

Hugo Bachmann

# **Erdbebensicherung von Bauwerken**

Mit 182 s/w-Abbildungen und 30 Tabellen

2., überarbeitete Auflage

Birkhäuser Verlag  
Basel · Boston · Berlin

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	v
<b>Inhaltsübersicht</b> .....	vii
<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Zum Nutzen des Erdbebeningenieurwesens .....	1
1.2 Historische Erdbeben .....	3
1.3 Auswirkungen von Erdbeben .....	8
<b>2 Seismologische Grundlagen</b> .....	9
2.1 Arten und Merkmale von Erdbeben .....	9
2.1.1 Arten .....	9
2.1.2 Merkmale .....	11
2.2 Erdbebenskalen .....	13
2.2.1 Magnitudenskala (Richterskala) .....	13
2.2.2 Intensitätsskala .....	14
2.3 Erdbebenwellen .....	17
2.3.1 Wellenarten .....	17
2.3.2 Wellengeschwindigkeiten .....	18
2.3.3 Wellenwege .....	19
2.4 Registrierung von Erdbeben .....	22
2.4.1 Geschwindigkeits-Messgeräte .....	22
2.4.2 Beschleunigungs-Messgeräte .....	25
2.5 Seismologische Auswertungen .....	28
2.5.1 Epizentrum und Herdtiefe .....	28
2.5.2 Magnitude und Intensitäten .....	30
2.6 Ingenieurmässige Auswertungen .....	31
2.6.1 Physikalische Kenngrössen .....	31
2.6.2 Zeitverläufe der Bodenbewegung .....	34
2.7 Antwortspektren .....	38
2.7.1 Vorgehen zur Ermittlung .....	38
2.7.2 Mathematische Beschreibung .....	43
2.7.3 Merkmale der Antwortspektren .....	46

<b>3 Bemessungsbeben, Tragwiderstand und Duktilität .....</b>	<b>49</b>
3.1 Seismische Gefährdung .....	50
3.1.1 Gefährdungsstudien .....	50
3.1.2 Gefährdungs- und Zonenkarten .....	50
3.2 Bestimmung der Bebenkenngrößen .....	55
3.3 Konstruktion elastischer Bemessungs-Antwortspektren .....	58
3.4 Erzeugung spektrumskonformer Zeitverläufe der Bodenbewegung .....	60
3.5 Tragwiderstand und Duktilität .....	61
3.5.1 Grundlegende Zusammenhänge .....	61
3.5.2 Definition und Arten der Duktilität .....	62
3.5.3 Abminderung des Tragwiderstandes dank Duktilität .....	68
a) Erwägungen .....	68
b) Abminderungs- und Verhaltensfaktoren .....	69
3.6 Ermittlung inelastischer Bemessungs-Antwortspektren .....	73
<b>4 Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten .....</b>	<b>75</b>
4.1 Tragwerkeigenschaften .....	76
4.2 Tragwerksarten .....	77
4.2.1 Rahmen aus Stahlbeton oder Stahl .....	77
4.2.2 Stahlbetontragwände in Skelettbauten .....	80
4.2.3 Gemischte Tragsysteme aus Stahlbetontragwänden und -rahmen .....	82
4.2.4 Stahlfachwerke .....	84
4.2.5 Mauerwerkstragwände .....	85
4.2.6 Füllwände aus Mauerwerk .....	86
4.3 Entwurfsgrundsätze .....	88
4.3.1 Allgemeine Grundsätze .....	88
4.3.2 Gestaltung im Grundriss .....	88
4.3.3 Gestaltung im Aufriss .....	91
4.4 Duktilitätsklassen .....	93
4.5 Tragwerksverformungen .....	94
4.5.1 Stockwerkverschiebungen .....	94
4.5.2 Auswirkungen auf nichttragende Elemente .....	95
4.5.3 Fugen zwischen benachbarten Gebäuden .....	96
4.6 Zur Wahl des Tragwerks .....	97
4.6.1 Nutzungsfreiheit .....	97
4.6.2 Bemessungsduktilität und Tragwiderstand .....	98
4.6.3 Sicherheits-, Betriebs- und Schädengrenzbeben .....	99
4.7 Querschnittsabmessungen von Stahlbetontragwerken .....	101
4.7.1 Allgemeines .....	101
4.7.2 Rahmenstützen .....	102
4.7.3 Schwerelaststützen .....	102

4.7.4	Rahmenriegel .....	103
4.7.5	Deckenplatten .....	103
4.7.6	Tragwände .....	103
4.7.7	Koppelungsriegel von gekoppelten Tragwänden .....	104
<b>5</b>	<b>Berechnungsverfahren .....</b>	<b>105</b>
5.1	Übersicht .....	105
5.2	Bauwerksschwingungen .....	108
5.2.1	Einmassenschwinger .....	108
a)	Bewegungsgleichung .....	108
b)	Homogene Lösung .....	109
c)	Partikuläre Lösung .....	111
5.2.2	Mehrmassenschwinger .....	112
a)	Bewegungsgleichung .....	112
b)	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen .....	114
c)	Zerlegung nach Eigenschwingungsformen .....	116
d)	Ergänzungen zur Dämpfung .....	121
5.3	Ersatzkraftverfahren .....	125
5.3.1	Grundlagen .....	125
5.3.2	Erdbeben-Ersatzkraft .....	126
a)	Definition .....	126
b)	Abschätzung der Grundfrequenz .....	126
c)	Berücksichtigung der plastischen Verformungen .....	130
d)	Einfluss einer Nachgiebigkeit des Baugrundes .....	131
e)	Ersatzkraft nach Normen .....	132
f)	Verteilung der Ersatzkraft über die Gebäudehöhe .....	134
5.3.3	Berücksichtigung der Torsion .....	135
5.3.4	Beurteilung des Ersatzkraftverfahrens .....	136
5.4	Antwortspektrenverfahren .....	138
5.4.1	Merkmale .....	138
5.4.2	Antwortspektren .....	138
a)	Definition .....	138
b)	Arten von Antwortspektren: .....	139
c)	Kombinierte doppelt-logarithmische Darstellung .....	140
d)	Grenzwerte für sehr steife und sehr weiche Systeme .....	142
e)	Konstruktion von Bemessungs-Antwortspektren nach Newmark .....	143
5.4.3	Verfahren beim Einmassenschwinger .....	145
5.4.4	Verfahren beim Mehrmassenschwinger .....	147
5.4.5	Verwendung inelastischer Antwortspektren .....	150
5.4.6	Beurteilung des Antwortspektrenverfahrens .....	150
5.5	Zeitverlaufsverfahren .....	152
5.5.1	Modale Lösung der Bewegungsgleichung .....	152
5.5.2	Direkte Integration der Bewegungsgleichung .....	153
5.5.3	Beurteilung der Zeitverlaufsverfahren .....	153

<b>6 Berechnung von Hochbauten</b> .....	155
6.1 Beanspruchungen und Widerstände .....	156
6.1.1 Allgemeine Bemessungsbedingung .....	156
6.1.2 Beanspruchungen .....	156
6.1.3 Widerstände .....	157
a) Tragwiderstand und Bemessungswert des Tragwiderstandes .....	157
b) Mittlerer Widerstand .....	158
c) Widerstand bei Überfestigkeit .....	158
d) Bemessungsbeiwert .....	159
6.2 Modellbildung .....	161
6.2.1 Trennung der orthogonalen Richtungen .....	161
6.2.2 Ersatzstab .....	161
a) Ganzer Hochbau .....	161
b) Einzelne Tragwände .....	161
6.2.3 Diskretes Tragwerksmodell .....	162
a) Steifigkeiten der Tragelemente .....	162
b) Steifigkeit von Verbindungen .....	163
6.2.4 Gebäudemassen .....	163
6.2.5 Baugrund .....	164
6.3 Ermittlung der Schnittkräfte .....	165
6.3.1 Schnittkräfte am Ersatzstab .....	165
6.3.2 Verteilung der Stockwerkquerkraft auf die vertikalen Tragelemente .....	166
a) Allgemeines .....	166
b) Statisch bestimmtes Tragwandsystem .....	167
c) Symmetrisches Tragwandsystem mit Stockwerkquerkraft in Symmetrieachse .....	168
d) Allgemeines Tragwandsystem .....	169
e) Rahmensysteme .....	172
6.3.3 Ermittlung der Biegemomente in den einzelnen vertikalen Tragelementen .....	173
6.4 Beispiel symmetrisches Tragwandsystem .....	175
6.4.1 Grundlagen .....	175
a) Beschreibung des Objektes .....	175
b) Baustoffe .....	175
c) Gefährdungsbild und Beanspruchungen .....	175
d) Allgemeine Modellbildung .....	177
6.4.2 Ersatzkraftverfahren .....	178
a) Spezifische Modellbildung .....	178
b) Abschätzung der Grundfrequenz .....	178
c) Ersatzkraft .....	179
d) Verteilung der Ersatzkraft über die Gebäudehöhe .....	179
e) Schnittkräfte .....	180
6.4.3 Antwortspektrenverfahren .....	180
a) Spezifische Modellbildung .....	180
b) Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen .....	181
c) Bemessungs-Antwortspektrum .....	182

d)	Modale Schnittkräfte .....	182
e)	Überlagerung der modalen Schnittkräfte .....	182
f)	Vergleich mit dem Ersatzkraftverfahren .....	183
6.4.4	Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren .....	184
a)	Spezifische Modellbildung .....	184
b)	Zeitverlauf der Bodenbeschleunigung .....	187
c)	Schnittkräfte und Verformungen .....	187
d)	Vergleich mit dem Ersatzkraftverfahren .....	189
6.5	Beispiel symmetrisches Rahmensystem .....	191
6.5.1	Grundlagen .....	191
a)	Beschreibung des Objektes .....	191
b)	Baustoffe .....	191
c)	Gefährdungsbild und Beanspruchungen .....	191
d)	Allgemeine Modellbildung .....	191
6.5.2	Ersatzkraftverfahren .....	193
a)	Spezifische Modellbildung .....	193
b)	Abschätzung der Grundfrequenz .....	194
c)	Ersatzkraft .....	194
d)	Verteilung der Ersatzkraft über die Gebäudehöhe .....	194
e)	Schnittkräfte .....	195
6.5.3	Antwortspektrenverfahren .....	197
a)	Spezifische Modellbildung .....	197
b)	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen .....	197
c)	Bemessungs-Antwortspektrum .....	197
d)	Modale Schnittkräfte .....	199
e)	Überlagerung der modalen Schnittkräfte .....	199
f)	Vergleich mit dem Ersatzkraftverfahren .....	199
6.5.4	Nichtlineares Zeitverlaufsverfahren .....	201
a)	Spezifische Modellbildung .....	201
b)	Zeitverlauf der Bodenbeschleunigung .....	202
c)	Duktilitätsbedarf in den plastischen Gelenken .....	202
6.6	Beispiel unsymmetrisches Tragwandsystem .....	204
6.6.1	Grundlagen .....	204
a)	Beschreibung des Objektes .....	204
b)	Baustoffe .....	204
c)	Gefährdungsbild und Beanspruchungen .....	204
d)	Allgemeine Modellbildung .....	204
6.6.2	Ersatzkraftverfahren .....	205
a)	Bestimmung des Steifigkeitszentrums .....	205
b)	Bestimmung des Massenzentrums .....	206
c)	Berücksichtigung der Torsion .....	206
d)	Verteilung der Stockwerkquerkraft .....	206
<b>7</b>	<b>Bemessung und konstruktive Durchbildung von Hochbauten .....</b>	<b>209</b>
7.1	Methode der Kapazitätsbemessung .....	210
7.1.1	Besonderheiten der Erdbebenbeanspruchung .....	210
7.1.2	Konventionelle Bemessung und Kapazitätsbemessung .....	211

7.1.3	Definition der Kapazitätsbemessung .....	213
7.1.4	Ungeeignete und geeignete Mechanismen .....	214
7.1.5	Überfestigkeit .....	218
7.1.6	Anwendung der Kapazitätsbemessung .....	219
7.2	Stahlbetontragwände .....	221
7.2.1	Arten und Begriffe .....	221
7.2.2	Querschnittsformen .....	222
7.2.3	Versagensarten .....	223
7.2.4	Geeignete Mechanismen .....	224
7.2.5	Konventionelle Bemessung .....	225
7.2.6	Kapazitätsbemessung schlanker Tragwände .....	225
	a) Kapazitätsbemessung schlanker Tragwände für beschränkte Duktilität .....	225
	b) Kapazitätsbemessung schlanker Tragwände für volle Duktilität .....	236
	c) Kapazitätsbemessung zusammenwirkender Tragwände .....	236
	d) Kapazitätsbemessung gekoppelter Tragwände für volle und beschränkte Duktilität .....	237
7.2.7	Besonderheiten bei gedrunenen Tragwänden .....	238
7.3	Stahlbetonrahmen .....	239
7.3.1	Geeignete Mechanismen .....	239
7.3.2	Konventionelle Bemessung .....	240
7.3.3	Kapazitätsbemessung .....	240
7.4	Gemischte Tragsysteme aus Stahlbetontragwänden und -rahmen .....	241
7.4.1	Geeignete Mechanismen .....	241
7.4.2	Konventionelle Bemessung .....	241
7.4.3	Kapazitätsbemessung .....	242
7.5	Stahlrahmen .....	243
7.5.1	Mechanismen und Bemessung .....	243
7.5.2	Besonderheiten in plastischen Gelenken .....	243
	a) Riegelgelenke .....	243
	b) Stützengelenke (am Stützenfuss im Erdgeschoss) .....	244
7.6	Stahlfachwerke .....	245
7.6.1	Fachwerke mit zentrischen Anschlüssen .....	245
7.6.2	Fachwerke mit exzentrischen Anschlüssen .....	246
7.7	Mauerwerkstragwände .....	248
7.7.1	Unbewehrte Mauerwerkstragwände .....	248
7.7.2	Bewehrte Mauerwerkstragwände .....	248
7.8	Füllwände aus Mauerwerk .....	251
7.9	Nichttragende Zwischenwände und Fassadenbauteile .....	252
7.9.1	Allgemeines .....	252
	a) Mit dem Tragwerk fest verbundene Bauteile .....	252
	b) Vom Tragwerk durch Fugen abgetrennte Bauteile .....	252
	c) Bemessung für Einwirkungen quer zur Elementebene .....	253
7.9.2	Nichttragende Mauerwerkswände ohne Fugen .....	253

7.9.3	Nichttragende Wände mit Fugen .....	254
7.9.4	Fassadenbauteile .....	254
7.10	Anlagen und Einrichtungen .....	256
7.11	Fundationen .....	258
7.11.1	Anforderungen .....	258
7.11.2	Einzel- und Streifenfundamente .....	259
7.11.3	Plattenfundamente und Kastenfundationen .....	259
7.11.4	Pfahlfundationen .....	260
<b>8</b>	<b>Erdbebensicherung von Brücken .....</b>	<b>261</b>
8.1	Mögliche Schäden .....	263
8.1.1	Absturz des Brückenträgers .....	263
8.1.2	Schäden bei Lagern .....	264
8.1.3	Schäden bei Widerlagern .....	264
8.1.4	Schäden an Brückenstützen .....	265
8.2	Absturzsicherung .....	266
8.2.1	Grundlagen .....	266
8.2.2	Einfache Regeln .....	267
a)	Grundgrößen .....	267
b)	Mindestabmessungen der Auflagerbereiche .....	269
c)	Numerische Auswertung und Eichung .....	270
d)	Regeln zur Absturzsicherung .....	270
8.3	Bemessung .....	272
8.3.1	Längsrichtung bei schwimmender Lagerung .....	272
8.3.2	Längsrichtung bei (anfänglich) fester Lagerung .....	274
8.3.3	Längsrichtung bei Lagerung mit Sollbruchstellen .....	276
8.3.4	Querrichtung .....	277
8.4	Besondere Massnahmen .....	279
8.4.1	Blei-Gummi-Lager .....	279
8.4.2	Stossdämpfer .....	280
8.4.3	Schubnocken .....	280
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>281</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>285</b>