

Jost A. Studer · Jan Laue · Martin G. Koller

# Bodendynamik

Grundlagen, Kennziffern, Probleme  
und Lösungsansätze

3., völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 221 Abbildungen und 29 Tabellen

 Springer

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	XIII
<b>1 Einführung</b> . . . . .	1
1.1 Bodendynamische Problemstellungen . . . . .	1
1.2 Unterschied zwischen Bodendynamik und klassischer Bodenmechanik . . . . .	2
1.3 Elemente bodendynamischer Untersuchungen . . . . .	4
1.4 Hinweis für den Gebrauch des Buches . . . . .	5
<b>2 Grundlagen der Schwingungslehre</b> . . . . .	6
2.1 Bewegungsdifferenzialgleichung . . . . .	6
2.2 Eigenschwingung . . . . .	7
2.2.1 Ungedämpfter Einmassenschwinger . . . . .	8
2.2.2 Gedämpfter Einmassenschwinger . . . . .	10
2.3 Harmonische Anregung . . . . .	11
2.3.1 Ungedämpfter Einmassenschwinger . . . . .	12
2.3.2 Gedämpfter Einmassenschwinger . . . . .	13
2.3.3 Gedämpfter Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung . . . . .	15
2.3.4 Zusammenfassung der wichtigsten Formeln . . . . .	17
2.4 Schwingungsisolaton . . . . .	17
2.5 Stoßartige Belastung . . . . .	19
2.5.1 Rechteckförmiger Stoß . . . . .	20
2.5.2 Stoß-Antwortspektren . . . . .	21
2.6 Allgemeine Belastung . . . . .	21
2.7 Nichtlineare Systeme . . . . .	24
2.8 Dämpfungsarten . . . . .	27
<b>3 Wellenausbreitung</b> . . . . .	29
3.1 Eindimensionale Wellenausbreitung . . . . .	31
3.1.1 Schubträger . . . . .	31
3.1.2 Allgemeine Wellengleichung . . . . .	33
3.1.3 Anwendungsbeispiel . . . . .	37

3.2 Wellenausbreitung im elastischen Raum . . . . .	40
3.2.1 Herleitung der Bewegungsgleichung . . . . .	40
3.2.2 Lösungen der dreidimensionalen Bewegungsgleichung . . . . .	42
3.3 Wellenausbreitung im elastischen Halbraum . . . . .	43
3.3.1 Rayleigh-Wellen . . . . .	43
3.3.2 Wellen im geschichteten Halbraum . . . . .	45
3.4 Wellenausbreitung in nicht idealen Verhältnissen . . . . .	45
3.4.1 Einfluss der Schichtung auf das Wellenbild . . . . .	45
3.4.2 Wellenausbreitung in Gemischen von Wasser und Festschubstanz . . . . .	46
3.4.3 Wellenausbreitung in porösen, gesättigten Materialien . . . . .	48
3.4.4 Einfluss des Grundwasserspiegels . . . . .	49
3.4.5 Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in wichtigen Böden und Gesteinsarten . . . . .	50
<b>4 Dynamische Bodenkennziffern . . . . .</b>	<b>51</b>
4.1 Bodenmodelle . . . . .	51
4.1.1 Einflussparameter . . . . .	52
4.1.2 Elastische und elasto-plastische Bodenmodelle . . . . .	53
4.1.3 Deformationsverhalten – Bruchverhalten . . . . .	57
4.2 Linear äquivalente Bodenkennziffern . . . . .	58
4.2.1 Sand . . . . .	62
4.2.2 Kies-Sand . . . . .	67
4.2.3 Tonige Böden . . . . .	70
4.2.4 Fels . . . . .	77
4.2.5 Abschließende Bemerkungen . . . . .	78
4.3 Festigkeitseigenschaften unter dynamischer Belastung . . . . .	78
4.3.1 Übersicht . . . . .	78
4.3.2 Entwicklung von Verformungen . . . . .	79
4.4 Konzeption von Untersuchungsprogrammen . . . . .	84
4.5 Feldmethoden . . . . .	86
4.5.1 Reflexions-Seismik . . . . .	91
4.5.2 Refraktions-Seismik . . . . .	92
4.5.3 Hybridseismik . . . . .	94
4.5.4 Oberflächenwellenbasierende Methoden . . . . .	94
4.5.5 Crosshole-Seismik . . . . .	97
4.5.6 Downhole- und Uphole-Seismik . . . . .	99
4.5.7 Seismische Tomographie . . . . .	101
4.5.8 Wasserkanone (Beispiel für dyn. Plattenversuch) . . . . .	102
4.6 Laborversuche . . . . .	103
4.6.1 Resonant-Column-Versuch . . . . .	104
4.6.2 Ultraschallmessungen . . . . .	106
4.6.3 Zyklischer Scherversuch . . . . .	108
4.6.4 Zyklischer Triaxialversuch . . . . .	109
4.6.5 Zyklischer Torsionsversuch . . . . .	112

4.7 Vergleich von Feld- und Labordaten . . . . .	114
4.8 Das Phänomen Bodenverflüssigung . . . . .	117
4.8.1 Übersicht und Definition . . . . .	117
4.8.2 Berechnung des Verflüssigungspotenzials . . . . .	121
4.8.3 Granulare Böden . . . . .	124
4.8.4 Tonige Böden . . . . .	129
4.8.5 Mischböden . . . . .	130
4.8.6 Feldversuche zur Bestimmung des Verflüssigungspotenzials . . . . .	131
4.8.7 Laborversuche zur Bestimmung des Verflüssigungspotenzials . . . . .	135
4.9 Zentrifugenmodellversuche zur Untersuchung des Systemverhaltens . . . . .	139
<b>5 Erschütterungen . . . . .</b>	<b>142</b>
5.1 Ausbreitung von Erschütterungen . . . . .	142
5.1.1 Erschütterungsausbreitung bei Verkehrsträgern . . . . .	144
5.1.2 Ausbreitung von Sprengerschütterungen . . . . .	151
5.1.3 Ausbreitung von Erschütterungen infolge Maschinen in Industrieanlagen . . . . .	152
5.2 Beurteilung der Erschütterungen . . . . .	153
5.2.1 Schäden an Bauwerken . . . . .	154
5.2.2 Belästigung des Menschen . . . . .	158
5.2.3 Grenzwerte für Geräte . . . . .	163
5.3 Erschütterungsreduktion . . . . .	164
5.3.1 Bauliche Maßnahmen bei der Quelle . . . . .	164
5.3.2 Bauliche Maßnahmen auf dem Übertragungsweg . . . . .	166
5.3.3 Maßnahmen beim Empfänger . . . . .	169
<b>6 Dynamisch belastete Fundamente . . . . .</b>	<b>171</b>
6.1 Maschinenfundamente . . . . .	171
6.1.1 Generelle Gesichtspunkte beim Entwurf . . . . .	171
6.1.2 Modellbildung . . . . .	172
6.1.2.1 Modellbildung für starre Fundamente . . . . .	173
6.1.3 Lösungsmethoden für Fundamente auf dem elastischen Halbraum . . . . .	175
6.1.3.1 Einmassenschwinger-Analogon . . . . .	178
6.1.3.2 Lösungsmethode mit Impedanzfunktionen . . . . .	181
6.1.3.3 Methoden zur Berechnung von Impedanzfunktionen . . . . .	185
6.1.3.4 Dynamische Berechnung eines starren Fundamentes mittels Impedanzfunktion . . . . .	186
6.1.3.5 Verfeinerte physikalische Modelle . . . . .	189
6.1.4 Diagramme für die Berechnung von Maschinenfundamenten . . . . .	191
6.1.4.1 Resonanzkurven für das Einmassenschwinger-Analogon . . . . .	191
6.1.4.2 Impedanzfunktionen . . . . .	196
6.1.5 Fundamentschwingungen auf realem Boden . . . . .	206

6.1.6	Kriterien beim Entwurf eines Maschinenfundamentes . . .	206
6.2	Bleibende Verformungen und Veränderungen der Tragfähigkeit .	208
6.2.1	Allgemeines . . . . .	208
6.2.2	Entscheidungskriterien unabhängig von der Gründungsart	210
6.2.3	Akkumulation von vertikalen Verformungen bei Flachfundamenten . . . . .	212
6.2.4	Pfahlfundationen . . . . .	216
6.2.5	Einfluss des Porenwasserdruckes . . . . .	221
6.2.6	Abschließende Bemerkungen . . . . .	223
<b>7</b>	<b>Geotechnisches Erdbebeningenieurwesen . . . . .</b>	<b>224</b>
7.1	Erdbeben . . . . .	224
7.1.1	Wirkung von Erdbeben . . . . .	224
7.1.2	Grundlagen und Begriffe . . . . .	225
7.2	Erdbebenerschütterung am Bauwerksstandort . . . . .	236
7.2.1	Herd- und Wellenausbreitungseinflüsse . . . . .	237
7.2.2	Einfluss der Baugrundeigenschaften . . . . .	240
7.3	Vorgehenskonzepte zur Ermittlung von Erdbebenbemessungs- größen . . . . .	253
7.3.1	Seismotektonisches Modell . . . . .	254
7.3.2	Deterministische Methoden: Konzept, Vor- und Nachteile	257
7.3.3	Probabilistische Methoden: Konzepte, Vor- und Nachteile	259
7.3.4	Ermittlung der Bemessungsgrößen $a_{max}$ , Antwortspektrum, Dauer der Starkbebenphase . . . . .	267
7.3.5	Zeitverläufe für nichtlineare Berechnungen . . . . .	273
7.3.6	Durch menschliche Aktivitäten induzierte seismische Ereignisse . . . . .	275
7.4	Dynamische Boden-Bauwerk-Interaktion . . . . .	277
7.4.1	Wesen und Bedeutung der Boden-Bauwerk-Interaktion . .	277
7.4.2	Berechnungsmethoden . . . . .	279
7.4.3	Einfaches Modell für die Berechnung der Boden- Bauwerk-Interaktion . . . . .	281
7.5	Erdbebenbemessung von Foundationen und Stützkörpern . . . .	286
7.5.1	Grundsätze zur Standortwahl . . . . .	286
7.5.2	Flachfundationen . . . . .	287
7.5.3	Tieffundationen . . . . .	287
7.5.4	Erdbebenbemessung von Stützwänden und Widerlagern von Brücken . . . . .	289
7.5.5	Einfluss des Wassers . . . . .	293
7.5.6	Deformationsberechnungen . . . . .	293
7.6	Baugrundverbesserungen . . . . .	293
7.7	Böschungstabilität unter Erdbebenlasten . . . . .	298
7.7.1	Berechnung der bleibenden Deformationen infolge von Trägheitskräften . . . . .	299
7.8	Erdbebensicherheit von Erd- und Steinschüttdämmen . . . . .	304

7.8.1	Einleitung . . . . .	304
7.8.2	Erdbebenverletzlichkeit von Erd- und Steinschüttdämmen und Maßnahmen zu deren Verringerung . . . . .	306
7.8.3	Erdbebenschäden bei Erd- und Steinschüttdämmen . . . . .	307
7.8.4	Wahl der Berechnungsmethode . . . . .	308
7.8.5	Untersuchung des Verflüssigungspotenzials . . . . .	309
7.8.6	Berechnung der bleibenden Deformationen infolge von Trägheitskräften . . . . .	311
7.9	Mikrozonierung . . . . .	311
7.9.1	Einführung . . . . .	311
7.9.2	Durch den Baugrund verursachte Versagensarten . . . . .	318
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>323</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>337</b>