

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

Bauwerke und Erdbeben

Grundlagen – Anwendung – Beispiele

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

VORWORT ZUR ERWEITERTEN DRITTEN 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 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	149
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
2.8 Seismologische Praxis.....	163
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
2.9 Beispiele typischer Erdbebenschäden.....	175
3 SEISMISCHE BEANSPRUCHUNG VON KONSTRUKTIONEN.....	189
3.1 Rechenverfahren.....	189
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
3.2 Asynchrone multiple seismische Erregung.....	246
3.3 Boden-Bauwerk Interaktion.....	255
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
4 ERDBEBENBEMESSUNG VON BAUWERKEN NACH DIN 4149 UND DIN EN 1998-1.....	273
4.1 Inhaltliche Erläuterung der DIN 4149.....	273

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
4.1.7	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

4.2 Inhaltliche Unterschiede zwischen DIN 4149 und DIN EN 1998-1	318
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
4.3 Rechenbeispiele zur DIN 4149 und DIN EN 1998-1	330
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 Modellaufbau	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	Stand sicherheitsnachweis 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
5	SEISMISCHE VULNERABILITÄT BESTEHENDER BAUWERKE.....	417
5.1	Grundlegendes Beurteilungskonzept	417
5.2	Bauwerksschädigung.....	417
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
5.3 Seismische Gefährdung.....	421
5.3.1 Klassifizierungsparameter	421
5.3.2 Seismische Gefährdungskurven.....	422
5.4 Methoden zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität	423
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
5.5 Integriertes Gesamtkonzept.....	432
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

6 MAUERWERKSBAUTEN.....	469
6.1 Verhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung	469
6.1.1 Versagensformen von Mauerwerkscheiben unter seismischer Belastung	469
6.1.2 Wand-Decken und Wand-Wand Interaktion	472
6.1.3 Zusammenwirken der Schubwände	477
6.2 Rechenverfahren für Mauerwerksbauten	478
6.3 Berechnungsmodelle für Mauerwerksbauten	479
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
6.4 Beanspruchungen senkrecht zur Wandebene	484
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
6.5 Ermittlung von Last-Verformungskurven für Schubwände	493
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
6.6 Verformungsbasierte Bemessung von Mauerwerksbauten	504
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
6.7 Berechnungsbeispiele für den statisch nichtlinearen Nachweis.....	513
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

7 BAUWERKE UND KOMPONENTEN IM ANLAGENBAU	531
7.1 Einführung	531
7.2 Sicherheitskonzept auf Grundlage von Bedeutungsbeiwerten	532
7.3 Auslegung der Primärstruktur	534
7.4 Sekundärstrukturen	538
7.4.1 Berechnungsansätze	538
7.4.2 Berechnungsbeispiel für einen Behälter in einer fünfstöckigen Anlage	546
7.5 Silobauwerke	553
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
7.5.5.1 Beanspruchung infolge Erdbeben für konstanten Beschleunigungsverlauf	571
7.5.5.2 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
7.6 Tankbauwerke	589
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 Fundamentalschub 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
7.6.9 Berechnungsbeispiel 1: Schlanker Tank	630
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
7.6.10 Berechnungsbeispiel 2: Tank mittlerer Schlankheit	644
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
8 ABSPERRBAUWERKE.....	661
8.1 Standsicherheitsnachweise für Erddämme	661
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
9 ANHANG - PROGRAMMBESCHREIBUNGEN.....	679
9.1 Übersicht	679
9.2 Programmbeschreibungen.....	682
SACHWORTVERZEICHNIS.....	713