

Erdbeben – eine beherrschbare Naturgewalt? ¹

Prof. Dr.-Ing. **Horst Werkle**, Fachhochschule Konstanz

Zusammenfassung

Erdbeben stellen eine selten auftretende aber häufig extrem hohe Belastung für Bauwerke dar. Die Auslegung eines Bauwerks für diesen Lastfall erfordert besondere ingenieurmäßige Betrachtungen und Erfahrungen. Wesentliche Gesichtspunkte bei der Erdbebenauslegung von Bauwerken wie der Einfluss der seismischen Kennwerte, die Genauigkeit dynamischer Berechnungen, die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung und der Einfluss plastischer Verformungen werden exemplarisch erläutert. Darüber hinaus werden Konzepte der Schwingungsisolierung zur Erdbebensicherung von Bauwerken vorgestellt. Die heute erreichbare Erdbebensicherheit wird anhand japanischer Untersuchungen des Kobe-Erdbebens von 1995 verdeutlicht.

1 Einführung

Die Gefährdung von Bauwerken durch Erdbeben ist nicht neu. So beschrieb etwa Goethe die baulichen Schäden, die infolge des Erdbebens im Februar 1782 in der Stadt Messina an den so genannten Palazzata-Gebäuden entstanden waren, so:

Alles waren steinerne, vierstöckige Gebäude, von welchen mehrere Vorderseiten bis aufs Hauptgesims noch völlig stehen, andere bis auf den dritten, zweiten und ersten Stock herunter gebrochen sind.... An diesem seltsamen Phänomen ist Ursache, dass... weniger begüterte Nachbarn ... ihre alten aus größeren und kleineren Flußgeschieben und vielem Kalk zusammengekneteten Häuser hinter neuen, aus Quaderstücken aufgeführten Vorderseiten versteckten. Jenes an sich schon unsichere Gefüge musste, von der ungeheuren Erschütterung aufgelöst und zerbröckelt, zusammenstürzen.... Dass jene aus Mangel naher Bruchsteine so schlechte Bauart hauptsächlich schuld an dem völligen Ruin der Stadt gewesen, zeigt die Beharrlichkeit solider Gebäude. Der Jesuiten Kollegium und Kirche, von tüchtigen Quadern aufgeführt, stehen noch unverletzt in ihrer anfänglichen Tüchtigkeit.

(Johann Wolfgang von Goethe, Italienische Reise, Messina, den 13. Mai 1787)

Bereits hier wird deutlich, dass zum erdbebensicheren Bauen besondere Anforderungen an die Qualität der Baustoffe und der Bauausführung zu stellen sind. Auch heute kommt es

¹ Vortrag im Rahmen des 2. Symposiums „bauhaus goes business“ am 26. 9. 2003 an der Bauhaus-Universität Weimar

immer wieder zu folgenschweren Schäden bei Erdbeben, selbst in Hochtechnologie-Ländern wie den USA und Japan.

Vorschriften zur Erdbebensicherung von Bauwerken gibt es in Ländern mit hoher seismischer Gefährdung wie den USA oder Japan schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts. In Deutschland erschien 1957 erstmalig die DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Richtlinie für Bemessung und Ausführung“. Sie galt allerdings nur als Empfehlung und nicht als bindende Bauvorschrift. Im Jahr 1972 erschien in Baden-Württemberg die „Vorläufige Richtlinie für das Bauen in Erdbebengebieten des Landes Baden-Württemberg“, deren Anwendung verbindlich war. Viele Bestimmungen dieser „Vorläufigen Richtlinie“ wurden dann der im Jahr 1981 erschienenen und danach baurechtlich verbindlich eingeführten Neufassung der DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ zugrunde gelegt. Für kerntechnische Anlagen wurde eine spezielle Norm, die KTA-Regel 2201, entwickelt, die den höheren sicherheitstechnischen Anforderungen dieser Bauwerke gerecht wird. Eine neue Normengeneration entstand in den 90-er Jahren mit der Entwicklung der europäischen Normung. Für Erdbebeneinwirkungen gilt der Eurocode 8 „Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben“. Dieser gibt nicht nur den neuesten technischen Stand der Berechnungs- und Bemessungsverfahren wieder, sondern er enthält auch Regeln zur seismischen Auslegung von Brücken, Türmen, Masten, Behältern und Rohrleitungen und geht damit über das Anwendungsgebiet der bisherigen DIN 4149 weit hinaus. Da noch offen ist, wann die Eurocodes die nationale Normen ablösen werden, wird derzeit die DIN 4149 auf der Basis des Eurocode 8 überarbeitet.

2 Entstehung von Erdbeben und Baugrunderschütterungen

Nach der Wegnerschen Plattentheorie besteht die Erdkruste aus großräumigen Platten. Die Platten liegen auf dem zähflüssigen Erdmantel auf und führen, durch endogene Kräfte bedingt, immer wieder geringfügige Relativbewegungen durch. Diese können als Kriechbewegungen erfolgen oder aber, wenn sich die Plattenteile „verklemmen“, auch durch eine plötzliche Spannungslösung, die ein Erdbeben auslöst. Erdbeben sind natürliche Erscheinungen, die aber wegen der hier zu beachtenden geologischen Zeiträume leicht in Vergessenheit geraten und, wenn sie dann auftreten, Unverständnis und Schrecken hervorrufen.

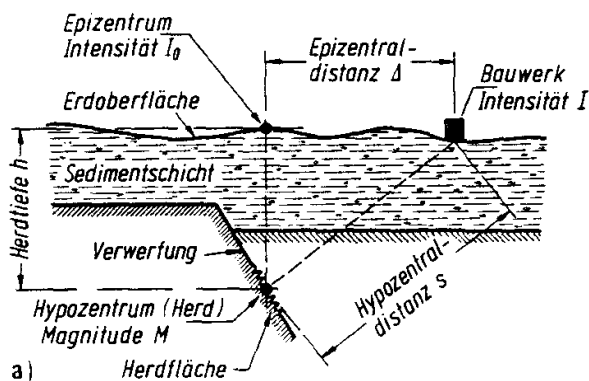


Bild 1: Dislokationsbeben [1]



Bild 2: Einfamilienhaus auf der Hayward-Verwerfung in Kalifornien

Die an den Plattenrändern auftretenden Verwerfungen (Bild 1) können sich bis an die Erdoberfläche erstrecken. Bild 2 zeigt ein Einfamilienhaus in Kalifornien, das unwissentlich auf einer Verwerfung, die eine Kriechbewegung durchführt, errichtet wurde. Man erkennt, dass es an der rechten Hausecke durch die Kriechbewegung des darunter liegenden Baugrundes immer wieder zu Schäden kommt.

Meistens, so auch in Deutschland, sind die Verwerfungen jedoch von einer mehrere Kilometer mächtigen Sedimentschicht überdeckt. Vom Entstehungsort des Bebens, dem Hypozentrum, breiten sich Bodenwellen zur Erdoberfläche aus (Bild 1). Beim Durchgang durch den Boden werden die Wellen gefiltert. Hierdurch kommt es insbesondere durch die obersten Bodenschichten zu Änderungen der Amplituden und des Frequenzgehaltes. Besonders deutlich wurden diese bodendynamische Einflüsse beim Erdbeben in Mexico City am 19.9.1985.

Obwohl das Hypozentrum sich 400 km von Mexico City entfernt befand, traten in der Innenstadt schwere Schäden auf. Diese ist auf einer ca. 30-40 m mächtigen, sehr weichen Tonschicht errichtet, die durch Verlandung eines ehemaligen Sees entstand. Auf dem festen Baugrund außerhalb der Innenstadt hinterließ das Beben hingegen keine Schäden. Die Vergrößerung der Erdbebenbeschleunigung durch die weichen Tonschichten lässt sich auch rechnerisch nachvollziehen. Ausgehend von dem auf den festen Baugrund gemessenen Beschleunigungszeitverläufen und den aus geotechnischen Untersuchungen bekannten Bodenprofilen der Innenstadt lassen sich

Antwortspektren für den Innenstadtbereich berechnen. Bild 3 zeigt mehrere Antwortspektren für Mexico City [2]. Die für verschiedene Profil- und Bodenbeschleunigungsvarianten berechneten Spektren stimmen hervorragend mit dem aus dem Antwortspektrum eines auf der weichen Tonschicht gemessenen Zeitverlaufs überein. Das Antwortspektrum des weichen Bodens besitzt bei einer Eigenschwingzeit von ca. 2 s Maximalwerte in Verbindung mit sehr hohen Antwortbeschleunigungen. Dies erklärt auch, warum gerade mittelhohe Gebäude mit 7 bis 12 Stockwerken und einer Eigenschwingzeit von 1,5 bis 2,5 Hz besonders stark von Erdbebenschäden betroffen waren. Sie gerieten in Resonanz mit den Schwingungen der weichen Bodenschicht. *„Die Gebäude wurden von den annähernd sinusförmigen Bodenbewegungen aufgeschaukelt, bis sie den Belastungen nicht mehr standhalten konnten. Dabei wirkte sich die große Anzahl der Lastwechsel sowie die meist geringe Zähigkeit und das geringe Dissipationsvermögen der Gebäude fatal aus.“* (Waas, [2]).

Die Untersuchungen zeigen, dass es durchaus möglich ist, standortspezifische Antwortspektren realitätsnah zu berechnen. Die Verschiebung der Spitzen des Antwortspektrums in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnisse wird in neueren Normen wie dem Eurocode 8 und der Neufassung der DIN 4149 explizit berücksichtigt.

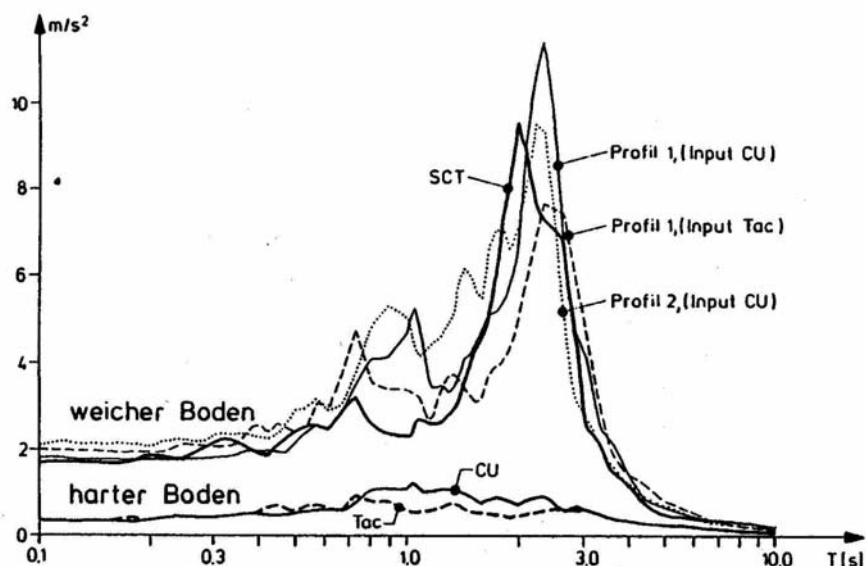


Bild 3: Antwortspektrum für gemessene Beschleunigungen auf festem Boden (Tac, CU) und weichem Boden (SCT) und für berechnete Beschleunigungen auf weichem Boden für unterschiedliche Profile (Dämpfung 5%) [2].

3 Erdbebensicherung von Bauwerken

3.1 Allgemeines

Die Erdbebenerschütterung des Bodens wird durch zwei horizontale und eine vertikale Komponente beschrieben. Für die Beanspruchung von Bauwerken sind insbesondere die horizontalen Bodenbeschleunigungen maßgebend, da die vertikale Erdbebenbeschleunigung meist geringer als die horizontale ist und das Bauwerk aus den im Wesentlichen vertikalen Lastfällen Eigengewicht und Verkehr bereits erhebliche Tragreserven gegenüber vertikalen Lasten besitzt.

3.2 Baudynamische Berechnungen

Grundlage der dynamischen Berechnung eines Bauwerks ist die sich aus der Finite-Element-Methode ergebende Bewegungsgleichung

$$\underline{K} \cdot \underline{u} + \underline{C} \cdot \dot{\underline{u}} + \underline{M} \cdot \ddot{\underline{u}} = -\underline{M} \cdot \underline{I} \cdot \ddot{u}_b(t). \quad (1)$$

\underline{K} ist die Steifigkeitsmatrix des Systems, \underline{C} die Dämpfungsmatrix, \underline{M} die Massenmatrix, \underline{I} ein Vektor zur Beschreibung der Anregungsrichtung, $\underline{u}(t)$ der Vektor der Verschiebungszeitverläufe und $\ddot{u}_b(t)$ der Beschleunigungszeitverlauf des Bodens. Als Lösungsverfahren kommen insbesondere das Zeitverlaufsverfahren und das Antwortspektrenverfahren in Betracht [3].

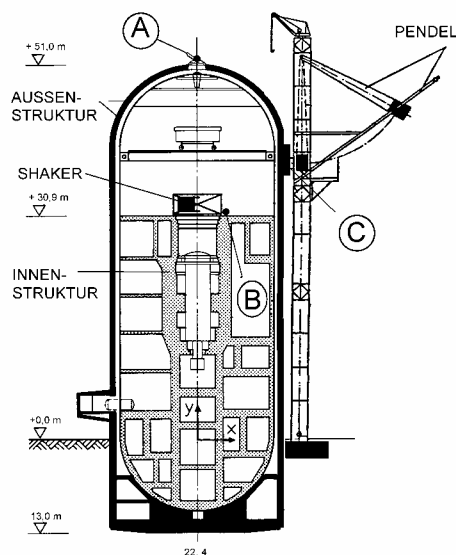


Bild 4: Versuchsbauwerk HDR (Außenschale rotations-symmetrisch)

Die Genauigkeit, die von einer dynamischen Berechnung erwartet werden kann, hängt nicht nur von der numerischen Genauigkeit des Rechenverfahrens sondern in hohem Maße auch von der Realitätsnähe der Modellbildung ab. Versuche an realen Bauwerken unter hohen dynamischen Lasten erfordern einen sehr hohen Aufwand und sind daher selten. In den 80-er Jahren wurden solche Versuche am Kraftwerksgebäude des HDR Kahl durchgeführt (Bild 4). Hierbei sollte auch die Genauigkeit dynamischer Berechnungsverfahren beurteilt werden. In einem Versuch wurde Stahlbetonkuppel der Außenschale durch Fallenlassen eines 20 t schweren Pendels stoßartig belastet [4]. Allerdings war die Schale im Aufprallbereich verstärkt, um

Durchstanzen zu vermeiden. Die vor den Versuchen berechneten Beschleunigungszeitverläufe der Punkte A und C der Außenschale und die Versuchsergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Vorausberechnung ist hervorragend. In einer weiteren Versuchsreihe wurde auf der obersten Ebene der Innenstruktur ein großer Shaker angebracht, der in der Lage ist, Horizontalkräfte bis zu 10000 kN mit einer Frequenz von maximal 8 Hz aufzubringen [5]. Bild 6 zeigt die abklingende Shakerfrequenz sowie die Amplituden der berechneten und der in zwei Richtungen gemessenen horizontalen Beschleunigungen in zwei Bauwerkspunkten. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung festzustellen. Die Beispiele vermitteln einen Eindruck mit welcher Realitätsnähe Bauwerke abgebildet und dynamische Vorgänge in der Berechnung simuliert werden können.

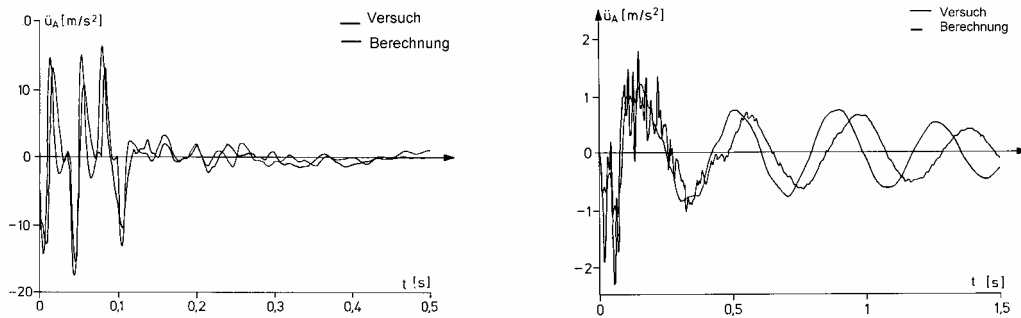


Bild 5: Beschleunigungszeitverläufe der Punkte A und C beim Stoßversuch [4]

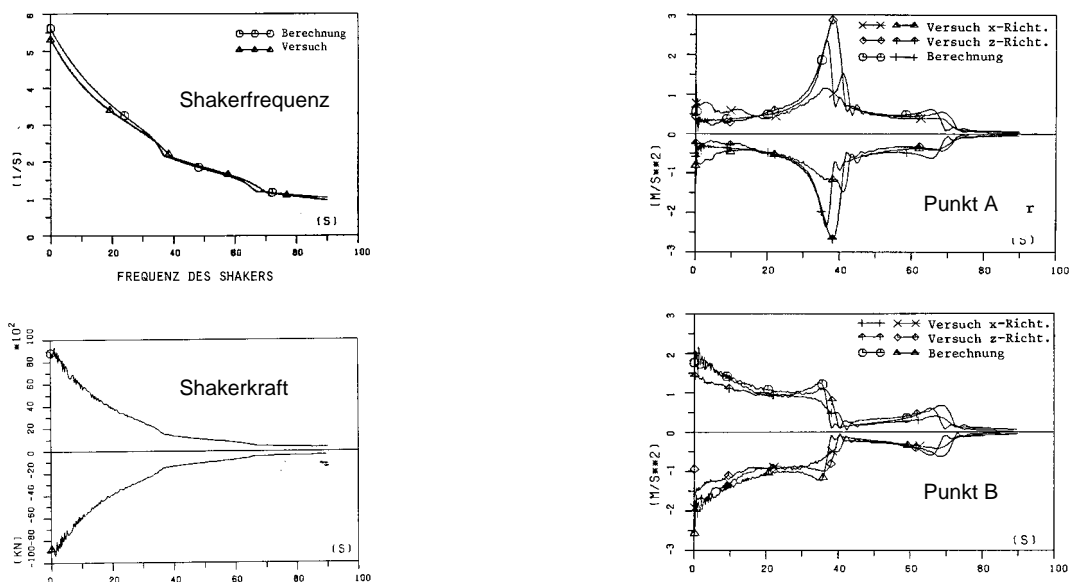


Bild 6: Zeitverläufe der Shakerfrequenz, Shakerkraft und Amplituden der Beschleunigungen der Punkte A und B beim Shakerversuch [5]

3.3 Boden-Bauwerk- und Flüssigkeits-Bauwerk-Wechselwirkung

Der Baugrund beeinflusst durch seine elastischen und dämpfenden Eigenschaften das Schwingungsverhalten des Bauwerks. Dieser als Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bezeichnete Effekt ist insbesondere bei massiven, steifen Bauwerken von entscheidender Bedeutung. Die Modellbildung des Bodens stellt eine besondere Schwierigkeit dar, da sich Wellen im Boden in einen sehr viel größeren Bereich ausbreiten als statische Verformungen. Die Modellierung des Bodens ausschließlich durch Finite Elemente scheidet wegen der Größe des erforderlichen Modells daher in der Regel aus. Analytische Methoden und die Randelementmethode sind für homogene und für wenig geschichtete Böden geeignet. Bei stark geschichteten Böden ist der Rechenaufwand mit diesen Methoden jedoch sehr hoch.

Eine äußerst effiziente, semianalytische Methode, mit der auch Böden mit ausgeprägter Schichtung mit demselben Aufwand wie homogene Böden dynamisch berechnet werden können, wurde erstmalig von Waas [6] in Berkeley entwickelt. Mit dieser Methode wurde zunächst ein Makroelement hergeleitet (Bild 7). Das Makroelement wird am Rand eines zweidimensionalen Finite-Element-Bereichs, mit dem der Bodenbereich unmittelbar unter dem Bauwerk modelliert wird, angeordnet und gibt die Wellenausbreitung in den umgebenden Boden mechanisch exakt wieder. Die zugrunde liegende Idee ist einfach: *„Zur Herleitung des Makroelements werden Produktansätze verwendet. In horizontaler Richtung werden analytische Funktionen (Lösungen der Differentialgleichungen) verwendet. In vertikaler Richtung wird das elastische bzw. viskoelastische Medium durch stückweise lineare Verschiebungsansätze diskretisiert. Mit homogenen Randbedingungen (spannungsfreie Oberfläche, starrer unterer Rand) ergibt sich für die Veränderlichen in vertikaler Richtung ein Eigenwertproblem. Nach dessen Lösung werden die Verschiebungen nach den Eigenformen entwickelt. Die Eigenwerte sind im Allgemeinen komplexe Wellenzahlen, die sich mit der vorgegebenen Frequenz ändern“* (Waas [7]).

Mit derselben semianalytischen Methode lassen sich auch Green'sche Funktionen herleiten, die die dynamischen Verschiebungen des geschichteten Bodens infolge einer Einzelkraft im Frequenzbereich wiedergeben. Die beiden Eigenwertprobleme für die Wellenzahlen k_R und k_L der Rayleigh- und Love-Wellen lauten

$$(\underline{A}_R \cdot k_R^2 + \underline{B}_R \cdot k_R + \underline{C}_R) \cdot \underline{x}_R = \underline{0} \quad \text{und} \quad (\underline{A}_L \cdot k_L^2 + \underline{C}_L) \cdot \underline{y} = \underline{0}. \quad (2)$$

Die Matrizen \underline{A}_R , \underline{B}_R , \underline{C}_R , \underline{A}_L , \underline{C}_L lassen sich leicht mit den Bodenkennwerten (Schubmodul, Querdehnzahl, Materialdämpfung und Masse) aufstellen. Die vertikalen Verschiebungen im

Abstand R von einer vertikalen Einheitskraft an der Schichtgrenze l im Frequenzbereich erhält man damit beispielsweise zu:

$$\underline{w} = -i \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sum_{j=1}^{2m} k_{Rj} \cdot H_j \cdot \underline{z}_j \cdot \alpha_{Rj} \quad \text{mit} \quad \alpha_{Rj} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot k_{Rj} \cdot Z_{lj} \quad (3)$$

Hierin bedeuten $H_j = H_j^{(2)}(k_{Rj} \cdot R)$ die Hankelfunktionen der zweiten Art der Ordnung j . Der Vektor \underline{z}_j enthält die Vertikalkomponenten der Eigenform \underline{x}_R . Entsprechende Lösungen lassen sich auch für Ring- und Kreisflächenlasten sowie für Böden mit orthotropen Materialeigenschaften angeben [8]. Das Verfahren lässt sich auf eine Vielzahl von Aufgaben der linearen Boden-Bauwerk-Wechselwirkung anwenden. Beispielsweise kann man damit Formeln für die Feder- und Dämpferkennwerte starrer Kreisfundamente auf einem Boden mit linear zunehmender Steifigkeit entwickeln (Bild 8) [9, 3, 10]. Weitere wichtige Anwendung sind die Wechselwirkung benachbarter Bauwerke und die dynamische Gruppenwirkung von Pfählen [11].

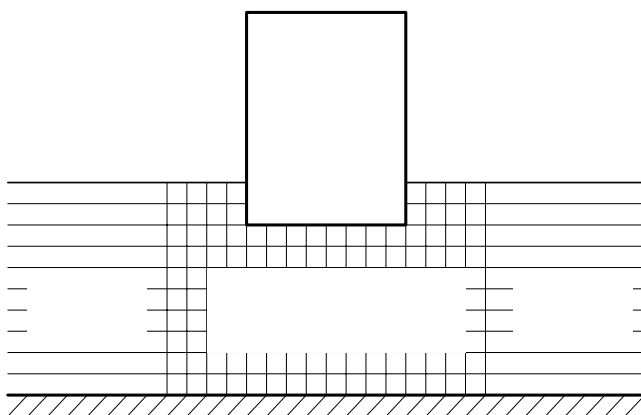


Bild 7: Semifinites Verfahren für geschichteten Baugrund

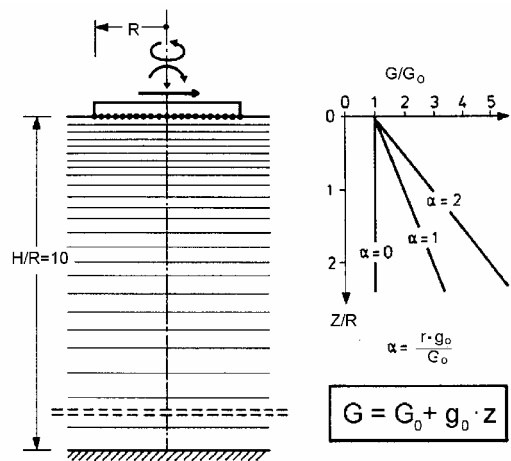


Bild 8: Kreisfundament auf Boden mit linear zunehmender Steifigkeit

Ein derzeit aktuelles Forschungsgebiet ist die Flüssigkeits-Bauwerk-Wechselwirkung. So werden bei der Erdbebenbeanspruchung von Flüssigkeitsbehältern zusätzlich zum statischen Flüssigkeitsdruck dynamische Druckzustände hervorgerufen. Die rechnerische Behandlung der komplexen Interaktion der Schwingungen der Flüssigkeit und der Bauwerkschwingungen ist mit der Finite-Element-Methode möglich. Daneben gibt es auch vereinfachte Feder-Masse-Dämpfer-Modelle für spezielle Systeme. Als Beispiel für eine neuere Arbeit sei diejenige von Habenberger [12] für spezielle Flüssigkeitsbehälter genannt.

3.4 Tragwiderstand und Duktilität

Für das Erdbebenverhalten eines Tragwerks ist neben seinem Tragwiderstand gegen horizontale Kräfte auch dessen Duktilität oder Verformungsvermögen von entscheidender Bedeutung. Unter der Duktilität versteht man das Verhältnis zwischen der Verformung im Versagenszustand und der Verformung an der Elastizitätsgrenze. Man unterscheidet zwischen der Verschiebeduktilität ganzer Bauwerke, der Dehnungs-, und der Krümmungsduktilität eines Querschnitts und der Rotationsduktilität eines plastischen Gelenks. Nach Bachmann [13] besteht bezüglich des Versagens eines Gebäudes bei Erdbebenbelastung folgender grundsätzliche Zusammenhang:

$$\text{„Güte des Erdbebenverhaltens“} = \text{Tragwiderstand} \cdot \text{Duktilität}$$

Die Auslegung eines Bauwerks für ein gegebenes Bemessungserdbeben ist also entweder mit einem hohen Tragwiderstand und geringer Duktilität oder mit einem niedrigerem Tragwiderstand und entsprechend hoher Duktilität zu erreichen (Bild 9).

Die konsequente Nutzung der Tragwerksduktilität führt zu dem Verfahren der Kapazitätsbemessung. Dieses kann kurz wie folgt charakterisiert werden:

- *In einem Tragwerk mit Erdbebeneinwirkungen werden die plastifizierenden Bereiche bewusst gewählt und so festgelegt, dass ein geeigneter plastischer Mechanismus entsteht.*
- *Die plastifizierenden Bereiche werden so bemessen und konstruktiv durchgebildet, dass sie genügend duktil sind.*
- *Die übrigen Bereiche werden mit zusätzlichem Tragwiderstand (Kapazität) versehen, damit sie elastisch bleiben, wenn die plastifizierenden Bereiche ihre Überfestigkeit entwickeln.*

(Hugo Bachmann in Anlehnung an Thomas Paulay [13])

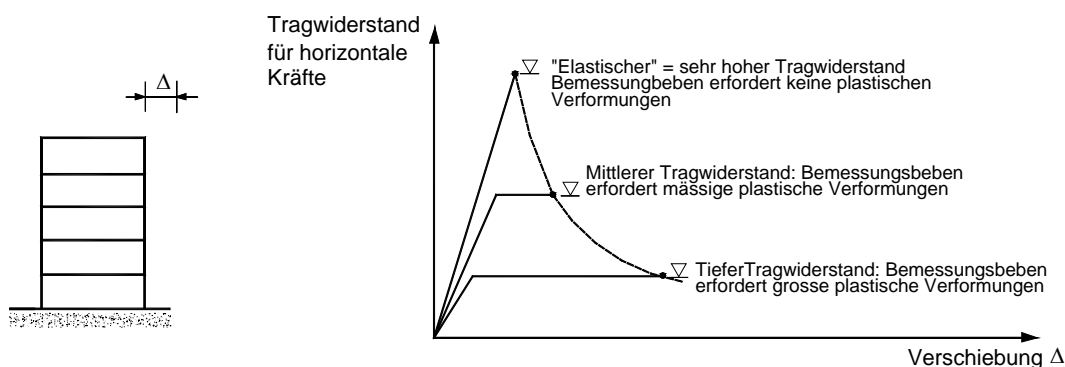
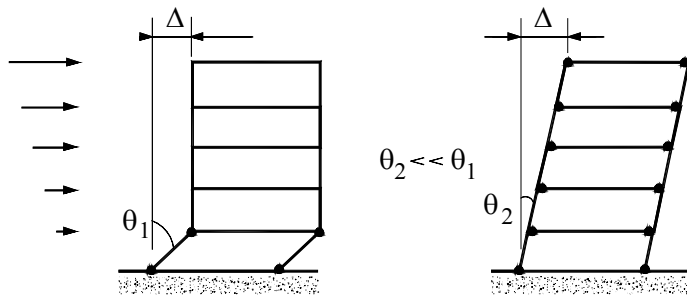


Bild 9: Zusammenhang zwischen Tragwiderstand und Duktilität [13]

Fließgelenke sollten nach der Kapazitätsbemessung in der Regel durch entsprechende konstruktive Durchbildung nicht in den Stützen sondern in den Riegeln von Rahmen angeordnet werden. Ein klassisches Beispiel zeigt Bild 10. Der Stützenmechanismus (a) ist ungeeignet, da Stützen aufgrund des spröden Betonverhaltens bei hohen Normalkräften eine deutlich geringere Duktilität als Riegel besitzen. Weiterhin treten große Verformungen Δ und damit hohe Zusatzkräfte infolge Theorie II-ter Ordnung auf. Wesentlich besser geeignet ist der Riegelmechanismus (b). Stützenmechanismen von unzureichend bemessenen Stützen



(a) ungeeigneter
Stützenmechanismus

(b) besser geeigneter
Riegelmechanismus

Bild 10: Plastische Mechanismen eines Rahmens

sind häufige Einsturzursache von Hochbauten bei Erdbeben.

Praktische Hinweise, wie Stahlbetonbauteile für einen vorgegebenen Tragwiderstand duktil bemessen und konstruktiv ausgebildet werden können, werden in [13, 14] gegeben.

3.5 Erdbebensichere Gebäudeplanung und konstruktive Durchbildung

Bereits bei der Bauplanung werden wesentliche Festlegungen bezüglich der Erdbebensicherheit eines Gebäudes getroffen. So sind mehrgeschossige Gebäude mit exzentrischen horizontalen Aussteifungselementen wesentlich ungünstiger als solche, bei denen Massen- und Steifigkeitsschwerpunkt übereinstimmen, da durch eine exzentrische Aussteifung

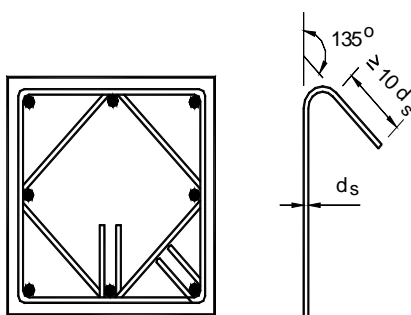


Bild 11: Ausführung von Bügeln
bei Stützen

zusätzliche Torsionsbeanspruchungen von erheblicher Größe auftreten. Aber auch die konsequente konstruktive Durchbildung ist im Stahlbetonbau entscheidend, damit das rechnerisch angesetzte Tragverhalten auch tatsächlich gewährleistet ist. So müssen beispielsweise tragende Bügel entweder verschweißt werden oder mit 135°-Abbiegungen nach innen verankert werden, damit sie bei Erdbebenbeanspruchung wirksam sind (Bild 11).

Grund dieser Maßnahme ist, dass bei Erdbebenbeanspruchung von einem Abplatzen der Betondeckung ausgegangen werden muss.

Die wichtigsten praktischen Maßnahmen zur Planung und konstruktiven Durchbildung von Gebäuden versucht Bachmann durch „35 Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden“ zu systematisieren. Einige Regeln seien exemplarisch angegeben:

- *GS 1: Enge Zusammenarbeit von Architekt und Bauingenieur beim Entwurf!*
- *GS 20: Fugen zwischen benachbarten Gebäuden fachgerecht ausbilden!*
- *GS 28: Foundation durch Kapazitätsbemessung schützen!*
- *GS 30: Mögliche Bodenverflüssigung untersuchen!*
- *GS 32: Fassadenbauteile auch für horizontale Kräfte verankern!*

Die 35 Grundsätze sind in [15] ausführlich erläutert und illustriert. Weitere Hinweise und Beispiele für Konstruktionsdetails, insbesondere aus dem Wohnhausbau, finden sich in der vom Innenministerium des Landes Baden-Württemberg herausgegebenen Planungshilfe „Erdbebensicheres Bauen“ [16] sowie in den Publikationen von Müller/Keintzel [1], Paulay/Bachmann/Moser [14] und Bachmann[13].

In komplizierten Fällen kann die Abtragung von Horizontallasten auch mit einem dreidimensionalen Finite-Element-Modell rechnerisch untersucht werden. Bild 12 zeigt beispielsweise ein Modell zum rechnerischen Nachweis der Aussteifung des „Seeuferhaus Konstanz“ in den beiden Untergeschossen. Das Gebäude besitzt Grundrissabmessungen von 153 m x 94 m und ist wegen des als Untergrund anstehenden sehr weichen Seetons auf einer kombinierten Pfahl-Bodenplatte gegründet. Die Lastaufteilung der von den vier Obergeschossen einwirkenden Erdbebenkräfte und -momente auf die aussteifenden Wände, die durch Öffnungen geschwächt sind, kann mit dem Finite-Element-Modell detailliert ermittelt werden.

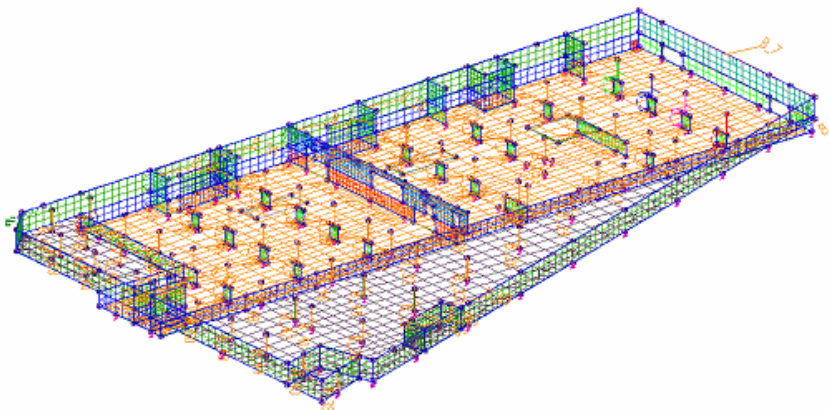


Bild 12 Finite-Element-Modell, Seeuferhaus Konstanz (Teilmodell des 1. und 2. UG)

4 Besondere Konzepte zur Erdbebensicherung von Bauwerken

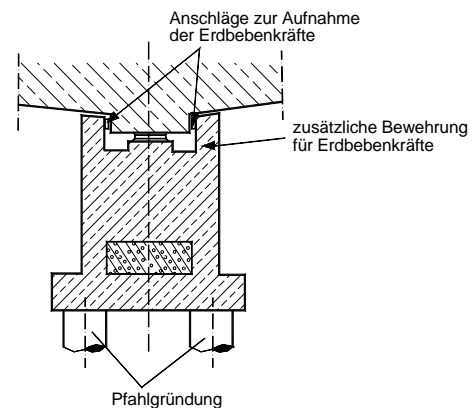
4.1 Konstruktive Lösungen und Sonderkonstruktionen

Wenn in Gebieten mit hoher Seismizität Erdbeben wesentlich höhere Horizontalkräfte hervorrufen, als sie in anderen Lastfällen auftreten, können Sonderkonstruktionen sinnvoll sein. Ein typisches Beispiel ist im Brückenbau die Aufnahme der horizontalen Erdbebenkräfte. In Brückenlängsrichtung werden Brücken mit großer Spannweite in der Regel an einem Pfeiler unverschieblich und an allen übrigen Pfeilern verschieblich gelagert, um Zwängungen zu vermeiden. Damit wirkt die gesamte Masse der Brücke bei Erdbebenbeanspruchung an einem Pfeiler. Für derartige Konstruktionen gibt es eine Reihe von Sonderanschlägen. Beispielsweise wurden an der Rheinbrücke Konstanz die unverschieblichen Lager in Brückenlängsrichtung nur für kleinere Erdbeben ausgelegt. Bei größeren Beben werden Anschläge wirksam, die entsprechend duktil bewehrt sind (Bild 13). Gegebenenfalls müssen nach einem solchen Beben die Lager gewechselt werden. In anderen Fällen werden im Brückenbau Schubnocken, vorgespannte Zug-Druck-Lager oder Vorrichtungen, die ein Abheben der Lager bei Torsionsbeanspruchung des Brückenkörpers verhindern, eingesetzt [1], [17], [18].



(a) Ansicht

Bild 13 Rheinbrücke Konstanz



(b) Brückenpfeiler

4.2 Mauerwerk

An den Einsatz von Mauerwerk für aussteifende Wände in Erdbebengebieten sind besondere Anforderungen zu stellen. So sind in bestimmten Fällen nur Steinsorten mit in Wandlängsrichtung durchgehenden Stegen zugelassen. Auch durch Stahlbetonwand-

scheiben können Mauerwerksbauten in Erdbebengebieten wirksam ausgesteift werden. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von bewehrtem Mauerwerk (Bild 14) Durch die eingelegte (i. d. R. korrosionsgeschützte) Bewehrung werden die Aufnahmefähigkeit für Zugkräfte und die Duktilität von Mauerwerk erhöht [15]. Untersuchungen zum Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk bei seismischer Beanspruchung werden derzeit auch im Hinblick auf die Neufassung der DIN 4149 und der DIN 1053, Teil 3 durchgeführt [19].



Bild 14 Wand aus bewehrtem Mauerwerk auf dem Erdbeben-Rütteltisch der University of California, Berkeley



Bild 15 Erdbebensanierungsmaßnahmen an einem Hörsaalgebäude der ETH Zürich

4.3 Erdbebenertüchtigung bestehender Bauwerke

In den vergangenen Jahrzehnten hat das Wissen um die Erdbebenbeanspruchung von Bauwerken in hohem Maße zugenommen. Bestehende Gebäude, vor allem solche von besonderer Bedeutung für die Allgemeinheit, werden daher bei Bedarf auf ihre Erdbebensicherheit überprüft und, falls erforderlich, durch geeignete Sanierungsmaßnahmen ertüchtigt. So wird derzeit in der Schweiz vom Bundesamt für Wasser und Geologie die Erdbebensicherheit bundeseigener Gebäude untersucht. Beispielsweise zeigt Bild 15 die



Bild 16 Erdbebensanierungsmaßnahmen an der Golden-Gate-Bridge

für Erdbebenbelastungen nachträglich ausgeführten Verstärkungsmaßnahmen an einem Gebäude der ETH Zürich in Form eines Stahlfachwerks. In Kalifornien werden häufig ältere Bauwerke mit teilweise umfangreichen Maßnahmen für Erdbebenbeanspruchungen ertüchtigt. So wird derzeit ein mehrjähriges Sanierungsprogramm für die Golden-Gate-Bridge bei San Francisco durchgeführt (Bild 16), [20].

4.4 Schwingungsisolierung

Unter der Schwingungsisolierung versteht man die Lagerung des Bauwerks oder Bauteils auf Elastomerlagern oder Stahlfedern (Bild 17) [21]. Bei der Schwingungsisolierung eines Bauwerks wird eine größere Anzahl von Lagerungselementen über die gesamte Gründungsebene verteilt. Durch diese für Bauwerke aufwendige Maßnahme werden die Erdbebenbeschleunigungen erheblich reduziert.

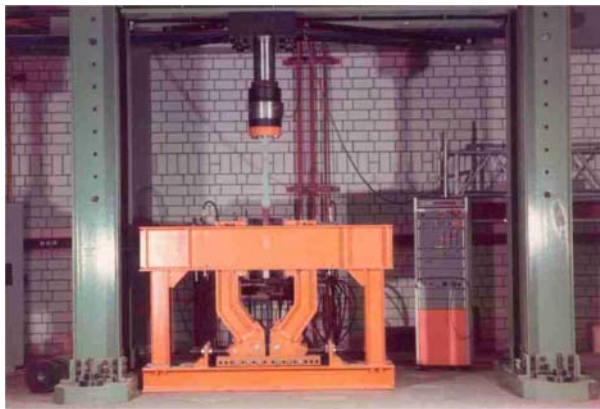


Bild 17 Erdbebenschutz eines Bauwerks in Kalifornien (Quelle: GERB) [22]

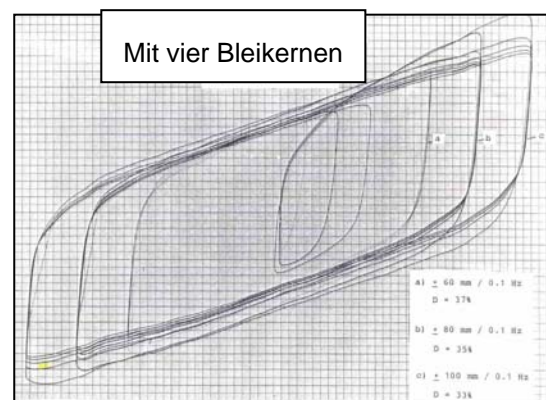
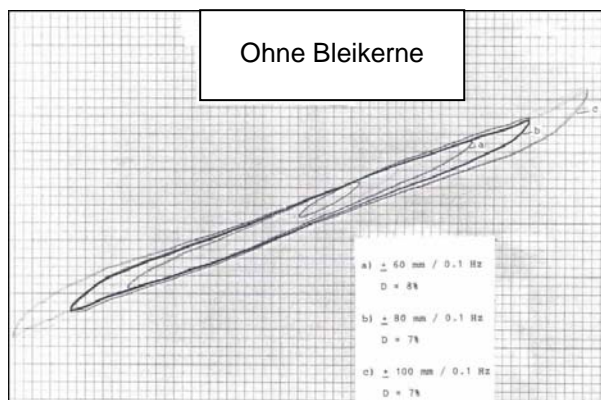
Problematisch kann die Größe der horizontalen Verschiebungen im Erdbebenfall werden. Um diese zu begrenzen, müssen zusätzlich Dämpferelemente vorgesehen werden. Ein Schwingungsisolierungssystem muss im Einzelfall auf den Schwingungsgehalt des Erdbebenstandortes und die Eigenfrequenzen des Bauwerks abgestimmt werden. Zu beachten ist auch, dass die Höhe von Bauwerken mit Schwingungsisolierung begrenzt ist. Bei sehr hohen Bauwerken treten Kippmomente auf, die in den äußersten Lagern unzulässig große vertikale Lagerkräfte hervorrufen können.

Ein von HOCHTIEF Construction bereits in den

80-er Jahren entwickeltes Schwingungsisolierungssystem auf der Grundlage von mit Stahlplatten verstärkten Elastomerlagern ist in Bild 18 dargestellt. Zur Erhöhung der Dämpfung sind in den Elastomerkörper mehrere Bleikerne eingelassen. Die beiden Kraft-Verschiebungskurven der zyklischen Schubversuche in Bild 18(b) zeigen die durch die Bleikerne gewonnene Vergrößerung der Fläche innerhalb der Hysteresisschleife. Sie entspricht einer Erhöhung der Dämpfung von 5-7% ohne Bleikerne auf 25-30% mit Bleikernen [23].



(a) Versuchsanordnung



(b) Hysteresisschleifen

Bild 18 Test eines Schwingungsisolierungssystems mit Elastomerlagern
(Hochtief Construction)

4.5 Verformungskontrollierte Systeme

Insbesondere in Japan werden zur Reduktion der Erdbebenbeanspruchungen aber auch von Windschwingungen in großen Hochhäusern TMD-Systeme eingesetzt. Ein Tuned Mass

Damper (TMD) ist eine elastisch gelagerte Masse, die an einem Bauwerk im obersten Geschoss angebracht wird, um Resonanzschwingungen zu verringern. Die Masse und die Steifigkeit des TMD werden so abgestimmt, dass seine Eigenfrequenz nahe bei der Eigenfrequenz des Gebäudes liegt. Zur Energiedissipation wird der TMD zusätzlich mit Dämpferelementen versehen. Wird das Gebäude zu resonanzähnlichen Schwingungen angeregt, beginnt der TMD ebenfalls zu schwingen und dissipiert in hohem Maße Energie.

Zur Dissipation eines Teils der dem Bauwerk zugeführten Erdbebenenergie können auch spezielle Dämpferelemente in das Tragwerk eingebaut werden. Dämpfer als Konstruktionselemente haben auch den Vorteil, dass sie bei langsamen Verformungen wie z.B. Temperaturbeanspruchungen eine zwängungsfreie Lagerung ermöglichen und gleichzeitig bei stoßartigen Beanspruchungen im Lastfall Erdbeben eine Kraftübertragung ermöglichen. Einen Überblick über weitere, aktuelle Neuentwicklungen geben [24] und [25].

5 Ausführungsbeispiel Flughafen Athen

Der Flughafen Athen wurde in den Jahren 1995-2000 vom Hochtief Konsortium als Generalunternehmer für rund 3,2 Mrd DM schlüsselfertig erbaut (Bild 19). Die Erdbebenauslegung erfolgte nach der neu eingeführten griechischen Erdbebennorm [26], die sich am Eurocode orientiert und mit der damals noch keine Erfahrungen vorlagen. Besondere Anforderungen wurden an die Erdbebenauslegung der Dachkonstruktion des Main Terminal Building gestellt (Bild 19b). In den weit gespannten Stahldächern traten hohe Beanspruchungen durch horizontale Beschleunigungen auf. Hinzu kamen ungleiche Lagerbewegungen von erheblicher Größe. So liegt die in Bild 19c dargestellte 60m x 60m großen Dachkonstruktion vertikal auf vier verschiedenen Stahlbetontragwerken auf, die bis auf die Sohlplatte völlig voneinander getrennt sind und sich beim Erdbeben wegen unsymmetrischer und unterschiedlicher Aussteifung ungleich bewegen. Die Beibehaltung des Tragwerkskonzeptes des Architekten gelang nur mit einer speziellen technischen Lösung. Diese bestand im Einsatz von besonderen Elastomerlagern mit hoher Materialdämpfung, von Gleitlagern mit Reibdämpfung und von viskosen Dämpfern (Bild 19d). Darüber hinaus waren umfangreiche dynamische Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit im Lastfall Erdbeben erforderlich. Beim Erdbeben am 7. September 1999, bei dem es in Teilen von Athen umfangreiche Schäden und einige Gebäudeeinstürze zu beklagen gab, blieb der Flughafen völlig unbeschädigt [27].



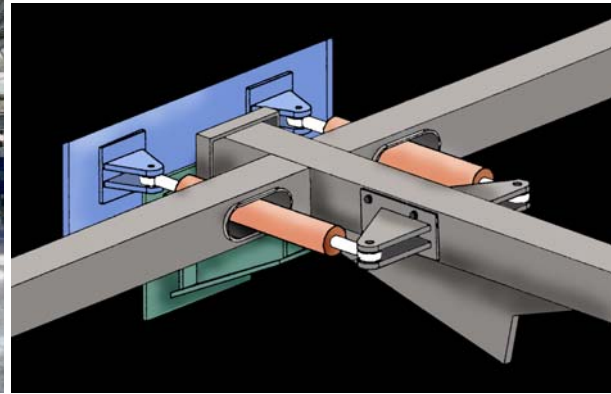
(a) Ansicht



(b) Tower mit dem Main Terminal Building
(Länge ca. 800 m)



(c) Abflughalle



(d) Viskoser Dämpfer an der Dachkonstruktion

Bild 19: Flughafen Athen

6 Zur Beherrschbarkeit des Naturrisikos Erdbeben

Für die Erdbebensicherheit eines Bauwerks sind eine Reihe von Faktoren von entscheidender Bedeutung. Über die Stärke und den Frequenzgehalt des am Standort anzusetzenden Erdbebens müssen seismologisch zuverlässige Angaben vorliegen. Die Bauplanung erfordert umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen des Erdbebeningenieurwesens und die Bauausführung muss entsprechend den Planungsunterlagen erfolgen, wobei auch Details z.B. bei der Bewehrungsführung entscheidend sein können. Sind diese Faktoren gegeben und ist ein Bauwerk nach zeitgemäßen Normen erstellt, so besitzt es auch bei Erdbebenbeanspruchung die notwendige Sicherheit. Dies wird von Untersuchungen nach dem Kobe-Erdbeben am 17. Januar 1995 in Japan bestätigt. Bereits wenige Tage nach dem Beben stellten F. Seible u.a. nach einer ersten Untersuchung der entstandenen Schäden fest: „*Very little damage in buildings of newer construction was observed which can be at*

least partially attributed to significant changes in the Japanese building codes in the mid eighties towards a capacity design based approach which recognizes the need for ductile

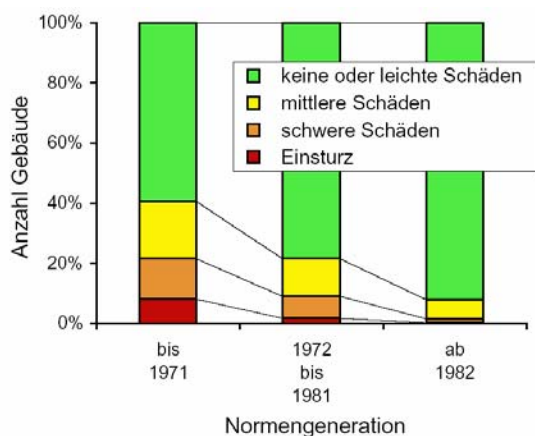


Bild 20: Erdbeben von Kobe 1995 [29],[30]

detailing“ [28]. Dies wurde auch durch nachfolgende, detaillierte Untersuchungen in [29] bestätigt. Den Einfluss der Erdbeben-Normengeneration auf das Schadensausmaß beim Erdbeben von Kobe zeigt Bild 20. Es wird deutlich, dass überwiegend vor 1971 errichtete Gebäude geschädigt wurden. Bei nach 1982, dem Einführungsjahr der modernen japanischen Norm, errichteten Gebäuden traten praktisch keine schwere Schäden und Gebäudeeinstürze auf.

Literatur

- [1] Müller F.-P. , E. Keintzel, Erdbebensicherung von Hochbauten, Ernst&Sohn, Berlin, 1984
- [2] Waas G., Das Erdbeben am 19. September 1985 in Mexiko – bodendynamische und bautechnische Aspekte, 3. Jtg. DGEB, Trans Tech Publications, Clausthal, 1988
- [3] Werkle H., Finite Elemente in der Baustatik, 2. Auflage, Vieweg, Weisbaden, 2001
- [4] Werkle H., G. Waas, Computed versus measured response of HDR reactor building in impact tests, SMIRT 9, Lausanne, 1987
- [5] Werkle H., G. Waas, Computed versus measured response of HDR reactor building in large scale shaking tests, SMIRT 9, Lausanne, 1987
- [6] Waas, G., Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layered media, Dissertation, University of California, Berkeley, 1972
- [7] Waas G., Berechnung dynamischer Boden-Bauwerk-Wechselwirkungen, Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis, Ernst&Sohn, Berlin, 1984
- [8] Waas G., H.R. Riggs, H. Werkle, Displacement solutions for dynamic loads in transversely-isotropic stratified media, Earthq. Eng. and Struct. Dyn., John Wiley&Sons, 1985
- [9] Werkle H., Steifigkeit und Dämpfung von Fundamenten auf inhomogenem Baugrund, 3. Jtg. DGEB, Trans Tech Publications, Clausthal, 1988
- [10] Flesch R., Baudynamik – praxisgerecht, Bd. 1, Bauverlag, Wiesbaden, 1993
- [11] Hartmann H.-G., Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, 2. Symposium „bauhaus goes business“, Bauhaus-Universität Weimar, 2003

- [12] Habenberger J., Beitrag zur Berechnung von nachgiebig gelagerten Behältertragwerken unter seismischen Einwirkungen, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [13] Bachmann H., Erdbebensicherung von Bauwerken, Birkhäuser Verlag, Basel, 2002
- [14] Paulay T., H. Bachmann, K. Moser, Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten, Birkhäuser Verlag, Basel, 1990
- [15] Bachmann H., Erdbebugerechter Entwurf von Hochbauten – Grundsätze für Ingenieure Architekten, Bauherren und Behörden, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 2002
- [16] Erdbebensicher bauen – Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure, Innenministerium Baden-Württemberg, Referat Bautechnik, Stuttgart, 1988
- [17] Priesley, M.J.N., Seible F., Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley&Sons, New York, 1996
- [18] Billig B. u.a., Brückendynamik im Rahmen des Taiwan High Speed Railway Projekts, in: Baudynamik, VDI-Bericht 1754, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [19] Zilch K., D. Schermer, Untersuchungen zum Verhalten von Mauerwerksgebäuden unter Erdbebenbeanspruchung, Bauingenieur, Berlin, 2003
- [20] Mervin C., Giacomini M.C., J.E. Woelfel, Golden Gate Update, CIVIL ENGINEERING MAGAZINE, Nov. 2000, <http://www.pubs.asce.org/ceonline/1100feat.html>
- [21] Komodromos P. I., Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures, WIT Press, Southampton, 2000
- [22] Nawrotzki P., Stahlfedern und Viscodämpfer zur Optimierung der Erdbebenbeanspruchung von Bauwerken, DACH-Tagung 2001, Innsbruck, 2001
- [23] Waas G., Zyklische Schubversuche an Elastomerlagern in der Versuchhalle der HOCHTIEF AG, Persönliche Mitteilung, HOCHTIEF Construction AG, Frankfurt, 2003
- [24] Meskouris K., K.-G. Hinzen, Bauwerke und Erdbeben, Vieweg, Wiesbaden, 2003
- [25] Pocanschi A., M.C. Phocas, Kräfte in Bewegung – die Techniken des erdbebensicheren Bauens, Teubner, GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2003
- [26] New Greek Aseismic Code (NEAK 1995), Greek Organisation for Aseismic Design and Protection (OASP), Athens, 1995
- [27] G. Waas, Erdbebenauslegung der Tragwerke des Flughafens Athen, Persönliche Mitteilung, HOCHTIEF Construction AG, Frankfurt, Juli 2003
- [28] Seible F., M.J.N. Priestley, G. MacRae, The Kobe Earthquake of January 17, 1995, Report No. SSRP-95/03, University of California, San Diego, Februar 1995
- [29] Ikunai M., Investigation of building damages by the 1995 Hyogken nanbu Earthquake, Structural Dynamics – Eurodyn'96, Augusti Borri & Spinelli, Balkema, Rotterdam, 1996
- [30] T. Wenk, Einführung in das Erdbebeningenieurwesen, Vorlesung, ETH Zürich, 2001