

## Methodik zur Bestimmung erdbebenbedingter Gebäudebelastungen

Univ.Doz.Dr. Wolfgang Lenhardt  
[wolfgang.lenhardt@zamg.ac.at](mailto:wolfgang.lenhardt@zamg.ac.at)  
Seismologischer Dienst  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Hohe Warte 38, A-1190 Wien

### Einleitung

Die bau- und versicherungstechnische Frage der Beurteilung von Gebäudeschäden in Folge von Erdbeben stellt sich immer häufiger. Daher wird in den folgenden Seiten eine methodische Darstellung der Vorgangsweise präsentiert, die helfen soll, die relevanten Aspekte besser zu verstehen und Schadensszenarien selbst abschätzen zu können.

### Vorgangsweise

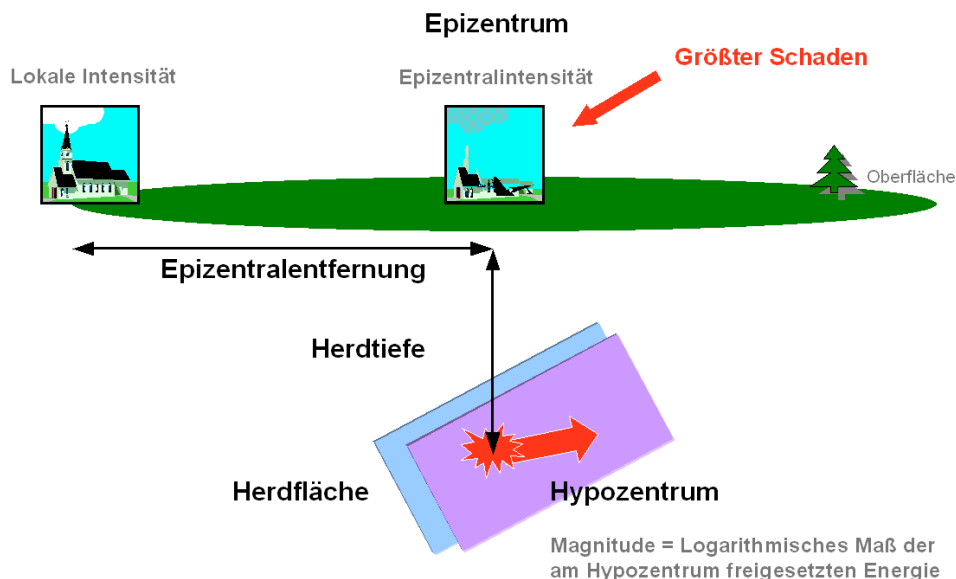
Das Ausmaß der Einwirkungen von erdbebenbedingten Erschütterungen auf Bauwerke hängt von den folgenden Parametern ab:

1. Erschütterungsart
2. Untergrund
3. Typ des Bauwerks

Als letzter Schritt ist eine integrale Bestimmung des Erschütterungsausmaßes in einer probabilistischen Form durchzuführen, bei der die Einflüsse der verschiedensten Hypozentren in Bezug auf den Bemessungspunkt berücksichtigt werden. Dafür wird der Erdbebenkatalog herangezogen.

Ad 1) Die Erschütterungsart – impulsförmig oder anschwellend bzw. variierend – hängt vom Mechanismus des Bebens und der Distanz des Hypozentrums vom Bezugsort ab. Je weiter entfernt das Hypozentrum, desto geringer werden zwar die Bodenbewegungen, dafür hält die Erschütterungseinwirkung länger an und sein Frequenzinhalt verschiebt sich zu geringeren Frequenzen.

Das Erschütterungsszenario wird durch die Europäischen Makroseismischen Intensitätsskala 1998 „EMS-98“ (Grünthal, 1998) ausgedrückt, die mit der Bodenbeschleunigung korreliert.



Ad 2) Der Untergrund kann die Erschütterungseinwirkung sowohl verstärken als auch abmindern. Nur wenn die Mächtigkeit der obersten Schichte des Untergrundes  $\frac{1}{4}$  der dominanten Wellenlänge der seismischen Wellen beträgt, kommt es zu einer Verstärkung bzw. Aufschaukelung der Bodenbewegungen. Da die Wellenlänge bei 10 Hz ca. 250 m und bei 5 Hz ca. 500 m beträgt, sind vor allem Bereiche von Lockersedimenten mit Mächtigkeiten von 60 – 120 m davon betroffen. Hier geht die Dauer des Erdbebens, die im wesentlichen von der Größe der Herdfläche bestimmt wird, in die Betrachtung ein. Herdflächen im Alpenraum sind jedoch meist relativ klein, sodass der Effekt des Untergrundes einen Wert von 1,4 kaum überschreitet (s.a. Europäische Norm EN 1981-1:2004, Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings). Diese lokalen frequenzabhängigen Effekte lassen sich mit Hilfe von Tiefenmodellen gut abschätzen. In der ÖNORM B 4015 ist dieser Effekt mit Hilfe der Bodenklassenauswahl in den Antwortspektren berücksichtigt.

Ad 3) Typ des Bauwerks

Hier sei wieder auf die Europäischen Makroseismischen Intensitätsskala 1998 verwiesen, in der Bauwerksarten und deren Anfälligkeitsklassen angeführt sind:

Type of Structure	Vulnerability Class					
	A	B	C	D	E	F
MASONRY	rubble stone, fieldstone	○				
	adobe (earth brick)	○—				
	simple stone	...○				
	massive stone	—○—				
	unreinforced, with manufactured stone units	...○—				
	unreinforced, with RC floors	—○—				
	reinforced or confined	...○—				
REINFORCED CONCRETE (RC)	frame without earthquake-resistant design (ERD)	...—○—				
	frame with moderate level of ERD	...—○—				
	frame with high level of ERD	...—○—				
	walls without ERD	...—○—				
	walls with moderate level of ERD	...—○—				
	walls with high level of ERD	...—○—				
STEEL	steel structures	...—○—				
WOOD	timber structures	...—○—				

○ most likely vulnerability class; — probable range; .....range of less probable, exceptional cases

Entsprechend der Anfälligkeitsklasse treten mehr (Kategorie A) oder weniger (Kategorie F) Schäden auf.

**Integrale Bestimmung des Erschütterungsausmaßes**

Der erste Schritt beinhaltet die Bestimmung der lokalen Intensität am Bezugspunkt:

$$I_{\text{lokal}} = I_0 - 3 \cdot \log_{10}(R/z) - 1,3 \cdot \alpha \cdot (R - z)$$

wobei gilt:

- $\alpha$  = Abnahmekoeffizient
- $R$  = Hypozentraldistanz (km)
- $z$  = Herdtiefe (km)
- $I_{\text{lokal}}$  = Intensität am Bezugspunkt (infolge der Hypozentraldistanz und der Herdtiefe  $\leq I_0$ )
- $I_0$  = Intensität im Epizentrum nach der Europäischen Makroseismischen Skala EMS-98 (Grünthal, 1998)

(Sponheuer, 1960). Die Konstante „ $\alpha$ “ wird dabei für das Untersuchungsgebiet empirisch ermittelt. Dieser Vorgang wird für alle Erdbeben aus dem Erdbebenkatalog wiederholt. Danach wird berechnet, wie oft in einem definierten Zeitraum eine bestimmte Erschütterungsstärke am Bezugspunkt überschritten wurde. Dessen reziproker Wert entspricht dann der mittleren Wiederkehrperiode „ $T_m$ “ der Erschütterungsgröße. Analog wird mit den Bodenbeschleunigungen verfahren, deren Beträge die Basis für die ÖNORM B 4015 darstellt.

Die Überschreitenswahrscheinlichkeit („ $\ddot{U}$ “, Wahrscheinlichkeit, mit welcher der angeführte Wert mindestens erreicht wird, daher auch oft „Eintrittswahrscheinlichkeit“ genannt) ist mit der mittleren Wiederholungszeit „ $T_m$ “ verknüpft. Es gilt:

$$T_m = - T_n / \ln (1-\ddot{U}) \text{ bzw. } \ddot{U} = 1 - \exp (-T_n/T_m)$$

wobei

$T_n$ ... Betrachtungszeitraum (Jahre), z.B. beabsichtigte Nutzungszeit eines Bauwerks oder Zeitraum für die Berechnung des Risikos, etc.

Beispiel: Erdbebeneinwirkungen, die sich durchschnittlich alle 50 Jahre ereignen („ $T_m$ “= 50 Jahre), werden in 50 Jahren („ $T_n$ “ = ebenfalls 50 Jahre) daher mit 63 % Wahrscheinlichkeit erreicht oder überschritten.

Mittlere Wiederkehrperiode $T_m$ (Jahre)	Eintritts- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeit (%) in $T_n$ -Nutzungsjahren				
	10	50	100	200	475
10	63%	99%	100%	100%	100%
50	18%	63%	86%	98%	100%
100	10%	39%	63%	86%	99%
200	5%	22%	39%	63%	91%
475	2%	10%	19%	34%	63%

**Interpretation**

Ist die Erschütterungsgröße als Intensität definiert, so lässt sich der potentielle Schaden mit Hilfe der Anfälligkeitsklasse eines Gebäudes abschätzen:

<b>EMS-98</b>	<b>Few (&lt; 20%)</b>	<b>Many (20% - 60%)</b>	<b>Most (&gt; 60%)</b>
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	-	-	-
5	<b>A1, B1</b>	-	-
6	<b>A2, B2, C1</b>	<b>A1, B1</b>	-
7	<b>A4, B3, C2, D1</b>	<b>A3, B2</b>	-
8	<b>A5, B4, C3, D2</b>	<b>A4, B3, C2</b>	-
9	<b>B5, C4, D3, E2</b>	<b>A5, B4, C3, D2</b>	-
10	<b>C5, D4, E3, F2</b>	<b>B5, C4, D3, E2</b>	<b>A5</b>
11	<b>D5, E4, F3</b>	<b>C5, D4, E3, F2</b>	<b>B5, C4, D3</b>
12	-	-	<b>A5, B5, C5, D5, E5, F5</b>

In der obigen Tabelle sind nach rechts die Schadenshäufigkeiten - bezogen auf die Grundgesamtheit der am Standort befindlichen Gebäudeobjekte (100%) - aufgetragen, und nach unten die Intensitätsgrade. Die Zellenbezeichnungen A1, B2 etc. bedeuten: Anfälligkeitsklasse A mit Schadensgrad 1 bzw. Anfälligkeitsklasse B mit Schadensgrad 2, etc.

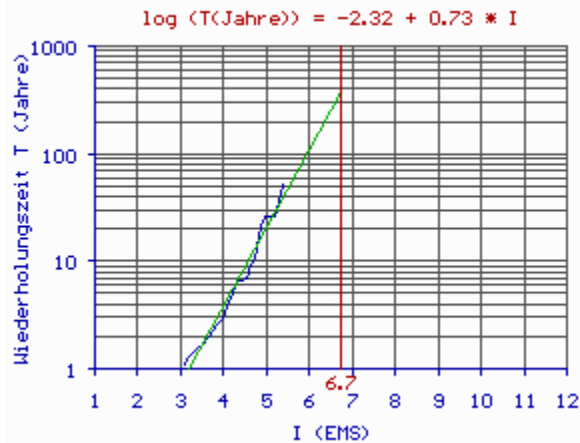
Schadenskategorien (verkürzte übersetzte Version):

<b>Schadensgrad</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
<b>1</b>	Vernachlässigbare bis leichte Schäden	Haarrisse an wenigen Wänden, vereinzelt Herausfallen von kleinen Verputzteilen
<b>2</b>	Moderate Schäden	Sprünge in vielen Wänden, Herausfallen von größeren Verputzteilen, teilweiser Einsturz von Kaminen
<b>3</b>	Substantielle bis schwere Schäden	Größere und ausgedehnte Risse in den meisten Wänden, Dachziegel lösen sich, Kamine lösen sich an der Basis, Bruch nichttragender Bauelemente, wie z.B. Giebelwände
<b>4</b>	Sehr schwere Schäden	Schwere Schäden an den Wänden, teilweiser Einsturz von Decken und Böden.
<b>5</b>	Zerstörung	Totaler Einsturz

Aus dem mittleren Wiederkehrzeitraum „T<sub>m</sub>“ der entsprechenden Intensität „I<sub>lokal</sub>“ und dem Anfälligkeitstyp des Gebäudes kann somit der Schadensgrad ermittelt werden. Ist die Nutzungsdauer „T<sub>n</sub>“ des Gebäudes bekannt, kann zudem auch die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der dieser Fall innerhalb dieses Nutzungszeitraums eintritt.

**Anwendungsbeispiel**

Nach der Wahl des Bezugspunkts (geogr. Breite und Länge) ergibt sich folgende Statistik:



I (EMS)	T- (Jahre)	Tmittel (Jahre)	T+ (Jahre)
3	1	1	1
4	3	4	5
5	17	20	25
6*	89	109	132

Legende: Mittlere Wiederkehrperioden (Tmittel, T- bzw. T+ = minus bzw. plus einer Standardabweichung) der Intensität (EMS-98), \* = linear extrapoliert.

		Eintritts- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeit (%) in T <sub>n</sub> -Nutzungsjahren				
I (EMS-98)	T <sub>mittel</sub> (Jahre)	T <sub>n</sub> = 10	T <sub>n</sub> = 50	T <sub>n</sub> = 100	T <sub>n</sub> = 200	T <sub>n</sub> = 475
4	4	92%	100%	100%	100%	100%
5	20	39%	92%	99%	100%	100%
6*	109	9%	37%	60%	84%	99%

**Interpretation**

Die mittlere Wiederkehrperiode von Bodenerschütterungen des Intensitätsgrads 5 beträgt für den Bezugspunkt 20 Jahre. An Gebäuden der Anfälligkeitsklasse „A“ und „B“ sind mit 92%er Wahrscheinlichkeit in 50 Jahren in einigen Fällen (< 20%) Schäden vom Grad 1 zu erwarten. Anlässlich des Erdbebens vom 15. September 1976 im Friaul kam es zuletzt zu solchen Auswirkungen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Gebäude, die 50 Jahre alt sind, einer größeren Intensität (Grad 6, extrapoliert!) ausgesetzt werden, beträgt maximal 37% in diesen 50 Jahren. Ein geringerer Nutzungszeitraum von z.B. 10 Jahren verringert zwar die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses auf maximal 9%, aber es sind nun im Ereignisfall noch immer vereinzelt (< 20%) leichte Schäden an Objekten der Anfälligkeitsklasse „C“ und Grad 2 an vielen (20% - 60%) Gebäuden der Anfälligkeitsklassen „A“ und „B“ zu erwarten.

**Literatur**

Grünthal, G. (Hrsg.) 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Volume 15.

ÖNORM, 2002. Belastungsannahmen im Bauwesen - Außergewöhnliche Einwirkungen - Erdbebeneinwirkungen, Grundlagen und Berechnungsverfahren - ÖNORM B 4015, Austrian Standards Institute (ON), ICS 91.010.30; 91.120.25, 59 Seiten.

Sponheuer, W. 1960. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Freiburger Forschungsheft C88, Akademie-Verlag Berlin.

## Kurzfassung der Europäischen Makroseismischen Skala – 1998

EMS Intensität	Beschreibung der Wirkungen
1	<b>nicht fühlbar</b>
2	<b>kaum bemerkbar:</b> Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
3	<b>schwach:</b> Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.
4	<b>deutlich:</b> Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.
5	<b>stark:</b> Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige werden verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Objekte werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf und zu. Vereinzelt leichte Schäden.
6	<b>leichte Gebäudeschäden:</b> Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden, wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z.B. kleinen Verputzteilen.
7	<b>Gebäudeschäden:</b> Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in großen Mengen aus den Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mäßige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechtem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.
8	<b>schwere Gebäudeschäden:</b> Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf; d.h. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.
9	<b>zerstörend:</b> Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.
10	<b>sehr zerstörend:</b> Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.
11	<b>verwüstend:</b> Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und - ausführung, werden zerstört.
12	<b>vollständig verwüstend:</b> Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört.

Deutschsprachige Kurzfassung von Grünthal, G. (Hrsg.) 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Volume 15, Seite 99. Es wird darauf hingewiesen, dass die Kurzform sich nicht zur Bestimmung der Lokalintensität eignet., sondern nur einem Überblick dient.

Kommentar: Auswirkungen auf die Natur, wie Hangrutschungen, Bodenrisse, Änderungen von Quellschüttungen und Schwankungen von Seepiegeln, treten meist erst ab einer Intensität von Grad 6 auf. Bodenverflüssigungen wurden meist erst ab Intensität 8 beobachtet.