

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 114 (1996)  
**Heft:** 21

**Artikel:** Erdbebentauglichkeit von Stahlbetonhochbauten  
**Autor:** Moser, Konrad / Bachmann, Hugo  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-78974>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

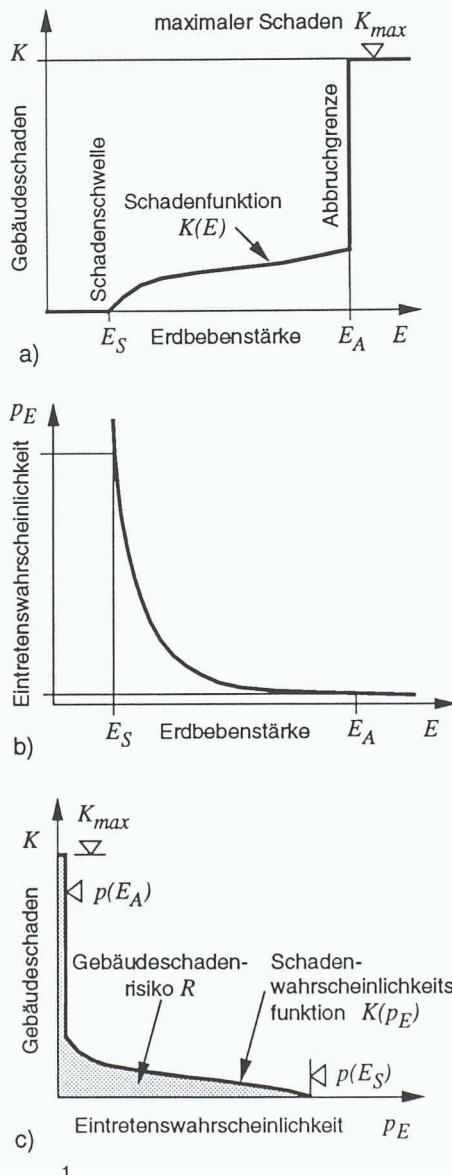
Konrad Moser, Bertschikon, und Hugo Bachmann, Zürich

# Erdbebentauglichkeit von Stahlbetonhochbauten

**Die Erdbebentauglichkeit von Stahlbetonhochbauten kann anhand des Gebäudeschadenrisikos beurteilt werden. Dabei wird neben den Schäden an den Tragelementen auch der kostenmässig grosse Beitrag der Schäden an den nichttragenden Elementen berücksichtigt. So lässt sich eine Gesamtoptimierung des Bauwerks über alle Bauelemente durchführen, wobei der Nutzen einzelner Verbesserungsmassnahmen quantifiziert werden kann. Grundlagen zum Schadenverhalten der in Mitteleuropa üblichen Bauweisen werden bereitgestellt. Durch die Wahl günstiger Verbesserungsmassnahmen kann das Gebäudeschadenrisiko wesentlich vermindert werden [1].**

In Mitteleuropa ist die Erdbebengefährdung im Vergleich zu den bekannten Erdbebengebieten wie Kalifornien, Japan oder Neuseeland relativ geringer. Untersuchungen für die in der Schweiz historisch bezeugten Erdbeben zeigen jedoch, dass diese bei der heutigen Besiedlungs- und Überbauungsdichte trotzdem sehr grosse Schäden hervorrufen würden [2]. Für das Beben im Vispertal 1855 ist heute mit reinen Gebäudeschäden von 5 bis 10 Mia. Franken und mit 170 bis 350 Todesopfern, für dasjenige von Basel 1356 gar mit rund 30 bis 50 Mia. Franken und mit 1500 bis 2500 Todesopfern zu rechnen [3].

Dazu kommen die entsprechenden Schäden am Gebäudeinhalt, an den Infrastrukturbauten (Verkehr, Kommunikation und Entsorgung), die wirtschaftlichen Folgeschäden und allenfalls grössere Umweltschäden. Die Gesamtschäden dürften das zwei- bis dreifache der Gebäudeschäden ausmachen. Die zahlreichen Todesopfer und fünf- bis zehnmal so vielen Verletzten sind besonders zu gewichten und wiegen bei der Risikobeurteilung relativ schwer. Das Erdbeben von Basel beispielsweise weist eine mittlere Wiederkehrperiode von rund 500 Jahren auf, die Eintretenswahrscheinlichkeit dieses Schadeneignisses ist also relativ klein. Das Gebäudeschadenrisiko jedoch ist infolge des grossen Schadenausmasses beträchtlich, und Massnahmen zur Erdbebensicherung sind deshalb angezeigt.



1  
Ermittlung des Gebäudeschadenrisikos: a) Schadenfunktion des Bauwerks, b) Eintretenswahrscheinlichkeit in Funktion der Erdbebenstärke, c) Schadenwahrscheinlichkeitsfunktion mit Gebäudeschadenrisiko

2  
Schadenfunktion eines Tragelementes (schematisch)

3  
Schädigungsgrad von Fliessgelenkbereichen in Funktion der kumulierten Verschiebedektiltät

Elemente werden in der Norm allgemein nicht behandelt. (Nichtragende Elemente sind mit dem Tragwerk fest verbundene Bauelemente ohne eigentliche Tragfunktion für horizontale und vertikale Kräfte: Trennwände, Fassadenelemente etc.) Sie stellen jedoch bei Stahlbetonhochbauten einen wesentlichen Teil der Gebäudekosten dar, und ihr Schadenverhalten dominiert deshalb kostenmäßig das Schadenverhalten des gesamten Bauwerks.

## Erdbebentauglichkeit

Zur Beurteilung der Erdbebentauglichkeit von Bauwerken wird ein neuartiges Modell vorgeschlagen [1]. Es beruht auf dem Vergleich des vorhandenen Gebäudeschadenrisikos  $R_v$  mit dem entsprechenden akzeptierten Gebäudeschadenrisiko  $R_a$ :

$$R_v \leq R_a \quad (1)$$

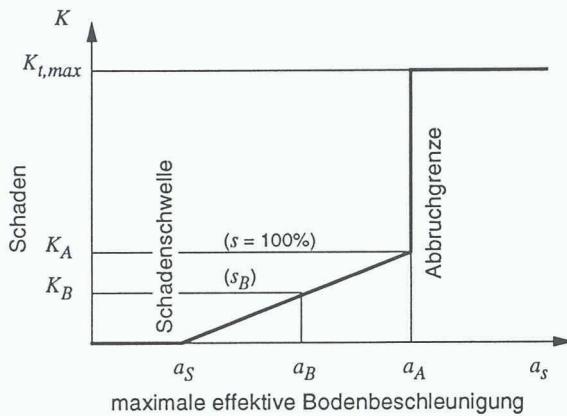
Dieses Vorgehen ermöglicht die eingangs erwähnte Verminderung des Gebäudeschadenrisikos durch Verbesserungsmassnahmen bei den Tragelementen als auch bei den nichtragenden Elementen.

## Modell

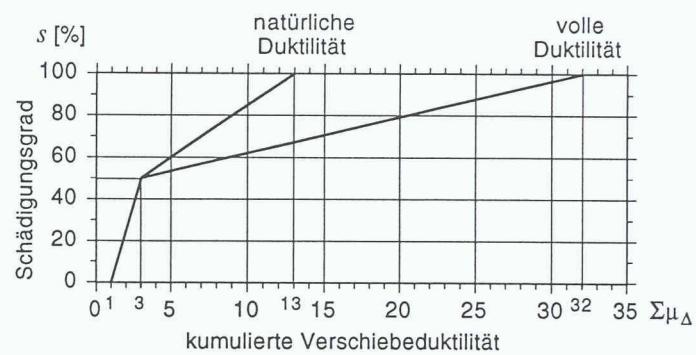
Die Summe der infolge aller Erdbebeneinwirkungen am betrachteten Standort zu erwartenden Gebäudeschäden, multipliziert mit ihren Eintretenswahrscheinlichkeiten, wird als Gebäudeschadenrisiko  $R$  bezeichnet. Es kann in Kosten pro Zeit (Franken pro Jahr) ausgedrückt werden. Für allgemeine Vergleiche wird das Gebäudeschadenrisiko auf die Gebäudekosten  $K_o$  bezogen (% $K_o$  pro Jahr).

## Risikoermittlung

Die Schäden an den Tragelementen und an den nichtragenden Elementen eines



2



3

ganzen Bauwerks werden in Funktion der Erdbebenstärke ermittelt und über das ganze Bauwerk aufsummiert. Dies ergibt die Schadenfunktion  $K(E)$  (1a). Bis zur so genannten Schadenschwelle  $E_s$  treten keine Schäden auf. Mit zunehmender Erdbebenstärke nimmt der Gebäudeschaden bis zur Abbruchgrenze  $E_A$  zu. Dort steigt der Schaden auf den maximalen Schaden  $K_{\max}$ . Der Wert  $K_{\max}$  ist definiert als Kosten für Abbruch und Entsorgung des irreparabel geschädigten Gebäudes plus Erstellungskosten des identischen Neubaus.

Die Erdbebenstärke  $E$  in der Schadenfunktion wird durch ihre Eintretenswahrscheinlichkeit  $p_E$  ersetzt. Dazu wird für den betrachteten Standort die in (1b) dargestellte Beziehung zwischen Erdbebenstärke und Eintretenswahrscheinlichkeit benötigt. Es ergibt sich die in (1c) gezeigte Schadenwahrscheinlichkeitsfunktion  $K(p_E)$ .

Das Gebäudeschadenrisiko wird durch die Integration der Schadenwahrscheinlichkeitsfunktion erhalten:

$$R = \int K(p_E) dp_E \quad (2)$$

Die Fläche unter der Schadenwahrscheinlichkeitsfunktion entspricht damit direkt dem Gebäudeschadenrisiko  $R$ .

Bei Bauwerken, die nicht rotationssymmetrisch sind, kann aus den Risikowerten für die beiden Hauptachsen ( $R_{vx}$  und  $R_{vy}$ ) der massgebende Mittelwert  $R_v$  berechnet werden.

Ein Bauwerk ist erdbebentauglich, wenn das vorhandenen Risiko  $R_v$  kleiner oder gleich ist wie das akzeptierte Risiko  $R_a$  (vgl. Gl. 1).

Als Mass für die allgemein mit  $E$  bezeichnete Erdbebenstärke eignet sich für prakti-

tische Anwendungen die maximale effektive Bodenbeschleunigung  $a_s$ . Diese Größe entspricht der elastischen Antwortbeschleunigung eines starren Körpers und wird zur Skalierung von Bemessungsantwortspektren verwendet.

### Schadenfunktionen für Tragelemente

Die Schadenfunktionen für die Tragelemente sind bestimmt durch die Schadenschwelle  $a_s$ , die Abbruchgrenze  $a_A$ , den Schaden beim Erreichen der Abbruchgrenze  $K_A$  und den maximalen Schaden des Tragelementes  $K_{t,max}$ . Einfache Schadenfunktionen ergeben sich unter der Annahme linearer Verläufe (2).

Die Schadenschwelle von Stahlbetontragelementen wird mit dem Beginn plastischer Verformungen der Bewehrung gleichgesetzt. Die Abbruchgrenze des Bauwerks wird im allgemeinen durch das Schadenverhalten der Tragelemente bestimmt (Verlust des Tragwiderstandes, übermäßige plastische Verschiebungen etc.). Für Erdbebenstärken oberhalb der Abbruchgrenze muss das Bauwerk ersetzt werden. Diese Grenze ist deshalb möglichst genau zu ermitteln, speziell wenn die zugehörige Eintretenswahrscheinlichkeit nicht schon sehr klein ist.

Zur praktischen Anwendung wurde primär ein Schädigungsmodell für Stahlbetontragwerke aufgestellt, die nach den Prinzipien der Kapazitätsbemessung bemessen und konstruktiv durchgebildet wurden („volle Duktilität“, vgl. [5]). Bei diesen Tragwerken ist die Lage der Fließgelenkbereiche bekannt. Die Schädigung kann basierend auf der kumulierten Duktilität dieser plastischen Gelenke ermittelt werden, wobei die Art der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks berücksichtigt wird.

Das Schädigungsmodell wurde für die konstruktive Durchbildung nach den

üblichen Regeln erweitert („natürliche Duktilität“), (3). Bei Tragwerken natürlicher Duktilität kann jedoch die Lage der Fließgelenke meist nicht zuverlässig bestimmt werden.

Auswertungen von nichtlinearen Tragwerksberechnungen zeigen, dass die unter Erdbebenanregung zu erwartende kumulierte Verschiebeduktilität  $\Sigma\mu_\Delta$  mit genügender Genauigkeit durch das Produkt eines Anteils der während der Zeitdauer der Starkbebenphase  $t_E$  maximal möglichen Grundschwingungen (Grundfrequenz  $f_1$ ) multipliziert mit der Bemessungsduktilität  $\mu_{\Delta,B}$  (maximale plastische Verformung) angenähert werden kann:

$$\Sigma\mu_\Delta = t_E \cdot f_1 \cdot \mu_{\Delta,B} / 5 \quad (3)$$

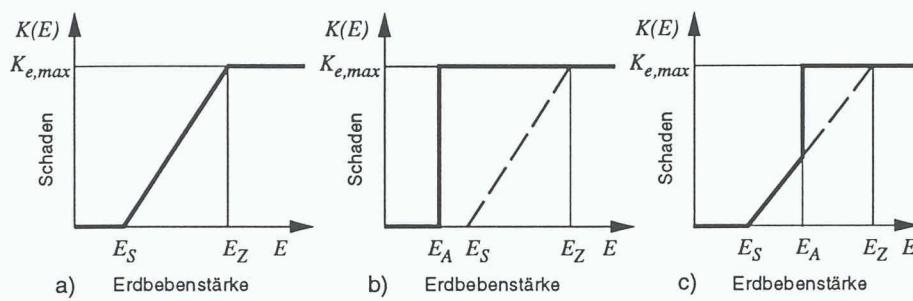
Mit der erwarteten kumulierten Verschiebeduktilität  $\mu_\Delta$  kann der Schädigungsgrad  $s$  in Funktion der Erdbebenstärke mit Hilfe linearisierter Funktionen ermittelt werden, welche ausgehend von Forschungsergebnissen der Universität Bochum angesetzt wurden. Der Schaden  $K_B$  an einem Tragelement konstanten Querschnitts infolge des Bemessungsbabens kann damit ange schrieben werden zu:

$$K_B = K_t \cdot s_B \cdot r \cdot l_p / l_t \quad (4)$$

Dabei sind  $K_t$  die Kosten des Tragelementes,  $s_B$  der Schädigungsgrad des Fließgelenkbereiches der Länge  $l_p$  beim Bemessungsbab. Mit  $r$  wird der Reparaturfaktor zur Berücksichtigung der Mehrkosten bei der Reparatur des geschädigten Bereiches in einem bestehenden und allenfalls genutzten Bauwerk und mit  $l_t$  die Länge des Tragelementes bezeichnet.

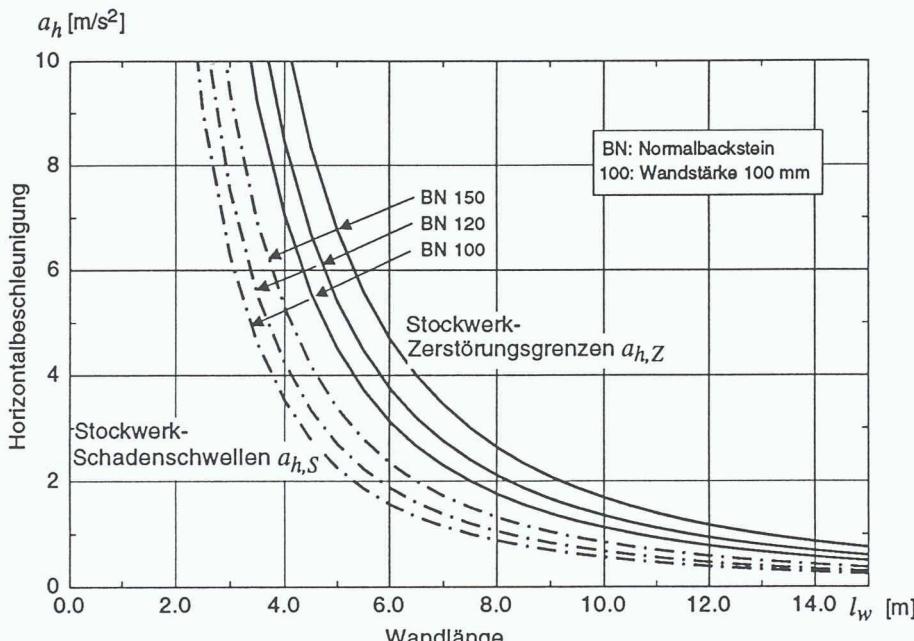
### Schadenfunktionen für nichttragende Elemente

Die Schadenfunktionen der nichttragenden Elemente können ebenfalls mit Hilfe



4

4 Schadenfunktionen von nichttragenden Elementen (schematisch)



5

Bauwerksklasse	BWK I	BWK II	BWK III
Akzeptiertes Gebäudeschadenrisiko $R_a$	0.40 % $K_o/a$	0.25 % $K_o/a$	0.12 % $K_o/a$

6

der Schadenschwelle  $E_S$  und der Zerstörungsgrenze  $E_Z$  definiert werden. Bei den meisten nichttragenden Elementen können mit genügender Genauigkeit lineare Funktionen angesetzt werden. Bei Elementen mit unstetigen oder in hohem Maße nichtlinearen Schadenfunktionen sind entsprechende Zwischenwerte zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung dieser Schadenfunktionen werden Beziehungen zwischen der Erdbebenstärke und der Stockwerkverschiebung  $\Delta x/\Delta h$  bzw. der maximalen Stockwerkbeschleunigung  $a_f$  benötigt. Zur praktischen Anwendung im Rahmen dieser Methode wurden dafür vereinfachte Regeln hergeleitet.

Aus den für ein nichttragendes Element in einem bestimmten Stockwerk eines Gebäudes massgebenden Stockwerkbeschleunigungen  $a_f$  oder Stockwerkverschiebungen  $\Delta x/\Delta h$  kann die Erdbebenstärke auf dem Erdboden ermittelt werden. Das gleiche nichttragende Ele-

ment in verschiedenen Stockwerken weist wohl dieselben Stockwerk-Schadensschwellen und Stockwerk-Zerstörungsgrenzen auf, die entsprechenden Schadensschwellen und Zerstörungsgrenzen als Erdbebenstärken auf dem Erdboden sind jedoch für gleiche Elemente verschiedener Stockwerke verschieden.

(4) enthält schematisch die verschiedenen Schadenfunktionen der nichttragenden Elemente eines Bauwerks. (4a) zeigt ein Element, das seine Zerstörungsgrenze vor der Abbruchgrenze des Bauwerks erreicht (direkt geschädigtes Element). In (4b) liegt die Abbruchgrenze des Bauwerks unterhalb der Schadenschwelle des nichttragenden Elementes. Diese wird nicht erreicht, da das Bauwerk schon bei kleinerer Erdbebenstärke abgebrochen werden muss (indirekt geschädigtes Element). (4c) schliesslich zeigt den häufigen Fall der Kombination der direkten und der indirekten Schädigung, bei dem das betrachtete nichttragende Element teilweise

4 Schadenfunktionen von nichttragenden Elementen (schematisch)

5 Schadenschwelle und Zerstörungsgrenze von unbewehrten seitlich gehaltenen Mauerwerkswänden für Beschleunigungen quer zur Wandebene

6 Akzeptierte Gebäudeschadenrisiken entsprechend den Norm-Schadenbildern nach SIA 160

7 Schadenwahrscheinlichkeitsfunktionen des Beispielgebäudes mit unterschiedlichen Trennwänden: a) Bezeichnung TB mit freistehenden unbewehrten Mauerwerkstrennwänden und b) Bezeichnung TL mit Leichttrennwänden (hier Metallständerwände mit Gipskartonbeplankung)

geschädigt ist, wenn die Abbruchgrenze des Bauwerks erreicht wird.

Die Berechnung mit linearisierten Schadenfunktionen für die nichttragenden Elemente führt in den meisten Fällen zu guten Resultaten, da sich die Schadenfunktion des Bauwerks aus der Addition der Vielzahl der Schadenfunktionen aller tragenden und nichttragenden Elemente ergibt.

Die Schadenfunktionen der nichttragenden Elemente können mit Hilfe ingenieurmässiger Betrachtungen hergeleitet werden: Die Bildung wesentlicher Risse wird als Schadenschwelle betrachtet. Die Zerstörungsgrenze ist schwieriger zu definieren. Sie kann durch weit geöffnete Risse oder durch sprödes Versagen gegeben sein, in beiden Fällen muss das Element ersetzt werden.

Allgemein kann der Schaden an nichttragenden Elementen angesetzt werden zu:

$$K_c(E) = K_c \cdot s(E) \cdot r \quad (5)$$

Dabei sind  $K_c$  die Neubaukosten des nichttragenden Elementes,  $s(E)$  ist der von der Erdbebenstärke  $E$  abhängige Schädigungsgrad und  $r$  der Reparaturfaktor.

Für die in Mitteleuropa üblichen Bauweisen wie Backstein- und Kalksandsteinmauerwerk mit oder ohne seitlicher Halterung, mit horizontaler oder horizontaler und vertikaler Bewehrung, für Gips- und Gipskartonwände, für Fenster etc. wurden Gleichungen und entsprechende Diagramme zur Bestimmung von Schadenschwelle und Zerstörungsgrenze erarbeitet.

(5) zeigt diese Werte exemplarisch in Funktion der Wandlänge  $l$  für unbewehrte, seitlich gehaltene Mauerwerkswände für Beschleunigungen quer zur Wandebene.

## Schadenfunktion des Bauwerks

### Ermittlung der Schadenfunktion

Die Schadenfunktion ergibt sich grundsätzlich durch die Aufsummierung der Schäden an allen Elementen des Bauwerks in Funktion der Erdbebenstärke.

### Maximaler Schaden an einem Element

Der maximale Schaden an einem Tragelement oder an einem nichttragenden Element kann wesentlich grösser sein als die ursprünglichen Neubaukosten des Elementes. Er definiert sich durch die Kosten beim Ersatz des Elementes innerhalb des bestehenden Gebäudes.

Aus Gleichung (4) mit  $s_B = 1.0$  und  $l_p = 1$  bzw. aus Gleichung (5) mit  $s(E) = 1.0$  ergeben sich die maximalen Schäden an den tragenden bzw. den nichttragenden Elementen als:

$$K_{t,\max} = r \cdot K_t \text{ bzw. } K_{e,\max} = r \cdot K_e \quad (6)$$

Der Reparaturfaktor  $r$  ist stark abhängig von den spezifischen Gegebenheiten im zu reparierenden Bauwerk. Er liegt meist zwischen rund 2.0 und 6.0. Für die numerischen Beispiele wurde  $r = 3.0$  angesetzt.

Mit diesen Ansätzen lassen sich aus den Schadenfunktionen der Elemente die Schadenfunktionen des gesamten Bauwerks ermitteln.

### Maximaler Schaden am Bauwerk

Der maximale Schaden am Bauwerk  $K_{\max}$  ist gegeben durch die Kosten für Abbruch und Entsorgung des irreparablen Bauwerks plus Neubau des identischen Bauwerks am gleichen Standort (Kosten  $K_o$ ). Untersuchungen für Stahlbetonskelettbauten führten zu einem allgemeinen Wert für den maximalen Schaden von rund:

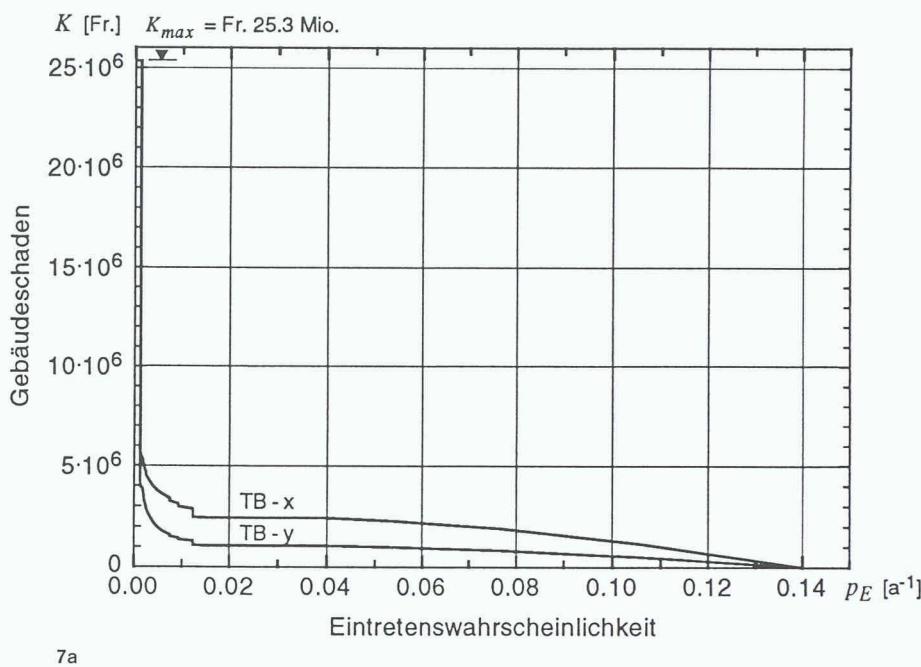
$$K_{\max} = 1.2 K_o \quad (7)$$

Die Summe der Schäden an den einzelnen Elementen kann höchstens bis auf  $K_{\max}$  ansteigen, dann ist der maximale Schaden am Bauwerk und damit seine Abbruchgrenze erreicht.

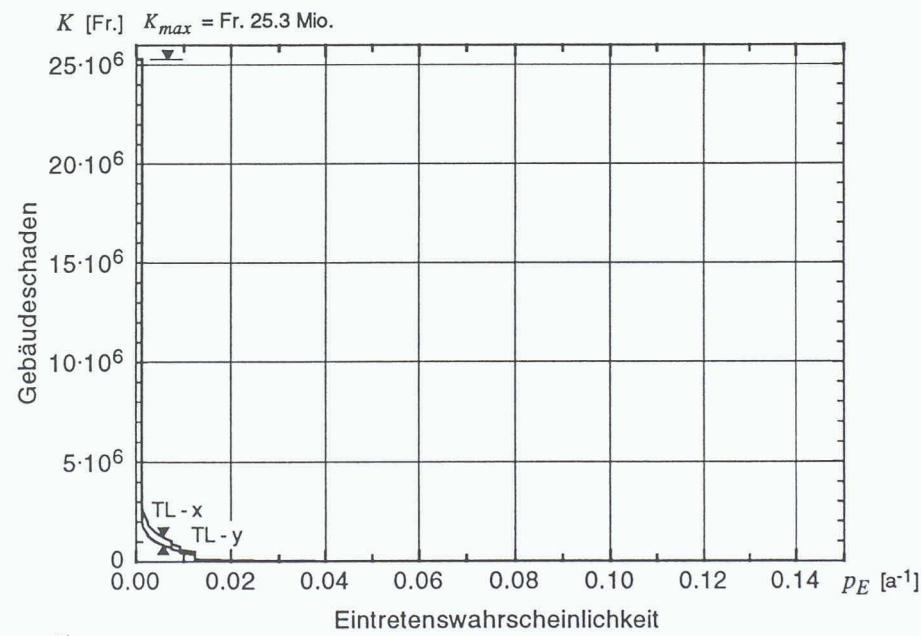
## Akzeptierte Risiken

### Herleitung

Zur Beurteilung der Erdbebentauglichkeit eines Gebäudes ist das vorhandene Risiko mit dem akzeptierten Risiko zu vergleichen. Werte für akzeptierte Risiken  $R_a$  lassen sich am besten durch die Analyse des menschlichen Empfindens und Verhaltens bezüglich Risiko und Risikoverminderung bestimmen.



7a



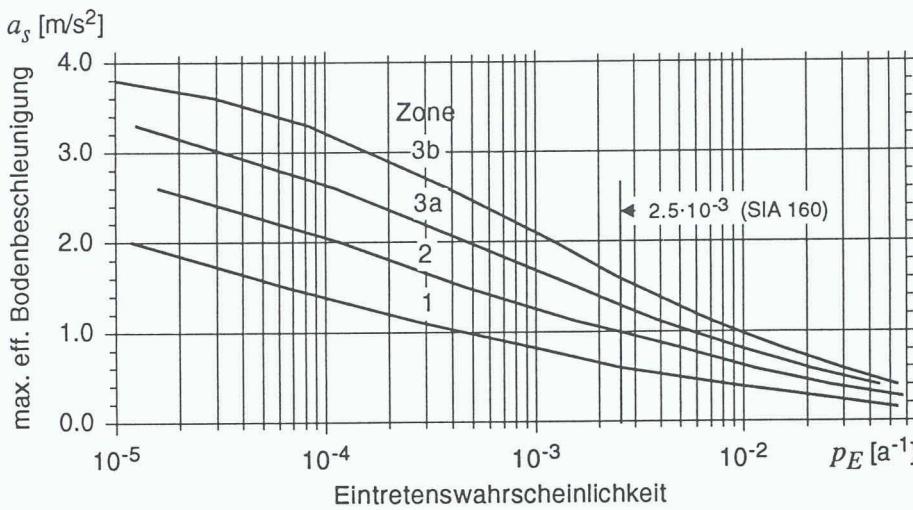
7b

Dafür könnten etwa die Zusatzkosten zur Erdbebensicherung öffentlicher Bauwerken ausgewertet werden. Eine besser zugängliche Quelle mit eindeutigen Angaben stellen jedoch die Einwirkungsnormen für Bauwerke dar. Neuere Normen geben auch die bei der Erdbebenbemessung als zulässig angenommen akzeptierten Schäden an. Ausgehend von diesen akzeptierten Schadenbildern können für die verschiedenen Gebäudekategorien akzeptierte Schadenfunktionen eingegrenzt werden. Aus den akzeptierten Schadenfunktionen lassen sich unter Verwendung der Beziehungen zwischen Erdbebenstärke und Eintretenswahrscheinlichkeit die akzeptierten Schadenwahrscheinlichkeitsfunktionen ermitteln. Die akzeptierten Risiken ergeben sich durch Integration der Schadenwahrscheinlichkeitsfunktionen.

Dieses Vorgehen wurde auf die vier Erdbebenzonen und die drei Bauwerksklassen der Norm SIA 160 [4] angewandt. Dabei zeigt sich, dass pro Bauwerksklasse die akzeptierten Risiken für alle Erdbebenzonen praktisch gleich gross sind. Die gerundeten Werte liegen zwischen  $R_a = 0.40\% K_o/a$  für «gewöhnliche Hochbauten ohne grössere Menschenansammlungen und ohne Gefährdung der Umwelt» und  $R_a = 0.12\% K_o/a$  für «Bauwerke mit lebenswichtiger Infrastrukturfunktion» wie etwa Spitäler (6).

### Diskussion der akzeptierten Risiken

Die in Bild 6 aufgeführten akzeptierten Risiken bedürfen der Interpretation, sie erscheinen relativ hoch. In der Schweiz befinden sich rund 80% der Hochbausubstanz in der Erdbebenzone 1. In dieser



8

Gebäudeschadenrisiko für die Beispielbauwerke	1	2	3a	3b
Bauwerk TB:				
vorhandenes Risiko $R_v$ bezogen auf $R_{v,max}$ für Zone 3b	0.45 % $K_o/a$ 45%	0.70 % $K_o/a$ 69%	0.87 % $K_o/a$ 86%	1.01 % $K_o/a$ 100%
Bauwerk TL:				
vorhandenes Risiko $R_v$ bezogen auf $R_{v,max}$ für Zone 3b	0.006 % $K_o/a$ 0.03%	0.024 % $K_o/a$ 12%	0.074 % $K_o/a$ 37%	0.20 % $K_o/a$ 100%
Bauwerk UTL:				
vorhandenes Risiko $R_v$ bezogen auf $R_{v,max}$ für Zone 3b	0.0019 % $K_o/a$ 0.02%	0.013 % $K_o/a$ 12.4%	0.038 % $K_o/a$ 36%	0.11 % $K_o/a$ 100%

9

Zone weisen die Tragwerke oft eine relativ hohen Tragwiderstand gegen Horizontalkräfte auf, da sie viele Tragwände oder wenige Geschosse aufweisen oder relativ hohen Windkräften widerstehen müssen. In vielen Fällen ist deshalb der Tragwiderstand wesentlich höher, als dies infolge der Erdbebenkräfte erforderlich wäre. Das durchschnittlich vorhandene Risiko ist deshalb meist wesentlich geringer als das nach den Minimalanforderungen der Norm maximale akzeptierte Risiko.

Ein Vergleich der obigen akzeptierten Risiken mit dem Entwurf einer gesamtschweizerischen Erdbebenversicherung zeigt, dass die ausgehend von der Einwirkungsnorm ermittelten Werte 5mal bis 20mal höher liegen als die Versicherungswerte. Die vom Versicherer angesetzten Werte sind jedoch nicht für diejenigen Bauwerke mit dem nach der Norm minimalen Tragwiderstand berechnet, sondern für die effektiv erwarteten mittleren Schadenwahrscheinlichkeiten. Die Unterschiede erscheinen deshalb plausibel. Die Versicherungsrisiken sind zudem nach Zonen und nicht nach Bauwerksklassen abge-

stuft, was den direkten Vergleich weiter erschwert.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der hier vorgestellten Methode zur Beurteilung der Erdbebentauglichkeit besteht darin, über die Einhaltung der Normanforderungen hinaus das Bauwerk zu optimieren, da der Einfluss von konzeptionellen und konstruktiven Verbesserungen quantifiziert werden kann.

### Anwendungsbeispiele

Ein sechsgeschossiges Gebäude von 52,40 m Länge und 26,80 m Breite wurde analysiert. Das Bauwerk mit Stahlbetontragwänden mit dem normgemässen minimalen Widerstand gegen Erdbebenkräfte und mit freistehenden unbewehrten Mauerwerkstrennwänden (Bezeichnung TB) weist für die Zone 3a nach SIA 160 die in (7a) gezeigte Schadenwahrscheinlichkeitsfunktionen in x- und in y-Richtung auf. (Die Berechnung und Darstellung der Anwendungsbeispiele erfolgte auf einem Personal Computer mit einem handels-

8  
Maximale effektive Bodenbeschleunigung in Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit für die vier Erdbebenzonen der Schweiz

9  
Vorhandene Risiken der drei Beispielbauwerke in den vier Erdbebenzonen

üblichen modernen Tabellenrechenprogramm.)

Erste wesentliche Risse (Schadengrenze) treten bei einer Eintretenswahrscheinlichkeit von  $p_E > 0.14/a$  auf. Die Eintretenswahrscheinlichkeit der Abbruchgrenze ( $a_A = 2.0 \text{ m/s}^2$ ) liegt bei  $p_E = 1.2 \cdot 10^{-3}/a$ . Das aus den in (7a) gezeigten Funktionen bestimmte vorhandene Gebäudeschadenrisiko beträgt  $R_v = 1.0\%K_o/a$  und überschreitet das akzeptierte Risiko der Bauwerksklasse BWK I von  $R_a = 0.40\%K_o/a$  bei weitem. Die Normanforderungen bezüglich Widerstand des Tragwerks (Bemessung auf Ersatzkräfte für das Beben mit einer Wiederkehrperiode von 400 Jahren) sind jedoch erfüllt!

Ein grosser Teil des Risikos stammt von den bei kleinen Beschleunigungen quer zur Wand umstürzenden freistehenden Mauerwerkswänden. Diese Tatsache stimmt mit der Norm [4] Tabelle 31 überein, die für die Bauwerksklasse BWK III in allen Zonen und für die BWK II in der Zone 3 keine freistehenden Trennwände (Sekundärelemente) zulässt.

### Einfluss der nichttragenden Elemente

Werden die freistehenden Mauerwerkswände durch Metallständerwände mit Gipskartonbeplankung ersetzt, so ergeben sich die in (7b) dargestellten Schadenwahrscheinlichkeitsfunktionen (Bezeichnung TL). Das vorhandene Risiko sinkt auf  $R_v = 0.20\%/a$ , und dies bei sogar leicht reduzierten Baukosten.

Bei diesem Beispielbauwerk wird das akzeptierte Risiko für die Bauwerksklasse BWK I unterschritten, sobald die ungeeigneten freistehenden Mauerwerkswände durch geeignete Leichttrennwände ersetzt werden. Sogar das akzeptierte Risiko für die Bauwerksklasse BWK II wird so unterschritten.

### Einfluss der Tragwerksteifigkeit

Das Gebäude (Bezeichnung UTL) wurde in Wirklichkeit viel steifer ausgeführt, als dies die Norm erfordert. Für Beschleunigungen quer zum Gebäude bleibt das Tragwerk elastisch und verformt sich äusserst wenig. Das vorhandene Risiko beträgt in der Zone 3b nur  $R_v = 0.10\%/a$ . Dieses Bauwerk genügt sogar den Anforde-

rungen an die Bauwerksklasse III. In Wirklichkeit steht das Bauwerk in der Erdbebenzone 1, und das vorhandene Risiko ist noch wesentlich kleiner.

### Einfluss des Standortes

Das vorhandene Risiko ist relativ stark vom Standort des Bauwerks abhängig. (8) zeigt die maximalen effektiven Bodenbeschleunigungen in Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit. Mit diesen Funktionen kann für ein bestimmtes Bauwerk, ausgehend von der nur vom Bauwerk selbst abhängigen Schadefunktion, für einen Standort in jeder Zone die Schadenerwartungsfunktion und daraus das Risiko berechnet werden. (8) kann entnommen werden, dass die Abbruchgrenze der Beispielbauwerke von  $a_A = 2.0 \text{ m/s}^2$  je nach Zone eine Eintretenswahrscheinlichkeit von  $p_E = 1.2 \cdot 10^{-3}$  bis  $p_E = 1.2 \cdot 10^{-5}$  aufweist.

Ausgehend von den Schadefunktionen für die Zone 3a wurden mit Hilfe der jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeiten von Schadenschwelle  $a_S$  und Abbruchgrenze  $a_A$  die vorhandenen Risiken für die Standorte in den anderen Erdbebenzonen abgeschätzt. Dieses Vorgehen setzt affine Funktionen für  $a(p_E)$  voraus (8) und liefert für eine Diskussion des Zoneneinflusses genügend genaue Resultate (9).

Bei allen Beispielbauwerken sind die vorhandenen Risiken in den Zonen geringerer Erdbebengefährdung wesentlich kleiner als in der Zone 3b mit der höchsten Gefährdung. Beim Bauwerk TB sinkt das Risiko auf 45% des maximalen Wertes, bei den Bauwerken TB und UTL sogar auf 0,2 bis 0,3%. Dies liegt daran, dass die maximalen Bodenbeschleunigungen für die verschiedenen Erdbebenzonen bei grösseren Eintretenswahrscheinlichkeiten relativ nahe beieinander liegen. Bei kleinen Eintretenswahrscheinlichkeiten sind die Unterschiede dagegen wesentlich grösser. Liegt nun die Schadefunktion bei maximalen Bodenbeschleunigungen im Bereich kleiner Eintretenswahrscheinlichkeiten,

so fallen die Risikounterschiede für Standorte in den verschiedenen Zonen wesentlich grösser aus.

- Ein Vergleich der vorhandenen Risiken mit den akzeptierten Risiken in (6) zeigt, dass:
- das Bauwerk TB in allen Zonen auch für die Bauwerksklasse BWK I ein zu hohes Risiko aufweist,
- das Bauwerk TL in der Zone 3b für die Bauwerksklasse BWK II ein genügend kleines Risiko aufweist und in den Zonen 3a bis 1 sogar die Anforderung für BWK III erfüllt,
- das Bauwerk UTL in allen Zonen das akzeptierte Risiko für die Bauwerksklasse BWK III unterschreitet.

### Folgerungen

Das vorgeschlagene Modell beurteilt die Erdbebentauglichkeit von Stahlbetonhochbauten anhand des Gebäudeschadenrisikos. Das vorhandene Risiko wird mit dem entsprechenden akzeptierten Risiko verglichen.

Das vorhandene Gebäudeschadenrisiko wird ermittelt, indem der Gebäudeschaden in Funktion der Erdbebenstärke, dargestellt als sog. Schadefunktion, mit der für den betrachteten Standort gültigen Beziehung zwischen Erdbebenstärke und Eintretenswahrscheinlichkeit verknüpft wird (Schadewahrscheinlichkeitsfunktion). Die Schadefunktion berücksichtigt das Verhalten jedes einzelnen Gebäudelementes. Damit kann eine Änderung der Bauweise bei Tragelementen oder bei nichttragenden Elementen in ihrer Auswirkung auf das vorhandene Gebäudeschadenrisiko direkt beurteilt werden. Das Modell ermöglicht deshalb die Gesamtoptimierung von Gebäuden bezüglich Erdbebentauglichkeit.

Wie die Anwendungsbeispiele zeigen, können geeignete Verbesserungsmaßnahmen im günstigen Fall das Gebäudeschadenrisiko auch ohne Zusatzkosten vermindern.

### Literatur

- [1] Moser K., Erdbebentauglichkeit von Stahlbetonhochbauten, IBK Bericht Nr. 201, November 1993.
- [2] Schaad W., Erdbebenzenarien Schweiz, Kurzfassung, Schweizerischer Pool für Erdbebenversicherung, Bern, 1988.
- [3] Moser K., Ist die Erdbebensicherung im Hochbau gerechtfertigt? Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 44, Oktober 1991 und IBK-Bericht Nr. 188, 1992.
- [4] Norm SIA 160: Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989.
- [5] Paulay T., Bachmann H., Moser K.: Erdbebenbelastung von Stahlbetonhochbauten, 1990.

Der Schadenbeitrag der nichttragenden Elemente ist für das Gebäudeschadenrisiko meist dominierend. Die Beurteilung der Erdbebentauglichkeit anhand des Gebäudeschadenrisikos ist deshalb wesentlich umfassender als die Erfüllung der üblichen Anforderungen der Normen bezüglich Tragwiderstand.

#### Adressen der Verfasser:

Konrad Moser, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA, Breitistrasse 12, 8614 Bertschikon; Hugo Bachmann, Prof. Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 8093 Hönggerberg.