

Integraler baulicher Erdbebenschutz I: Schutzauftrag - Begriffe - rechnerischer Nachweis

Autor(en): **Staudacher, Konrad**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 17

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74476>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Integraler baulicher Erdbebenschutz I:

Schutzauftrag – Begriffe – rechnerischer Nachweis

Von Konrad Staudacher, Zürich

Der Erdbeben-Schutzauftrag der Baunormen widerspiegelt den Stand von Wissenschaft und Technik. Bauingenieure haben vorerst gelernt, Bauwerke erdbebengerecht auszubilden, und später, sie erdbebentüchtig zu machen. Wird jedoch heute der Auftrag erteilt, Bauwerke umfassend gegen Starkbeben zu sichern und den erreichten Schutzgrad rechnerisch nachzuweisen, entstehen ernsthafte technische und analytische Probleme.

Forschungsarbeiten haben es in den letzten Jahren erlaubt, ein Schutzsystem zu entwickeln, das die Erdbebenisolation der Bauwerke zum Ziel hat. Schweizer Ingenieure leisteten darin Pionierarbeit. Theoretische Untersuchungen zeigen, dass dieses System Bauwerke gegen stärkste Erdbeben zu sichern vermag. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde mit dem «integralen baulichen Erdbebenschutz» ein erweiterter Schutzauftrag formuliert, der in Zukunft für privilegierte Bauwerkklassen gelten soll.

Einleitung

Unter Fachleuten ist heute die Auffassung weit verbreitet, dass Bauwerke bei konventioneller Ausbildung gegen die zerstörende Wirkung extremer Erdbeben nicht wirksam geschützt werden können [1]. Totalschäden an modernen Hochbauten bestätigen diese Annahme, obwohl die rechnerische Kontrolle nach dem heute üblichen Muster in Einzelfällen Sicherheiten bis für Beben der Richter-Magnitude 8 auswies [2]. Sind wir Bauingenieure damit gezwungen, vor der Herausforderung, die extreme Erdbeben darzustellen, zu kapitulieren? – Entwicklungsarbeiten an der Erdbebenisolation der Bauwerke weisen auf sehr wirksame neue Lösungsmöglichkeiten hin [3, 4, 5].

1. Voraussetzungen

Für den Schutzauftrag werden folgende Voraussetzungen eingeführt:

- Der Standort des zu schützenden Bauwerks befindet sich in einer starkbeben-gefährdeten Zone.
- Der Bauherr wünscht, dass sein Bauwerk gegen die denkbar stärksten Erdbeben sicher ausgelegt wird.
- Es wird ein umfassender numerischer Nachweis der Fähigkeit des Bauwerks verlangt, Starkbeben schadlos standzuhalten.

Diese Ansprüche gehen wesentlich über jene hinaus, die bisher aufgrund gültiger Erdbebennormen an die technische

Qualität eines Bauwerks und an die Güte eines rechnerischen Erdbeben-Sicherheitsnachweises gestellt werden konnten.

2. Beschränkter Schutzauftrag in modernen Erdbebennormen

2.1. Aktuelle Situation

Die Art der Formulierung des Erdbeben-Schutzauftrags in modernen Normen [6, 7, 8, 9] legt die Problematik des baulichen Erdbebenschutzes offen. Mitte der siebziger Jahre wurde im Entwurf zu den kalifornischen Bauvorschriften folgender Wortlaut verwendet (Übersetzung):

«Was Erdbeben anbetrifft, sollten die Bauwerke im Einklang mit den Vorkehrungen und Prinzipien dieser Vorschriften fähig sein:

- kleinere Erdbeben schadlos zu überstehen
- mittelstarke Erdbeben ohne Tragwerkschäden, aber mit einigen Schäden an nichttragenden Bauteilen zu überstehen
- Grossbeben einer Intensität, die den stärksten in Kalifornien erlebten Beben entspricht, ohne Bauwerk-kollaps, aber mit Tragwerkschäden und Schäden an nicht-tragenden Bauteilen zu überstehen.»

Dieses Konzept ist nicht die Folge übersetzter Kosten für zusätzliche bauliche Massnahmen, sondern es berücksichtigt, dass ein umfassender Erdbebenschutz mit konventionellen technischen

Mitteln gar nicht sichergestellt werden kann. Es gilt derzeit für alle Bauwerk-klassen, unabhängig von deren Gefährdungspotential für Bewohner und Umfeld.

In der Praxis bedeutet dieses Konzept, dass bei extremalen Erdbebenintensitäten die mechanische Integrität des Bauwerks, insbesondere die Unversehrtheit seines Tragwerks nach dem Beben, dem Schutz des menschlichen Lebens untergeordnet wird: *Man ist bereit, Bauschäden bis zur Abbruchreife hinzunehmen, falls ein Kollaps vermieden wird und die Fluchtwege offenbleiben.*

Kommt es bei Starkbeben also zum Schadenfall, zerbricht das Tragwerk. Bei kritischen Bauwerken müsste dadurch allerdings mit katastrophartigen Folgeschäden gerechnet werden. Es ist deshalb angezeigt, im Zusammenhang mit den heute gültigen Erdbebennormen von einem «beschränkten Schutzauftrag» zu sprechen.

2.2. Neuorientierung

Diese Beschränkungen sollen überwunden werden. Ein Bedürfnis besteht insbesondere für ausgewählte Bauwerk-klassen, aber auch für Bauherren, die aus grundsätzlichen Erwägungen eine erdbebensichere Konzeption verlangen. Das hat folgende Konsequenzen:

1. Die Erdbeben-Intensitätsstufe «Extremalbeben» muss in die *Lastfall-Definition* aufgenommen werden.
2. Neue *technische Konzepte* müssen bereitgestellt werden, um die Erdbebenresistenz konstruktiv einfach und wirtschaftlich bis zur umfassenden Erdbebensicherheit anheben zu können. Die derzeit verfügbaren Mittel reichen nicht wesentlich über den Schutz gegen Beben mittlerer Intensitäten hinaus.
3. Neue *analytische Methoden* müssen erarbeitet werden, um durch Rechnung oder Experiment direkt und ohne übersetzte Kosten nachweisen zu können, dass ein Bauwerk einen bestimmten (hohen) Schutzgrad erreicht. Die heute verfügbaren Methoden sind in der Anwendung untragbar aufwendig.
4. Die *Verpflichtung des Bauherrn*, für bestimmte Bauwerk-klassen in hochseismischen Zonen umfassende technische Massnahmen zum Erdbebenschutz vorzusehen, muss gesetzlich verankert werden.

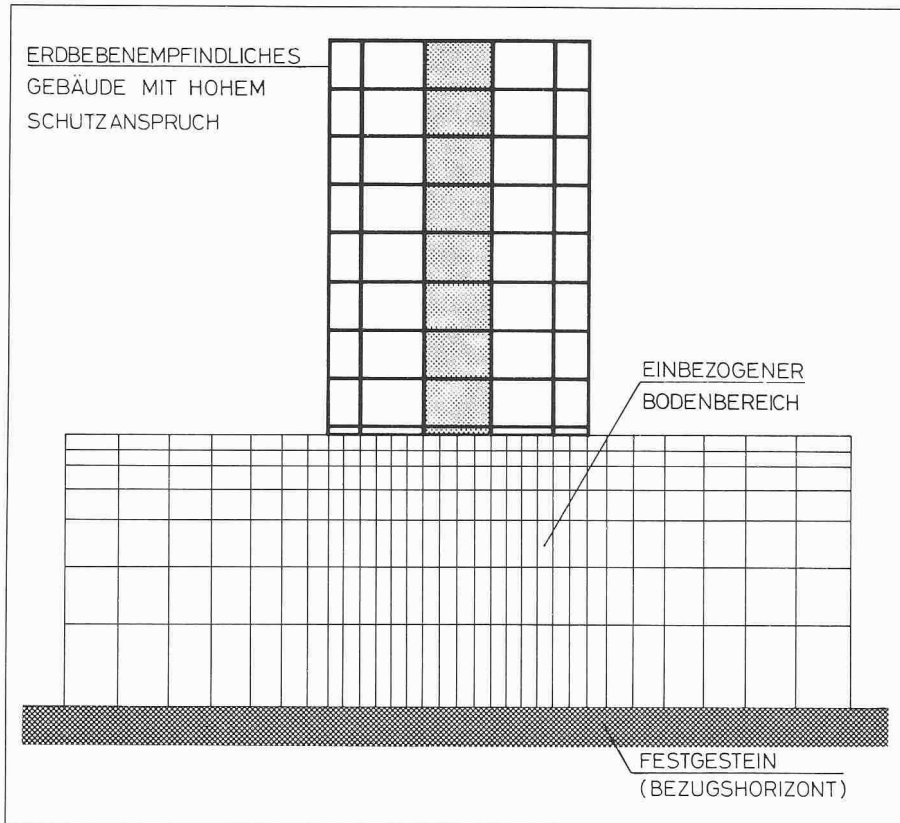


Bild 1. Schnitt durch ein komplettes dreidimensionales Bauwerkmodell mit dem mitwirkenden Baugrund

3. Numerischer Nachweis der Erdbebensicherheit

3.1. Grenzen der Reaktionsspektren-Methode

In vielen modernen Normen wird empfohlen, die Reaktionsspektren-Methode zum Erdbeben-Sicherheitsnachweis von Bauwerken zu verwenden [6 bis 12]. Ihr Wert liegt vor allem darin, für kleinere bis mittlere Erdbebenintensitäten eine einfache, direkte und kostengünstige Abschätzung seismischer Ersatzkräfte zu ermöglichen, die nach Normkonvention zur Bemessung herangezogen werden dürfen. Sie war jedoch von Anfang an nicht für den Sicherheitsnachweis von Bauwerken unter Extremalbeben-Beanspruchung ausgelegt [13, 14.]

Die Gründe werden in [15] ausführlich dargelegt. Sie zielen auf Kernfragen des baulichen Erdbebenschutzes und seiner analytischen Behandlung ab. Insbesondere geht aus dieser Studie hervor, dass der rechnerische Nachweis der Extremalbeben-Sicherheit von Bauwerken auf dieser Grundlage unsicher ist: *Fehlbeurteilungen der maximalen Beanspruchungszustände in den exponierten Tragwerkteilen um einen Faktor 2 bis 6 müssen erwartet werden.*

3.2. Folgerungen

Diese Situation lässt sich kaum ohne wesentliche Änderungen in der Methodik des Erdbeben-Sicherheitsnachweises

beheben, wozu nach [15] folgende Massnahmen erwogen werden sollten:

1. echt dreidimensionale Modellierung der Bauwerke
2. voller Einbezug des Baugrunds in das mathematische Modell (Bild 1)
3. Verfeinerung der analytischen Modelle, bis sie die realen Vibrationseigenschaften der Bauwerke (Eigenfrequenzen, Modalformen, Systemdämpfung) zuverlässig wiedergeben
4. innere Auflösung der physikalischen Modelle, bis die Tragwerkteile tatsächlich aufgefunden werden können, die als erste elasto-plastische Deformationen (Zerstörungen) erleiden
5. Übergang zur nicht-linearen Analyse (Geometrie, Baumaterialien, Baugrund) für den Sicherheitsnachweis in den oberen Erdbeben-Intensitätsstufen
6. Einsatz von baugrundabhängigen dreidimensionalen Bemessungsspektralformen auf Maximalwert-Basis für den Sicherheitsnachweis in den unteren Erdbeben-Intensitätsstufen
7. Einsatz einer Serie von typischen dreidimensionalen Bemessungsbeben für den Extremalbeben-Sicherheitsnachweis
8. Rotation der dreidimensionalen Bemessungsbeben um die Fundation der Bauwerke, um die tatsächlich grössten System- und Elementreaktionen aufzufinden (Bild 2)

9. Parameteranalyse, um den Einfluss von Annahmefehlern in der Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsverteilung der Bauwerke einzuzugrenzen
10. Untersuchung der lokalen Resonanzgefahr in Teilbereichen der Bauwerke

Derselbe Artikel enthält ergänzende Massnahmen, die darauf abzielen, den Lastfall «Erdbeben» wirklich phänomengerecht zu definieren. Insbesondere soll er in Zukunft echt *dreidimensional* eingeführt werden, was die Anwendung der Reaktionsspektren-Methode in Frage stellt. In Kap. 8 wird deshalb ein Vorschlag unterbreitet, wie der Extremalbeben-Sicherheitsnachweis für eine bestimmte Bauwerkklasse erbracht werden kann.

4. Der Begriff des integralen baulichen Erdbebenschutzes

In der Folge wird neu der erweiterte Schutzauftrag dem beschränkten nach Kap. 2 gegenübergestellt. Er betrifft das Erdbebenverhalten ausgewählter Bauwerkklassen. Sein Ziel besteht im «integralen baulichen Erdbebenschutz» und ist wie folgt definiert:

«Integral erdbebensichere Bauwerke halten den grössten am Standort gemessenen oder zu erwartenden Starkbeben schadlos stand. Das Tragwerk erleidet keine elasto-plastischen Deformationen (Zerstörungen). Die entsprechende Fähigkeit des Tragwerks ist durch Rechnung oder Experiment nachweisbar.»

Zum analytischen Nachweis ist eine hohe innere Auflösung der Struktur erforderlich, so dass jene exponierten Tragwerkteile tatsächlich aufgefunden werden, deren Versagen einen Bauwerk kollaps einleiten könnte.

5. Begriffe zur Lastfall-Definition

Die in Kap. 6 folgenden Begriffe stellen auf eine Lastfall-Definition in drei Erdbeben-Intensitätsstufen ab:

- Intensitätsstufe «Standardbeben»: Sicherheitsklasse I
- Intensitätsstufe «Intensivbeben»: Sicherheitsklasse II
- Intensitätsstufe «Extremalbeben»: Sicherheitsklasse III.

Als «Starkbeben» werden in der Fachliteratur solche Beben bezeichnet, die Bauschäden verursachen. Diese Bezeichnung umfasst also alle drei obigen Intensitätsstufen.

Um der Forderung nach ingenieurmässiger Erfassbarkeit der Erdbeben-Intensitätsangaben Rechnung zu tragen [15], wurde zur Klassifizierung der Bemessungsbeben die sog. «vektorielle seismische Bewegungsintensität» BI entwickelt [5]. Als Verhältnis der seismischen Bewegungsintensitäten BI in den drei genannten Sicherheitsklassen wird für hochseismische Regionen gegenüber [5] neu 1:2:5 vorgeschlagen.

Definitionen, gültig für *hochseismische Regionen*:

- «Standardbeben» sind Starkbeben mit einer Wiederkehrhäufigkeit von 5 bis 10 Jahren. Der Absolutwert der Bewegungsintensität BI wird mit repräsentativen Bemessungsbeben errechnet und als Bezugsgrösse auf 1.0 normiert.
- «Intensivbeben» sind Starkbeben mit einer Wiederkehrhäufigkeit von 50 bis 100 Jahren (1 bis 2 Mal in der Lebensdauer eines Bauwerks). Der Relativwert der Bewegungsintensität BI wurde mit 2.0 ermittelt.
- «Extremalbeben» sind die grössten Starkbeben, die am Standort des Bauwerks oder in seismisch ähnlich aktiven Regionen je gemessen wurden oder dort zu erwarten sind. Der Relativwert der Bewegungsintensität BI wurde auf 5.0 festgelegt.

6. Begriffe zur Erdbebensicherheit von Bauwerken

Die üblichen Begriffe zur baulichen Erdbebensicherheit orientieren sich an den Bedürfnissen des beschränkten Schutzauftrags der Normen (Kap. 2), vermögen den Anforderungen des integralen Erdbebenschutzes aber nicht gerecht zu werden. Die nachfolgende Terminologie soll diesbezüglich eine Klärung bringen:

- «Erdbebengerecht» sind Bauwerke, die den bautechnischen und konstruktiven Anforderungen gemäss den einschlägigen Erdbebennormen genügen. Dazu gehören insbesondere: Standortwahl, Ausbildung der Foundation, Qualität der Baumaterialien, Konzeption des Gesamtsystems, Bearbeitung der konstruktiven Details. Ein rechnerischer Nachweis ist nicht erforderlich.
- «Erdbebentüchtig» sind erdbebengerecht ausgelegte Bauwerke, für die in Normen elasto-plastische Deformationen (lokale Zerstörungen im Tragwerk) zugelassen werden. Dieses Verhalten ist mit einfachen dynamischen Berechnungen nachweisbar; es tritt ab Intensivbeben bei den meisten

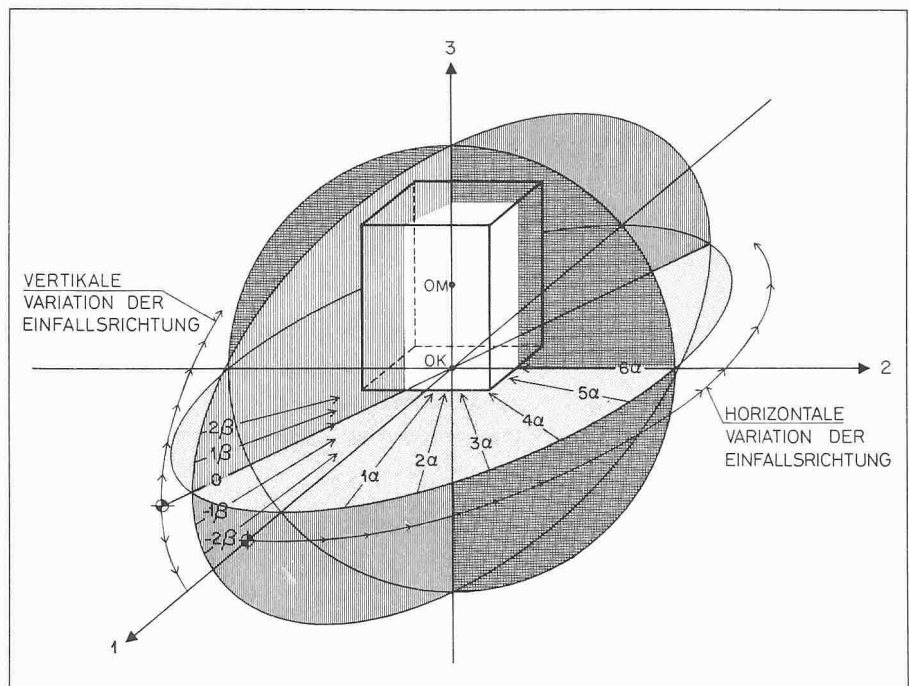


Bild 2. Ungünstigste Erdbeben-Einfallrichtungen: Rotation der dreidimensionalen Bemessungsbeben um das Bauwerk

Bauwerken konventioneller Ausbildung auf.

- «Erdbebensicher» sind erdbebengerecht ausgelegte Bauwerke, die sich aufgrund eines rechnerischen oder experimentellen Nachweises innerhalb definierter Grenzen der Bewegungsintensität BI elastisch verhalten.

Die Bezeichnung «standardbebensicher» entspricht dem rechnerischen Nachweis gegen Beben der Sicherheitsklasse I. Die bekannten Baunormen hochseismischer Regionen beschreiben, wie dieser Nachweis zu führen ist [6, 7, 8, 9].

Die Bezeichnung «intensivbebensicher» entspricht dem rechnerischen Nachweis gegen Beben der Sicherheitsklasse II. Der rechnerische Nachweis erfolgt mit Vorteil nach der Methode in Kap. 8. Für Bauwerke konventioneller Ausbildung ist die Intensivbeben-Sicherheit in der Regel technisch schwierig zu verwirklichen und rechnerisch aufwendig nachzuweisen.

Die Bezeichnung «extremalbebensicher» entspricht dem rechnerischen Nachweis gegen Beben der Sicherheitsklasse III. Sie ist damit Bauwerken vorbehalten, die mit einem Erdbebenschutzsystem ausgerüstet sind. Der rechnerische Nachweis erfolgt mit der 2-Stufen-Methode in Kap. 8.

«Kollapssicher» sind erdbebengerechte, -tüchtige und -sichere Bauwerke, die mittels zusätzlicher technischer Massnahmen Intensiv- und Extremalbeben trotz Zerstörungen am Tragwerk ohne Kollaps überstehen. Insbesondere sollen die Fluchtwege offen bleiben, um

die Menschenleben optimal zu schützen.

Das Konzept des «integralen baulichen Erdbebenschutzes» bezieht sich damit auf erdbebensichere Bauwerke und steht für folgende Konvention:

«Der Erdbebeningenieur erbringt den Nachweis der rechnerischen Sicherheit mit Hilfe einer umfassenden dynamischen Untersuchung, und die Erdbebenversicherung haftet, falls bei Erdbeben innerhalb der definierten Intensitätsgrenzen trotz ausgewiesener rechnerischer Sicherheit Schäden auftreten.»

Aufgrund dieser Terminologie ist anzunehmen, dass Kernenergie-Anlagen als erdbebentüchtig und wichtige Komponenten als intensivbebensicher zu betrachten sind. Angewandt auf Wohn- und Geschäftshäuser, Spitäler, Bahnhöfe oder auch Brücken, ist besonders der Gebrauch der Bezeichnung «erdbebensicher» nur in Einzelfällen angezeigt.

7. Entwicklung von Erdbebenschutzsystemen zur baulichen Extremalbeben-Sicherung

7.1. Appell zur Unterstützung der Erdbebenforschung

Nach langjähriger weltweiter Forschung zur Verbesserung der Erdbebenresistenz mit konventionellen Mitteln (Baukonzeption, konstruktive Ausbildung, Baumaterialien, Ausführungsgüte, Baugrundqualität) ist heute eine gewisse Resignation festzustellen. Auf

Eigenfrequenzen - Abstimmung der Bauwerke:

- Zone A:** extrem tiefe Abstimmung
- Zone B:** tiefe Abstimmung
- Zone C:** üblicher Bereich (Resonanz)
- Zone D:** hohe Abstimmung

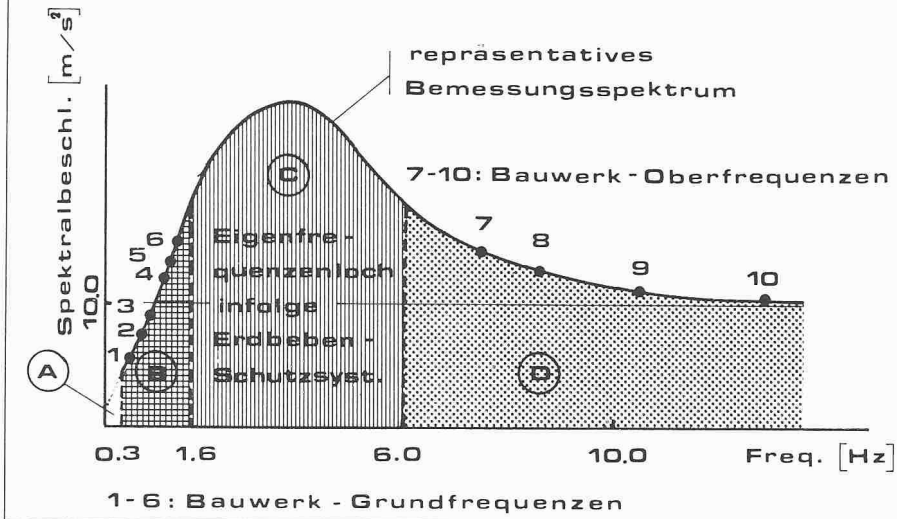


Bild 3. Übliche und angestrebte Abstimmung der Bauwerk-Eigenfrequenzen im Erdbeben-Bemessungsspektrum

dieser Basis scheint das Ziel tatsächlich nicht erreichbar zu sein. Wir besitzen aber in der schwimmenden Lagerung ein Konzept mit dem technischen Potential zur Extremalbeben-Sicherung der Bauwerke. Bis zur praktischen Realisierung des integralen baulichen Erdbebenschutzes sind indessen noch erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich.

7.2. Aufgabenstellung

Die Grundfrequenzen (tiefsten Eigenfrequenzen) unserer Bauwerke fallen durchwegs in die Zone C des für gute Baugrund-Verhältnisse repräsentativen Reaktionsspektrums in Bild 3. Damit sind es ihre empfindlichsten Modalformen, die durch typische zerstörende Starkbeben in Resonanz angeregt wer-

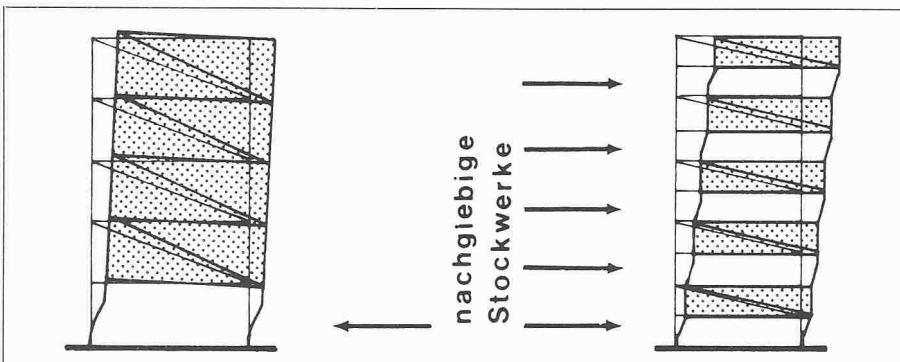


Bild 4. Vorschläge zur künstlichen Absenkung der Bauwerk-Eigenfrequenzen für Hochbauten

den. Daraus entsteht eine Gefährdung, der exponierte Tragwerkteile unter extremerer Erdbebenbeanspruchung nicht gewachsen sind [2]. Bauwerkschäden bis zur Abbruchreife sind die Folge. Es wurde frühzeitig erkannt [16], dass ein Hauptanliegen des Erdbebeningenieurs darin besteht, Tragwerke zu entwickeln, womit die Bauwerk-Grundfre-

quenzen aus dem Resonanzbereich C abgezogen und in den Zonen B oder D angesiedelt werden können. Starr ausgebildete Tragwerke mit hohen Grundfrequenzen in der Zone D sind in bedeutendem Masse sprödebruchgefährdet. Relativ weiche Tragwerke mit Grundfrequenzen in der Zone B sind dagegen unter Extremalbeben kollapsgefährdet, da die zwangsläufig feingliedrigen Strukturelemente an der Basis unzulässig grosse elasto-plastische Deformationen erleiden (Bild 4).

Daraus ergibt sich die bekannte «konzeptionelle Pattsituation», worin dem Erdbebeningenieur grundsätzlich kein gangbarer Weg offenzustehen scheint, gegen Extremalbeben vorteilhafte Lösungen anzubieten. Der integrale Schutz gegen die bewegungsintensivsten heute bekannten Beben ist damit nur über die Entwicklung von eigentlichen Erdbeben-Schutzsystemen technisch realisierbar.

Die Aufgabenstellung lautet also, Systeme zu finden, die es ermöglichen

- die konzeptionelle Pattsituation zu überwinden
- extremale Erdbeben ohne elasto-plastische Tragwerk-Deformationen aufzunehmen
- den Extremalbeben-Schutz technisch und finanziell realisierbar zu machen

und eine einfache, zuverlässige Methode zum Nachweis der tatsächlich erreichten Erdbebensicherheit zu entwickeln.

7.3. Bauwerke mit vermutetem Bedürfnis nach integralem Erdbebenschutz

Ein Bedürfnis nach integralem Erdbebenschutz besteht in erster Linie für Bauwerke mit grosser Menschenkonzentration (Hochhäuser, Kongress-, Versammlungs- und Kinogebäude, Schulen, Schutzbauten). Daneben ist er für solche Bauwerke erforderlich, die infolge Erdbebenschäden für ihr direktes Umfeld und das weitere «Einzugsgebiet» eine erhebliche Gefahr darstellen oder bei deren Ausfall lebenswichtige Funktionen ausgeschaltet werden. Es seien besonders erwähnt:

- Anlagen des öffentlichen Bedarfs mit lebenswichtiger Funktion (Spitäler, Verwaltungs- und Kommandozentralen)
- Anlagen des Energiebedarfs (Staudämme, Kraftwerke, Treibstoff-Lagerstätten)
- Anlagen des Industriesektors (Chemiewerke, Sprengstoff-Fabriken)
- Verkehrsanlagen (Brücken, Tunnel, Bahnhöfe, Flugplätze)
- Militäranlagen (Kommando-Unterstände, Schutzbauten, erschütterungsempfindliche Geräte).

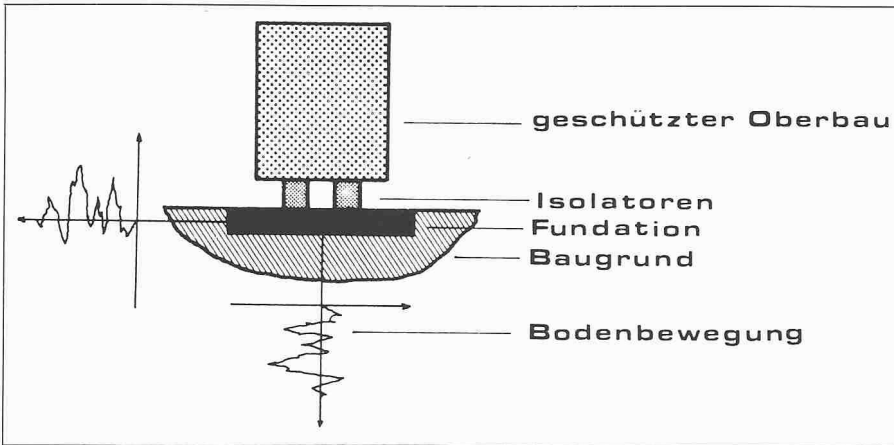


Bild 5. Konzept zur umfassenden Erdbebenisolation der Bauwerke durch räumlich schwimmende Lagerung

Schliesslich dürften in Zukunft private Bauherren vermehrt darauf pochen, dass ihre Bauinvestitionen auch gegen Erdbeben umfassend geschützt werden.

Es wird Aufgabe der verantwortlichen Behörden sein abzuwägen, welcher Schutzgrad den Werten an Menschenleben und materiellen Gütern mit und in den Bauwerken im einzelnen zugeordnet werden soll.

7.4. Praktische Realisierung des integralen Erdbebenschutzes

Mitte der sechziger Jahre schlugen Schweizer Ingenieure vor, Bauwerke zum Erdbebenschutz *schwimmend* zu lagern (Bild 5). Die Lösung besteht darin, den Oberbau von der Fundation zu trennen und in die Trennfuge sog. *mechanische Isolatoren* in Form von hochelastischen Kautschuk-Stützkörpern einzufügen. Die Idee wurde beim Bau des Schulhauses Pestalozzi 1969 in Skopje, Jugoslawien, praktisch realisiert [3].

Heute stehen auf dieser Basis zwei verschiedene Konzepte zur Verfügung

- die *horizontal schwimmende Lagerung* HSL mit horizontal hochelastischen und vertikal sehr steifen Lagerkörpern [4]
- die *räumliche schwimmende Lagerung* RSL mit nach allen Seiten hochelastischen Lagerkörpern [5].

Tatsächlich lässt sich bei räumlich schwimmender Lagerung die «konzeptionelle Pattsituation» (Kap. 7.2) auch praktisch überwinden. Im Resonanzbereich der Reaktionsspektren typischer Starkbeben (Zone C, Bild 3) bildet sich dank des Erdbeben-Schutzsystems eine eigenfrequenzenfreie Zone des Bauwerks aus, die auch als «*Eigenfrequenzenloch*» bezeichnet wird. Die Studie [5] stellt gleichzeitig ein Rechenmodell vor, die «*Seismische-Masse-Analogie*», womit der real vorhandene Schutzgrad mit nurmehr sechs Freiheitsgraden ko-

stengünstig und aussagekräftig ermittelt wird.

Das Schweizer System ist vom Typ «räumlich schwimmende Lagerung» und wird in weiteren Beiträgen im Detail vorgestellt werden. Diesem Beitrag ist es vorbehalten, in die theoretischen Grundlagen zum Konzept des «integralen baulichen Erdbebenschutzes» einzuführen.

8. Die 2-Stufen-Methode zum rechnerischen Extremalbeben-Sicherheitsnachweis

Der integrale Schutz soll nach der Definition in Kap. 4 nicht nur technisch realisierbar, sondern auch *durch Rechnung oder Experiment nachweisbar* sein. Die beschränkte Möglichkeit, diesen Nachweis zu erbringen, bildet wohl eine der grundlegenden Schwächen der heute gebräuchlichen Erdbebennormen. Die nachfolgende Methode soll diesen Mangel beheben helfen. Sie wurde besonders für Bauwerke mit *Erdbeben-Schutzsystem* entwickelt, lässt sich aber in wesentlichen Zügen auf andere Bauwerkklassen übertragen.

Unter der Annahme, dass sich das Bauwerk in einer hochseismischen Region befindet, können die Begriffe «integraler baulicher Erdbebenschutz» und «Extremalbeben-Schutz» gleichgesetzt werden.

8.1. Übersicht

Die vorgeschlagene Methode wird *2-Stufen-Methode* genannt, da der Nachweis in den Erdbeben-Intensitätsstufen Standardbeben und Extremalbeben je einzeln durchgeführt wird. Sie ist als analytisches Hilfsmittel zu verstehen, um durch Rechnung zu bestätigen, dass ein Bauwerk mit Schutzsystem den Anforderungen an den integralen Erdbebenschutz genügt. Der Nachweis gilt

dann als erbracht, wenn alle Anforderungen der Konvention erfüllt sind.

Der *Extremalbeben-Sicherheitsnachweis* lässt sich in vier logische Bereiche mit insgesamt sieben Etappen gliedern:

- A. Lastfall-Definition (1. Etappe)
- B. Standardbeben-Sicherheitsnachweis für das Bauwerk ohne Erdbeben-Schutzsystem (2. Etappe)
- C. Extremalbeben-Sicherheitsnachweis für das Bauwerk mit Erdbeben-Schutzsystem (3. bis 6. Etappe)
- D. Untersuchung lokaler Resonanzprobleme (7. Etappe).

2-Stufen-Methode

1. Etappe: *Definition der Lastfälle* Extremalbeben und Standardbeben, gültig für den Bauwerkstandort
2. Etappe: *Standardbeben-Sicherheitsnachweis* für das Bauwerk ohne Erdbeben-Schutzsystem nach den Vorschriften der Erdbebennormen der Standortregion und unter Annahme einer Beschränkung auf elastische Deformationen
3. Etappe: Aufsuchen der *ungünstigsten Einfallsrichtungen* mit dreidimensionalen Bemessungsbeben durch Rotation um die Fundation des Bauwerks mit Erdbeben-Schutzsystem - Näherungsweise spektrale, evtl. modale oder inkrementale Berechnung mit Extremalbeben
4. Etappe: Untersuchung des Einflusses von Annahmefehlern in der Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsverteilung am Bauwerk mit Erdbeben-Schutzsystem - *Parameteranalyse* durch repetitive spektrale Berechnung in den ungünstigsten Einfallsrichtungen
5. Etappe: Bestimmung der *extremalen Bewegungs- und Kraftgrößen* des Gesamt-Tragwerks und von Tragwerkteilen am Bauwerk mit Erdbeben-Schutzsystem - Modale oder inkrementale Berechnung mit extremalen Bemessungsbeben in den ungünstigsten Einfallsrichtungen
6. Etappe: Kontrolle der Tragwerkbemessung mit den ungünstigsten Kräftekombinationen aus den statischen und dynamischen Lastfällen - *Eigentlicher Sicherheitsnachweis*
7. Etappe: Untersuchung der *lokalen Resonanzgefahr* in Teilbereichen des Bauwerks - Be-

rechnung mit einfachen Finite-Element-Modellen und den ermittelten kinematischen Reaktionen (5. Etappe) als Inputfunktionen.

8.2. Kommentar

Die beschriebene Nachweismethode baut auf den Erfahrungen mit der Reaktionsspektren-Methode auf. Insbesondere wird versucht, die Änderungsvorschläge nach Kap. 3.2 zu integrieren.

Lastfall-Definition:

Im Gegensatz zu den Normen werden die Bemessungsbeben für die beiden Erdbeben-Intensitätsstufen Standardbeben und Extremalbeben nicht mit Spektralformen auf Mittelwert-, sondern auf *Maximalwert-Basis* ermittelt.

Standardbeben-Sicherheitsnachweis:

Die erste Stufe des Nachweises erfolgt mit der Erdbeben-Intensitätsstufe «Standardbeben» am erdbebengerecht ausgebildeten Bauwerk *ohne* Einbezug des vorhandenen *Erdbeben-Schutzsystems*. Dazu werden die bekannten Baunormen hochseismischer Regionen verwendet, wobei das Reaktionsverhalten des Bauwerks auf den *elastischen* Materialbereich beschränkt wird. Mit diesem Vorgehen wird die *erdbebengerechte Ausbildung* des Bauwerks überprüft. Sie muss im Hinblick auf seine Fähigkeit, den Anforderungen bei Extremalbeben zu genügen, vorausgesetzt werden können.

Extremalbeben-Sicherheitsnachweis:

Die zweite Stufe des Nachweises erfolgt mit der Erdbeben-Intensitätsstufe «Extremalbeben» am Bauwerk mit *Erdbeben-Schutzsystem*. Der Lastfall ist durch eine Serie von repräsentativen, dreidimensionalen Bemessungsbeben definiert. Damit sind *Lastfall und Bauwerk* im Modell als voll *dreidimensional* zu betrachten. Die Anforderung an die Güte des Nachweises bedingt eine grosse innere Auflösung, um eine getreue Wiedergabe der Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsverteilung zu gewährleisten. Es ist das Ziel des Rechengangs, jene exponierten Tragwerkteile aufzufinden, die als erste elasto-plastische Deformationen (Zerstörungen) erleiden.

Kontrolle der Tragwerkbemessung:

Zur Kontrolle der Tragwerkbemessung werden die ungünstigsten dynamischen Beanspruchungen mit den üblichen statischen kombiniert. Dazu werden die Querschnittkräfte der Tragwerkelemente ermittelt und in konventioneller Weise mit den zulässigen verglichen. Die Ermittlung der Erdbebenbeanspru-

chung ergibt im allgemeinen eine Serie von räumlichen Last- bzw. Spannungszuständen für jedes Element des Modells. Im Rahmen der «Seismische-Masse-Analogie» entstehen dagegen sog. «*kinetostatische Lastfälle*», die direkt in die statische Analyse übernommen werden [5].

8.3. Besondere Probleme

Lokale Resonanzen:

Resonanzeffekte am Gesamtsystem werden im Extremalbeben-Sicherheitsnachweis dank der dreidimensionalen Modellierung mit hoher innerer Auflösung des Bauwerks voll berücksichtigt. Lokale Resonanzen sind daneben solche, deren *Auswirkungen auf die Dynamik des Gesamtsystems vernachlässigbar* sind und deshalb bei der Modellierung unterdrückt wurden. Sie können deshalb durch geeignete einfache *Finite-Element-Modelle* für die betroffenen Bauwerkbereiche beschränkter geometrischer Ausdehnung unabhängig untersucht werden.

Ungünstigste Erdbeben-Einfallrichtungen:

Dem *Einfluss der Einfallrichtung* eines dreidimensionalen Erdbebens auf die Bauwerkreaktionen wurde bisher zu wenig Beachtung geschenkt. Ihre richtige Wahl entscheidet darüber, ob die tatsächlich grössten System- und Elementreaktionen wirklich aufgefunden werden. Das vorgeschlagene Verfahren besteht darin, *vororientierte Bemessungsbeben* [5] wo nötig rund um die Fundation zu drehen, bis die grössten Reaktionen aufgefunden sind (Bild 2).

Suche nach gefährdeten Bauwerkbereichen:

Die Suche nach gefährdeten Bauwerkbereichen («exponierte Tragwerkteile, deren Versagen einen Bauwerkkollaps einleiten könnte») ist mit ein aufwendiger Schritt des Nachweises. Es ist kein wirtschaftliches analytisches Verfahren bekannt, welches das gewünschte Resultat zuverlässig zu erbringen vermöchte. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, sind intuitives Verständnis und Erfahrung nötig.

Parameteranalyse:

Die beste Grundlage für einen Sicherheitsnachweis mit zuverlässigen Resultaten wird durch die exakte Ermittlung der *Vibrationseigenschaften des Bauwerks* erzielt: Eigenfrequenzen, Modalformen, Systemdämpfung. Der Parameteranalyse kommt darin die doppelte Funktion zu, einerseits die Vibrationseigenschaften des Bauwerks zu optimieren, andererseits den Einfluss der Fehlermöglichkeiten aus mangelhaften Rechenannahmen zu ermitteln. Damit

wird ein Schutz vor den Auswirkungen von

- Projektänderungen der letzten Minute
- fehlerhaften Annahmen für die Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsverteilung des Systems
- Massunhaltigkeiten und Nutzlastannahme- Ungenauigkeiten erreicht.

Die vorgeschlagene Optimierungs- und Kontrolltechnik besteht darin, Einzelparameter oder Parametergruppen des untersuchten Bauwerks innerhalb definierter, technisch realisierbarer Grenzen schrittweise zu variieren. Dabei verändern sich die Vibrationseigenschaften des Systems. Jeder dieser Systemkonfigurationen werden die Bemessungsbeben mit wechselnden Einfallrichtungen aufgezwungen, wobei pro Iterationsschritt je ein Satz extremerer System- und Elementreaktionen anfällt. Unter Beizug einer geeigneten *Maximalwert-Suchtechnik* [5] können im Verlauf dieser Analyse sowohl die *optimalen* wie auch die *ungünstigsten Systemkonfigurationen* aufgefunden werden. Sie dienen der definitiven Bemessung.

Zusammenfassung

Entgegen einer weit verbreiteten Auffassung können Bauwerke gegen stärkste Erdbeben umfassend geschützt werden. Das erlaubt es, mit dem «*integralen baulichen Erdbebenschutz*» einen *erweiterten Schutzauftrag* einzuführen. Er soll auf ausgewählte Risiko-Bauwerkklassen in hochseismischen Regionen angewendet werden und den beschränkten Schutzauftrag heute gültiger Baunormen ablösen. Der Schutzauftrag des «*integralen baulichen Erdbebenschutzes*» wird definiert; seine Schlüsselbegriffe sind erläutert.

Ein umfassender Schutz wird z.B. bei *Erdbebenisolation der Bauwerke durch räumlich schwimmende Lagerung* erzielt. Diese Massnahme lässt sich technisch einfach und wirtschaftlich realisieren.

Zum *rechnerischen Nachweis der Erdbeben-Sicherheit* wurde in Normen bisher die Verwendung der Reaktionsspektren-Methode empfohlen. Sie wird einer kritischen Betrachtung unterzogen. Da sie den Anforderungen des integralen baulichen Erdbebenschutzes nicht genügt, wurde die *2-Stufen-Methode* entwickelt. Die neue Methode ist dazu bestimmt, den *Sicherheitsnachweis für extremalbeben-beanspruchte Bauwerke mit Erdbeben-Schutzsystem* zu erbringen. Ihre sinngemässe Anwendung auf Bauwerke konventioneller Ausbildung ist grundsätzlich möglich, aber mit hohen Rechenkosten verbunden. Dank dem einfachen mathematischen

Modell für räumlich schwimmend gelagerte Bauwerke ist es jedoch gelungen, die 2-Stufen-Methode für solche Systeme kostengünstig einzusetzen. – In den nächsten Monaten soll das Konzept des integralen baulichen Erdbebenschutzes durch räumlich schwimmende Lagerung experimentell überprüft werden. Dazu arbeitet in Berkeley (USA) eine Forschergruppe der ETH mit der University of California zusammen.

Verdankungen

Der Autor ist den Herren Prof. M. H. Derron und Prof. Dr. R. Walther (Institut de statique et des structures, EPFL) und Herrn Prof. M. Del Pedro (Institut des métaux et machines, EPFL) dankbar für die Unterstützung, die sie ihm in den letzten Jahren zukommen liessen. Besonderen Dank sei Herrn Prof. Dr. H. Bachmann (Institut für Baustatik und Konstruktion, ETHZ) und Herrn Prof. Dr. J. M. Kelly (Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California, Berkeley) ausgesprochen. Sie haben in offener fachlicher Auseinandersetzung Entscheidendes zur sachlichen Klärung der dargestellten Begriffe beigetragen.

Adresse des Verfassers: Dr. Konrad Staudacher, University of California, Berkeley, Dept. of Civil Engineering, USA – Berkeley, CA. 94709; IBAP – EPFL, CH-1015 Lausanne.

Literaturverzeichnis

- [1] *Dowrick D. J.*: «Earthquake Resistant Design»; John Wiley and Sons, Ltd.; USA, 1977
- [2] *Rojahn C.*: «A preliminary analysis of the failure mechanism of October 15, 1979 Imperial Valley Earthquake strong-motion data recorded in the Imperial County Services Building, El Centro, California»; Seismological Society of America, Abstracts, 75th Annual Meeting; USA, 1979
- [3] *Hubacher C., Staudacher E., Siegenthaler R.*: «Erdbebensicherung im Bauen»; Neue Zürcher Zeitung, Technikbeilage; Zürich, Schweiz, 9. Febr. 1970
- [4] *Kelly J. M., Eidinger J. M., Derham C. J.*: «A practical Soft Storey System»; EERC 77/27, Univ. of California; Berkeley, USA, 1977
- [5] *Staudacher K.*: «Grundlagen zum Nachweis der Erdbebensicherheit schwimmend gelagerter Gebäude»; Dissertation, Presse Polytechnique Romande, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Schweiz, 1980
- [6] Applied Technology Council San Francisco: «Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings»; Applied Technology Council San Francisco, California, USA, Juni 1978
- [7] Groupe de coordination des textes techniques: «Règles parasismiques 1969 et annexes»; Société de diffusion des techniques du béton et des travaux publics; Paris, Frankreich, Oktober 1970
- [8] Deutscher Normausschuss: «DIN 4149»; Deutscher Normausschuss; BRD; 1974
- [9] Comision international de normas sismo-resistentes: «Norma sismo-resistente»; Spanien, 1968
- [10] *Clough R. W., Penzien J.*: «Dynamics of structures»; McGraw-Hill; New York, USA, 1975
- [11] *Müller F. P., Kleintzel E.*: «Erdbebensicherung von Hochbauten»; Verlag von Ernst und Sohn; Berlin, BRD, 1978
- [12] *Bachmann H., Wieland M.*: «Erdbebensicherung von Bauwerken»; Eidgenössische Technische Hochschule, Abteilung für Bauingenieurwesen, Autographie; Zürich, Schweiz, 1979
- [13] *Housner G. W.*: «Behavior of Structures during Earthquakes»; Proceedings ASCE, 85 EM4; USA, 1959
- [14] *Hudson D. E.*: «The response spectrum technique»; Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering; Berkeley, USA, 1956
- [15] *Staudacher Konrad*: «Integraler baulicher Erdbebenschutz III: Baulicher Erdbebenschutz am Wendepunkt», Veröffentlichung 1981
- [16] *Green N. B.*: «Flexible First Storey Constructions for Earthquake Resistance»; Transactions, ASCE, Vol. 100; USA, 1935