

Hans-Jürgen Lang · Jachen Huder · Peter Amann

# Bodenmechanik und Grundbau

Das Verhalten von Böden und Fels  
und die wichtigsten  
grundbaulichen Konzepte

Sechste, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 353 Abbildungen und 67 Tabellen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe</b> .....	<b>1</b>
1.1	Einführung .....	1
1.2	Die Korngrößenverteilung .....	1
1.3	Die Kenngrößen des Naturzustandes .....	3
1.4	Weitere, abgeleitete Kenngrößen .....	4
1.5	Die Lagerungsdichte $D$ .....	4
1.6	Der Durchlässigkeitsbeiwert $k$ .....	5
1.7	Die Plastizitätseigenschaften der Böden .....	6
1.8	Die Liquiditätszahl $I_L$ .....	7
1.9	Die Aktivitätszahl $I_A$ .....	8
1.10	Die Struktur der Böden .....	8
1.11	Klassifikation der Böden .....	10
<b>2</b>	<b>Totale und effektive Spannungen</b> .....	<b>13</b>
2.1	Einführung .....	13
2.2	Spannungen im elastisch-isotropen Halbraum .....	13
2.3	Totale Spannung, Porenwasserdruck und effektive Spannung .....	15
2.4	Spannungsänderungen und Porenwasserüberdruck .....	17
2.5	Porenwasserdruck im teilweise gesättigten Boden .....	18
2.6	Spannungsverhältnisse in unbelasteten und belasteten geschichteten Böden .....	20
2.7	Der Ruhedruck .....	22
2.8	Spannungen durch Kapillarkräfte .....	23
<b>3</b>	<b>Spannungsausbreitung im Boden</b> .....	<b>25</b>
3.1	Einführung .....	25
3.2	Einfluß einer vertikalen Einzelkraft $P$ .....	26
3.3	Einfluß einer horizontalen Einzelkraft $H$ .....	28
3.4	Einfluß von Linienlasten .....	29
3.5	Unendlich lange Streifenlasten .....	29
3.6	Allgemeine Flächenlasten .....	31
3.7	Berechnung mit Hilfstafeln .....	33
3.8	Berechnung mit Einflußkarten .....	33
3.9	Randbedingungen in der Natur .....	35

<b>4</b>	<b>Künstliche Verdichtung von Böden</b> .....	<b>36</b>
4.1	Einführung .....	36
4.2	Die Zustandsdarstellung .....	37
4.3	Die Proctor-Kurve .....	37
4.4	Einfluß der Bodenart .....	38
4.5	Eigenschaften des verdichteten Bodens .....	39
4.6	Verdichtungskontrolle .....	41
4.7	Beurteilung der Brauchbarkeit gegebener Böden als Dammschüttmaterial .....	42
4.8	Böden mit Überkorn .....	42
4.9	Beeinflussung des Wassergehaltes .....	44
4.10	Auswirkungen der Verdichtung auf den Spannungszustand im Boden .....	45
4.11	Maschinelle Verdichtung .....	47
<b>5</b>	<b>Die Formänderungseigenschaften der Böden</b> .....	<b>48</b>
5.1	Das Verhalten eines elastischen Materials und von Böden .....	48
5.2	Der Zusammendrückungsmodul $M_E$ bzw. $E_v$ und der Steifemodul $E_s$ .....	50
5.3	Der Ödometerversuch: Das Zusammendrückungs- diagramm .....	51
5.4	Der Kompressionsbeiwert $C_c$ .....	52
5.5	Normal und überkonsolidierte Böden .....	53
5.6	Die Zeit-Setzungs-Kurve aus dem Ödometerversuch .....	54
5.7	Der Konsolidationsgrad $U$ .....	55
5.8	Die Konsolidationstheorie .....	55
5.9	Die Verteilung der Porenwasserüberdrücke innerhalb der konsolidierenden Tonschicht .....	59
5.10	Näherungsverfahren für beliebige Randbedingungen .....	61
5.11	Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k$ von gesättigten Tonen .....	62
5.12	Mehrdimensionale Konsolidation .....	62
5.13	Mehrschichtprobleme .....	63
5.14	Nicht-plötzliche Belastung .....	65
5.15	Beschleunigung des Konsolidationsvorganges .....	66
5.16	Kontrollen des Konsolidationsvorganges .....	66
5.17	Deformationen, deren Verlauf nicht mittels der Konsolidationstheorie ermittelt werden kann .....	68
<b>6</b>	<b>Festigkeitseigenschaften der Böden</b> .....	<b>69</b>
6.1	Einführung .....	69
6.2	Das Bruchgesetz von Mohr-Coulomb .....	69
6.3	Die Darstellung des Bruchkriteriums im $p',q$ -Diagramm .....	70
6.4	Versuche zur experimentellen Ermittlung der Schерparameter .....	71
6.5	Das Prinzip des triaxialen Scherversuches .....	73
6.6	Der triaxiale KD-Versuch .....	74

6.7	Der triaxiale KU-Versuch .....	74
6.8	Scherfestigkeit körniger Böden .....	75
6.9	Scherfestigkeit bindiger Böden (Tone) .....	77
6.10	Grenzgleichgewichtszustände .....	80
6.11	Scherdeformationen von Böden .....	81
6.12	Abschätzen des Scherwinkels $\varphi'$ .....	82
<b>7</b>	<b>Einflüsse des Grundwassers im Boden .....</b>	<b>85</b>
7.1	Das Strömungsnetz .....	85
7.2	Die Bestimmung des $k$ -Wertes .....	87
7.3	Wasserdrücke im ruhenden Grundwasser .....	90
7.4	Der Strömungsdruck .....	91
7.5	Der Druckabbau beim Durchströmen von Schichtpaketen, bestehend aus Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit .....	92
7.6	Die Anisotropie geschichteter Böden .....	93
7.7	Wasserdrücke im strömenden Grundwasser .....	94
7.8	Der hydraulische Grundbruch .....	96
7.9	Verminderung des Druckes im Grundwasser (Entspannung) .....	99
7.10	Meßsysteme zur Messung des Potentials .....	100
7.11	Wasserhaltung in Baugruben .....	103
7.12	Innere Erosion und Filter .....	103
<b>8</b>	<b>Setzungsberechnung .....</b>	<b>105</b>
8.1	Einführung .....	105
8.2	Prinzip der Setzungsberechnung .....	105
8.3	Setzungsberechnung in Tabellenform .....	107
8.4	Einflußtiefe der Zusatzbelastung .....	108
8.5	Berücksichtigung von kombinierten Be- und Entlastungen .....	109
8.6	Auftrieb und Gebäudegewicht .....	110
8.7	Gewichtsausgleich .....	111
8.8	Vorbelastung .....	111
8.9	Überbelastung .....	112
8.10	Schlaffe und starre Lasten .....	114
8.11	Setzungsdifferenzen .....	115
8.12	Zulässige Setzungen und Setzungsdifferenzen .....	116
8.13	Schwerpunktverlagerung und Stabilität von hohen Bauwerken .....	117
<b>9</b>	<b>Stabilitätsprobleme .....</b>	<b>118</b>
9.0	Problemstellung .....	118
9.1	Böschungstabilität .....	118
9.1.1	Einführung .....	118
9.1.2	Vereinfachungen gegenüber der Natur .....	120

## XII Inhaltsverzeichnis

9.1.3	Die schwedische Methode der Stabilitätsberechnung . . .	121
9.1.4	Die Einflüsse des Wassers . . . . .	123
9.1.5	Das vereinfachte Verfahren nach Bishop . . . . .	125
9.1.6	Das vereinfachte Verfahren nach Janbu . . . . .	126
9.1.7	Die Praxis der Stabilitätsberechnung . . . . .	127
9.1.8	Die unendlich lange Böschung in einem Reibungsmaterial . . . . .	128
9.1.9	Hilfsmittel zur Ermittlung der Standsicherheit einfacher Böschungen im homogenen Boden . . . . .	129
9.1.10	Geometrie des Bruches; andere Methoden . . . . .	131
9.1.11	Einführung von Ankerkräften in die Stabilitäts- berechnung . . . . .	131
9.2	Tragfähigkeit . . . . .	131
9.2.1	Einführung . . . . .	131
9.2.2	Die allgemeine Tragfähigkeitsformel . . . . .	132
9.2.3	Die Tragfähigkeitsfaktoren $N_c$ , $N_q$ und $N_\gamma$ . . . . .	133
9.2.4	Allgemeines und örtliches Abscheren . . . . .	134
9.2.5	Einflüsse des Porenwasserdruckes . . . . .	134
9.2.6	Größe der Sicherheit $F_{stat}$ . . . . .	135
9.2.7	Andere Randbedingungen . . . . .	135
9.2.8	Exzentrizität des Lastangriffes . . . . .	136
9.2.9	Formfaktoren $s$ . . . . .	137
9.2.10	Tiefenfaktoren $d$ . . . . .	137
9.2.11	Lastneigungsfaktoren $i$ . . . . .	137
9.2.12	Geländeneigungsfaktoren $g$ . . . . .	138
9.2.13	Fundamentneigungsfaktoren $b'$ . . . . .	138
9.2.14	Undrainierte Belastung ( $\varphi = 0$ ) . . . . .	139
9.2.15	Ableiten des Fundamentes auf der Fundamentsohle . .	140
9.2.16	Der Begriff der „zulässigen Bodenpressung“ . . . . .	140
9.3	Erddruck . . . . .	141
9.3.1	Einführung . . . . .	141
9.3.2	Deformationen und Erddruck . . . . .	141
9.3.3	Verteilung des Erddruckes . . . . .	142
9.3.4	Der Erddruck als Stabilitätsproblem . . . . .	143
9.3.5	Der Einfluß der Kohäsion . . . . .	145
9.3.6	Der Einfluß von Auflasten auf dem Gelände . . . . .	146
9.3.7	Allgemeine Randbedingungen . . . . .	147
9.3.8	Graphische Ermittlung des Erddruckes . . . . .	148
9.3.9	Die freie Standhöhe $h_c$ . . . . .	150
9.3.10	Erddruck in geschichteten Böden . . . . .	150
9.3.11	Erddruck auf eine Winkelstützmauer . . . . .	151
9.3.12	Abschirmung des Erddruckes . . . . .	152
9.3.13	Einfluß des Wassers auf den Erddruck . . . . .	153
9.3.14	Erddruck-Umlagerung . . . . .	153
9.3.15	Gewölbewirkung . . . . .	154
<b>10</b>	<b>Vertikale Baugrubenabschlüsse . . . . .</b>	<b>157</b>
10.1	Problemstellung . . . . .	157
10.2	Übersicht über die wichtigsten Wandsysteme . . . . .	157

10.3	Belastungen der Wände .....	161
10.4	Bauzustände .....	163
10.5	Die nicht abgestützte, im Boden eingespannte Wand ...	164
10.6	Die einfach abgestützte Wand .....	166
10.7	Mehrfach abgestützte Wand .....	171
10.8	Erdwiderstand vor schmalen Druckflächen .....	172
10.9	Systemsicherheit und Abstützungen .....	173
<b>11</b>	<b>Die Sohldruckverteilung unter Fundamenten .....</b>	<b>174</b>
11.1	Einführung .....	174
11.2	Allgemeiner Grundsatz .....	174
11.3	Die relative Steifigkeit $K$ .....	175
11.4	Das Spannungstrapezverfahren .....	176
11.5	Das Bettungsmodulverfahren (Bettungszifferverfahren) ..	177
11.6	Der Bettungsmodul $k_s$ .....	179
11.7	Das Steifezahlverfahren .....	181
11.8	Bemerkungen zu den Verfahren .....	182
11.9	Das starre Fundament .....	184
<b>12</b>	<b>Tiefgründung .....</b>	<b>186</b>
12.1	Einführung .....	186
12.2	Baugrundverbesserung .....	186
12.3	Pfahlarten .....	188
12.4	Der Lasttransport in Pfählen .....	189
12.5	Die Abschätzung von Spitzenwiderstand und Mantelreibung .....	190
12.6	Die negative Mantelreibung .....	191
12.7	Rammpfähle in sensitiven Böden .....	193
12.8	Die Setzung von Einzelpfählen .....	194
12.9	Die Gruppenwirkung .....	196
12.10	Die horizontale Belastung von Pfählen .....	197
<b>13</b>	<b>Sicherheitsüberlegungen .....</b>	<b>199</b>
13.1	Einführung .....	199
13.2	Stabilitätsprobleme .....	200
13.3	Böschungsstabilität .....	203
13.4	Tragfähigkeit von Fundamenten .....	204
13.5	Erddruckprobleme .....	205
13.6	Ableiten und Kippen von Fundamenten .....	208
13.7	Hydraulischer Grundbruch .....	208
13.8	Auftriebssicherheit von Bauwerken .....	208
13.9	Deformationen (Setzungen) .....	209
13.10	Zusammenfassung .....	209

<b>14</b>	<b>Ausgewählte Beispiele</b> .....	210
14.0	Einführung .....	210
14.1	Die einfach abgestützte Wand: Einflüsse des Wassers . . . .	210
14.2	Hydraulischer Grundbruch und Auftrieb .....	218
14.3	Der Einfluß der Spannungsgeschichte am Beispiel der Vorbelastung .....	220
14.4	Stabilitätsberechnung nach Janbu .....	226
14.5	Einfluß von Auflasten und Kohäsion auf Erddrücke . . . .	231
<b>15</b>	<b>Tropische Böden</b> .....	236
15.1	Einführung .....	236
15.2	Das Residualprofil .....	237
15.3	Die Verwitterung .....	237
15.4	Neubildungen .....	238
15.5	Die Klassifikation tropischer Böden .....	238
15.6	Die äußeren Einflüsse als Systembestandteil .....	239
15.7	Die Erosion .....	240
<b>16</b>	<b>Boden und Fels</b> .....	245
16.1	Einführung .....	245
16.2	Grundeigenschaften von Boden und Fels .....	246
16.3	Trennflächengefüge und Gefügemodell .....	248
16.4	Lösen und Verdichten von Fels .....	248
16.5	Formänderungseigenschaften von Fels .....	248
16.6	Festigkeitseigenschaften von Fels .....	252
16.7	Eigenstressungen im Gebirge .....	253
<b>17</b>	<b>Beispiele</b> .....	255
17.0	Einführung .....	255
17.1	Kenngrößen für Böden .....	255
17.2	Kenngrößen des Naturzustandes, Volumenbilanz .....	257
17.3	Totale und effektive Spannungen .....	258
17.4	Festigkeitseigenschaften und einfachste Stabilitäts- berechnung .....	260
17.5	Undrainierte Scherfestigkeit $s_u$ .....	262
17.6	Künstliche Verdichtung .....	262
17.7	Setzungsberechnung, Kompressionsbeiwert $C_c$ .....	263
17.8	Setzungsberechnung, Spannungsgeschichte .....	266
17.9	Eindimensionale Konsolidation .....	268
17.10	Hydraulische Aspekte einer Baugrube .....	269
17.11	Sohlpressung von Fundamenten .....	271
17.12	Stabilitätsberechnung, Einfluß von Porenwasser- überdrücken .....	273
17.13	Stabilitätsfaktoren .....	276
17.14	Erddruck und Tragfähigkeit .....	277
17.15	Pfahlfundation .....	279

17.16	Nicht abgestützte vertikale Wand	280
17.17	Einfach abgestützte vertikale Wand	282
17.18	Mehrfach abgestützte vertikale Wand	283
<b>Anhang</b>		<b>287</b>
Tabellen A bis E	Spannungsverteilungen im Baugrund	287
Tabelle F	Setzung des kennzeichnenden Punktes K	291
Tabelle G	Sohlpressungen unter einer Fundamentplatte	292
Tabellen H <sub>1</sub> bis H <sub>8</sub>	Konsolidation	293
Tabellen I <sub>0</sub> bis I <sub>9</sub>	Einfluß von Belastungen auf der Bodenoberfläche auf die Größe von Erddruckspannungen	300
Tabellen K <sub>1</sub> bis K <sub>12</sub>	Einfluß der Kohäsionen auf die Größe von Erddruckspannungen	307
<b>Literatur</b>		<b>311</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>317</b>