

**EVALUATION OF SEISMIC MOVEMENTS OF A PEBBLE BED
REACTOR CORE AS BASIS FOR SHAKING EXPERIMENTS**
(Berechnung seismischer Bewegungen des Cores eines Kugelhaufenreaktors
als Grundlage für Rüttelexperimente am Modell einer Kugelschüttung)

H.-J. GLÖCKNER, F. KEMTER

*Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Gottlieb-Daimler-Strasse 8, D-6800 Mannheim, Germany*

G. SCHMIDT

*Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Postfach 2080, D-5170 Jülich, Germany*

Zusammenfassung

Für die Erdbebenauslegung eines Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktors sind Aussagen über das Erdbebenverhalten der Kugelschüttung im Reaktorcore mit von Bedeutung. Diese lassen sich exakt nur mit Modellversuchen ermitteln. Als Randbedingungen müssen hierfür unter anderem die genauen seismischen Bewegungen des Reaktorcores bekannt sein.

Die Erdbebenauslegung von Kernkraftwerken erfolgt standardmäßig unter Verwendung von standortspezifischen Boden-Antwort-Spektren. Bei der Bestimmung dieser Spektren gehen bekanntlich die Informationen über die zeitlichen Bewegungsabläufe der Erdbebenanregung verloren. Derartige Vorgaben können somit nicht unmittelbar zur Ermittlung der Time-History-Bewegungen des Reaktorcores - als Randbedingung für Rüttelversuche an Kugelschüttungen - herangezogen werden.

Der erste Teil der Arbeit befaßt sich mit der Entwicklung der im zweiten Abschnitt herangezogenen, angepaßten Erdbebenzeitverläufe. Es wird dabei ein Verfahren diskutiert, bei dem ein natürliches, beliebig vorzugebendes Erdbeben durch iterative Veränderung an die Bedingungen eines vorgegebenen Design-Spektrums angepaßt wird, wobei die ursprüngliche Charakteristik des Erdbebens weitgehend erhalten bleibt.

Im zweiten Teil der Arbeit werden rechnerisch dynamische Untersuchungen einer Hochtemperaturreaktoranlage zur Ermittlung der seismischen Corebewegungen als Randbedingung für die Rüttelversuche diskutiert. Die Anregung besteht dabei aus modifizierten, - d. h. an ein vorgegebenes Design-Spektrum angepaßten - Erdbeben. Der Einfluß unterschiedlicher Bodensteifigkeiten und Lagerungsarten des Spannbetonbehälters wird durch parametrische Variation der Kennwerte untersucht.

Erste auf einem Rütteltisch durchgeführte Versuche haben gezeigt, daß sich ein Kugelhaufen bei Erdbebenanregung in seinem Verhalten signifikant von dem einer Flüssigkeit unterscheidet. Der Kugelhaufen schwappt nicht. Es finden nur lokale Umordnungen der Kugeln an der Oberfläche der Kugelschüttung statt.

1. Einleitung

Das Verhalten der Kugelschüttung im Spannbetonbehälter eines Hochtemperaturreaktors läßt sich genau nur mit Modellversuchen erfassen. Als Randbedingungen müssen hierfür die seismischen Bewegungen des Reaktors bekannt sein.

Im folgenden wird über rechnerische, dynamische Untersuchungen zur Ermittlung dieser Bewegungen berichtet. Es findet dabei ein Verfahren Anwendung, das es ermöglicht, natürliche, beliebig vorgegebene Erdbebenzeitverläufe durch iterative Änderung an ein vorgegebenes Design-Spektrum anzupassen. Erste Ergebnisse aus Rüttelexperimenten werden kurz diskutiert.

2. Darstellung eines Rechenverfahrens, das natürliche Erdbeben durch möglichst geringfügige iterative Abänderungen an ein vorgegebenes Design-Response-Spektrum anpaßt.

2.1 Aufbereitung der vorgegebenen Boden-Anregung eines natürlichen Erdbebenzeitverlaufes.

Der Zeitverlauf der Beschleunigung ist in 1000 bis 2000 Punkten gegeben. Er wird in 3000 - 6000 gleiche Zeitintervalle digitalisiert, wobei Zwischenpunkte interpoliert werden. Ferner wird er um eine Ruhezone auf 2^m Punkte erweitert, die ausreicht, die betrachteten Einmassenschwinger bei vorgegebener Dämpfung wieder zur Ruhe zu bringen, denn für weitere Rechnungen wird die Anregung als periodisch mit der erweiterten Anregungsdauer T betrachtet. Nach dem Algorithmus von Cooley und Tukey /3/ werden 2^{m-1} komplexe Fourierkoeffizienten ($c_k, k \in [0, N = 2^{m-1}]$) mit geringer Rechenzeit ermittelt.

$$-a(t) = \sum_{k=-N}^N c_k e^{ik\omega t} \quad (1)$$

$a(t)$ = Erweiterte Anregung, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $c_{-k} = \bar{c}_k$

2.2 Berechnung der Bewegungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungszeitverläufe von angeregten Einmassenschwingern der Eigenfrequenz ω_0 bei einer Dämpfung ζ

Sei $x_0(t)$ die Bodenbewegung, also $\ddot{x}_0(t) = a(t)$ die beschleunigende Anregung (vgl. 2.1), dann gilt für die Bewegung $x(t)$ des Schwingers:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 2\zeta\omega_0\dot{x}_0 + \omega_0^2x_0 \quad (2)$$

mit $x_{rel} = x - x_0$: $\ddot{x}_{rel} + 2\zeta\omega_0\dot{x}_{rel} + \omega_0^2x_{rel} = -\ddot{x}_0 = -a(t) \quad (3)$

Da die Anregung $-a(t)$ nach 2.1 im Frequenzenraum gegeben ist, können die Fourierkoeffizienten x_k der partikulären Lösung der DGL (3) für jede betrachtete Frequenz algebraisch ermittelt werden.

$$h = \frac{\omega_0}{\omega}, \quad x_k = C_k / \omega^2 (h^2 - k^2 - i 2\zeta h k) \quad (4)$$

Die Ableitungen ergeben sich ebenfalls trivial durch Multiplikation mit $i k \omega$. Die Fourierkoeffizienten b_k der part. Lösung des Beschleunigungszeitverlaufes $\ddot{x}(t)$ werden:

$$b_k = -k^2 \omega^2 x_k - C_k \quad (5)$$

weil: $\ddot{x} = \ddot{x}_{rel} + \ddot{x}_0$, und: $\ddot{x}_0 = a(t)$, C_k : Siehe (4)
In der homogenen Lösung $x_h(t)$ von (3) können die Randbedingungen $x_{rel}(0) = 0$ und $\dot{x}_{rel}(0) = 0$ erfüllt werden.

$$x_h(t) = \underline{C_1 e^{\lambda_1 \omega_0 t} + C_2 e^{\lambda_2 \omega_0 t}}, \quad \lambda_{1,2} = -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}$$

$$C_1 = \frac{x_p(0) \lambda_2 - \dot{x}_p(0) / \omega_0}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad x_p(0) = \sum_{k=-N}^N x_k \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{x_p(0) \lambda_1 - \dot{x}_p(0) / \omega_0}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad \dot{x}_p(0) = \sum_{k=-N}^N i k \omega x_k$$

Der Zeitverlauf der Beschleunigung eines Einmassenschwingers ist dann folgendermaßen dargestellt:

$$b(t) = \sum_{k=-N}^N b_k e^{i k \omega t} + \ddot{x}_h(t) \quad (7)$$

2.3 Berechnung des Response-Spektrums

Mit der in 2.2 dargestellten Methode können sehr schnell die Zeitverläufe der Beschleunigungen $b(t, \omega_0^{(i)})$ für verschiedene Eigenfrequenzen $\omega_0^{(i)}$ bestimmt werden; zur Rücktransformation des 1. Terms aus (7) wird die Methode von Colley und Tukey /3/ auf 2^{m-1} Zeitpunkte verwendet. Das Response-Spektrum $R(\omega_0^{(i)})$ ist dann definitionsgemäß:

$$R(\omega_0^{(i)}) = \max_{0 \leq t \leq T} |b(t, \omega_0^{(i)})| \quad (8)$$

2.4 Auswählen geeigneter Frequenzpunkte für die iterative Anpassung

Nachdem das Response-Spektrum der natürlichen Anregung, berechnet nach 2.1, 2.2 und 2.3 in ca. 100 - 200 Punkten vorliegt, werden für die Iteration 20-60 Frequenzen ω_0^j so ausgewählt, daß die entstehenden Frequenzintervalle ungefähr proportional zur mittleren Breite der Resonanz sind, die eine solche Einzelfrequenz als Anregung im Resonanz-Spektrum hervorrufen würde. Dies führt zu einer logarithmisch äquidistanten Auswahl, weil die Resonanzbreite proportional zur Frequenz ist.

$$\omega_0^{j+1} - \omega_0^j \approx \omega_0^j \cdot p \quad (9)$$

Für $p \approx 2 \zeta \sqrt{3}$ wird besonders gleichmäßige Konvergenz der Iteration erzielt, da dann die Resonanzen zweier benachbarter Frequenzen in der Intervallmitte auf die Hälfte abgesunken sind, also z. B. das gleichmäßige Anheben der Fourierkoeffizienten, die zu ω_0^{j+1} und ω_0^j gehören, zu einer gleich-

mäßigen Anhebung des Response-Spektrums im ganzen Intervall $[\omega_0^j, \omega_0^{j+1}]$ führt. Außerdem sollten unter den ausgewählten Frequenzen alle diejenigen sein, für die das Response-Spektrum relative Extrema zeigt. Dies kann man am leichtesten erreichen, indem man das o. g. Auswahlkriterium jeweils zwischen 2 deutlichen Extrema unabhängig anwendet. (Verschiedener Faktor p).

2.5 Die iterative Anpassung des Response-Spektrums $R(\omega_0)$ an das vorgegebene Design-Spektrum $D(\omega_0)$ durch Veränderung der Fourierkoeffizienten der Anregung

In Anlehnung an /1/ und /2/ werden die Differenzen und die Quotienten aus Design und Response für jedes ω_0^j gebildet:

$$E_j = D(\omega_0^j) - R(\omega_0^j) \quad , \quad Q_j = D(\omega_0^j) / R(\omega_0^j) \quad (10)$$

Die 1. Methode der Anpassung besteht darin, alle Fourierkoeffizienten C_k der Anregung, die innerhalb einer Halbwertsbreite zu $R(\omega_0^j)$ resonant beitragen, gemäß Q_j zu verändern,

$$C_k^i = B \cdot Q_i \cdot C_k \quad (11)$$

wobei $B \leq 1$ ein gemeinsamer Proportionalitätsfaktor ist und $\{C_k\}$ die neuen Koeffizienten der modifizierten Anregung sind $\{k\} = [k_A, k_E]$. Zur Bestimmung von k_A und k_E wird die dämpfungsabhängige Resonanzverschiebung beachtet.

Für $E_j > 0$ oder $R(\omega_0^j) = 0$ steht eine 2. Methode zur Verfügung: Zur Anregung wird ein gedämpfter Puls der Form:

$$p(t) = F \cdot E_j \cdot e^{-\lambda t} \sin \omega_0 t \quad (12)$$

in Fourierkoeffizienten dargestellt und zu den Koeffizienten der Anregung addiert. ($F \sim 0,3, \lambda \sim 0,03$).

Mit der jetzt geänderten Anregung werden die Berechnungen 2.2, 2.3 und 2.5 erneut durchgeführt (etwa 5-10 Iterationen) bis das Response-Spektrum an das Design angepaßt ist.

2.6 Schlußrechnung

Nach 2.3 können für die angepaßte Anregung alle für die Iteration nicht benötigten Punkte im Response-Spektrum berechnet werden.

2.7 Diskussion der zwei vorgestellten Methoden

Für die in Abb. (1-3) dargestellte Anpassung wurde nur die 1. Methode verwendet. Sie reicht in den meisten Anwendungsfällen aus und führt zu sehr gleichmäßiger Anpassung, wirkt sich aber fallabhängig ungünstig auf die Normierung aus.

Die 2. Methode für $E_j > 0$ gemischt mit der 1. Methode für $E_j \leq 0$ erhält die Normierung, wirkt sich aber auf die Charakteristik der Anregung stärker verändernd aus, da es zu einer Anhäufung von Korrekturpulsen zu Beginn des Erdbebenzeitverlaufes kommen kann. Dies wäre möglicherweise durch später beginn-

nende Pulse oder durch Faltung des Pulses mit der Einhüllenden des Bebens vermeidbar. Letzteres könnte man im Fourierraum durch einfache Multiplikation der Koeffizienten erreichen.

Ausgehend von der Anregung $a(t) = 0$ kann mit der 2. Methode ein vollständig künstliches Erdbeben erzeugt werden, das reich an Frequenzen und kompatibel mit einem vorgegebenen Design ist.

2.8 Die Berechnungen 2.1 - 2.6 stehen in einem Computer-Programm (EARTHQ, GPØ55, Autor: Fr. Jisba) bei HRB-Mannheim zur Verfügung. Die Rechenzeit liegt für eine vollständige Anpassung unter 1 min auf IBM 3033.

3. Berechnung der seismischen Corebewegungen als Randbedingungen für Modellversuche

3.1 Rechenmodell

Mit dem dynamischen Modell einer projektierten PNP-3000 Reaktoranlage wurden als Randbedingungen für Rüttelexperimente an Kugelschüttungen die seismischen Bewegungen des Cores im Spannbetonbehälter, dem Druckgefäß des Hochtemperaturreaktors rechnerisch ermittelt.

In Abb. 4 ist der Reaktor im Schnitt dargestellt; das dynamische Rechenmodell zeigt Abb. 5. Dieses besteht aus einem elastisch gebetteten Balkenschwinger mit diskreten Einzelmassen - die die verschiedenen Anlagenteile repräsentieren - und masselosen flexiblen Balkenelemente, die wegen der gedungenen Bauweise sowohl Schub- als auch Biegedeformationen berücksichtigen. Der Boden wirkt als elastische Bettung und ist in dem Modell gemäß /4/ durch ein System von linear-elastischen Federn mit zu der Bodensteifigkeit äquivalenten Federsteifigkeiten und Dämpfungen berücksichtigt.

Strukturen und Bodendämpfungen weisen zum Teil beträchtliche Unterschiede auf, insbesondere hängen die Bodendämpfungen von der jeweiligen Deformationsrichtung ab. Der Einfluß der unterschiedlichen Dämpfungsgrößen wurde in der Rechnung durch modale Dämpfungen berücksichtigt.

3.2 Rechnerische Untersuchungen

Die Steifigkeit des Bodens am Standort und die Lagerung des Spannbetonbehälters beeinflussen unmittelbar die seismischen Corebewegungen und damit die Anregungen des Kugelhaufens.

Um hinsichtlich dieser Anregungen zu standortunabhängigen Aussagen zu gelangen, wurden die rechnerischen Untersuchungen unter parametrischer Variation des Bodenschubmoduls und für 2 konzipierte Lagerungsarten des SBB - eine in Horizontalrichtung weiche Neoprene-Lagerung und eine feste Verbindung des SBB mit der Abstützung - durchgeführt.

Die Anregung bestand aus modifizierten Erdbebenzeitverläufen, die mit dem

im ersten Abschnitt erläuterten Verfahren aus gemessenen natürlichen Erdbeben (EL CENTRO, TAFT, GOLDEN GATE) durch iterative Anpassung an ein vorgegebenes Design-Spektrum (Abb. 1) gewonnen wurden.

Abb. 6 zeigt für einen Bodenschubmodul von $G = 6000 \text{ MN/m}^2$ und fester Lagerung des SBB die mit dem dynamischen Modell (Abb. 5) berechneten horizontalen und vertikalen seismischen Bewegungen des Coremittelpunktes. Als Anregung wurde der in Abb. 3 dargestellte modifizierte EL CENTRO Erdbebenzeitverlauf in horizontaler und vertikaler Richtung angesetzt. Die maximale Bodenbeschleunigung betrug dabei 2 m/s^2 in horizontaler Richtung und 1 m/s^2 in vertikaler Richtung.

Die Auswirkungen einer für horizontale Bewegungen weichen Neoprene-Lagerung des Spannbetonbehälters und einer weichen Bodensteifigkeit ($G = 20 \text{ MN/m}^2$) auf das Schwingungsverhalten des Spannbetonbehälters ist aus den Abb. 7 und 8 ersichtlich. Die Anregung bestand aus einem an das in Abb. 1 gezeigte Design-Spektrum angepaßten TAFT-Erdbeben. Die max. Bodenbeschleunigungen betrugen analog zu der vorangegangenen Untersuchung 2 m/s^2 bzw. 1 m/s^2 .

In Abb. 7 läßt sich sehr deutlich der Einfluß der in horizontaler Richtung nachgiebigen Neoprene-Lagerung erkennen.

Die Lagerung bedingt eine Erhöhung der Schwingungszeiten und der Auslenkungen des Spannbetonbehälters in horizontaler Richtung, währenddessen die vertikalen Bewegungen von der Neoprene-Lagerung praktisch unbeeinflußt bleiben. Aus einem weichen Boden resultieren sowohl für die Horizontal- als auch für die Vertikalschwingungen höhere Eigenperioden und größere Amplituden (Vergleiche von Abb. 6 mit Abb. 8).

3.3 Ausblick auf erste Ergebnisse aus Rüttelversuchen

An einem mit Kugeln gefüllten Silo (Höhe 1,5 m, Durchmesser 1,5 m) wurden erste Rüttelexperimente durchgeführt (Abb. 9). Die Kugelschüttung bestand aus Graphitkugeln mit einem Durchmesser von $d_k = 60 \text{ mm}$. Die Kugeln entsprachen damit in ihren Abmessungen den in Hochtemperaturreaktoren verwendeten Brennelementen. Mit dem Rütteltisch konnten gleichzeitig horizontale und vertikale Bewegungen mit einer maximalen Amplitude von 15 mm aufgebracht werden.

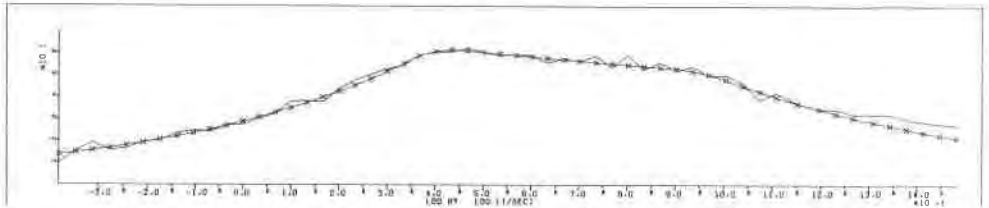
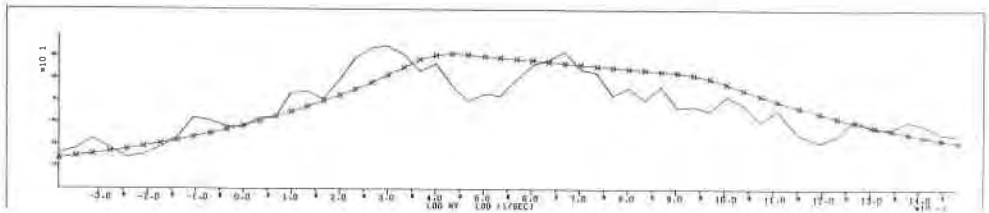
Als Anregungen wurden neben sinusförmigen, horizontal und vertikal gekoppelten Weg-Zeit-Verläufen die in Abb. 6 dargestellten Bewegungen des Coremittelpunktes herangezogen.

Erste Messungen und visuelle Beobachtungen ergaben dabei, daß innerhalb des Kugelhaufens keine Bewegungen der Kugeln stattfinden. Lediglich an der Oberfläche der Kugelschüttung wurden bis zu einer Tiefe von $3 \times \text{Kugeldurchmesser}$ geringe Umordnungen beobachtet.

Das Verhalten eines Kugelhaufens bei Erdbebenanregung unterscheidet sich somit signifikant von dem Verhalten einer Flüssigkeit.

Literaturverzeichnis

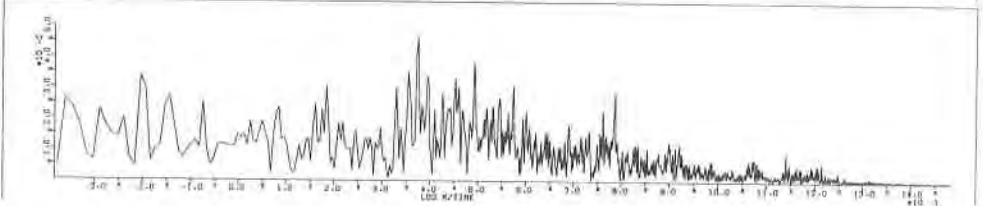
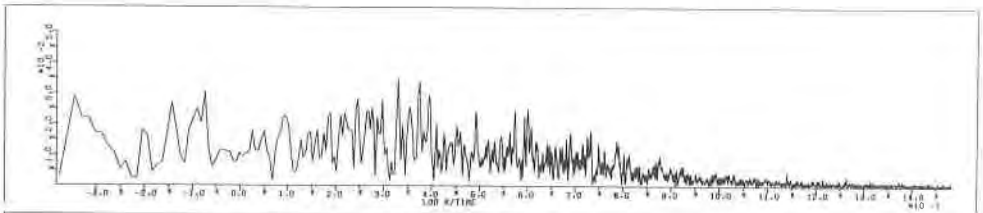
- /1/ P. C. Rizzo
Development of Real/Synthetic Time Histories to match smooth Design Spectra
Nuclear Engineering and Design 32 (1975) 148-155
- /2/ Nien-Chien Tsai
Spectrum-compatible motions for design purposes
ASCE, J. Eng. Mech. Div. 98 (EM2) Apr. (1972)
- /3/ J. W. Cooley and J. W. Tukey
An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series
Mathematics and Computations, Vol. 19 (Apr. 1965), p. 297
- /4/ R. W. Whitman
Soil-Structure Interaction
Seismic Design for Nuclear Power Plants p. 245



Response/Design Spektrum

Oben: natürliche Erdbebenanregung
Unten: nach 7 Iterationen

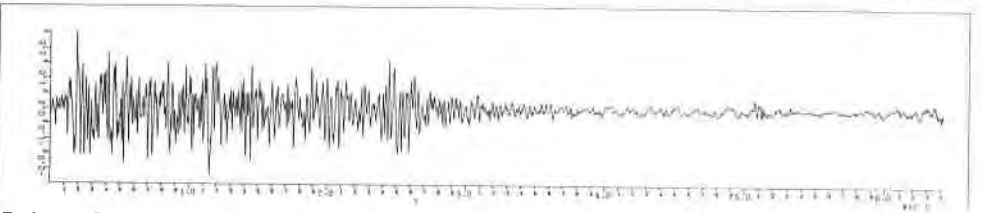
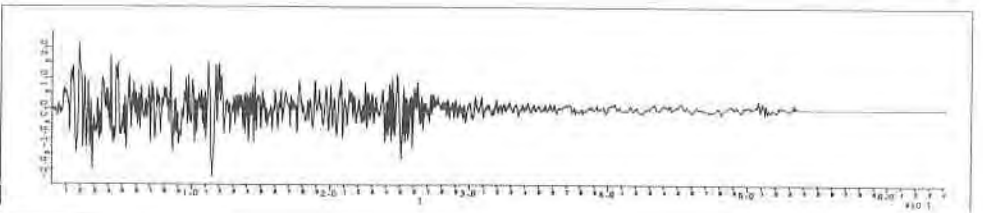
Abb. 1



Betrag der Fourierkoeffizienten

Oben: natürliche Erdbebenanregung
Unten: nach 7 Iterationen

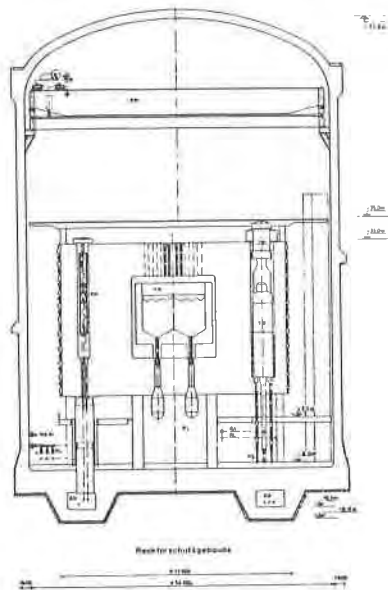
Abb. 2



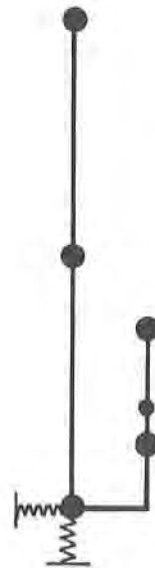
Zeitverlauf der Anregung

Oben: natürliches Erdbeben
Unten: nach 7 Iterationen

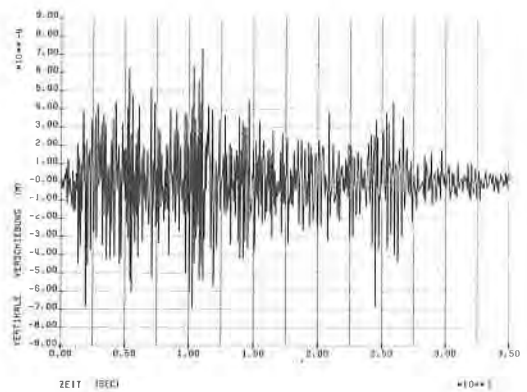
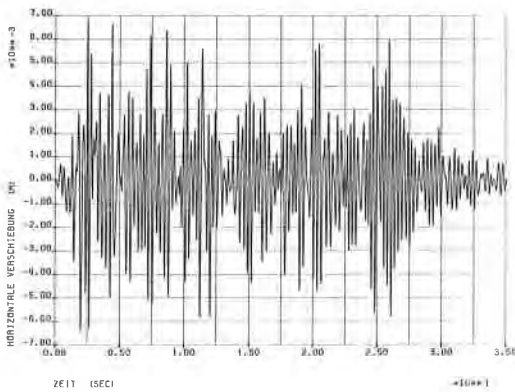
Abb. 3



Schnitt durch den Reaktor Abb. 4



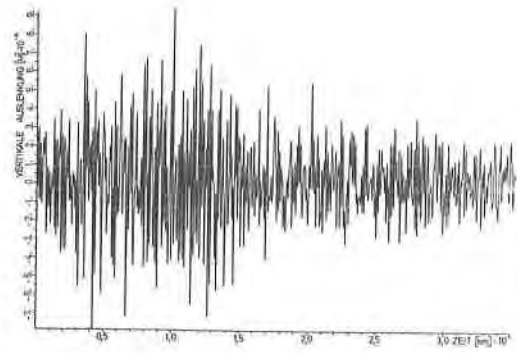
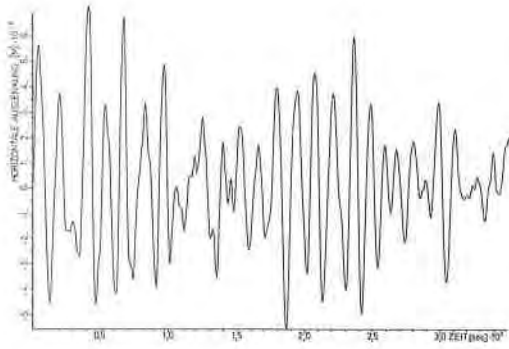
Rechenmodell Abb. 5



Bewegungen des Coremittelpunktes
 Anregung: EL CENTRO S90W (modifiziert)
 Bodenschubmodul: $G = 6000 \text{ MN/m}^2$
 Steife Lagerung des SBB

Links: Horizontalrichtung
 Rechts: Vertikalrichtung

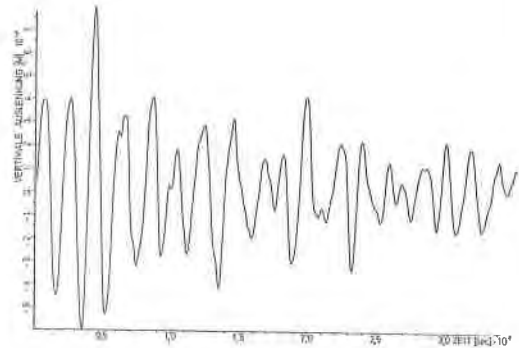
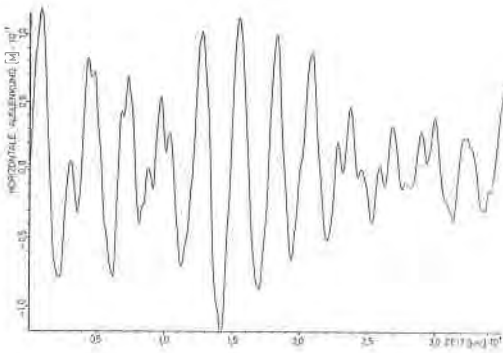
Abb. 6



Bewegungen des Coremittelpunktes
Anregung: TAFT N21E (modifiziert)
Bodenschubmodul: $G = 6000 \text{ MN/m}^2$
Neoprene-Lagerung des SBB

Links: Horizontalrichtung
Rechts: Vertikalrichtung

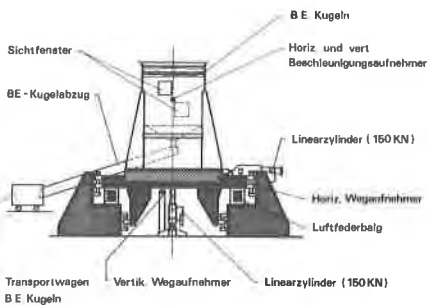
Abb. 7



Bewegungen des Coremittelpunktes
Anregung: TAFT N21E (modifiziert)
Bodenschubmodul: $G = 20 \text{ MN/m}^2$
Steife Lagerung des SBB

Links: Horizontalrichtung
Rechts: Vertikalrichtung

Abb. 8



Versuchsstand zur Erdbebensimulation

Abb. 9