentriert, mit ebenen Deckenelementen simuliert wurde. Als Zeitverlauf diente das Erdbeben von Friaul 1976 (NS-Komponente). Tabelle 9 zeigt den Längskraftverlauf über die Schalenhöhe in Abhängigkeit von der Zeit (Dämpfung  $D = 0,02$ ).

Folgende Aussagen lassen sich treffen:

- die maximalen Längskräfte ( $\max N_x$ ) der Schalenelemente treten nicht zur gleichen Zeit auf; sie stellen sich in der oberen Schalenhälfte bei 5,40, in Schalennitte bei 4,60 und im Fußbereich bei 6,15 s ein;
- die maximalen Schnittkräfte der Systeme entstehen nicht zum Zeitpunkt der Größtwerte der Beschleunigung (Erregung), eine direkte Zuordnung ist nicht möglich;
- zum Zeitpunkt starker Erdbebenstöße (3,9 s und 5,25 s) liegen die Längskräfte erheblich unter den auftretenden Maxima der Reaktion (23 % bzw. 37 % der Größtwerte).

In Tabelle 10 wird die Time-History der Erregung den Time-Histories der Bauwerksreaktion gegenübergestellt. Der zeitveränderliche Längskraftverlauf des Fußpunktes und des Elementes unterhalb der ersten Deckenlage wird für gefülltes und leeres Silobauwerk angegeben.

Es gelten folgende Feststellungen:

- beim gefüllten Doppelstocksilos stellen sich zum Zeitpunkt  $t = 3,5$  s nahezu harmonische Schwingungen unterschiedlicher Amplituden ein, die nach Erreichen des Maximums langsam abklingen; beim leeren Silo liegt dieser Bereich zwischen 3,5 und 7 s
- die Frequenzen der genannten Zeitintervalle entsprechen den Grundfrequenzen der beiden Systeme, der dominierende Anteil der ersten Eigenform wird deutlich

- die größten Amplituden des Schnittkraft-Zeitverlaufes korrelieren zeitlich mit dem Auftreten starker Beschleunigungsimpulse, die Schwingungen des gefüllten Systems klingen infolge der großen Massekonzentration langsamer als die des leeren Bauwerkes ab
- die zeitliche Verschiebung zwischen maximalen Beschleunigungsimpulsen und den Größtwerten der Bauwerksreaktion wird deutlich (vgl. Tabelle 9).

### 2.3. Response-Spektrum-Modale-Analysis am Finite-Elemente-Modell

Für das Schalenringelemente-Modell nach 2.2. wurden die Längskräfte  $N_x$  nach dem Response-Spektrum-Verfahren für das Friaul-Erdbeben ermittelt. Sie liegen über den Werten der Time-History-Untersuchung. Die Abweichungen nehmen vom oberen Bauwerksrand (6,5 %) zum Schalenfußpunkt (9,7 %) zu.

### 2.4. Vergleich der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Um den Vergleich von Stabmodell und Finite-Elemente-Modell zu ermöglichen, wurde der in Tabelle 9 aufgezeigte Längskraftverlauf (Umhüllende  $\max N_x$ ) und die nach Abschn. 2.3. mit der Response-Spektrum-Methode ermittelten Kräfte  $N_x$  in Kippmomente umgerechnet. Dabei wurde eine  $\cos 1$ -Verteilung der Belastung über den Schalenumfang zugrunde gelegt.

Tabelle 11 zeigt die Gegenüberstellung der Kippmomente (Maxima) über den Zeitbereich des jeweiligen Elementes mit den Biegemomenten des Stabmodells. Eine gute Übereinstimmung wird deutlich.

Im Vergleich der Berechnungsverfahren müssen jedoch Faktoren berücksichtigt werden, die zu Unterschieden in den ermittelten Werten führen können. Bei der Response-Spektrum-Methode sind Fragen hinsichtlich der Anzahl und Genauigkeit zu berücksichtigender Eigenformen, der Überlagerungsformel und des verwendeten Response-Spektrums zu klären.

Die Genauigkeit der Time-History-Untersuchung hängt wesentlich von den Integrationszeitschritten und dem Intervall des Ergebnisausdruckes ab. Als Integrationsschritt wurde in den Berechnungen eine Zeitdifferenz  $\Delta t = 0,001$  s festgelegt. Eine weitere Verkleinerung erhöht die Rechenzeit wesentlich, die Schnittkräfte nehmen jedoch nur minimal zu.

Die Abhängigkeit der maximalen Schnittkräfte vom Zeitintervall des Ergebnisausdruckes werden durch Krug [2] am Beispiel von Behältertragwerken untersucht. Die durchgeführten Parameterstudien ergaben, daß als Intervall des Rechnerausdruckes der Time-History-Berechnung eine Zeit von 0,05 s herangezogen werden kann.

Aus Schnittkraftvergleichen der berechneten Varianten geht hervor, daß die genauen Ergebnisse so um durchschnittlich 5 % unterschritten werden. (Im Einzelfall auch größere Werte.) Die Abweichungen der maximalen Längskräfte bei verändertem Zeitintervall werden in Tabelle 12 am Beispiel eines Containments ausgewiesen. Die in den Berechnungen nach 2.2. gegenüber dem Response-Spektrum-Verfahren auftretenden Differenzen können deshalb durch einen prozentualen Zuschlag korrigiert werden.

Die Unterschiede in den Response-Spektren-Untersuchungen (2.1. bzw. 2.3.) sind auf die mit dem jeweiligen Modell ermittelten Eigenfrequenzen zurückzuführen.

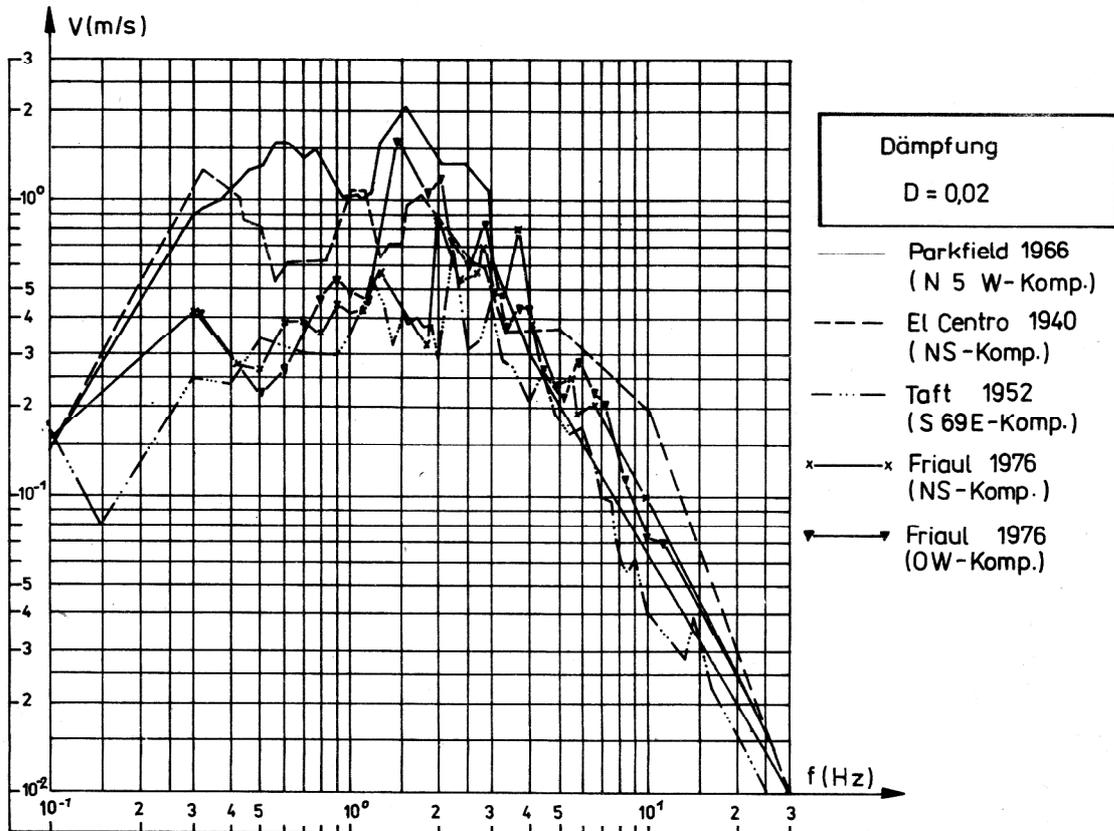
### LITERATUR

- [1] Hampe, E., Bohn, W., Pfefferkorn, G., Schwarz, J.: Beitrag zur Erdbebenuntersuchung von zylindrischen Silobauwerken nach der Response-Spektrum-Methode. Berlin: Bauplanung – Bautechnik (noch nicht veröffentlicht).
- [2] Krug, D.: Erdbebenuntersuchung von Schalentragwerken mit dem Programmsystem ASHSD II. Weimar; HAB, WB Stahlbeton-, Spannbeton- und Plastbauwerke, Diplomarbeit 1981.

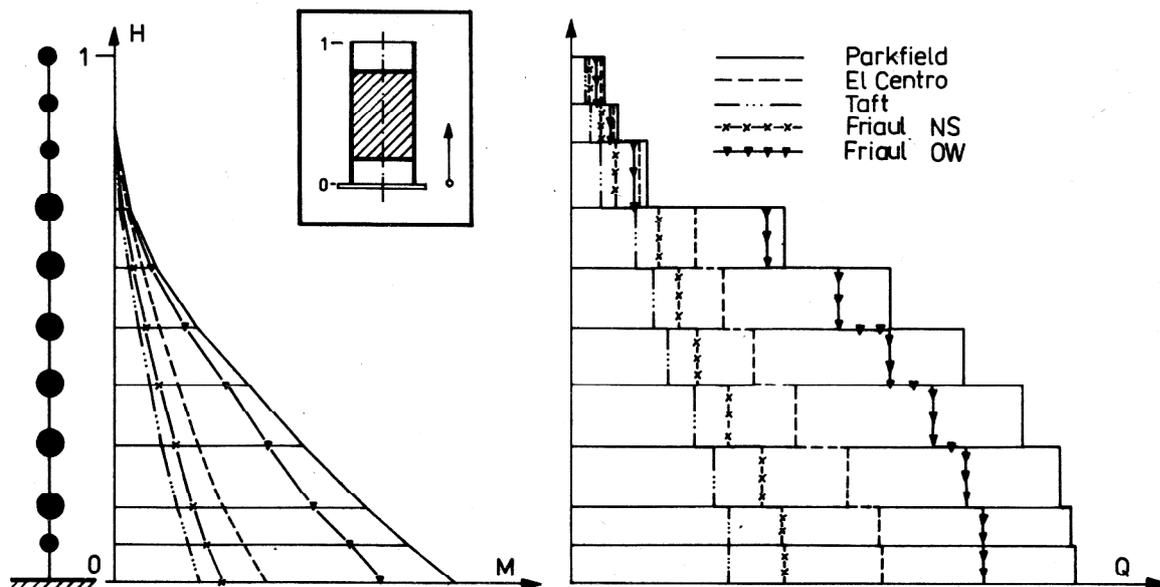
#### Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Hampe  
 Dipl.-Ing. W. Bohn  
 Dipl.-Ing. J. Schwarz  
 Hochschule für Architektur  
 und Bauwesen  
 Sektion Bauingenieurwesen  
 5300 Weimar, Marienstraße 13

## RESPONSE - SPEKTREN

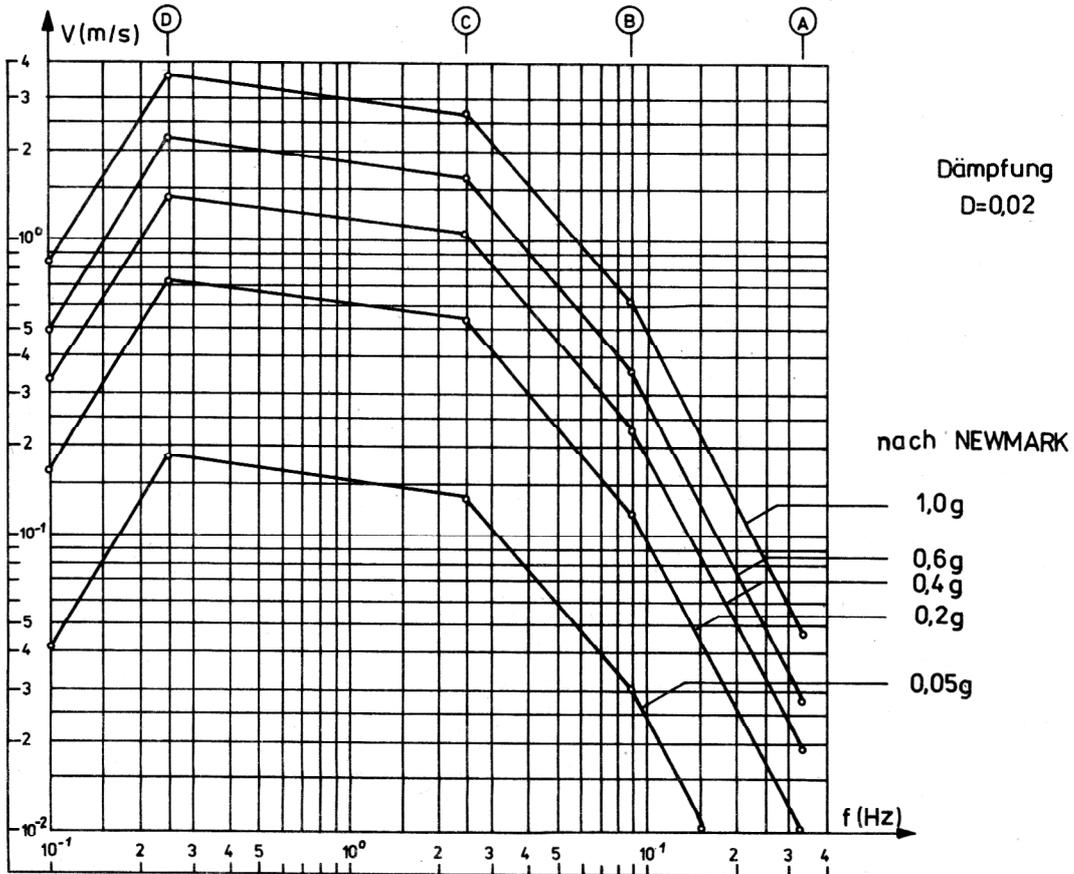


## SCHNITTKRÄFTE DES PUNKTMASSE-MODELLS

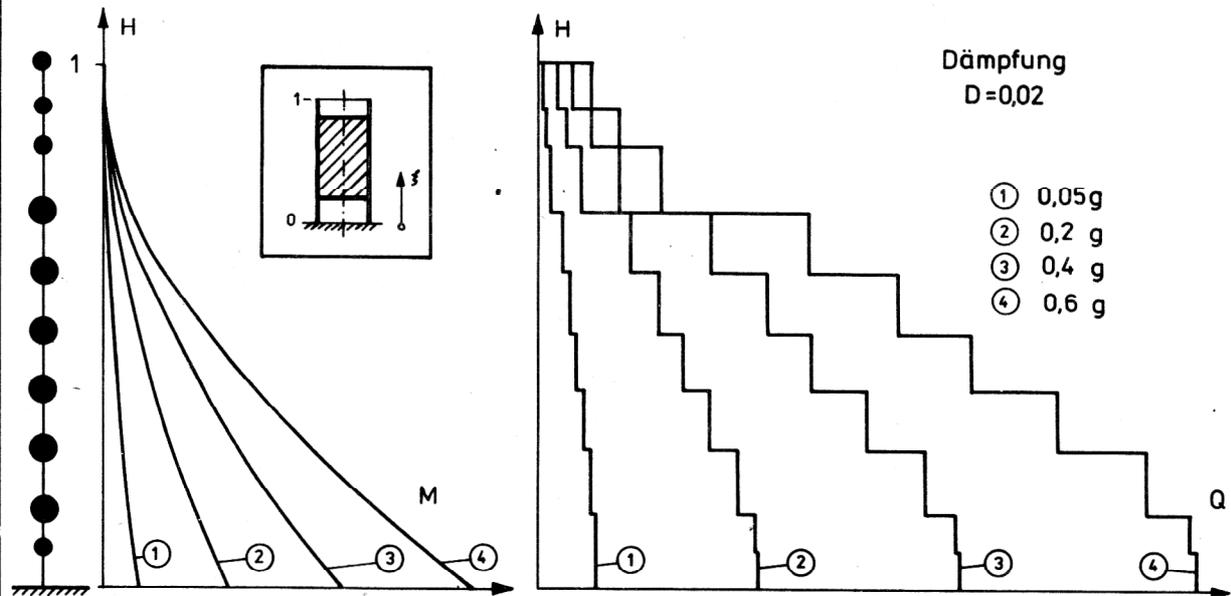


**Tabelle 3**  
Schnittkräfte des Punktmass-Stubmodells unter Anwendung aktueller Erdbebenspektren

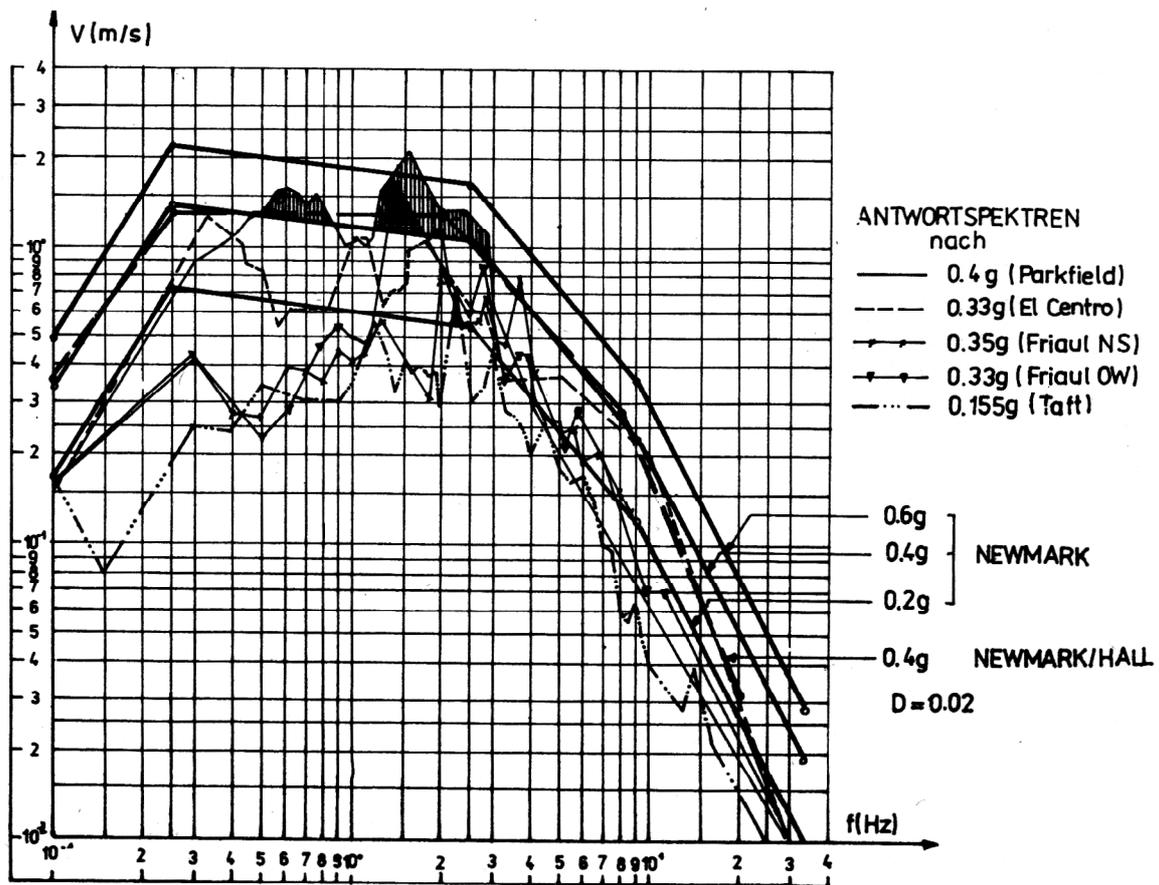
# RESPONSE - SPEKTRUM



# SCHNITTKRÄFTE DES PUNKTMASSE - MODELLS

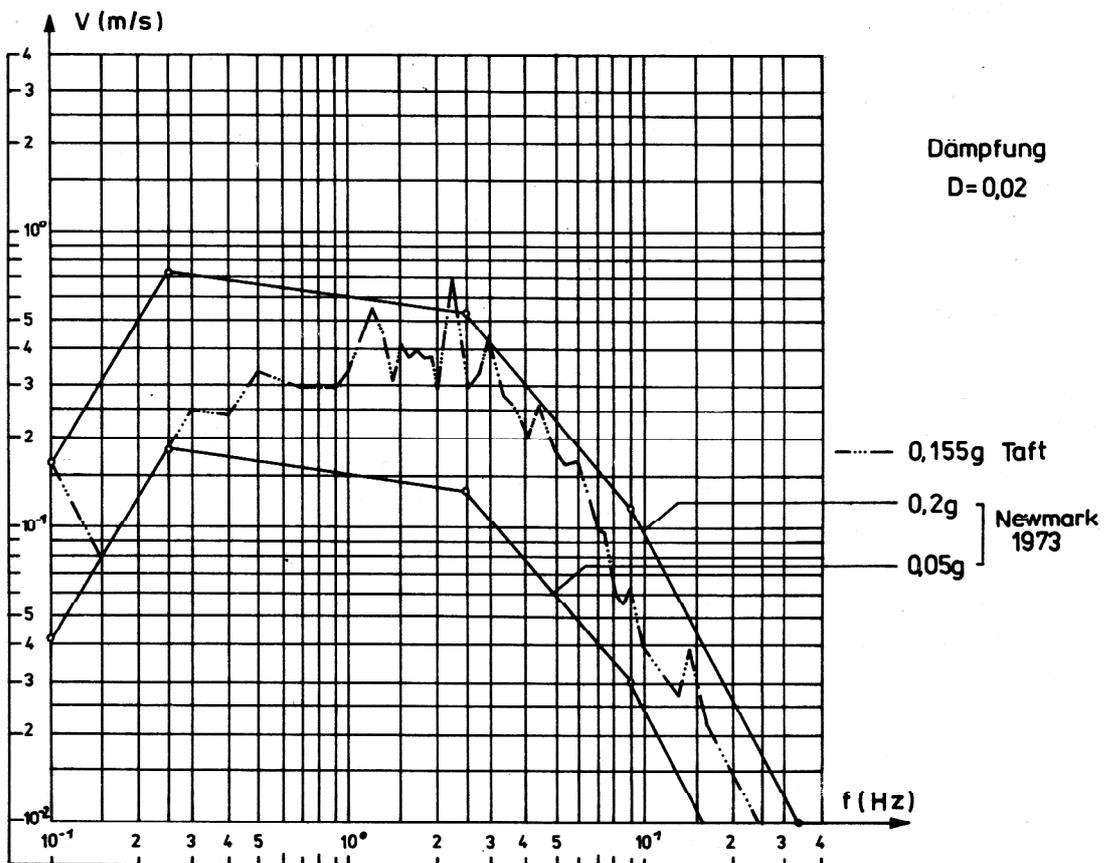


**Tabelle 4**  
Schnittkräfte des Stabmodells unter Anwendung der Newmark-Entwurfsepektren

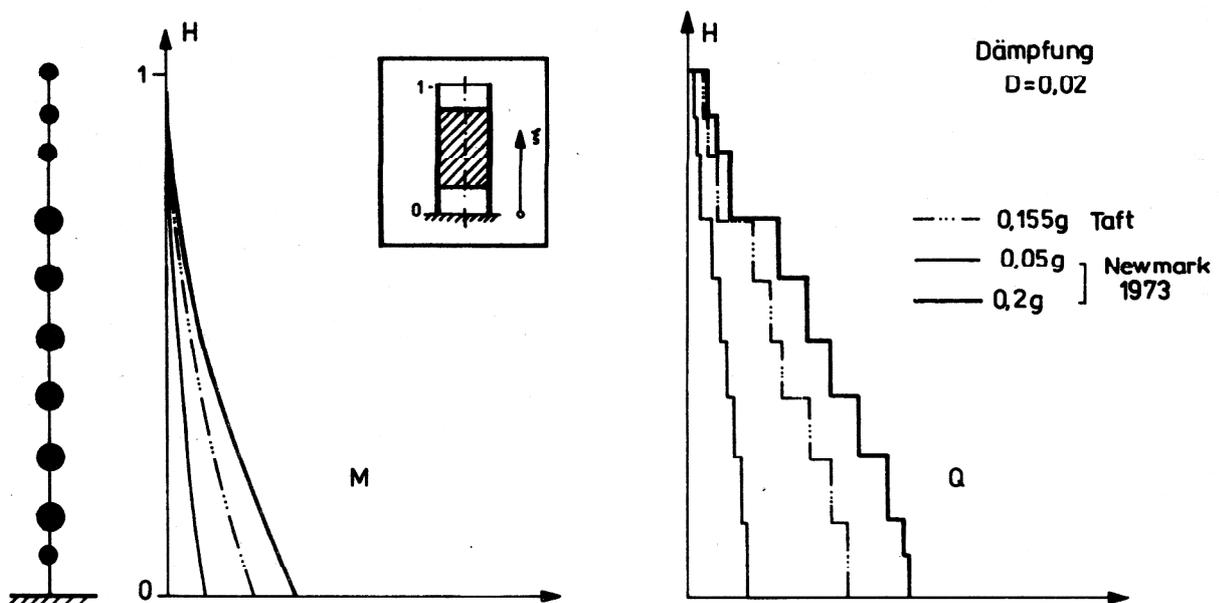


**Tabelle 5**  
Vergleich von Entwurfsspektren und Spektren aktueller  
Erdbebenzeitverläufe

## RESPONSE - SPEKTREN

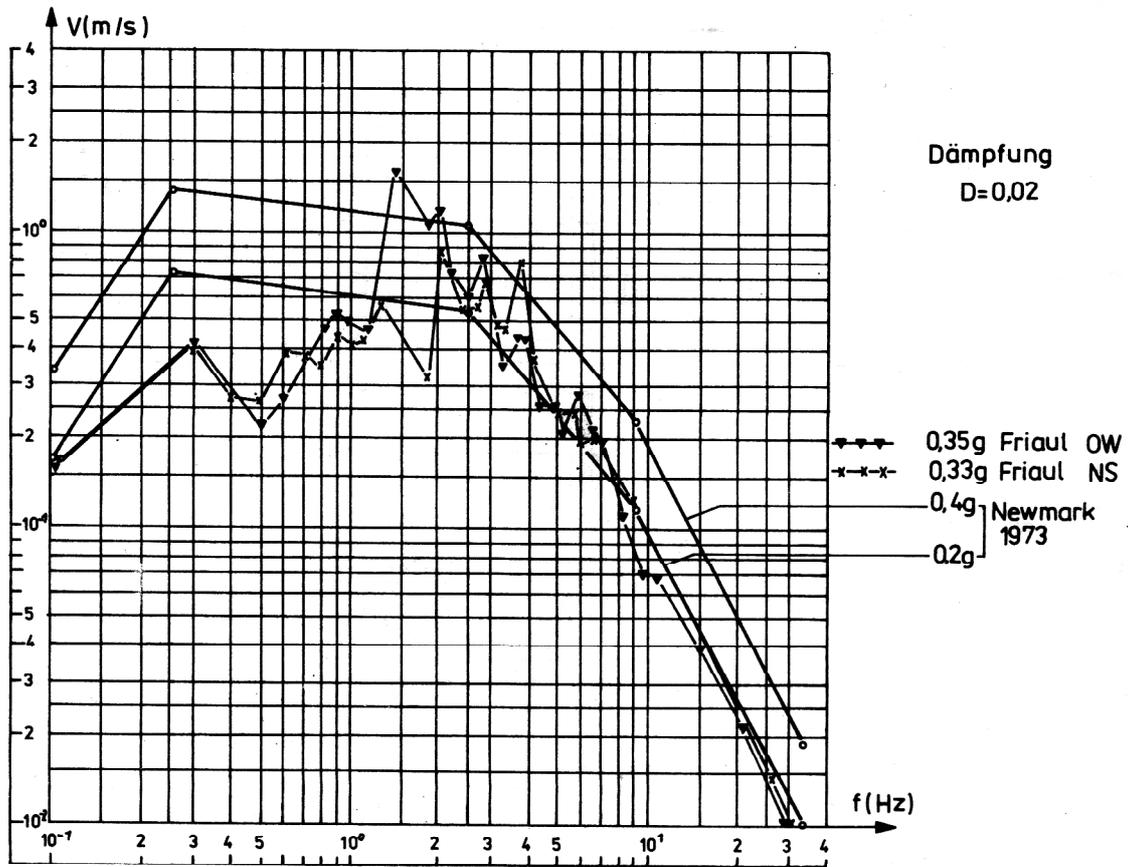


## SCHNITTKRÄFTE DES PUNKTMASSE -MODELLS

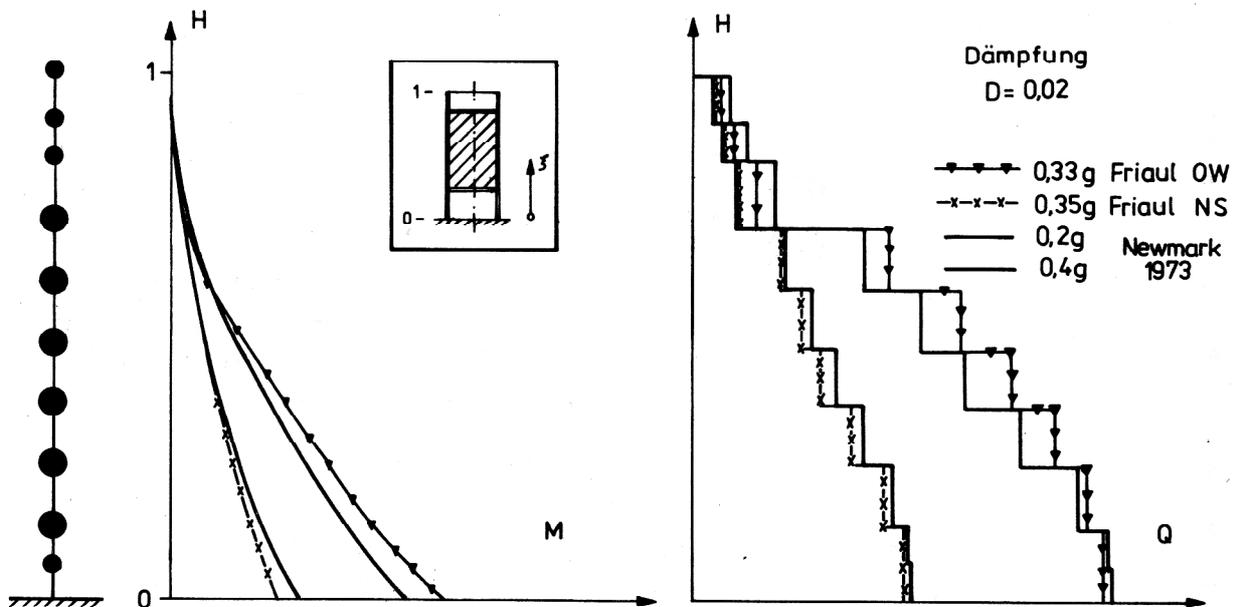


**Tabelle 6**  
Vergleich der Schnittkräfte aus aktuellen und geglätteten  
Entwurfsspektren (Taft, 0,05 g und 0,2 g Newmark-Spektren)

# RESPONSE - SPEKTREN

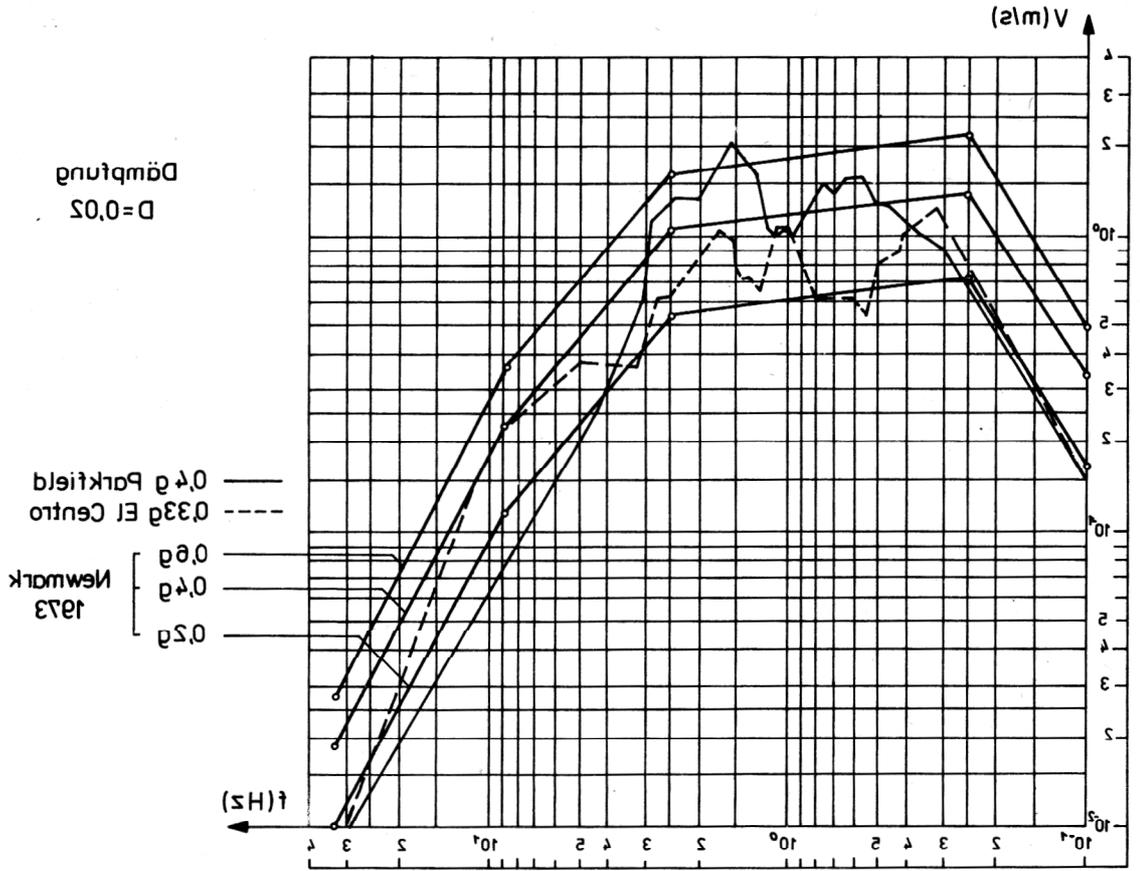


# SCHNITTKRÄFTE DES PUNKTMASSE -MODELLS



**Tabelle 7**  
Vergleich der Schnittkräfte aus aktuellen und geglätteten  
Entwurfsspektren (Friaul, 0,2 g und 0,4 g Newmark-Spektren)

# RESPONSE - SPEKTREN



# SCHNITTKRÄFTE DES PUNKTMASSE-MODELLS

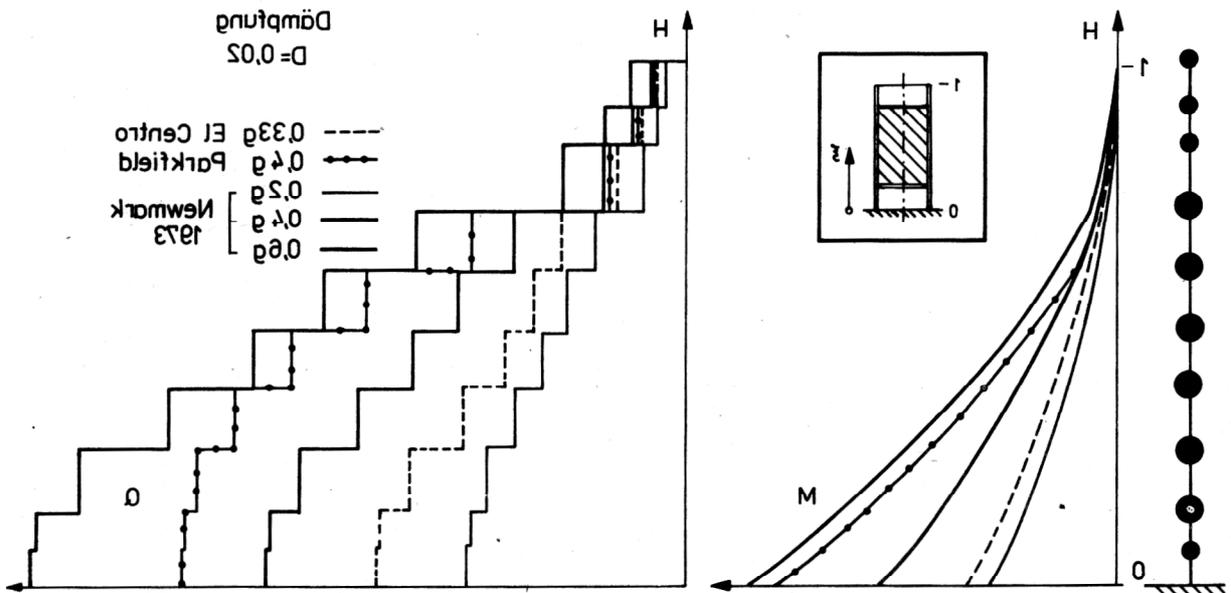
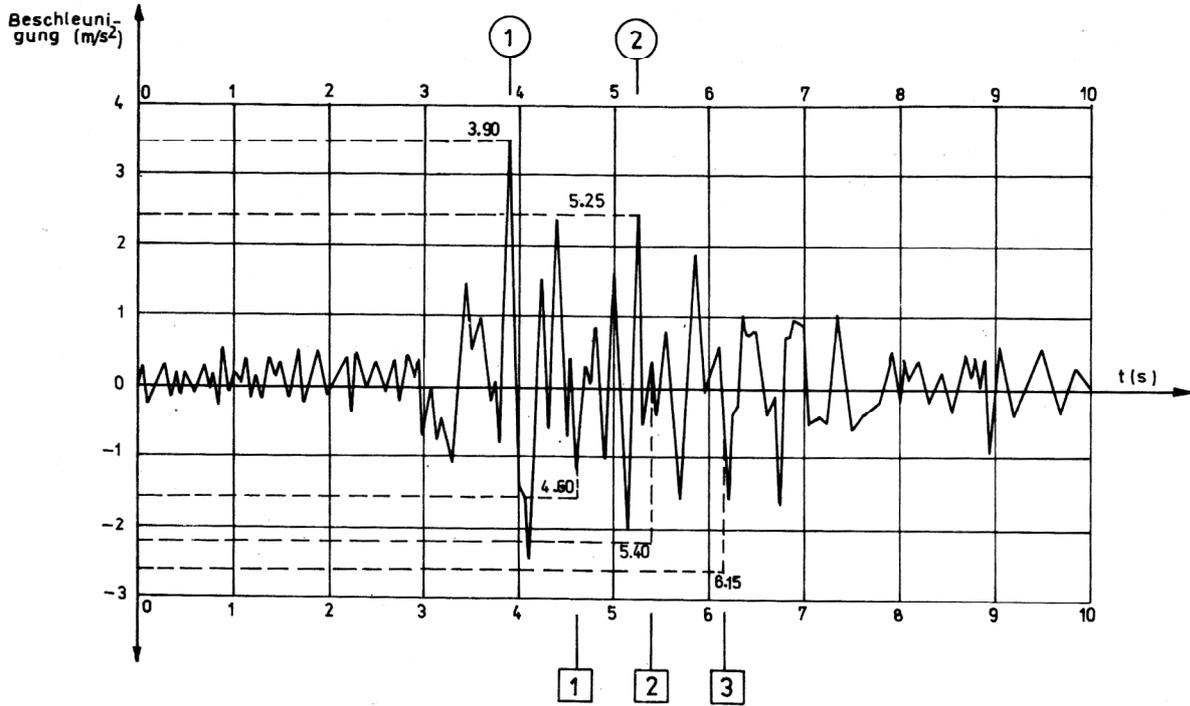
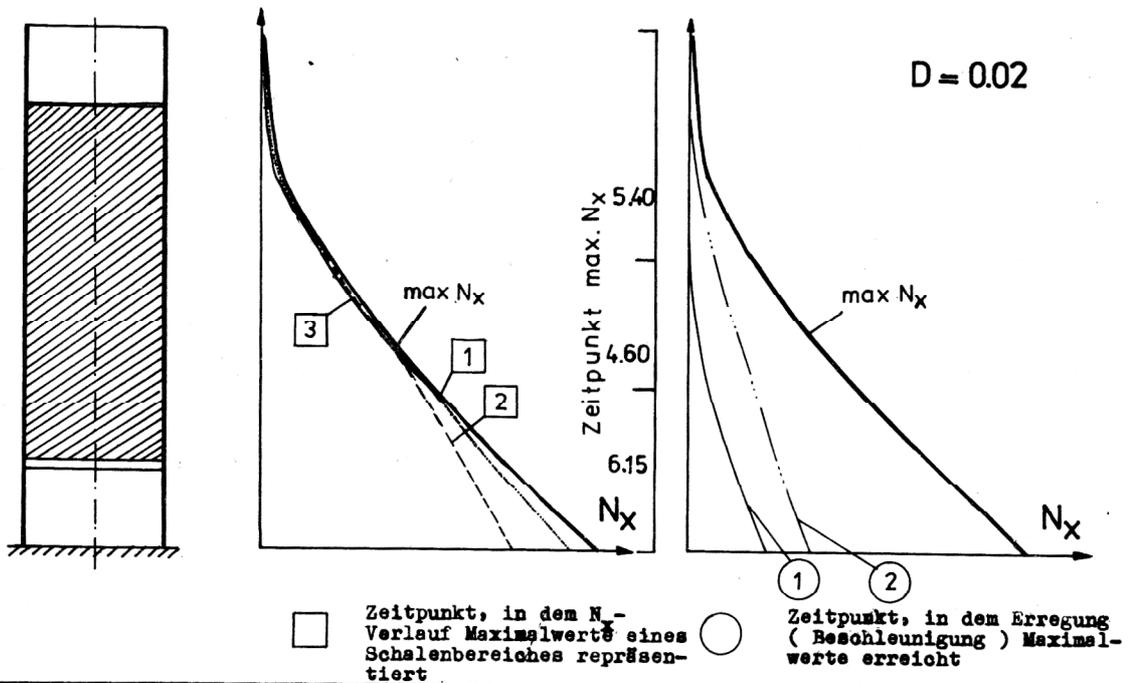


Tabelle 8  
 Vergleich der Schnittkräfte aus aktuellen und Entwurfspektren  
 (El Centro, Parkfield, 0,2 g, 0,4 g und 0,6 g Newmark-Spektren)

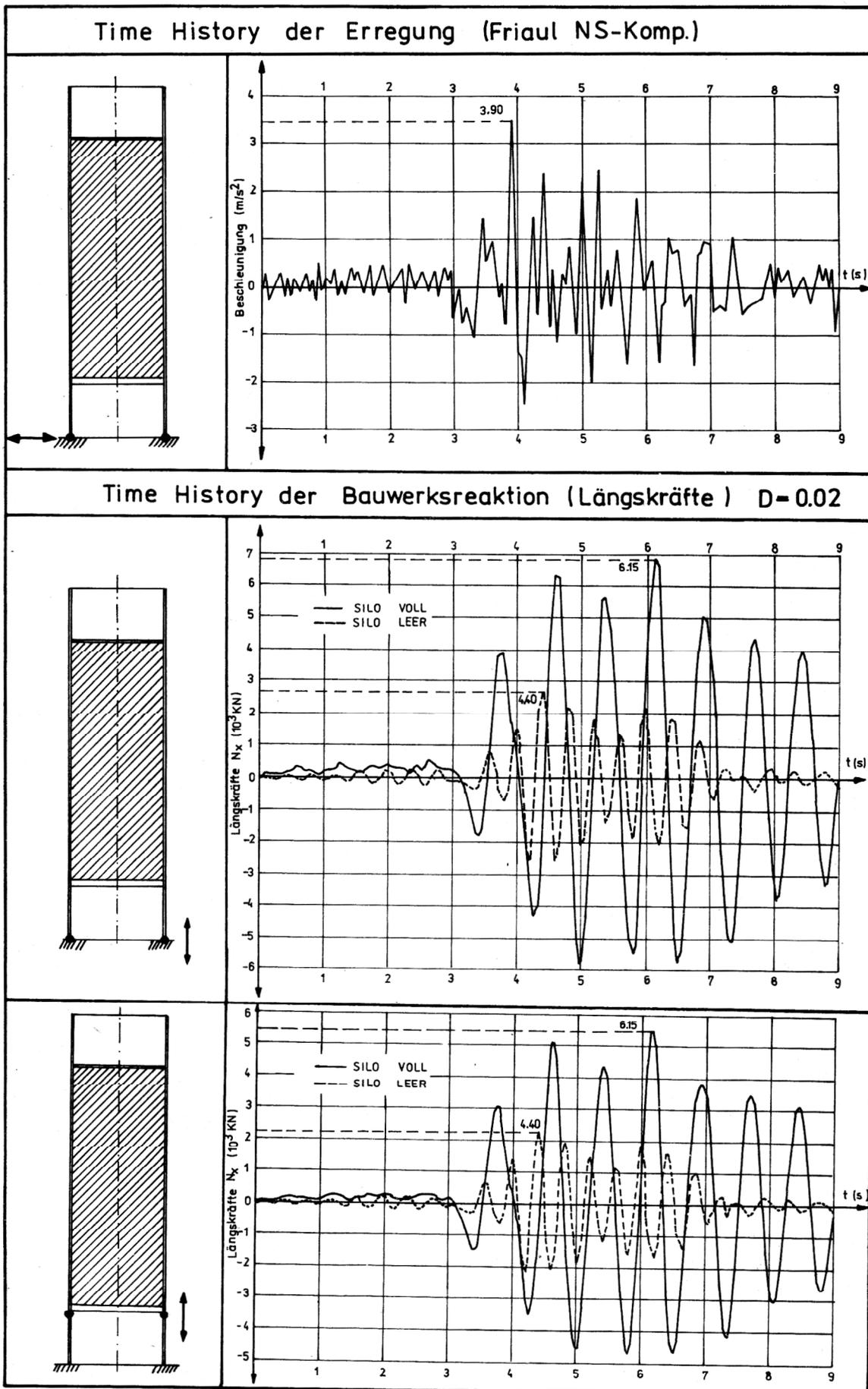
## Time History der Erregung (Friaul NS-Komp.)



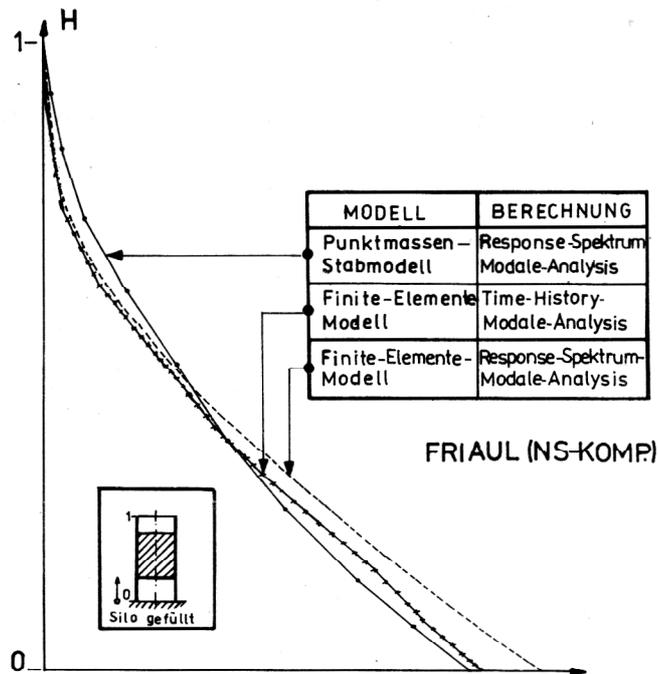
## Längskraftverlauf in Abhängigkeit von der Zeit



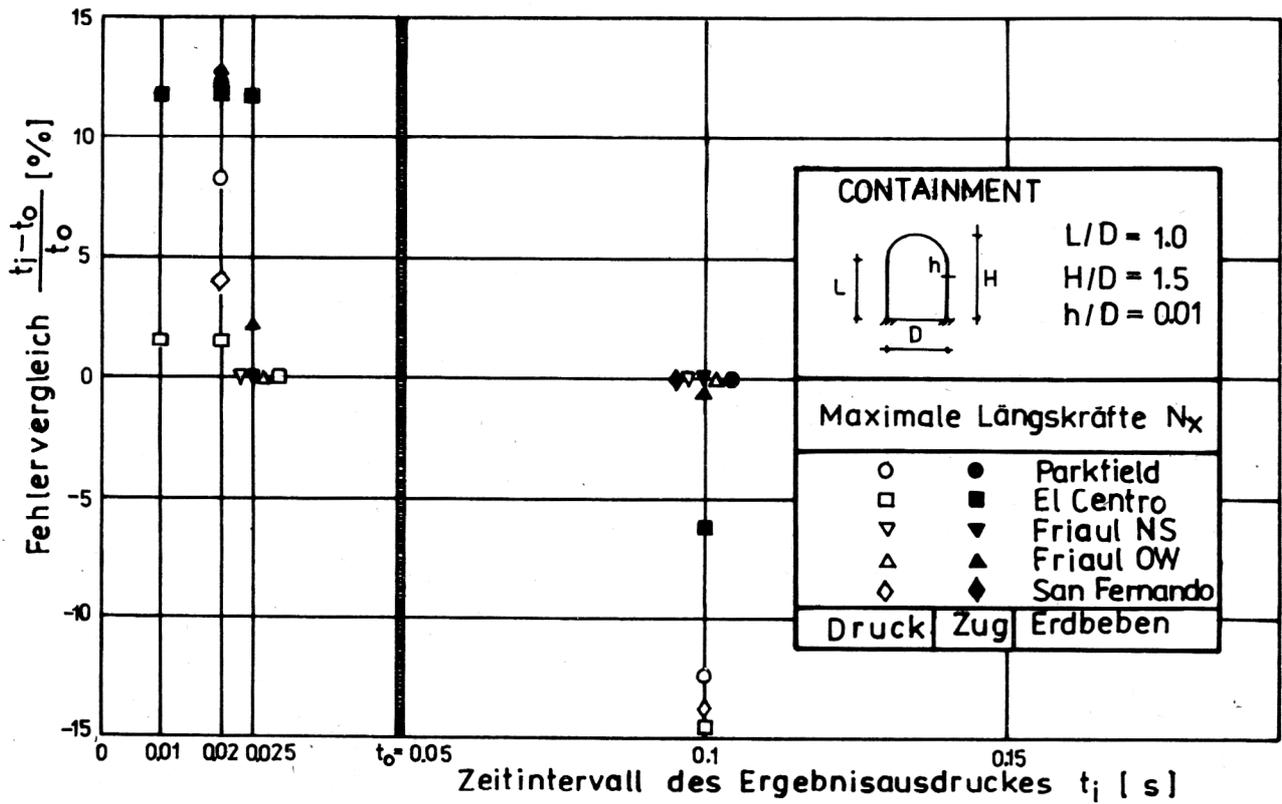
**Tabelle 9**  
Maximaler Längskraftverlauf eines Doppelstocksilos in Abhängigkeit von der Zeit



**Tabelle 10**  
 Vergleich des Längskraft-Zeitverlaufes eines Doppelstocksilos  
 im leeren und gefüllten Zustand



**Tabelle 11**  
Vergleich der Biege- bzw. Kippmomente aus Stab- bzw. Finite-Elemente-Modell



**Tabelle 12**  
Vergleich der Maximalen Längskräfte eines Containments in Abhängigkeit vom Zeitintervall des Ergebnisausdruckes (Bezugswert  $t_0 = 0,05$  s)