

Konstantin Meskouris
Klaus-G. Hinzen

Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen – Anwendung – Beispiele



Inhaltsverzeichnis

VORWORT	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.....	65
2.1.5.5 Aufteilung der seismischen Energie an Grenzflächen	68
2.1.6 Oberflächenwellen.....	70
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 <i>Strong-motion</i> -Seismogramm.....	80
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 Frequenzbereichsgrößen	87
2.3 Einfluss des lokalen Untergrundes.....	88
2.3.1 Verstärkungsfunktion eines Schichtpaketes	89
2.3.1.1 Homogene Sedimentschicht auf steifer Festgesteinsschicht ohne Dämpfung ...	90
2.3.1.2 Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf steifer Festgesteinsschicht.....	92
2.3.1.3 Homogene Sedimentschicht mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	93
2.3.1.4 Sedimentschichtpaket mit Dämpfung auf elastischer Festgesteinsschicht.....	95
2.3.2 Beispiele von Standorteffekten.....	96
2.3.3 Nichtlineares Materialverhalten.....	100
2.3.3.1 Dynamische Setzung.....	100
2.3.3.2 Bodenverflüssigung	100
2.3.4 Einfluss der dreidimensionalen Struktur des Untergrundes.....	102
2.4 Ermittlung ingenieurseismologischer Standortparameter	103
2.4.1 Wellengeschwindigkeiten.....	103
2.4.1.1 Refraktionsseismik.....	103
2.4.1.2 Reflexionsseismik	105
2.4.1.3 Spektrale Analyse von Oberflächenwellen	105
2.4.1.4 Bohrlochmessungen.....	105
2.4.2 Ermittlung der Materialdämpfung	107
2.4.3 Dichte.....	107
2.4.4 Passive Messungen	107
2.5 Der seismische Herdprozess	107
2.5.1 Scherverschiebung.....	108
2.5.2 Punktquellenapproximation und äquivalente Kräfte	110
2.5.3 Momententensor	116
2.5.4 Der ausgedehnte seismische Herd	118
2.5.5 Das Herdspektrum	122
2.5.6 Spannungsabfall.....	124
2.5.7 Abschätzung maximaler Bodenbewegungen.....	124
2.6 Ingenieurseismologische Parameter	125
2.6.1 Erdbebenstärke	125
2.6.1.1 Magnitude	125
2.6.1.2 Seismische Energie	127
2.6.1.3 Beziehungen zwischen Moment und Magnitude	130
2.6.1.4 Beziehungen zwischen Momentmagnitude und Herddimension	130
2.6.2 Standortbezogene Parameter.....	131
2.6.2.1 Makroseismische Intensität.....	131
2.6.2.2 Die europäische makroseismische Skala	132

2.6.2.3 Makroseismische Begriffe und Auswerteverfahren.....	137
2.6.2.4 Beziehungen zwischen Intensität und Beschleunigung	139
2.6.2.5 Beziehungen zwischen Magnitude und Beschleunigung.....	140
2.7 Erdbebenstatistik und Erdbebengefährdung	143
2.7.1 Rezente, historische und Paläoerdbeben.....	144
2.7.2 Charakterisierung der seismischen Quellen.....	145
2.7.2.1 Räumliche Bebenverteilung.....	145
2.7.2.2 Zeitliche Bebenverteilung.....	146
2.7.3 Deterministische Verfahren der Gefährdungsanalyse	147
2.7.4 Probabilistische Verfahren	148
2.7.5 Erdbebengefährdungskarten	152
2.8 Seismologische Praxis.....	153
2.8.1 Messtechnik	153
2.8.1.1 Seismometer.....	153
2.8.1.2 Messstation	158
2.8.2 Lokalisierung	160
2.8.3 Bestimmung der Magnitude	161
2.9 Beispiele typischer Erdbebenschäden.....	163
3 SEISMISCHE BEANSPRUCHUNG VON KONSTRUKTIONEN	177
3.1 Allgemeine Überlegungen und Rechenverfahren.....	177
3.1.1 Modalanalytisches Antwortspektrumverfahren.....	178
3.1.2 Verfahren mit statischen Ersatzlasten.....	184
3.1.3 Direkte Integrationsverfahren.....	184
3.1.4 Nichtlineare Verfahren	189
3.1.4.1 Inelastische statische Untersuchungen („Pushover-Analysis“)	200
3.1.4.2 Inelastische dynamische Untersuchungen (Zeitverlaufsmethode).....	203
3.2 Asynchrone multiple seismische Erregung	211
3.3 Boden-Bauwerk-Interaktion	220
3.3.1 Allgemeines zur Boden-Bauwerk-Interaktion.....	220
3.3.2 Untersuchungsmethoden	221
3.3.2.1 Direkte Methode und Substrukturmethode.....	221
3.3.2.2 Frequenzbereich und Zeitbereich.....	222
3.3.2.3 Näherungslösung mit einfachen physikalischen Modellen und mit strenger Randelementmethode.....	223
3.3.3 Berechnungsmodelle	223
3.3.3.1 Bettungszahlmodell nach Winkler.....	223
3.3.3.2 Kegelstumpfmodell nach Wolf.....	226
3.3.3.3 Geometrische Dämpfung und Materialdämpfung.....	227
3.3.3.4 Randelementmethode.....	227
3.3.4 Beispiel	230

4 SEISMISCHE NORMEN FÜR GEBÄUDE	235
4.1 E DIN 4149:2002-10 (E DIN 4149 Entwurf Oktober 2002)	235
4.1.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	241
4.1.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren	243
4.1.3 Standsicherheitsnachweise	245
4.1.4 Regeln für Betonbauten	246
4.2 Schnellberechnung nach E DIN 4149	248
4.2.1 Notwendigkeit einer seismischen Berechnung	248
4.2.2 Bemessungsspektren und statische Ersatzlasten	249
4.3 Beispiele zur E DIN 4149	250
4.3.1 Beispiel 1: Rahmentragwerk aus Stahlbeton ohne Wandscheiben	250
4.3.1.1 Allgemeines	250
4.3.1.2 Lastannahmen	252
4.3.1.3 Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	253
4.3.1.4 Elastische Antwortspektren	254
4.3.1.5 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung	255
4.3.1.6 Eigenfrequenzen und Eigenformen	255
4.3.1.7 Ermittlung der seismischen Lasten mit dem Ersatzkraftverfahren	256
4.3.1.8 Bemessungsschnittgrößen nach dem Ersatzkraftverfahren	258
4.3.1.9 Bemessungsschnittgrößen nach dem Antwortspektrumverfahren	262
4.3.1.10 Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung	267
4.3.1.11 Kombination der Lasten in den beiden horizontalen Richtungen	267
4.3.1.12 Konstruktive Durchbildung	267
4.3.1.13 Nichtlineare Berechnungen	267
4.3.2 Beispiel 2: Stahlbetontragwerk mit Wandscheiben	268
4.3.2.1 Allgemeines	268
4.3.2.2 Lastannahmen und Lastfallkombinationen	269
4.3.2.3 Antwortspektren	269
4.3.2.4 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung	270
4.3.2.5 Bemessungsschnittgrößen nach dem Ersatzkraftverfahren	270
4.3.2.6 Bemessungsschnittgrößen nach dem Antwortspektrumverfahren	270
4.4 Eurocode 8 Teil 1 (prEN 1998-1), Entwurf Januar 2003	282
4.4.1 Standsicherheitsnachweise nach EC 8-1	293
4.4.2 Regeln für Betonbauten	295
4.5 Beispiele zum EC 8	297
4.5.1 Beispiel 1: Rahmentragwerk aus Stahlbeton ohne Wandscheiben	297
4.5.1.1 Allgemeines zu Geometrie, Lastannahmen und Lastfallkombinationen	297
4.5.1.2 Antwortspektren	297
4.5.1.3 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung	298
4.5.1.4 Ermittlung der seismischen Lasten mit dem Ersatzkraftverfahren	299
4.5.1.5 Bemessungsschnittgrößen nach dem Ersatzkraftverfahren	301
4.5.1.6 Bemessungsschnittgrößen nach dem Antwortspektrenverfahren	304
4.5.1.7 Vergleich der Ergebnisse	307

4.5.1.8 Gebrauchstauglichkeit	308
4.5.1.9 Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung	308
4.5.1.10 Nichtlineare Berechnungen	308
4.5.2 Beispiel 2: Stahlbetontragwerk mit Wandscheiben	309
4.5.2.1 Allgemeines	309
4.5.2.2 Antwortspektren	309
4.5.2.3 Ermittlung der seismischen Lasten nach dem Ersatzkraftverfahren	310
4.5.2.4 Bemessungsschnittgrößen nach dem Antwortspektrenverfahren	310
5 SEISMISCHE VULNERABILITÄT VON GEBÄUDEN	317
5.1 Allgemeines	317
5.1.1 Seismische Gefährdung	317
5.1.2 Bauwerksschädigung	318
5.1.3 Strukturelle Schädigungsindikatoren	319
5.1.3.1 Lokale Schädigungsindikatoren	319
5.1.3.2 Globale Schädigungsindikatoren	320
5.1.4 Ökonomische Schädigungsindikatoren	320
5.1.5 Bewertung der Schädigung	321
5.2 Vulnerabilitätskurven	322
5.3 Empirische Formeln	324
5.4 Kapazitätsspektren	325
5.4.1 Kapazitätsspektrummethode	325
5.4.1.1 Last-Verformungs-Kurve (Pushover-Kurve)	325
5.4.1.2 Elastisches Antwortspektrum	325
5.4.1.3 Kurventransformation	325
5.4.1.4 Der „Performance Point“	326
5.4.2 FEMA - HAZUS99	329
5.5 Integrierte Methode	335
5.5.1 Anforderungen	335
5.5.2 Generelle Vorgehensweise	335
5.5.3 Untersuchungsstufe I (Level 1)	335
5.5.3.1 Bauwerkseigenschaften und Geländedaten	336
5.5.3.2 Untersuchungen im Vorfeld	342
5.5.4 Untersuchungsebene II (Level II)	342
5.5.4.1 Berechnung der Erdbebenersatzkräfte und Kontrolle der Kippsicherheit	342
5.5.4.2 Verformungskontrolle für Rahmentragwerke	342
5.5.4.3 Schubspannungskontrolle bei Stahlbetonrahmenstützen	342
5.5.4.4 Schubspannungskontrolle in den Schubwänden	343
5.5.4.5 Kontrolle der Diagonalaussteifungen	343
5.5.4.6 Bauwerk/Baugrund Frequenzkontrolle	343
5.5.5 Resultate der Vulnerabilitätsuntersuchung	346
5.5.6 Berechnungsgrundlagen zur Vulnerabilitätsuntersuchung	346

5.5.7 Untersuchungsstufe III	353
5.5.7.1 Grundlagen der probabilistischen Schädigung	353
5.5.7.2 Korrelation zwischen Erdbebenintensität und Schädigungswerten	354
5.5.7.3 Beispiel	355
5.5.7.3.1 Eigenfrequenzen des Gebäudes.....	355
5.5.7.3.2 Rayleigh-Dämpfung	355
5.5.7.3.3 Seismische Gefährdungskurve von Istanbul, Türkei.....	356
5.5.7.3.4 Wahl der Beschleunigungs-Zeitverläufe.....	357
5.5.7.3.5 Jährliche Schädigungskurve.....	358
5.6 Globalszenarien und Katastrophenplanung	359
6 SEISMISCHE ISOLIERUNG UND TRAGWERKSKONTROLLE	363
6.1 Allgemeines	363
6.2 Basisisierte Systeme.....	364
6.3 Verformungskontrollierte Systeme („Structural Control“)	377
6.3.1 Passive Systeme.....	377
6.3.2 Aktive, semiaktive und hybride Systeme.....	379
7 UNTERSUCHUNG WEITERER BAUWERKE UND ANLAGEN.....	385
7.1 Mauerwerksbauten	385
7.1.1 Versagen von Mauerwerksscheiben unter seismischer Belastung	385
7.1.2 Experimentelle Untersuchungen.....	386
7.1.3 Numerische Modelle für Mauerwerk	387
7.1.3.1 Mikromodelle	388
7.1.3.2 Makromodelle.....	388
7.1.4 Nichtlineares Materialmodell für Mauerwerksscheiben.....	389
7.1.4.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen	390
7.1.4.2 Versagenskriterium.....	392
7.1.4.3 Verhalten des Mauerwerks nach dem Versagen	393
7.1.5 Berechnungsbeispiele	394
7.1.5.1 Druckbeanspruchtes Mauerwerk	394
7.1.5.2 Schubbeanspruchte Mauerwerksscheibe	395
7.2 Silos.....	397
7.2.1 Ersatzlastverfahren	398
7.2.2 Numerische Simulation	405
7.2.3 Vergleich der Verfahren.....	408
7.3 Standsicherheitsnachweise für Erddämme.....	412
7.3.1 Standsicherheitsnachweise	412
7.3.1.1 Das pseudostatische Verfahren.....	414
7.3.1.2 Dynamische Verfahren	415

7.3.2 Berechnung der Gleitsicherheit mit Hilfe der FE-Methode	416
7.3.2.1 Berechnung des Sicherheitsfaktors.....	416
7.3.2.2 Gleitkreis der geringsten Sicherheit.....	418
7.3.3 Berechnungsbeispiel.....	422
7.3.3.1 Modellbildung	422
7.3.3.2 Lastfall Eigengewicht	423
7.3.3.3 Lastfall Wassereinstau	424
7.3.3.4 Nachweis der Böschungsbruchsicherheit für den Lastfall Wassereinstau.....	424
7.3.3.5 Lastfall Erdbeben.....	426
 8 ANHANG - PROGRAMMBESCHREIBUNGEN	431
8.1 Übersicht.....	431
8.2 Programmbeschreibungen	434
Sachwortverzeichnis.....	467