

# Ist die Erdbebensicherung im Hochbau gerechtfertigt?

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

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **109 (1991)**

Heft 44

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-86040>

## **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.

# Ist die Erdbebensicherung im Hochbau gerechtfertigt?

**Für elf historische Beben der Schweiz werden die bei der heutigen Überbauungssituation zu erwartenden Sachschäden, Verletzten, Todesopfer und Folgeschäden abgeschätzt und die dafür als angemessen empfundenen Sicherheitskosten ermittelt. Diese sind deutlich grösser als die Mehrkosten infolge der nach der Norm SIA 160, 1989, geforderten Erdbebensicherung.**

## Einleitung

Einerseits steigen mit der stark zunehmenden Industrialisierung sowohl das Gefährdungspotential als auch die Ver-

VON KONRAD MOSER,  
ZÜRICH

letzlichkeit der vom Menschen geschaffenen Bauten und technischen Systeme. Andererseits nimmt auch das Risikobewusstsein der Gesellschaft zu. So wird in neuerer Zeit bedeutend mehr Wert auf die Erdbebensicherung von Bauwerken gelegt. Die neue Einwirkungsnorm SIA 160 [6] verlangt deshalb eine höhere Erdbebensicherheit, als dies bisher der Fall war.

In diesem Zusammenhang mag die Frage interessieren, wie sich der gewonnene Sicherheitszuwachs zu den dadurch entstehenden Mehrkosten verhält. Dieser Beitrag versucht, das Erdbebenrisiko für den Hochbau in der Schweiz abzuschätzen und die Sicherungsmassnahmen anhand der erreichten Risikoverminderung zu beurteilen. Dazu wird ein Berechnungsmodell verwendet, welches für Industrie- und Verkehrsriskiken erarbeitet wurde und seit geraumer Zeit erfolgreich angewendet wird [14], [16].

Dieser Beitrag beschränkt sich auf eine Betrachtung des Risikos bei Hochbauten, und zwar infolge von Schäden am Gebäude, Schäden am Gebäudeinhalt sowie der verletzten und getöteten Personen. Wirtschaftliche Folgeschäden werden ansatzweise ebenfalls berücksichtigt.

Oft lösen Erdbeben bedeutende Folgeschäden aus, welche die direkten Erdbebensschäden wesentlich übersteigen können. So führte das Erdbeben von San Francisco 1906 zu einer verheerenden Feuersbrunst, auch bei den Beben von Managua 1972 und Loma Prieta 1989 (San Francisco) entstanden schwer zu löschende Brände. Bei der Universität von Cotobato 1976 auf Mindanao führte ein Folgebrand sogar zum nachträglichen

Einbruch des Chemiegebäudes [17]. Durch Erdbeben ausgelöste Brände können auch zu Schadenabläufen wie im Fall des Brandes von Schweizerhalle 1986 führen, wo durch das kontaminierte Löschwasser grössere Umweltschäden entstanden.

Auch die direkte Freisetzung von umweltgefährdenden Stoffen kann zu grossen Folgeschäden führen. Vor allem diejenigen von Erdölprodukten und Chemikalien durch Leckagen in Förder- und Lagersystemen haben meist grosse Schäden infolge der Verschmutzung des Grund- und Oberflächenwassers zur Folge. Das Beben von Edgumbe 1987 (Neuseeland) zerstörte Lagertanks einer Grossmolkerei, und die auslaufende Milch führte zu einer beträchtlichen Grundwasserverschmutzung.

Die Liste der Folgeschäden an der Umwelt liesse sich beliebig verlängern, sie sind in Art und Grösse von Fall zu Fall sehr verschieden und lassen sich selbst bei genauer Kenntnis der technischen Einrichtungen nur schwer abschätzen. Diese Schäden werden deshalb in der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt, sie würden aber die gerechtfertigten Sicherheitskosten unter Umständen wesentlich erhöhen.

## Beurteilungsmodell

### Risiko

Das Erdbebenrisiko setzt sich zusammen aus Sachschäden und Personenschäden. Während die Sachschäden direkt in Geldwert ausgedrückt werden können, wird bei Personenschäden auf die sogenannten *Rettungskosten* zurückgegriffen [14], [19]. Als Rettungskosten wird derjenige finanzielle Aufwand bezeichnet, welcher von der Gesellschaft zur Verhinderung eines Todesopfers oder einer Verletzung als gerechtfertigt angesehen wird. Die Rettungskosten zur Verhinderung eines Todesopfers sind allgemein grösser als der versicherungstechnische Schaden (z.B.

Versorgerschaden). Ihre absolute Grösse ist von verschiedenen, im Abschnitt «Rettungskosten» noch näher zu erläuternden Faktoren abhängig.

## Modellsysteme

Die Anforderungen zur Erdbebensicherung führen sowohl bei der Erstellung neuer Bauwerke als auch bei Umbauten und Erneuerungen zu Mehrkosten.

Diese Mehrkosten werden durch den Vergleich zweier Modellsysteme ermittelt, wobei vereinfachend vorausgesetzt wird, dass die Bausubstanz der Schweiz über die Betrachtungsperiode eines Jahres konstant bleibt, dass also gleich viel abgebrochen wie neu erstellt wird.

### System I

Die gesamte vorhandene und die während eines Jahres erstellte Bausubstanz ist *nicht erdbebengesichert*. Dieses System ergibt die jährlichen Investitionskosten und das Grundrisiko infolge der Einwirkung Erdbeben (Zustand vor der neuen Norm SIA 160).

### System II

Die gesamte vorhandene und die neu erstellte Bausubstanz ist *erdbebengesichert*. Dieses System ergibt einerseits grössere jährliche Investitionskosten, aber andererseits ein kleineres Risiko infolge Erdbeben.

## Beurteilung

Die Differenz der Investitionskosten der beiden Systeme wird verglichen mit der Differenz des Erdbebenrisikos. Falls die Risikoreduktion grösser ist als die Zunahme der Baukosten, so sind die Anforderungen für die Erdbebensicherung gerechtfertigt.

## Sachschäden

### Gebäudeschäden

Anhand von seit dem 14. Jahrhundert in der Schweiz aufgetretenen Erdbeben mit Intensitäten zwischen VI und IX wurden für die heutige Überbauungssituation die wahrscheinlichen Gebäudeschäden ermittelt (Tabelle 1). Szenarium A beruht direkt auf den zeitgenössischen Beschreibungen der Erdbebenwirkungen, es wird jedoch vermutet, dass diese Beschreibungen zum Teil etwas übertrieben ausgefallen sind. Deshalb wurden im Szenarium B die Schadenwerte noch mit einer optimistischeren Einschätzung ermittelt (Intensität um eine Stufe vermindert) [13].



Jahr	Ereignis	max. Intensität $I_{max}$	Gebäudeschäden (Mio. Fr.)			Todesopfer heute <sup>1)</sup>
			Szen. A	Szen. B	Durchschnitt	
1356	Basel	IX	47 130	13 390	30 260	1 510
1601	Nidwalden	VIII	8 950	760	4 855	242
1720	Bregenz	VII–VIII	1 440	300	870	44
1774	Altdorf	VIII	3 100	450	1 775	89
1796	Buchs/SG	VII–VIII	460	86	273	14
1853	Solothurn	VII	200	32	116	6
1855	Vispताल	IX	8 720	580	4 650	233
1881	Bern	VII	1 250	280	765	38
1898	Yverdon	VI–VII	110	–	55	3
1946	Rawil	VIII	1 900	430	1 165	58
1971	Glarus	VII	160	31	96	5
Summen für die Periode 1356–1990			73 420	16 339	44 880	2 242
Mittlere Werte pro Jahr ( $\cdot 1/635$ )			115,6	25,7	70,7	3,5

<sup>1)</sup> «Anzahl der Erdbebenopfer» gemäss Abschnitt

Tabelle 1. Gebäudeschäden und Todesopfer infolge Erdbeben in der Schweiz

Für den Zeitraum von 635 Jahren ergeben sich für die betrachteten Beben mittlere jährliche Gebäudeschäden bei heutiger Bausubstanz zwischen 115,6 Mio. Fr./a und 25,7 Mio. Fr./a. Im Folgenden wird für die Abschätzungen der Durchschnitt der beiden Szenarien von 70,7 Mio. Fr./a verwendet. Dies unter der Annahme, dass die im betrachteten Zeitraum aufgetretenen Erdbeben statistisch repräsentativ sind.

Anhand des grössten Einzelereignisses sollen diese Werte überprüft werden.

Aufgrund einer Auswertung aller bekannten historischen Erdbeben beträgt die mittlere Wiederkehrperiode eines Bebens von mindestens der Intensität des Bebens von Basel rund 500 Jahre [8]. Die Auswertung zeigt auch, dass ein Beben dieser Stärke im Raum Basel statistisch gesehen nicht als «Ausreisser», sondern für diese Wiederkehrperiode als normal anzusehen ist, liegen doch die bekannten Starkbeben in der logarithmischen Darstellung praktisch auf einer Geraden.

Land	Ort	Jahr	Sachschaden (Mio. Fr.) <sup>1)</sup>	Todesopfer (T)	Verhältnis (Mio. Fr./T)
BRD	Schwäbische Alb	1978	225	– <sup>2)</sup>	–
GRE	Saloniki	1978	240	50	4,8
	Korinth	1981	1 350	25	54,0
ITA	Sizilien	1968	480	281	1,7
	Friaul	1976	5 400	978	5,5
	Irpinien	1980	15 000	3 114	4,8
JPN	Niigata	1964	1 200	26 <sup>3)</sup>	46,2 <sup>8)</sup>
	Tokachi-Okai	1968	240	48	5,0
	Sendai	1978	1 200	27	44,4
	Nihon-Kai-Chubu	1983	900	104 <sup>4)</sup>	8,7 <sup>8)</sup>
JUG	Skopje	1963	900	1 070	0,8
	Montenegro	1979	4 050	131	30,9
URS	Taschkent	1966	450	–	–
	Gasli	1976	?	85	–
	Spitak <sup>5)</sup>	1988	30 000	25 000	1,2
USA	Anchorage	1964	807	131	6,2
	San Fernando	1971	803	65	12,4
	Los Angeles	1987	315	7	45,0
	Loma Prieta <sup>6)</sup>	1989	8 400	62 <sup>7)</sup>	135,5 <sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> Umrechnung mit SFr. 1.50/US\$

<sup>2)</sup> aus [15]

<sup>3)</sup> günstiger Zeitpunkt

<sup>4)</sup> aus [5]

<sup>5)</sup> grosser Sachschaden durch umgekippte Gebäude (Bodenverflüssigung)

<sup>6)</sup> 42 Todesopfer bei Brückeneinsturz

<sup>7)</sup> viele Todesopfer durch Flutwelle (Tsunami)

<sup>8)</sup> in Bild 1 nicht verwendeter Wert

Tabelle 2. Sachschäden, Todesopfer und deren Verhältnis bei den Erdbeben in Industrieländern seit 1960

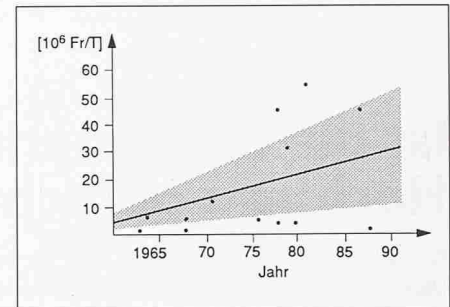


Bild 1. Entwicklung des Sachschadens pro Todesopfer in den Industrieländern

Die mittlere Auftretenswahrscheinlichkeit beträgt also  $1/500 = 2 \cdot 10^{-2}$  pro Jahr. Gemäss Tabelle 1 beträgt der Anteil der Gebäudeschäden des Basler Bebens 30 260 Mio. Fr., d.h. 67% der Schadenssumme der ganzen Periode. Damit erhalten wir pro Jahr:

$30\,260 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-2} / 0,67 \text{ a} = 90,3 \text{ Mio. Fr./a}$ . Dieser Wert liegt in der gleichen Grössenordnung wie der Mittelwert aller Beben in Tabelle 1. Dass er etwas grösser ist, kann daran liegen, dass in Tabelle 1 nicht sämtliche Schadenbeben der betrachteten Zeitperiode enthalten sind. Deshalb wird für die folgenden Abschätzungen der plausible, höhere Wert von 90 Mio. Fr./a verwendet.

### Schäden am Gebäudeinhalt

In Hochbauten entstehen auch beträchtliche Schäden am Gebäudeinhalt durch umstürzende Bauteile wie Trennwände, umstürzende Maschinen (Computer usw.), Behälter, Geräte und Gestelle sowie durch teilweisen oder totalen Einsturz des Tragsystems. Für das Erdbeben von Mexico-City wurden diese Schäden auf 80% der Gebäudeschäden geschätzt [18], sie dürften in der Schweiz bei den typischerweise kleineren Intensitäten etwas tiefer liegen.

Für durchschnittliche Hochbauten ohne spezielle Brand-, Explosions- oder Umweltverschmutzungsrisiken kann deshalb für diese Schäden etwa die Hälfte der Schäden am Gebäude selbst, rund 50 Mio. Fr./a, eingesetzt werden.

### Personenschäden

Die Untersuchung [13] beschränkt sich auf Gebäudeschäden. Für eine Gesamtbetrachtung sind jedoch die Schäden an Personen, Todesopfer und Verletzte, ebenfalls zu berücksichtigen.

### Anzahl der Erdbebenopfer

Für die Schweiz wurden die mittleren Gebäudeschäden sowohl für einzelne Beben als auch pro Jahr abgeschätzt. Es liegt deshalb nahe, darauf aufbauend auch die Anzahl der zu erwartenden To-



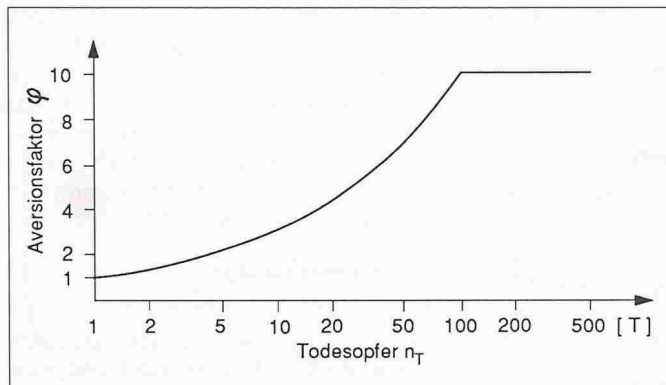


Bild 2. Aversionsfunktion für Erdbeben

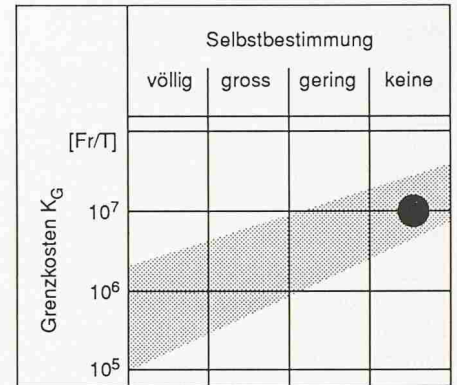


Bild 3. Grenzkosten in Abhängigkeit der Selbstbestimmung

desopfer zu ermitteln. Anhand der Zusammenstellung von Sachschäden und Todesopfern für alle bekannten Schadenbeben in [10] wurde der jeweilige Erdbebenschaden pro Todesopfer bestimmt. Diese Werte streuen äusserst stark und sind im wesentlichen vom Überbauungs- und Industrialisierungsgrad des Bebengebietes abhängig. Er beträgt in den Entwicklungsländern nur einen Bruchteil des Wertes für die Industrieländer. So erhalten wir für das Beben von Tangshan (China 1976) mit 242 000 Toten einen Wert von 0,03 Mio. Fr./T, für das Beben von Loma Prieta (Kalifornien 1989, [5]) beträgt er 135,5 Mio. Fr./T, also mehr als das Viertausendfache. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass dank der in Kalifornien verlangten Erdbebenbemessung sehr wenige Hochbauten einstürzten, weshalb für ein Beben dieser Stärke, abgesehen vom katastrophalen Versagen des Cyprus Highways auch äusserst wenige Todesopfer zu verzeichnen sind.

Es wurden deshalb hier, um das Verhältnis von Sachschaden zur Anzahl der Todesopfer zu ermitteln, nur die Zahlen für die industrialisierten Länder (Westeuropa, USA, Japan) seit 1960 verwendet (Tabelle 2). In Bild 1 sind davon nur diejenigen Werte eingetragen, welche nicht aufgrund von Besonderheiten der Ereignisse extrem sind (vgl. Anmerkungen zu Tabelle 2). Angesichts der kleinen und stark streuenden Datenmenge wurde im Sinne eines groben Trendes eine Gerade hineingelegt. Für 1990 ist demnach etwa mit 30 Mio. Fr. Sachschaden pro Todesopfer zu rechnen. Gemäss der Annahme von Abschnitt «Sachschäden» machen die Gebäudeschäden zwei Drittel der gesamten Sachschäden aus, und es ergibt sich, auf die Gebäudeschäden bezogen, ein Wert von 20 Mio. Fr./T. Damit wurden aus den Mittelwerten die ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführten, heute zu erwartenden Todesopfer ermittelt.

Würde das Erdbeben von Basel heute auftreten, wäre also nicht mit 300 Todesopfern zu rechnen wie im Jahre 1356, sondern mit etwa 1500, dies ohne allfällige Opfer infolge spezieller Risiken (Chemie usw.) oder infolge von Folgeschäden. Bei einem Beben wie demjenigen vom Vispental wären heute etwa 200 Todesopfer zu erwarten.

Die westliche Industriegesellschaft empfindet das Ausmass grosser Ereignisse überproportional und gewichtet diese stärker, als dies nach der Anzahl der Todesopfer eigentlich der Fall sein müsste. Die angemessenen Rettungskosten, d.h. die Kosten, die zur Verhinderung eines Todesopfers als angemessen erachtet werden, sind also nicht vom rational vorhandenen, sondern vom empfundenen Todesfallrisiko abhängig.

**Rettungskosten**

Diese Tatsache kann mit einem von der Anzahl der Todesopfer  $n_1$  abhängigen sogenannten *Aversionsfaktor*  $\varphi$  berücksichtigt werden. In Anlehnung an [19] wird für Erdbeben die folgende Aversionsfunktion verwendet (Bild 2):

$\varphi = \sqrt{n_T}$  wobei  $1 \leq \varphi \leq 10$  (1)

Die angemessenen *Rettungskosten*  $K_{R,a}$  werden deshalb definiert als Produkt von Aversionsfaktor  $\varphi$  und *Grenzkosten*  $K_G$  (Gl.2).

$K_{R,a} = \varphi K_G$  (2)

Mit *Grenzkosten* wird der finanzielle Aufwand bezeichnet, welchen die Gesellschaft zur Verhinderung eines einzelnen Todesfalles als angemessen betrachtet. Die Grenzkosten können aus Entscheiden über Investitionen zur Erhöhung der Sicherheit berechnet werden und sind stark davon abhängig, ob die

gefährdeten Personen ihr Risiko selbst beeinflussen können oder nicht [14]. Das Erdbebenrisiko fällt in die Kategorie «keine Selbstbestimmung» und weist deshalb Grenzkosten von etwa 10 Mio. Fr. auf (vgl. Bild 3, nach [19]).

Die Auswertung der Angaben für die Todesopfer in Tabelle 1 nach den Gleichungen (2) und (1) ergibt für alle Beben mit insgesamt 2240 Erdbebenopfern die aufsummierten angemessenen Rettungskosten von 218 Mia. Fr. oder  $K_{R,a} = 340$  Mio. Fr./a.

**Verletzte**

Die Anzahl der Verletzten schwankt bei Erdbeben in einem weiten Bereich, je nach der Art der Bauwerkschäden. In Tabelle 3 ist die Anzahl der Verletzten und Todesopfer der grossen Schadenbeben neuester Zeit zusammengestellt. Pro Todesopfer ist demnach mit 1 bis 10 Verletzten zu rechnen. Die Rettungskosten pro Verletzten sind durchschnittlich um einiges kleiner als für die Todesopfer. Bei ausheilenden Verletzungen wie etwa bei Brüchen sind sie sehr klein, bei zu teilweiser oder vollständiger Invalidität führenden Verletzungen unter Umständen in einer ähnlichen Grössenordnung wie für die Todesopfer. Stark vereinfachend nehmen wir an, dass die Summe der Rettungskosten für alle Verletzten zusammen etwa halb so gross sei wie für die Getöteten, nämlich umgerechnet 170 Mio. Fr. pro Jahr. Bei z.B. fünf Verletzten pro Todesopfer sind damit die angemessenen Rettungskosten pro Verletzten zehnmal tiefer angesetzt als diejenigen pro Todesopfer.

Ereignis	Verletzte	Todesopfer	Verhältnis
Mexico-City 1985, Mexico [15]	≈ 50 000	10 000–35 000	5–1,4
San Salvador 1986, El Salvador [15]	> 10 000	≈ 1200	> 8,3
Spitak 1988, Armenien [15]	25 000	25 000	1,0
Loma Prieta 1989, Kalifornien [5]	3 757	62	5,6
Cabanatuan 1990, Philippinen [1]	≈ 10 000	1000–1700	10–5,9
Manjil 1990, Iran [15]	100 000	35 000–50 000	2,9–2,0

Tabelle 3. Verhältnis der Anzahl Verletzter zur Anzahl Getöteter für die grossen Schadenbeben der letzten fünf Jahre



## Wirtschaftliche Folgeschäden

Neben den bisher behandelten Kosten entstehen auch wirtschaftliche Folgeschäden. Diese sind in einer einfachen Agrargesellschaft sehr klein, erreichen aber in den industrialisierten Ländern beachtliche Werte.

Diese Schäden sind zum grossen Teil auf Betriebsunterbrechungen infolge von Maschinen-, Steuerungs-, Computerstörungen und -schäden, hervorgerufen durch Erschütterungen und Stromausfälle, zurückzuführen. Dazu kommen mehr oder weniger lange Perioden mit unterbrochener oder verminderter Produktion wegen ausgefallener oder erschwelter Kommunikations-, Versorgungs- und Transporteinrichtungen. Im Gegensatz zu den Gebäudeschäden, welche oft versichert und deshalb recht gut bekannt sind, sind diese Schäden sehr schwer abschätzbar.

Wir schätzen die Schäden deshalb in Anlehnung an die in [10] verwendeten Schadensätze auf rund den gleichen Wert wie die Schäden an Gebäuden und deren Inhalt, nämlich auf 150 Mio. Fr./a.

## Gesamtrisiko ohne Sicherungsmassnahmen

Der gesamte empfundene Schadenerwartungswert setzt sich zusammen aus den eigentlichen Schäden an der Baubsubstanz, am Gebäudeinhalt, den angemessenen Rettungskosten für Todesopfer und Verletzte sowie den wirtschaftlichen Folgeschäden. Er beträgt nach Tabelle 4 rund 800 Mio. Fr. pro Jahr, wobei etwas mehr als die Hälfte von den angemessenen Rettungskosten stammt.

## Erdbebenschäden mit Sicherungsmassnahmen

Auch an entsprechend bemessenen und ausgebildeten Hochbauten kann die Erdbebeneinwirkung Schäden hervorru-

fen. Diese relativ geringen Schäden werden, jeweils bezogen auf die Schäden ohne Erdbebensicherung, wie folgt abgeschätzt:

### Schäden am Gebäude

In den Fliessgelenkbereichen können unter Einwirkung des Bemessungsbebens Risse entstehen, welche kosmetische Reparaturen erfordern. Obwohl genügend breite Bewegungsfugen vorhanden sind, können auch dort lokale Schäden entstehen.

Die Kosten dieser Reparaturen betragen vielleicht 5% des Schadens ohne Erdbebensicherung, d.h. 5 Mio. Fr./a.

### Schäden am Gebäudeinhalt

Auch bei erdbebenbemessenen Gebäuden treten beträchtliche Stockwerkbeschleunigungen auf. Teil- und Totaleinstürze mit entsprechenden Schäden am Gebäudeinhalt können jedoch ausgeschlossen werden.

Diese Schäden werden auf 10% derjenigen ohne Erdbebensicherung geschätzt, d.h. 5 Mio. Fr./a.

### Todesopfer

Da keine Tragelemente versagen, sind höchstens Todesopfer infolge von Bewegungen des Gebäudeinhaltes zu erwarten. Reduziert sich die Anzahl auf einen geschätzten Zwanzigstel der Opfer, so sinkt der mittlere Aversionsfaktor  $\varphi$  von 9,7 auf 6,8, und die angemessenen Rettungskosten betragen nur noch 3,5% derjenigen ohne Sicherungsmassnahmen, was einem Betrag von 1,2 Mio. Fr./a entspricht.

### Verletzte

Die Reduktion dürfte bei den Verletzten geringer ausfallen als bei den Todesopfern. Geschätzte 7% entsprechen ebenfalls einem Betrag von 1,2 Mio. Fr./a.

## Wirtschaftliche Folgeschäden

Auch bei praktisch unversehrten Gebäuden können Steuerungs-, Computer- und

Stromausfälle zu relevanten wirtschaftlichen Folgeschäden führen. Da die Versorgungs- und Transporteinrichtungen ebenfalls auf Erdbeben ausgelegt sind und im wesentlichen intakt bleiben, schätzen wir diese in der Grössenordnung eines Viertels derjenigen ohne Erdbebensicherung, d.h. 40 Mio. Fr./a.

## Gesamtrisiko mit Sicherungsmassnahmen

Die Summe der Schäden und angemessenen Rettungskosten kann aufgrund dieser groben und relativ konservativen Abschätzungen auf rund 50 Mio. Fr./a beziffert werden. Die einzelnen Werte sind in Tabelle 4 zusammengestellt und zeigen, dass der Hauptanteil von den wirtschaftlichen Folgeschäden herrührt, welche naturgemäss sehr schwierig abzuschätzen sind. Die Anteile der angemessenen Rettungskosten machen zusammen weniger als 5% des Schadenerwartungswertes aus. Bei erdbebengesicherten Bauwerken ist also praktisch nur noch mit stark verminderten Sachschäden zu rechnen.

## Kosten der Erdbebensicherung

Die Kosten der Erdbebensicherung können je nach Art der Hochbauten stark variieren. Bei Gebäuden, die zufällig ein gutes Erdbebenverhalten aufweisen, weil z.B. ihre Geometrie regelmässig ist, Masse und Steifigkeit über die Gebäudehöhe stetig verlaufen oder konstant bleiben usw. [11], [2], sind die zusätzlichen Anforderungen für die Erdbebensicherung nicht mehr gross. Oft ist es bei Stahlbetonhochbauten sogar so, dass schon zu viele Tragwände vorhanden sind, welche die Horizontalkräfte abtragen können. Um ein duktileres und kostengünstigeres Tragwerk zu erhalten, ist in diesen Fällen ein Teil dieser Stahlbetonwände durch nichttragende Wände zu ersetzen, wodurch sich manchmal sogar Kosteneinsparungen ergeben. Es ist deshalb sinnvoll, zur Ermittlung der erdbebenbedingten Mehrkosten vom Minimalprojekt für Schwerelasten und Windkräfte auszugehen.

In der Literatur finden sich zu diesen Mehrkosten verschiedene, zum Teil schon recht alte Angaben. In [4] sind für amerikanische Verhältnisse «1 bis 2%, sicher nicht mehr als 5% der Gebäuderkosten, in manchen Fällen keine Mehrkosten» angegeben. Aufgrund von Projektstudien werden in [9] mittlere Mehrkosten von 1,4 bis 2,2% angegeben. Diese wurden anhand der Bemessung von Stahlbetonrahmen und Tragwandssystemen nach den Normen SIA 160 [6] und 162 [7] sowie nach der Kapazitätsbemessung mit beschränkter und voller

Schadenart	ohne Erdbebensicherung		mit Erdbebensicherung <sup>2)</sup>	
	(Mio. Fr./a)	Anteil (%)	(Mio. Fr./a)	Anteil (%)
Gebäudeschäden	90	11	5,0	10
Schäden am Gebäudeinhalt	50	6	5,0	10
Todesopfer <sup>1)</sup>	340	43	1,2	2
Verletzte <sup>1)</sup>	170	21	1,2	2
Wirtschaftliche Folgeschäden	150	19	40,0	76
Gesamtrisiko	800	100	52,4	100

<sup>1)</sup> Basis: angemessene Rettungskosten

<sup>2)</sup> vgl. Abschnitt «Erdbebenschäden mit Sicherungsmassnahmen»

Tabelle 4. Schadenerwartungswerte bei Erdbeben ohne bzw. mit Erdbebensicherung



Duktilität nach [11] für die Zone mit der höchsten Erdbebenbeanspruchung der Schweiz (Zone 3b, Oberwallis) ermittelt.

Die neuen Vorschriften führen auch in Zone 1 zu Mehrkosten, diese sind allerdings wesentlich kleiner und liegen vielleicht durchschnittlich bei etwa 0,5% (dies entspricht etwa 1,5% Mehrkosten beim Rohbau). Entsprechend der Abstufung der Bemessungsbodenbeschleunigung wurde für Zone 2 ein Wert von 1,0% eingesetzt.

Um von diesen relativen Mehrkosten zu Werten zu kommen, die mit den Schadenerwartungswerten vergleichbar sind, müssen sie in absolute Kosten pro Jahr umgerechnet werden. Die Bausumme im Hochbau in der Schweiz betrug im Jahre 1989 37,3 Mia. Fr. [12], für 1990 schätzen wir 42 Mia. Fr. Diese Summe enthält nicht nur Neubauten, sondern auch Umbauten und Renovationen. Wir nehmen vereinfachend an, dass bei diesen die Mehrkosten im gleichen Verhältnis zu den Baukosten stehen wie bei Neubauten. Weiter setzen wir voraus, dass sich die Mehrkosten für alle Tragsysteme im Rahmen der Genauigkeit dieser Abschätzungen in der gleichen Grössenordnung bewegen.

Eine grobe Auswertung der Angaben für die Bautätigkeit für die einzelnen Kan-

Zone <sup>1)</sup>	Bodenbeschleunigung	Anteile Bauaufwendungen	Bausumme <sup>4)</sup> (Mio. Fr./a)	Mehrkosten Erdbebensicherung	
				relativ	absolut (Mio. Fr./a)
3a/3b	13%/16% g	5%	2 100	2,0% <sup>2)</sup>	42
2	10% g	15%	6 300	1,0% <sup>3)</sup>	63
1	6% g	80%	33 600	0,5% <sup>3)</sup>	168
		100%	42 000		273

<sup>1)</sup> nach [6]    <sup>2)</sup> nach [9]    <sup>3)</sup> geschätzt    <sup>4)</sup> Schätzung für 1990

Tabelle 5. Bodenbeschleunigung, Bausummen und mittlere Mehrkosten für die Erdbebensicherung (Erdbebenzonen nach SIA 160 [6])

tone [12] nach den Erdbebenzonen ergab die Aufteilung in Tabelle 5.

Die Mehrkosten für Erdbebensicherung in der ganzen Schweiz betragen gemäss den Zahlen von Tabelle 5 rund 270 Mio. Fr./a, d.h. 0,6% der Bauaufwendungen.

### Schlussfolgerung

Die zum Teil recht summarischen Abschätzungen in diesem Beitrag zeigen, dass die Mehrkosten infolge der Erdbebenbemessung im Hochbau in der Schweiz in der Grössenordnung von 270 Mio. Fr. pro Jahr, d.h. 0,6% der Baukosten, liegen dürften. Durch die Erdbebensicherung kann der mit Hilfe sozioökonomischer Kriterien abgeschätzte empfundene Schadenerwar-

tungswert von 800 Mio. Fr./a auf 50 Mio. Fr./a gesenkt werden.

Dem materiellen und von der Gesellschaft empfundenen Nutzen von 750 Mio. Fr./a stehen bauliche Mehrkosten von rund 270 Mio. Fr./a gegenüber. Diese Grössenordnungen erlauben sicher die Aussage, dass die nach der neuen Norm [6] verlangte Erdbebensicherung bei Hochbauten als gerechtfertigt anzusehen ist.

Adresse des Verfassers: Konrad Moser, dipl. Ing. ETH/SIA, Wiss. Mitarbeiter, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), 8093 Zürich.

### Literatur

- [1] AFP, DPA, Reuter, SDA: Hunderte von Toten bei Erdbeben auf Philippinen, Tagesanzeiger, Zürich, 18. Juli 1990.
- [2] Arnold C., Reitherman R.: Building Configuration and Seismic Design, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [3] Bachmann et al: Die Erdbebenbestimmungen der Norm SIA 160, Dokumentation D 044, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989.
- [4] Gaylord H.G.; Gaylord N.: Structural Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [5] Housner G.W.: Competing Against Time, Report to the Governor George Deukmejian from the Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake, State of California, 1990.
- [6] Norm SIA 160: Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989.
- [7] Norm SIA 162: Betonbauten, Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989.
- [8] Mayer-Rosa D.: Jährliche Auftretenswahrscheinlichkeiten der Beben von Basel und Vispताल, unveröffentlicht, Zürich, 1990.
- [9] Moser K.: Kapazitätsbemessung bei Stahlbetonhochbauten unter Erdbebeneinwirkung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 23. Forschungskolloquium in Zürich, Berlin, 1990.
- [10] Münchner Rück: Weltkarte der Naturgefahren, Begleitheft zur Karte, München, 1988.
- [11] Paulay T., Bachmann H., Moser K.: Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten, Birkhäuser-Verlag Basel / Boston / Berlin, 1990.
- [12] SBV: Schweizerische Bauwirtschaft in Zahlen, Schweizerischer Baumeisterverband, 1989.
- [13] Schaad W.: Erdbebenszenarien Schweiz, Kurzfassung, Schweizer Pool für Erdbebenversicherung, Bern, 1989.
- [14] Schneider Th.: Risikokzept, Cours postgrade sur la sécurité du travail, ETH Lausanne, 1984.
- [15] Steinwachs M. (Ed.): Untersuchungen von Erdbebenkatastrophen durch Teams aus Mitgliedern der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V.: Mexiko 1985, El Salvador 1986, Armenien 1988, DGEB, Hannover, 1989.
- [16] Stiefel U., Schneider J.: Was kostet Sicherheit? Schweizer Ingenieur und Architekt, Zürich, Heft 47, 1985.
- [17] Stratta J.L.: Manual of Seismic Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1987.
- [18] Tiedemann H.: Loss and Damage caused by the Mexican Earthquake of Sept. 19, 1985, 8th Symposium on Earthquake Engineering, Roorkee, 1986.
- [19] Troxler Ch., Günter R., Bohnenblust H.: Schutz vor Naturgefahren, Schweizer Ingenieur und Architekt, Zürich, Heft 39, 1989.