

Konstantin Meskouris | Klaus-G. Hinzen |  
Christoph Butenweg | Michael Mistler

# Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen – Anwendung – Beispiele

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

PRAXIS



# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT ZUR ERWEITERTEN DRITTEN AUFLAGE.....</b>	<b>V</b>
<b>1 BAUDYNAMISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Bewegungsdifferentialgleichungen, d'ALEMBERTsches Prinzip .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Zeitabhängige Vorgänge und Prozesse .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Der Einmassenschwinger .....</b>	<b>10</b>
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
<b>1.4 Stabtragwerke als diskrete Mehrmassenschwinger .....</b>	<b>31</b>
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
<b>2 SEISMOLOGISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>53</b>
<b>2.1 Wellenausbreitung.....</b>	<b>53</b>
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 RAYLEIGH-Welle .....	71
2.1.6.2 LOVE-Welle.....	75
2.1.7 Dämpfung.....	79
<b>2.2 Die Struktur von Seismogrammen.....</b>	<b>80</b>
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
<b>2.3</b>	<b>Einfluss des lokalen Untergrundes .....</b>	<b>92</b>
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
<b>2.4</b>	<b>Ermittlung ingenieurseismologischer Standortparameter .....</b>	<b>107</b>
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
<b>2.5</b>	<b>Der seismische Herdprozess .....</b>	<b>113</b>
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
<b>2.6</b>	<b>Ingenieurseismologische Parameter .....</b>	<b>131</b>
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
<b>2.7</b>	<b>Erdbebenstatistik und Erdbebengefährdung .....</b>	<b>149</b>
2.7.1	Rezente, historische und Paläoerdbeben .....	150
2.7.2	Archäoseismologie .....	151
2.7.3	Charakterisierung der seismischen Quellen .....	154

2.7.3.1 Räumliche Bebenverteilung .....	154
2.7.3.2 Zeitliche Bebenverteilung .....	156
2.7.4 Deterministische Verfahren der Gefährdungsanalyse .....	156
2.7.5 Probabilistische Verfahren .....	158
2.7.6 Erdbebengefährdungskarten .....	162
<b>2.8 Seismologische Praxis.....</b>	<b>163</b>
2.8.1 Messtechnik .....	163
2.8.1.1 Seismometer.....	163
2.8.1.2 Messstation .....	168
2.8.2 Lokalisierung.....	172
2.8.3 Bestimmung der Magnitude .....	174
<b>2.9 Beispiele typischer Erdbebenschäden.....</b>	<b>175</b>
<b>3 SEISMISCHE BEANSPRUCHUNG VON KONSTRUKTIONEN.....</b>	<b>189</b>
<b>3.1 Rechenverfahren.....</b>	<b>189</b>
3.1.1 Modalanalytisches Antwortspektrenverfahren .....	190
3.1.2 Verfahren mit statischen Ersatzlasten.....	196
3.1.3 Direkte Integrationsverfahren.....	196
3.1.4 Nichtlineare Verfahren .....	201
3.1.4.1 Inelastische statische Untersuchungen („Pushover-Analysis“) .....	212
3.1.4.2 Kapazitätsspektrum-Methode.....	216
3.1.4.3 Verformungsbasierter Nachweis nach DIN EN 1998-1 (2010), Anhang B.....	222
3.1.4.3.1 Inelastische Antwortspektren .....	222
3.1.4.3.2 Berechnungsablauf der N2-Methode.....	224
3.1.4.3.3 Berechnungsbeispiel: N2-Methode nach DIN EN 1998-1, Anhang B.....	231
3.1.4.3.4 Vergleich: N2-Methode und Kapazitätsspektrummethode .....	237
3.1.4.4 Inelastische dynamische Untersuchungen (Zeitverlaufsmethode).....	239
<b>3.2 Asynchrone multiple seismische Erregung.....</b>	<b>246</b>
<b>3.3 Boden-Bauwerk Interaktion.....</b>	<b>255</b>
3.3.1 Allgemeines zur Boden-Bauwerk Interaktion .....	255
3.3.2 Untersuchungsmethoden .....	256
3.3.2.1 Direkte Methode und Substrukturmethode .....	256
3.3.2.2 Frequenzbereich und Zeitbereich .....	257
3.3.2.3 Einfache physikalische Modelle und Randelementmethode .....	258
3.3.3 Berechnungsmodelle .....	258
3.3.3.1 Bettungszahlmodell nach Winkler .....	258
3.3.3.2 Kegelstumpfmmodell nach Wolf .....	260
3.3.3.3 Geometrische Dämpfung und Materialdämpfung .....	262
3.3.3.4 Randelementmethode.....	262
3.3.4 Berechnungsbeispiel.....	265
3.3.4.1 Problemstellung .....	265
3.3.4.2 Modellbeschreibung.....	265
3.3.4.3 Brückenpfeiler unter Vertikallast.....	266
3.3.4.4 Brückenpfeiler unter Horizontallast.....	267
<b>4 ERDBEBENBEMESSUNG VON BAUWERKEN NACH DIN 4149 UND DIN EN 1998-1.....</b>	<b>273</b>
<b>4.1 Inhaltliche Erläuterung der DIN 4149.....</b>	<b>273</b>

4.1.1	Stand der Erdbebennormung in Deutschland.....	273
4.1.2	Anwendungsbereich und Zielsetzung .....	273
4.1.3	Gliederung der DIN 4149 .....	274
4.1.4	Erdbebengerechter Entwurf.....	275
4.1.4.1	Grundrissgestaltung.....	275
4.1.4.2	Aufrissgestaltung.....	276
4.1.4.3	Ausbildung der Gründung.....	278
4.1.5	Erdbebeneinwirkung.....	278
4.1.5.1	Erdbebenzonenkarte und Untergrundbeschreibung.....	278
4.1.5.2	Elastisches Antwortspektrum .....	281
4.1.5.3	Bemessungsspektrum für lineare Tragwerksberechnungen.....	283
4.1.6	Berechnungsverfahren .....	284
4.1.6.1	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren .....	285
4.1.6.2	Multimodales Antwortspektrenverfahren.....	286
4.1.6.2.1	Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen .....	286
4.1.6.2.2	Kombination der modalen Schnittgrößen .....	287
4.1.6.2.3	Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Erdbebenkomponenten .....	287
4.1.6.3	Kombination der Beanspruchungsgrößen infolge der Erdbebenkomponenten .....	287
4.1.7	Berücksichtigung von Torsionswirkungen .....	287
4.1.7.1	Tragwerke mit unsymmetrischer Verteilung von Steifigkeit und Masse.....	288
4.1.8	Nachweis der Standsicherheit .....	291
4.1.8.1	Vereinfachter Nachweis der Standsicherheit.....	291
4.1.8.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	292
4.1.8.3	Nachweis der Duktilität.....	293
4.1.8.4	Nachweis des Gleichgewichts .....	293
4.1.8.5	Nachweis der Tragfähigkeit von Gründungen.....	293
4.1.8.6	Nachweis der erdbebengerechten Ausführung von Fugen.....	293
4.1.9	Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauten .....	294
4.1.9.1	Teilsicherheitsbeiwerte.....	294
4.1.9.2	Duktilitätsklasse 1 .....	294
4.1.9.3	Duktilitätsklasse 2 .....	296
4.1.9.3.1	Verhaltensbeiwerte.....	296
4.1.9.3.2	Lokale Duktilität.....	297
4.1.9.3.3	Verankerung der Bewehrung.....	298
4.1.9.3.4	Stöße von Bewehrungsstäben.....	298
4.1.9.3.5	Anforderungen an Balken.....	299
4.1.9.3.6	Anforderungen an Stützen .....	299
4.1.9.3.7	Anforderungen an aussteifende Wände .....	300
4.1.10	Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten .....	304
4.1.10.1	Duktilitätsklasse 1 .....	304
4.1.10.2	Duktilitätsklassen 2 und 3 .....	305
4.1.10.2.1	Kapazitätsbemessung.....	305
4.1.10.2.2	Allgemeine Festlegungen nach DIN 4149 (2005).....	306
4.1.10.2.3	Wahl des Verhaltensbeiwertes $q$ .....	307
4.1.10.2.4	Rahmenkonstruktionen .....	307
4.1.10.2.5	Rahmen mit konzentrischen Verbänden .....	309
4.1.10.2.6	Rahmen mit exzentrischen Verbänden .....	310
4.1.10.2.7	Eingespannte (Kragarm-)Konstruktionen, Dualtragwerke, Mischtragwerke .....	313
4.1.10.3	Ablaufschema für den Nachweis von Stahlbauten .....	313
4.1.11	Baustoffspezifische Regelungen für Mauerwerksbauten.....	314
4.1.11.1	Anforderungen an Mauerwerksbaustoffe und Konstruktionsregeln .....	314
4.1.11.2	Einhaltung konstruktiver Regeln, DIN 4149, Abschnitt 11.1-11.3.....	315
4.1.11.3	Rechnerischer Nachweis nach DIN 4149, Abschnitt 11.6 .....	316
4.1.12	Baustoffspezifische Regelungen für Holzbauten.....	318

<b>4.2 Inhaltliche Unterschiede zwischen DIN 4149 und DIN EN 1998-1 .....</b>	<b>318</b>
4.2.1 Anwendungsbereich und Zielsetzung .....	319
4.2.2 Gliederung der DIN EN 1998-1 .....	319
4.2.3 Erdbebengerechter Entwurf .....	320
4.2.4 Erdbebeneinwirkung .....	320
4.2.5 Berechnungsverfahren .....	321
4.2.6 Berücksichtigung von Torsionswirkungen .....	321
4.2.6.1 Ansatz zufälliger Torsionswirkungen .....	321
4.2.6.2 Ansatz von Torsionswirkungen im vereinfachten Antwortspektrenverfahren .....	321
4.2.6.3 Regelmäßige Grundrisse .....	322
4.2.6.4 Unregelmäßige Grundrisse .....	322
4.2.6.5 Ansatz von Torsionswirkungen in räumlichen Tragwerksmodellen .....	323
4.2.6.6 Vergleich mit DIN 4149 und Zusammenfassung .....	323
4.2.7 Nachweis der Standsicherheit .....	324
4.2.8 Baustoffspezifische Regelungen für Betonbauten .....	324
4.2.9 Baustoffspezifische Regelungen für Stahlbauten .....	325
4.2.10 Baustoffspezifische Regelungen für Mauerwerksbauten .....	327
4.2.10.1 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln .....	327
4.2.10.2 Rechnerischer Nachweis .....	328
<b>4.3 Rechenbeispiele zur DIN 4149 und DIN EN 1998-1 .....</b>	<b>330</b>
4.3.1 Stahlbetontragwerk mit aussteifenden Wandscheiben .....	330
4.3.1.1 Tragwerksbeschreibung .....	330
4.3.1.2 Lastannahmen und Bemessungskombination .....	331
4.3.1.3 Elastische Antwortspektren .....	332
4.3.1.4 Vertikalkomponente der Erdbebeneinwirkung .....	332
4.3.1.5 Verhaltensbeiwerte .....	333
4.3.1.6 Anzusetzende Vertikallasten für die seismische Berechnung .....	333
4.3.1.7 Modellbildung .....	334
4.3.1.8 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren .....	336
4.3.1.8.1 Berechnung der Eigenfrequenzen .....	336
4.3.1.8.2 Bemessungswerte der Beschleunigungen .....	338
4.3.1.8.3 Ermittlung der horizontalen Erdbebenersatzkräfte .....	338
4.3.1.8.4 Berücksichtigung von Torsionswirkungen und Verteilung der Erdbebenersatzkräfte .....	339
4.3.1.8.5 Bemessungsschnittgrößen der Wände .....	340
4.3.1.8.6 Verschiebungen / Theorie II. Ordnung .....	340
4.3.1.9 Multimodales Antwortspektrenverfahren auf Grundlage eines Ersatzstabs .....	341
4.3.1.9.1 Allgemeines .....	341
4.3.1.9.2 Eigenfrequenzen und Modalbeiträge .....	341
4.3.1.9.3 Überlagerung der modalen Schnittkräfte .....	342
4.3.1.9.4 Berücksichtigung von Torsionswirkungen .....	342
4.3.1.9.5 Bemessungsschnittkräfte der Wände .....	342
4.3.1.9.6 Verschiebungen / Theorie II. Ordnung .....	343
4.3.1.10 Multimodales Antwortspektrenverfahren: Räumliches Tragwerksmodell mit Balkenelementen .....	343
4.3.1.10.1 Allgemeines .....	343
4.3.1.10.2 Modelllaufbau .....	343
4.3.1.10.3 Eigenfrequenzen und Modalbeiträge .....	344
4.3.1.10.4 Torsionswirkungen .....	345
4.3.1.10.5 Berechnung .....	346
4.3.1.10.6 Effekte aus Theorie II. Ordnung .....	350
4.3.1.11 Multimodales Antwortspektrenverfahren: Räumliches Tragwerksmodell mit Schalenelementen .....	351
4.3.1.11.1 Allgemeines .....	351

4.3.1.11.2 Modellaufbau.....	351
4.3.1.11.3 Eigenfrequenzen und Modalbeiträge .....	351
4.3.1.11.4 Torsionswirkungen.....	352
4.3.1.11.5 Berechnung.....	353
4.3.1.11.6 Theorie II. Ordnung.....	354
4.3.1.12 Ergebnisvergleich der verschiedenen Rechenmodelle.....	354
4.3.1.13 Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 1 (DCL).....	355
4.3.1.13.1 Allgemeine Festlegungen .....	355
4.3.1.13.2 Bemessungsschnittkräfte .....	355
4.3.1.13.3 Bemessung auf Querkraft .....	355
4.3.1.13.4 Bemessung auf Biegung und Längskraft .....	356
4.3.1.13.5 Bemessungswert der bezogenen Längskraft .....	356
4.3.1.14 Bemessung und konstruktive Durchbildung: Duktilitätsklasse 2 (DCM).....	356
4.3.1.14.1 Allgemeine Anforderungen .....	356
4.3.1.14.2 Bemessungsschnittkräfte .....	357
4.3.1.14.3 Bemessung auf Querkraft .....	357
4.3.1.14.4 Bemessung auf Biegung und Längskraft .....	357
4.3.1.14.5 Maßnahmen zur Sicherstellung der lokalen Duktilität.....	357
4.3.1.15 Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbetonbauten .....	361
4.3.2 Stahltragwerk.....	361
4.3.2.1 Nachweis in Duktilitätsklasse 1 (DCL).....	366
4.3.2.2 Nachweis in Duktilitätsklasse 2 (DCM).....	366
4.3.2.3 Anmerkungen zur Bemessung von Stahlbauten .....	369
4.3.3 Reihenhaus aus Mauerwerk .....	370
4.3.3.1 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN 4149.....	371
4.3.3.2 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN EN 1998-1 .....	373
4.3.4 Mehrfamilienhaus aus Kalksandsteinmauerwerk .....	375
4.3.4.1 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN 4149.....	377
4.3.4.2 Vereinfachter Nachweis mit konstruktiven Regeln nach DIN EN 1998-1 .....	380
4.3.4.3 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren am Ersatzstab .....	382
4.3.4.3.1 Ermittlung der Stockwerksmassen.....	383
4.3.4.3.2 Ermittlung der Systemsteifigkeiten.....	384
4.3.4.3.3 Ermittlung der Erdbebenersatzkräfte in x- und y-Richtung .....	385
4.3.4.3.4 Verteilung der Erdbebenersatzkräfte auf die Wandscheiben.....	386
4.3.4.4 Standsicherheitsnachweis nach DIN 1053-100 (2006).....	390
4.3.4.4.1 Nachweis der zentrischen und exzentrischen Druckbeanspruchung .....	391
4.3.4.4.2 Schubnachweis .....	392
4.3.4.4.3 Ergebnisse der Nachweise .....	394
4.3.4.4.4 Berechnung unter Berücksichtigung der Rahmentragwirkung.....	396
4.3.4.5 Multimodales Antwortspektrenverfahren mit räumlichem Tragwerksmodell .....	398
4.3.4.5.1 Modale Analyse.....	398
4.3.4.5.2 Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen.....	405
4.3.4.5.3 Nachweisergebnisse für die Achse $y = 0$ , Wände 1-5 .....	406
4.3.4.5.4 Effekte der Wandkopplung.....	407
4.3.4.5.5 Effekte der Wand- Decken Interaktion .....	408
4.3.4.5.6 Zusammenfassung .....	409
4.3.4.6 Statisch nichtlinearer Nachweis.....	410
<b>5 SEISMISCHE VULNERABILITÄT BESTEHENDER BAUWERKE.....</b>	<b>417</b>
<b>5.1 Grundlegendes Beurteilungskonzept .....</b>	<b>417</b>
<b>5.2 Bauwerksschädigung.....</b>	<b>417</b>
5.2.1 Strukturelle Schädigungsindikatoren .....	418
5.2.1.1 Lokale Schädigungsindikatoren .....	418

5.2.1.2 Globale Schädigungsindikatoren.....	419
5.2.2 Ökonomische Schädigungsindikatoren .....	419
5.2.3 Bewertung der Schädigung.....	420
<b>5.3 Seismische Gefährdung.....</b>	<b>421</b>
5.3.1 Klassifizierungsparameter .....	421
5.3.2 Seismische Gefährdungskurven.....	422
<b>5.4 Methoden zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität.....</b>	<b>423</b>
5.4.1 Vereinfachte Methoden (Untersuchungsstufe I).....	423
5.4.1.1 Vulnerabilitätskurven.....	423
5.4.1.2 Empirische Formeln.....	426
5.4.2 Methoden in Untersuchungsstufe II.....	426
5.4.3 Methoden in Untersuchungsstufe III .....	430
<b>5.5 Integriertes Gesamtkonzept.....</b>	<b>432</b>
5.5.1 Bauwerksklassifizierung.....	432
5.5.2 Spezifikation für Hochbauten .....	432
5.5.2.1 Untersuchungsstufe I.....	432
5.5.2.1.1 Berechnungsgrundlagen .....	433
5.5.2.1.2 Bauwerkseigenschaften und Geländedaten .....	436
5.5.2.1.3 Resultate in Untersuchungsstufe I.....	439
5.5.2.2 Untersuchungsstufe II.....	440
5.5.2.2.1 Berechnung der Erdbebenersatzkräfte und Kontrolle der Kippsicherheit.....	440
5.5.2.2.2 Verformungskontrolle für Rahmentragwerke.....	440
5.5.2.2.3 Schubspannungskontrolle bei Stahlbetonrahmenstützen .....	440
5.5.2.2.4 Schubspannungskontrolle in den Schubwänden.....	441
5.5.2.2.5 Kontrolle der Diagonalaussteifungen .....	441
5.5.2.2.6 Bauwerk/Baugrund Frequenzkontrolle.....	441
5.5.2.2.7 Resultate in Untersuchungsstufe II.....	443
5.5.2.3 Untersuchungsstufe III .....	443
5.5.2.3.1 Grundlagen der probabilistischen Schädigung .....	443
5.5.2.3.2 Korrelation zwischen Erdbebenintensität und Schädigungswerten .....	444
5.5.2.4 Beispiel 1: Verwaltungsgebäude in Istanbul: Untersuchungsstufen I und II.....	445
5.5.2.5 Beispiel 2: Bürogebäude in Istanbul: Untersuchungsstufe III.....	447
5.5.2.5.1 Modellbeschreibung.....	447
5.5.2.5.2 Eigenfrequenzen des Gebäudes.....	447
5.5.2.5.3 Rayleigh-Dämpfung.....	447
5.5.2.5.4 Seismische Gefährdungskurve von Istanbul, Türkei .....	448
5.5.2.5.5 Wahl der Beschleunigungszeitverläufe .....	449
5.5.2.5.6 Jährliche Schädigungskurve .....	449
5.5.3 Spezifikation für Brückenbauwerke .....	450
5.5.3.1 Programmsystem SVBS.....	451
5.5.3.2 Untersuchungsstufe I.....	452
5.5.3.3 Untersuchungsstufe II .....	452
5.5.3.4 Untersuchungsstufe III .....	452
5.5.3.5 Beispiel: Rheinbrücke Emmerich: Untersuchungsstufen I, II und III .....	453
5.5.3.5.1 Erdbebengefährdung am Brückenstandort.....	453
5.5.3.5.2 Rechenmodelle.....	454
5.5.3.5.3 Schwingungsmessungen.....	455
5.5.3.5.4 Modellkalibrierung.....	457
5.5.3.5.5 Lastfallkombinationen.....	457
5.5.3.5.6 Ergebnisse in den drei Untersuchungsstufen .....	458
5.5.4 Spezifikation für Industrieanlagen.....	460



<b>6 MAUERWERKSBAUTEN</b> .....	<b>469</b>
<b>6.1 Verhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung</b> .....	<b>469</b>
6.1.1 Versagensformen von Mauerwerksscheiben unter seismischer Belastung .....	469
6.1.2 Wand-Decken und Wand-Wand Interaktion .....	472
6.1.3 Zusammenwirken der Schubwände .....	477
<b>6.2 Rechenverfahren für Mauerwerksbauten</b> .....	<b>478</b>
<b>6.3 Berechnungsmodelle für Mauerwerksbauten</b> .....	<b>479</b>
6.3.1 Ersatzstab.....	479
6.3.2 Ebenes Rahmenmodell .....	480
6.3.3 Pseudo 3D-Modelle mit äquivalenten Rahmenmodellen.....	482
6.3.4 Räumliche Modelle.....	483
<b>6.4 Beanspruchungen senkrecht zur Wandebene</b> .....	<b>484</b>
6.4.1 Problemstellung .....	484
6.4.2 Normative Nachweise.....	485
6.4.2.1 Tragende Schubwände .....	485
6.4.2.2 Nicht tragende Trennwände .....	486
6.4.3 Verformungsbasierte Nachweiskonzepte.....	487
6.4.3.1 Seismische Belastung der Wände.....	487
6.4.3.2 Verformungsbasierte Nachweise.....	487
6.4.4 Numerische Simulationen.....	491
6.4.5 Forschungsbedarf.....	492
<b>6.5 Ermittlung von Last-Verformungskurven für Schubwände</b> .....	<b>493</b>
6.5.1 Zyklische Schubwandversuche.....	493
6.5.2 Nichtlineare Berechnungen.....	496
6.5.3 Analytische Ansätze der FEMA-Richtlinien .....	497
6.5.3.1 Berechnung der horizontalen Tragfähigkeiten.....	497
6.5.3.2 Ermittlung der Verformungsfähigkeiten der Versagensformen.....	498
6.5.4 Analytische Ansätze nach DIN EN 1996-1-1 und DIN EN 1998-3 .....	499
6.5.4.1 Horizontale Tragfähigkeiten der Versagensformen.....	500
6.5.4.2 Verformungsfähigkeiten der Versagensformen.....	501
6.5.5 Analytischer Ansatz auf Grundlage der Versuchsdaten aus ESECMaSE.....	501
6.5.6 Datenbankansatz auf Grundlage experimenteller Kurven .....	503
<b>6.6 Verformungsbasierte Bemessung von Mauerwerksbauten</b> .....	<b>504</b>
6.6.1 Berechnung des Gebäude-Kapazitätsspektrums .....	505
6.6.1.1 Vereinfachter Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das Erdgeschoss .....	505
Berechnungsalgorithmus .....	505
6.6.1.2 Genauerer Ansatz: Kapazitätskurve bezogen auf das oberste Geschoss.....	508
6.6.2 Iterative Ermittlung des Performance Point.....	509
6.6.3 Berücksichtigung der normativen Anforderungen.....	512
<b>6.7 Berechnungsbeispiele für den statisch nichtlinearen Nachweis</b> .....	<b>513</b>
6.7.1 Beispiel 1: Dreistöckiges Reihenhaus.....	513
6.7.2 Beispiel 2: Einfluss der Torsion am Beispiel eines freistehenden Gebäudes.....	517
6.7.3 Beispiel 3: Doppelhaushälfte aus Ziegelmauerwerk.....	518
6.7.4 Nachweis mit experimentell ermittelten Last-Verformungskurven.....	519
6.7.5 Nachweis mit approximierten Last-Verformungskurven.....	523
6.7.6 Nachweis der Einspannwirkung der Deckenplatte .....	525

<b>7 BAUWERKE UND KOMPONENTEN IM ANLAGENBAU .....</b>	<b>531</b>
<b>7.1 Einführung .....</b>	<b>531</b>
<b>7.2 Sicherheitskonzept auf Grundlage von Bedeutungsbeiwerten .....</b>	<b>532</b>
<b>7.3 Auslegung der Primärstruktur.....</b>	<b>534</b>
<b>7.4 Sekundärstrukturen .....</b>	<b>538</b>
7.4.1 Berechnungsansätze .....	538
7.4.2 Berechnungsbeispiel für einen Behälter in einer fünfstöckigen Anlage.....	546
<b>7.5 Silobauwerke.....</b>	<b>553</b>
7.5.1 Ersatzlastverfahren nach DIN EN 1998-4 (2007).....	555
7.5.2 Berechnung der Eigenfrequenzen von Silos .....	560
7.5.2.1 Silos mit direkter Lagerung auf einem Gründungskörper .....	560
7.5.2.2 Silos mit Unterkonstruktion .....	563
7.5.2.3 Silos in Silobatterien .....	565
7.5.3 Ansatz der Dämpfung für Silos .....	567
7.5.3.1 Strukturdämpfung .....	567
7.5.3.2 Dämpfung des Untergrunds .....	567
7.5.3.3 Dämpfung des Schüttguts .....	567
7.5.3.4 Ansatz einer gewichteten Dämpfung .....	567
7.5.4 Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion .....	568
7.5.5 Berechnungsbeispiel: Schlankes Silo .....	568
7.5.5.1 Beanspruchungen infolge Fülllasten .....	569
7.5.5.2 Beanspruchung infolge Erdbeben für konstanten Beschleunigungsverlauf.....	571
7.5.5.3 Beanspruchung infolge Erdbeben für veränderlichen Beschleunigungsverlauf .....	573
7.5.5.3 Beanspruchung infolge Erdbeben mit vereinfachtem Berechnungsansatz .....	576
7.5.6 Berechnungsbeispiel: Gedrungenes Silo .....	578
7.5.7 Numerische Simulation .....	584
7.5.8 Vergleich der Verfahren .....	587
<b>7.6 Tankbauwerke .....</b>	<b>589</b>
7.6.1 Einleitung .....	589
7.6.2 Grundlagen: Zylindrische Tankbauwerke unter Erdbebenbelastung .....	590
7.6.3 Eindimensionale horizontale Erdbebeneinwirkung .....	594
7.6.3.1 Konvektiver Druckanteil (Schwappen).....	594
7.6.3.2 Impulsiv starrer Druckanteil (Starrkörperverschiebung).....	596
7.6.3.3 Impulsiv flexibler Druckanteil (Biegeschwingung) .....	598
7.6.3.4 Praxisbezogene Vereinfachung der Druckanteile durch tabellierte Faktoren.....	604
7.6.3.5 Überlagerung der Druckanteile für eindimensionale horizontale Anregung .....	609
7.6.4 Vertikale Erdbebeneinwirkung.....	610
7.6.4.1 Impulsiv starrer Druckanteil infolge vertikaler Erdbebenanregung .....	610
7.6.4.2 Impulsiv flexibler Druckanteil infolge vertikaler Erdbebenanregung .....	611
7.6.4.3 Überlagerung der Druckanteile für vertikale Erdbebenanregung.....	615
7.6.5 Überlagerung der Anteile für die dreidimensionale Erdbebenanregung.....	615
7.6.6 Aufstellung der Spektren für das Antwortspektrenverfahren .....	617
7.6.7 Fundamentschub und Umsturzmomente .....	618
7.6.7.1 Berechnung durch Integration der Druckfunktionen.....	618
7.6.7.2 Vereinfachter Ansatz nach DIN EN 1998-4 (2007), Anhang A.3.2.2 .....	622
7.6.7.3 Näherungsverfahren nach Housner .....	624
7.6.8 Weitere Lastfälle zur Bemessung von Tanks .....	629
7.6.8.1 Lasten aus Eigengewicht.....	629
7.6.8.2 Hydrostatischer Druck .....	629

7.6.8.3 Wind.....	629
7.6.8.4 Schnee.....	630
7.6.8.5 Lasten aus Setzungen.....	630
7.6.8.6 Temperaturbelastung.....	630
7.6.8.7 Vorspannung.....	630
7.6.8.8 (Gas-) Innendruck.....	630
7.6.8.9 Überlagerung der einzelnen Lastfälle.....	630
<b>7.6.9 Berechnungsbeispiel 1: Schlanker Tank.....</b>	<b>630</b>
7.6.9.1 Objektbeschreibung.....	631
7.6.9.2 FE-Modellierung des Tanks.....	632
7.6.9.3 Berechnung der Druckkurven.....	632
7.6.9.4 Fundamentschub und Umsturzmomente mit genauen Druckkurven.....	636
7.6.9.5 Fundamentschub und Umsturzmomente mit tabellierten Druckkurven.....	636
7.6.9.6 Fundamentschub und Umsturzmomente nach Housner.....	637
7.6.9.7 Fundamentschub und Umsturzmomente nach Gehrig (2004).....	640
7.6.9.8 Ergebnisvergleich der Verfahren für Fundamentschub und Umsturzmomente.....	641
7.6.9.9 Beurteilung der Spannungen in der Tankschale.....	642
<b>7.6.10 Berechnungsbeispiel 2: Tank mittlerer Schlankheit.....</b>	<b>644</b>
7.6.10.1 Objektbeschreibung.....	644
7.6.10.2 FE-Modellierung des Tanks.....	645
7.6.10.3 Fundamentschub und Umsturzmomente mit tabellierten Vorfaktoren.....	645
7.6.10.4 Fundamentschub und Umsturzmomente nach DIN EN 1998-4 (2007).....	648
7.6.10.5 Ergebnisvergleich und Diskussion.....	649
7.6.11 Fazit.....	651
7.6.12 Anhang: Tabellen der einzelnen Druckanteile.....	652
<b>8 ABSPERRBAUWERKE.....</b>	<b>661</b>
<b>8.1 Standsicherheitsnachweise für Erddämme.....</b>	<b>661</b>
8.1.1 Standsicherheitsnachweise.....	661
8.1.1.1 Pseudostatisches Verfahren.....	663
8.1.1.2 Dynamische Verfahren.....	664
8.1.2 Berechnung der Gleitsicherheit mit Hilfe der Finite-Elemente Methode.....	665
8.1.2.1 Berechnung des Sicherheitsfaktors.....	665
8.1.2.2 Gleitkreis der geringsten Sicherheit.....	666
8.1.3 Berechnungsbeispiel.....	670
8.1.3.1 Modellbildung.....	670
8.1.3.2 Lastfall Eigengewicht.....	672
8.1.3.3 Lastfall Wassereinstau.....	673
8.1.3.4 Nachweis der Böschungsbruchsicherheit für den Lastfall Wassereinstau.....	673
8.1.3.5 Lastfall Erdbeben.....	674
<b>9 ANHANG - PROGRAMMBESCHREIBUNGEN.....</b>	<b>679</b>
<b>9.1 Übersicht.....</b>	<b>679</b>
<b>9.2 Programmbeschreibungen.....</b>	<b>682</b>
<b>SACHWORTVERZEICHNIS.....</b>	<b>713</b>