

Hans-Jürgen Lang · Jachen Huder  
Peter Amann · Alexander M. Puzrin

# Bodenmechanik und Grundbau

Das Verhalten von Böden und Fels  
und die wichtigsten  
grundbaulichen Konzepte

8., ergänzte Auflage

Mit 364 Abbildungen und 42 Tabellen



# 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 .....	3
1.5	Die Lagerungsdichte $D$ .....	4
1.6	Der Durchlässigkeitsbeiwert $k$ .....	4
1.7	Die Plastizitätseigenschaften der Böden .....	6
1.8	Die Liquiditätszahl $I_L$ .....	6
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.....	19
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>37</b>
4.1	Einführung .....	37
4.2	Die Zustandsdarstellung .....	38
4.3	Die Proctorkurve .....	38
4.4	Einfluss der Bodenart .....	39

4.5	Eigenschaften des verdichteten Bodens .....	40
4.6	Verdichtungskontrolle .....	42
4.7	Beurteilung der Brauchbarkeit gegebener Böden als Dammschüttmaterial .....	43
4.8	Böden mit Überkorn .....	43
4.9	Beeinflussung des Wassergehaltes .....	45
4.10	Auswirkungen der Verdichtung auf den Spannungszustand im Boden .....	46
4.11	Maschinelle Verdichtung.....	48
<b>5</b>	<b>Formänderungseigenschaften der Böden</b>	<b>49</b>
5.1	Das Verhalten eines elastischen Materials und von Böden..	49
5.2	Der Zusammendrückungsmodul $M_E$ bzw. $E_v$ und der Steifemodul $E_s$ .....	51
5.3	Der Ödometerversuch: Das Zusammendrückungsdiagramm .....	52
5.4	Der Kompressionsbeiwert $C_c$ .....	53
5.5	Normal und überkonsolidierte Böden.....	54
5.6	Die Zeit-Setzungs-Kurve aus dem Ödometerversuch.....	55
5.7	Der Konsolidationsgrad $U$ .....	56
5.8	Die Konsolidationstheorie.....	56
5.9	Die Verteilung der Porenwasserüberdrücke innerhalb der konsolidierenden Tonschicht .....	60
5.10	Näherungsverfahren für beliebige Randbedingungen.....	61
5.11	Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k$ von gesättigten Tonen.....	63
5.12	Mehrdimensionale Konsolidation.....	63
5.13	Mehrschichtprobleme.....	65
5.14	Nichtplötzliche Belastung.....	66
5.15	Beschleunigung des Konsolidationsvorganges.....	67
5.16	Kontrollen des Konsolidationsvorganges .....	68
5.17	Deformationen, deren Verlauf nicht mittels der Konsolidationstheorie ermittelt werden kann .....	68
<b>6</b>	<b>Festigkeitseigenschaften der Böden</b>	<b>71</b>
6.1	Einführung .....	71
6.2	Das Bruchgesetz von Mohr-Coulomb .....	71
6.3	Die Darstellung des Bruchkriteriums im $p'$ , $q$ -Diagramm...	72
6.4	Versuche zur experimentellen Ermittlung der Scherparameter.....	73
6.5	Das Prinzip des triaxialen Scherversuches .....	75
6.6	Der triaxiale KD-Versuch .....	75
6.7	Der triaxiale KU-Versuch .....	75
6.8	Scherfestigkeit körniger Böden .....	77
6.9	Scherfestigkeit bindiger Böden (Tone) .....	79
6.10	Grenzgleichgewichtszustände .....	81
6.11	Scherdeformationen von Böden .....	83
6.12	Abschätzen des Scherwinkels $\varphi'$ .....	85
<b>7</b>	<b>Einflüsse des Grundwassers im Boden</b>	<b>87</b>
7.1	Das Strömungsnetz .....	87
7.2	Die Bestimmung des $k$ -Wertes .....	89

7.3	Wasserdrücke im ruhenden Grundwasser.....	93
7.4	Der Strömungsdruck.....	93
7.5	Der Druckabbau beim Durchströmen von Schichtpaketen, bestehend aus Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit .....	95
7.6	Die Anisotropie geschichteter Böden .....	96
7.7	Wasserdrücke im strömenden Grundwasser .....	96
7.8	Der hydraulische Grundbruch .....	99
7.9	Verminderung des Druckes im Grundwasser (Entspannung) .....	102
7.10	Messsysteme zur Messung des Potenzials .....	103
7.11	Wasserhaltung in Baugruben .....	105
7.12	Innere Erosion und Filter .....	107
<b>8</b>	<b>Setzungsberechnung</b>	<b>109</b>
8.1	Einführung .....	109
8.2	Prinzip der Setzungsberechnung.....	109
8.3	Setzungsberechnung in Tabellenform .....	111
8.4	Einflusstiefe der Zusatzbelastung .....	112
8.5	Berücksichtigung von kombinierten Be- und Entlastungen .....	113
8.6	Auftrieb und Gebäudegewicht .....	114
8.7	Gewichtsausgleich.....	115
8.8	Vorbelastung.....	115
8.9	Überbelastung.....	116
8.10	Schlaffe und starre Lasten .....	118
8.11	Setzungsdifferenzen .....	119
8.12	Zulässige Setzungen und Setzungsdifferenzen.....	120
8.13	Schwerpunktverlagerung und Stabilität von hohen Bauwerken .....	120
<b>9</b>	<b>Stabilitätsprobleme</b>	<b>123</b>
9.0	Problemstellung .....	123
9.0.1	Einführung.....	123
9.0.2	Die gemeinsamen Eigenschaften der Stabilitätsprobleme.....	123
9.0.3	Die Lösung des Stabilitätsproblems .....	124
9.1	Böschungsstabilität .....	125
9.1.1	Einführung .....	125
9.1.2	Vereinfachungen gegenüber der Natur .....	127
9.1.3	Die schwedische Methode der Stabilitätsberechnung .....	128
9.1.4	Die Einflüsse des Wassers .....	130
9.1.5	Das vereinfachte Verfahren nach Bishop.....	133
9.1.6	Das vereinfachte Verfahren nach Janbu .....	133
9.1.7	Die Praxis der Stabilitätsberechnung .....	135
9.1.8	Die unendlich lange Böschung in einem Reibungsmaterial .....	136
9.1.9	Die allgemeine Berechnung des Sicherheitsgrads .	136
9.1.10	Die kinematischen Methoden von Culmann und Taylor .....	137

9.1.11	Hilfsmittel zur Ermittlung der Standsicherheit einfacher Böschungen im homogenen Boden.....	139
9.1.12	Geometrie des Bruches; andere Methoden.....	141
9.1.13	Einführung von Ankerkräften in die Stabilitätsberechnung .....	142
9.2	Tragfähigkeit.....	142
9.2.1	Einführung.....	142
9.2.2	Problemstellung .....	143
9.2.3	Die Näherungsmethoden für den undrainierten Zustand .....	143
9.2.4	Die statische Methode für den drainierten Zustand .....	144
9.2.5	Die allgemeine Tragfähigkeitsformel .....	145
9.2.6	Die Tragfähigkeitsfaktoren $N_c$ , $N_q$ und $N_y$ .....	146
9.2.7	Allgemeines und örtliches Abscheren .....	147
9.2.8	Einflüsse des Porenwasserdruckes .....	148
9.2.9	Grösse der Sicherheit $F_{\text{stat}}$ .....	148
9.2.10	Andere Randbedingungen .....	148
9.2.11	Exzentrizität des Lastangriffes .....	149
9.2.12	Formfaktoren $s$ .....	150
9.2.13	Tiefenfaktoren $d$ .....	150
9.2.14	Lastneigungsfaktoren $i$ .....	150
9.2.15	Geländeneigungsfaktoren $g$ .....	150
9.2.16	Fundamentneigungsfaktoren $b'$ .....	151
9.2.17	Undrainierte Belastung ( $\varphi = 0$ ).....	151
9.2.18	Abgleiten des Fundamentes auf der Fundamentsohle .....	152
9.2.19	Der Begriff der „zulässigen Bodenpressung“.....	153
9.3	Erddruck .....	153
9.3.1	Einführung .....	153
9.3.2	Die Erddrucktheorie von Rankine .....	154
9.3.3	Deformationen und Erddruck .....	154
9.3.4	Verteilung des Erddruckes .....	155
9.3.5	Wirkung der Kohäsion .....	156
9.3.6	Kurzfristige Stabilität und Wirkung des Grundwassers .....	157
9.3.7	Die Erddrucktheorie von Coulomb.....	157
9.3.8	Der Erddruck als Stabilitätsproblem (nach Coulomb) .....	158
9.3.9	Der Einfluss der Kohäsion .....	160
9.3.10	Der Einfluss von Auflasten auf dem Gelände .....	162
9.3.11	Der Einfluss der Wandreibung .....	162
9.3.12	Zusammenfassung der Näherungsverfahren und Einflüsse .....	163
9.3.13	Allgemeine Randbedingungen.....	163
9.3.14	Grafische Ermittlung des Erddruckes.....	164
9.3.15	Die freie Standhöhe $h_c$ .....	164
9.3.16	Erddruck in geschichteten Böden .....	165
9.3.17	Erddruck auf eine Winkelstützmauer .....	167
9.3.18	Abschirmung des Erddruckes .....	168
9.3.19	Einfluss des Wassers auf den Erddruck .....	169

9.3.20 Erddruck-Umlagerung .....	169
9.3.21 Gewölbewirkung .....	170
<b>10 Vertikale Baugrubenabschlüsse</b>	<b>173</b>
10.1 Problemstellung .....	173
10.2 Übersicht über die wichtigsten Wandsysteme.....	173
10.3 Belastungen der Wände .....	177
10.4 Bauzustände .....	179
10.5 Die nicht abgestützte, im Boden eingespannte Wand.....	180
10.6 Die einfach abgestützte Wand .....	182
10.7 Mehrfach abgestützte Wand .....	187
10.8 Erdwiderstand vor schmalen Druckflächen .....	188
10.9 Systemsicherheit und Abstützungen .....	189
<b>11 Die Sohldruckverteilung unter Fundamenten</b>	<b>191</b>
11.1 Einführung .....	191
11.2 Allgemeiner Grundsatz.....	191
11.3 Die relative Steifigkeit $K$ .....	192
11.4 Das Spannungstrapezverfahren .....	193
11.5 Das Bettungsmodulverfahren (Bettungszifferverfahren)....	194
11.6 Der Bettungsmodul $k_s$ .....	196
11.7 Das Steifezahlverfahren .....	198
11.8 Bemerkungen zu den Verfahren .....	200
11.9 Das starre Fundament .....	201
<b>12 Tiefgründung</b>	<b>203</b>
12.1 Einführung .....	203
12.2 Baugrundverbesserung.....	203
12.3 Pfahlarten.....	205
12.4 Der Lasttransport in Pfählen .....	206
12.5 Die Abschätzung von Spitzenwiderstand und Mantelreibung .....	207
12.6 Die negative Mantelreibung.....	208
12.7 Rammpfähle in sensitiven Böden .....	210
12.8 Die Setzung von Einzelpfählen.....	210
12.9 Die Gruppenwirkung.....	213
12.10 Die horizontale Belastung von Pfählen.....	213
<b>13 Sicherheitsüberlegungen</b>	<b>217</b>
13.1 Einführung .....	217
13.2 Stabilitätsprobleme .....	218
13.3 Böschungsstabilität .....	221
13.4 Tragfähigkeit von Fundamenten.....	222
13.5 Erddruckprobleme .....	223
13.6 Abgleiten und Kippen von Fundamenten .....	226
13.7 Hydraulischer Grundbruch .....	226
13.8 Auftriebssicherheit von Bauwerken .....	226
13.9 Deformationen (Setzungen) .....	227
13.10 Zusammenfassung .....	227
<b>14 Ausgewählte Beispiele</b>	<b>229</b>
14.0 Einführung .....	229

## XVI Inhaltsverzeichnis

14.1	Die einfach abgestützte Wand: Einflüsse des Wassers .....	229
14.2	Hydraulischer Grundbruch und Auftrieb.....	237
14.3	Der Einfluss der Spannungsgeschichte am Beispiel der Vorbelastung .....	239
14.4	Stabilitätsberechnung nach Janbu.....	244
14.5	Aktiver und passiver Erddruck: Allgemeinere Randbedingungen .....	249
<b>15</b>	<b>Tropische Böden</b>	<b>257</b>
15.1	Einführung .....	257
15.2	Das Residualprofil.....	257
15.3	Die Verwitterung .....	257
15.4	Neubildungen.....	259
15.5	Die Klassifikation tropischer Böden.....	259
15.6	Die äusseren Einflüsse als System-Bestandteile.....	260
15.7	Die Erosion.....	261
<b>16</b>	<b>Boden und Fels</b>	<b>267</b>
16.1	Einführung .....	267
16.2	Grundeigenschaften von Boden und Fels.....	267
16.3	Trennflächengefüge und Gefügemodell .....	269
16.4	Lösen und Verdichten von Fels.....	270
16.5	Formänderungseigenschaften von Fels .....	271
16.6	Festigkeitseigenschaften von Fels .....	273
16.7	Eigenspannungen im Gebirge .....	275
<b>17</b>	<b>Beispiele</b>	<b>277</b>
17.0	Einführung .....	277
17.1	Kenngrössen für Böden .....	277
17.2	Kenngrössen des Naturzustandes, Volumenbilanz .....	279
17.3	Totale und effektive Spannungen.....	279
17.4	Festigkeitseigenschaften und einfachste Stabilitätsberechnung.....	282
17.5	Undrainierte Scherfestigkeit $s_u$ .....	283
17.6	Künstliche Verdichtung .....	284
17.7	Setzungsberechnung, Kompressionsbeiwert $C_c$ .....	285
17.8	Setzungsberechnung, Spannungsgeschichte.....	286
17.9	Eindimensionale Konsolidation .....	290
17.10	Hydraulische Aspekte einer Baugrube .....	291
17.11	Sohlpressung von Fundamenten .....	292
17.12	Stabilitätsberechnung, Einfluss von Porenwasserüberdrücken .....	294
17.13	Stabilitätsfaktoren.....	297
17.14	Erddruck und Tragfähigkeit .....	298
17.15	Pfahlfundation .....	300
17.16	Nicht abgestützte vertikale Wand .....	301
17.17	Einfach abgestützte vertikale Wand .....	303
17.18	Mehrfach abgestützte vertikale Wand.....	305
17.19	Bestimmung des $k$ -Wertes aus einem Pumpversuch .....	306
17.20	Grundwasserabsenkung mit einer Mehrbrunnenanlage....	307
17.21	Standsicherheit einer Felsböschung .....	310

<b>Anhang</b>	<b>313</b>	
Tabelle A bis E	Spannungsverteilungen im Baugrund .....	313
Tabelle F	Setzung des kennzeichnenden Punktes K .....	318
Tabelle G	Sohlpressungen unter einer Fundamentplatte .	319
Tabelle H <sub>1</sub> bis H <sub>8</sub>	Konsolidation.....	319
<b>Literatur</b>	<b>327</b>	
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>333</b>	