

Konstantin Meskouris
Klaus-G. Hinzen
Christoph Butenweg
Michael Mistler

Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen - Anwendung - Beispiele

2., erweiterte und aktualisierte Auflage

mit 359 Abbildungen und 60 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

VORWORT ZUR ZWEITEN AUFLAGE	V
1 BAUDYNAMISCHE GRUNDLAGEN	1
1.1 Bewegungsdifferentialgleichungen, d'ALEMBERTSches Prinzip	1
1.2 Zeitabhängige Vorgänge und Prozesse	6
1.3 Der Einmassenschwinger	10
1.3.1 Der Einmassenschwinger im Zeitbereich.....	10
1.3.2 Der Einmassenschwinger im Frequenzbereich.....	16
1.3.3 Der Einmassenschwinger mit nichtlinearer Rückstellkraft.....	19
1.3.4 Lineare Antwortspektren von Beschleunigungszeitverläufen.....	23
1.3.5 Nichtlineare (inelastische) Antwortspektren.....	26
1.3.6 Spektrumkompatible Beschleunigungszeitverläufe.....	27
1.4 Stabtragwerke als diskrete Mehrmassenschwinger	31
1.4.1 Statische Beanspruchung.....	31
1.4.2 Differentialgleichungssystem des Diskreten Mehrmassenschwingers.....	36
1.4.3 Wesentliche Freiheitsgrade, statische Kondensation, Eigenwertproblem.....	37
1.4.4 Modale Analyse.....	41
1.4.5 Viskoser Dämpfungsansatz.....	45
1.4.6 Direkte Integration.....	46
1.4.7 Berechnung der Schnittkräfte ebener Rahmen aus den Verformungen.....	48
2 SEISMOLOGISCHE GRUNDLAGEN	53
2.1 Wellenausbreitung	53
2.1.1 Bewegungsgleichung.....	54
2.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung.....	56
2.1.3 Elastische Konstanten.....	57
2.1.4 Raumwellen.....	58
2.1.5 Raumwellen in geschichteten Medien.....	61
2.1.5.1 FERMATSches Prinzip und SNELLIUSsches Gesetz.....	61
2.1.5.2 Laufzeit und Laufweg eines Strahls.....	63
2.1.5.3 Kritische Refraktion.....	64
2.1.5.4 Laufzeitkurven.....	64
2.1.5.5 Aufteilung der seismischen Energie an Grenzflächen.....	67
2.1.6 Oberflächenwellen.....	70
2.1.6.1 2.1.6.1 RAYLEIGH-Welle.....	71
2.1.6.2 LOVE-Welle.....	75
2.1.7 Dämpfung.....	79
2.2 Die Struktur von Seismogrammen	80
2.2.1 Strong-motion-Seismogramm.....	81
2.2.2 Seismogramm eines Lokalbebens.....	82

2.2.3 Seismogramm eines Fernbebens.....	84
2.2.4 Parameter zur Beschreibung der Bewegung.....	85
2.2.4.1 Zeitbereichsgrößen.....	85
2.2.4.2 Dauer der Bodenbewegung.....	87
2.2.4.3 Frequenzbereichsgrößen.....	88
2.2.4.4 Beispiel.....	89
2.3 Einfluss des lokalen Untergrundes.....	92
2.3.1 Verstärkungsfunktion eines Schichtpaketes.....	93
2.3.1.1 Homogene Sedimentschicht auf steifer Festgesteinsschicht ohne Dämpfung.....	94
2.3.1.2 Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf steifer Festgesteinsschicht.....	96
2.3.1.3 Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	97
2.3.1.4 Sedimentschichtpaket mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	99
2.3.2 Beispiele von Standorteffekten.....	100
2.3.3 Nichtlineares Materialverhalten.....	104
2.3.3.1 Dynamische Setzung.....	104
2.3.3.2 Bodenverflüssigung.....	104
2.3.4 Einfluss der dreidimensionalen Struktur des Untergrundes.....	106
2.4 Ermittlung ingenieurseismologischer Standortparameter.....	107
2.4.1 Wellengeschwindigkeiten.....	107
2.4.1.1 Refraktionsseismik.....	107
2.4.1.2 Reflexionsseismik.....	109
2.4.1.3 Spektrale Analyse von Oberflächenwellen.....	109
2.4.1.4 Bohrlochmessungen.....	109
2.4.2 Ermittlung der Materialdämpfung.....	111
2.4.3 Dichte.....	111
2.4.4 Passive Messungen.....	111
2.4.5 H/V Methode.....	111
2.5 Der seismische Herdprozess.....	113
2.5.1 Scherverschiebung.....	114
2.5.2 Punktquellenapproximation und äquivalente Kräfte.....	115
2.5.3 Momententensor.....	122
2.5.4 Der ausgedehnte seismische Herd.....	124
2.5.5 Das Herdspektrum.....	128
2.5.6 Spannungsabfall.....	130
2.5.7 Abschätzung maximaler Bodenbewegungen.....	130
2.6 Ingenieurseismologische Parameter.....	131
2.6.1 Erdbebenstärke.....	131
2.6.1.1 Magnitude.....	131
2.6.1.2 Seismische Energie.....	133
2.6.1.3 Beziehungen zwischen Moment und Magnitude.....	136
2.6.1.4 Beziehungen zwischen Momentmagnitude und Herddimension.....	136
2.6.2 Standortbezogene Parameter.....	137
2.6.2.1 Makroseismische Intensität.....	137
2.6.2.2 Die europäische makroseismische Skala.....	138
2.6.2.3 Makroseismische Begriffe und Auswerteverfahren.....	142
2.6.2.4 Beziehungen zwischen Intensität und Beschleunigung.....	145
2.6.2.5 Beziehungen zwischen Magnitude und Beschleunigung.....	146

2.7 Erdbebenstatistik und Erdbebengefährdung.....	1
2.7.1 Rezente, historische und Paläoerdbeben.....	1
2.7.2 Archäoseismologie.....	1
2.7.3 Charakterisierung der seismischen Quellen.....	1
2.7.3.1 Räumliche Bebenverteilung.....	1
2.7.3.2 Zeitliche Bebenverteilung.....	1
2.7.4 Deterministische Verfahren der Gefährdungsanalyse.....	1
2.7.5 Probabilistische Verfahren.....	1
2.7.6 Erdbebengefährdungskarten.....	1
2.8 Seismologische Praxis.....	1
2.8.1 Messtechnik.....	1
2.8.1.1 Seismometer.....	1
2.8.1.2 Messstation.....	1
2.8.2 Lokalisierung.....	1
2.8.3 Bestimmung der Magnitude.....	1
2.9 Beispiele typischer Erdbebenschäden.....	1
3 SEISMISCHE BEANSPRUCHUNG VON KONSTRUKTIONEN.....	1
3.1 Rechenverfahren.....	1
3.1.1 Modalanalytisches Antwortspektrenverfahren.....	1
3.1.2 Verfahren mit statischen Ersatzlasten.....	1
3.1.3 Direkte Integrationsverfahren.....	1
3.1.4 Nichtlineare Verfahren.....	2
3.1.4.1 Inelastische statische Untersuchungen („Pushover-Analysis“)......	2
3.1.4.2 Kapazitätsspektrum-Methode.....	2
3.1.4.3 Inelastische dynamische Untersuchungen (Zeitverlaufsmethode).....	2
3.2 Asynchrone multiple seismische Erregung.....	2
3.3 Boden-Bauwerk Interaktion.....	2
3.3.1 Allgemeines zur Boden-Bauwerk Interaktion.....	2
3.3.2 Untersuchungsmethoden.....	2
3.3.2.1 Direkte Methode und Substrukturmethode.....	2
3.3.2.2 Frequenzbereich und Zeitbereich.....	2
3.3.2.3 Einfache physikalische Modelle und Randelementmethode.....	2
3.3.3 Berechnungsmodelle.....	2
3.3.3.1 Bettungszahlmodell nach Winkler.....	2
3.3.3.2 Kegelstumpfmmodell nach Wolf.....	2
3.3.3.3 Geometrische Dämpfung und Materialdämpfung.....	2
3.3.3.4 Randelementmethode.....	2
3.3.4 Berechnungsbeispiel.....	2
3.3.4.1 Problemstellung.....	2
3.3.4.2 Modellbeschreibung.....	2
3.3.4.3 Brückenpfeiler unter Vertikallast.....	2
3.3.4.4 Brückenpfeiler unter Horizontallast.....	2

4 BEMESSUNG VON BAUWERKEN NACH DIN 4149:2005.....	255
4.1 Inhaltliche Erläuterung der DIN 4149:2005.....	255
4.1.1 Stand der Erdbebennormung in Deutschland.....	255
4.1.2 Anwendungsbereich und Zielsetzung.....	255
4.1.3 Gliederung der DIN 4149:2005.....	256
4.1.4 Erdbebengerechter Entwurf.....	257
4.1.4.1 Grundrissgestaltung.....	257
4.1.4.2 Aufrissgestaltung.....	258
4.1.4.3 Ausbildung der Gründung.....	260
4.1.5 Erdbebeneinwirkung.....	260
4.1.5.1 Erdbebenzonenkarte und Untergrundbeschreibung.....	260
4.1.5.2 Elastisches Antwortspektrum.....	262
4.1.5.3 Bemessungsspektrum für lineare Tragwerksberechnungen.....	265
4.1.6 Berechnungsverfahren.....	265
4.1.6.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren.....	266
4.1.6.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren.....	267
4.1.7 Berücksichtigung von Torsionswirkungen.....	268
4.1.8 Nachweis der Standsicherheit.....	270
4.1.8.1 Vereinfachter Nachweis der Standsicherheit.....	270
4.1.8.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	271
4.1.8.3 Nachweis der Duktilität.....	272
4.1.8.4 Nachweis des Gleichgewichts.....	272
4.1.8.5 Nachweis der Tragfähigkeit von Gründungen.....	272
4.1.8.6 Nachweis der erdbebengerechten Ausführung von Fugen.....	272
4.1.9 Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauten.....	272
4.1.9.1 Teilsicherheitsbeiwerte.....	272
4.1.9.2 Duktilitätsklasse 1.....	273
4.1.9.3 Duktilitätsklasse 2.....	274
4.1.10 Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten.....	283
4.1.10.1 Duktilitätsklasse 1.....	283
4.1.10.2 Duktilitätsklassen 2 und 3.....	283
4.1.10.3 Ablaufschema für den Nachweis von Stahlbauten.....	291
4.1.11 Baustoffspezifische Regelungen für Mauerwerksbauten.....	292
4.1.11.1 Anforderungen an Mauerwerksbaustoffe und Konstruktionsregeln.....	292
4.1.11.2 Nachweis: Einhaltung konstruktiver Regeln (DIN 4149:2005, Abschnitt 11.6).....	293
4.1.11.3 Rechnerischer Nachweis (DIN 4149:2005, Abschnitt 11.6).....	294
4.1.12 Baustoffspezifische Regelungen für Holzbauten.....	296
4.2 Beispiele zur DIN 4149:2005.....	296
4.2.1 Stahlbetontragwerk mit aussteifenden Wandscheiben.....	296
4.2.1.1 Tragwerksbeschreibung.....	297
4.2.1.2 Lastannahmen und Bemessungskombination.....	298
4.2.1.3 Elastische Antwortspektren.....	299
4.2.1.4 Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung.....	299
4.2.1.5 Verhaltensbeiwerte.....	300
4.2.1.6 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung.....	300
4.2.1.7 Modellabbildung.....	301
4.2.1.8 Bemessungsschnittgrößen: Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren.....	303
4.2.1.9 Bemessungsschnittgrößen nach dem multimodalen Antwortspektrenverfahren unter Verwendung des Ersatzstabs.....	308
4.2.1.10 Bemessungsschnittgrößen nach dem multimodalen Antwortspektrenverfahren unter Verwendung eines räumlichen Modells.....	310

4.2.1.11 Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 1.....	318
4.2.1.12 Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 2.....	319
4.2.1.13 Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbetonbauten nach DIN 4149:2005.....	323
4.2.2 Stahltragwerk.....	323
4.2.2.1 Nachweis in Duktilitätsklasse 1.....	328
4.2.2.2 Nachweis in Duktilitätsklasse 2.....	329
4.2.2.3 Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbauten nach DIN 4149:2005.....	331
4.2.3 Reihenhaus aus Mauerwerk.....	331
4.2.3.1 Allgemeines.....	331
4.2.3.2 Einhaltung der konstruktiven Regeln.....	332
4.2.3.3 Einhaltung materialspezifischer konstruktiver Regeln.....	332
4.2.3.4 Rechnerischer Nachweis.....	333
4.2.4 Mehrstöckiges Haus aus Mauerwerk.....	336
4.2.4.1 Allgemeines.....	336
4.2.4.2 Lastannahmen und anzusetzende Vertikallasten.....	337
4.2.4.3 Modellabbildung.....	337
4.2.4.4 Ermittlung der horizontalen Erdbebenersatzkraft.....	339
4.2.4.5 Bemessungsschnittgrößen und Spannungsnachweis.....	340
4.2.4.6 Anmerkungen zur Bemessung von Mauerwerksbauten nach DIN 4149:2005.....	345
5 SEISMISCHE VULNERABILITÄT BESTEHENDER BAUWERKE.....	349
5.1 Grundlegendes Beurteilungskonzept.....	349
5.2 Bauwerksschädigung.....	349
5.2.1 Strukturelle Schädigungsindikatoren.....	350
5.2.1.1 Lokale Schädigungsindikatoren.....	350
5.2.1.2 Globale Schädigungsindikatoren.....	351
5.2.2 Ökonomische Schädigungsindikatoren.....	351
5.2.3 Bewertung der Schädigung.....	352
5.3 Seismische Gefährdung.....	353
5.3.1 Klassifizierungsparameter.....	353
5.3.2 Seismische Gefährdungskurven.....	354
5.4 Methoden zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität.....	355
5.4.1 Vereinfachte Methoden (Untersuchungsstufe I).....	355
5.4.1.1 Vulnerabilitätskurven.....	355
5.4.1.2 Empirische Formeln.....	358
5.4.2 Methoden in Untersuchungsstufe II.....	358
5.4.3 Methoden in Untersuchungsstufe III.....	362
5.5 Integriertes Gesamtkonzept.....	364
5.5.1 Bauwerksklassifizierung.....	364
5.5.2 Spezifikation für Hochbauten.....	364
5.5.2.1 Untersuchungsstufe I.....	364
5.5.2.1.1 Berechnungsgrundlagen.....	365
5.5.2.1.2 Bauwerkseigenschaften und Geländedaten.....	368
5.5.2.1.3 Resultate in Untersuchungsstufe I.....	371
5.5.2.2 Untersuchungsstufe II.....	372
5.5.2.2.1 Berechnung der Erdbebenersatzkräfte und Kontrolle der Kipsicherheit.....	372

5.5.2.2.2	Verformungskontrolle für Rahmentragwerke.....	372
5.5.2.2.3	Schubspannungskontrolle bei Stahlbetonrahmenstützen.....	372
5.5.2.2.4	Schubspannungskontrolle in den Schubwänden.....	373
5.5.2.2.5	Kontrolle der Diagonalaussteifungen.....	373
5.5.2.2.6	Bauwerk/Baugrund Frequenzkontrolle.....	373
5.5.2.2.7	Resultate in Untersuchungsstufe II.....	375
5.5.2.3	Untersuchungsstufe III.....	375
5.5.2.3.1	Grundlagen der probabilistischen Schädigung.....	375
5.5.2.3.2	Korrelation zwischen Erdbebenintensität und Schädigungswerten.....	376
5.5.2.4	Beispiel 1: Verwaltungsgebäude in Istanbul: Untersuchungsstufen I und II.....	377
5.5.2.5	Beispiel 2: Bürogebäude in Istanbul: Untersuchungsstufe III.....	379
5.5.2.5.1	Modellbeschreibung.....	379
5.5.2.5.2	Eigenfrequenzen des Gebäudes.....	379
5.5.2.5.3	Rayleigh-Dämpfung.....	379
5.5.2.5.4	Seismische Gefährdungskurve von Istanbul, Türkei.....	380
5.5.2.5.5	Wahl der Beschleunigungszeitverläufe.....	381
5.5.2.5.6	Jährliche Schädigungskurve.....	381
5.5.3	Spezifikation für Brückenbauwerke.....	382
5.5.3.1	Programmsystem SVBS.....	383
5.5.3.2	Untersuchungsstufe I.....	384
5.5.3.3	Untersuchungsstufe II.....	384
5.5.3.4	Untersuchungsstufe III.....	384
5.5.3.5	Beispiel: Rheinbrücke Emmerich: Untersuchungsstufen I, II und III.....	385
5.5.3.5.1	Erdbebengefährdung am Brückenstandort.....	385
5.5.3.5.2	Rechenmodelle.....	386
5.5.3.5.3	Schwingungsmessungen.....	387
5.5.3.5.4	Modellkalibrierung.....	389
5.5.3.5.5	Lastfallkombinationen.....	389
5.5.3.5.6	Ergebnisse in den drei Untersuchungsstufen.....	390
5.5.4	Spezifikation für Industrieanlagen.....	392
6	UNTERSUCHUNG WEITERER BAUWERKE UND ANLAGEN.....	401
6.1	Mauerwerksbauten.....	401
6.1.1	Versagensarten von Mauerwerksscheiben unter seismischer Belastung.....	402
6.1.2	Verformungsbasierte Bemessung von Mauerwerksbauten.....	404
6.1.3	Berechnung des Gebäude-Kapazitätsspektrums.....	406
6.1.3.1	Vereinfachter Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das Erdgeschoss.....	406
6.1.3.2	Genauerer Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das oberste Geschoss.....	409
6.1.4	Iterative Ermittlung des Performance Point.....	411
6.1.5	Berücksichtigung der normativen Anforderungen.....	413
6.1.6	Praxisorientierte Umsetzung des Verfahrens.....	415
6.1.7	Anwendungsbeispiele.....	415
6.1.7.1	Beispiel 1: Dreistöckiges Reihenhauses.....	415
6.1.7.2	Einfluss der Torsion am Beispiel eines freistehenden Gebäudes.....	419
6.2	Silos.....	420
6.2.1	Ersatzlastverfahren.....	421
6.2.2	Numerische Simulation.....	428
6.2.3	Vergleich der Verfahren.....	431