

Dimitrios Kolymbas

# Geotechnik

Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau

2., korrigierte und ergänzte Auflage

Mit 547 Abbildungen



Springer

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung – Was ist Geotechnik?</b> .....	1
1.1	Geschichte der Geotechnik .....	5
1.2	Anwendungen der Geotechnik .....	7
1.3	Mechanisches Verhalten von Geomaterialien .....	7
1.4	Selbstorganisation und Musterbildung .....	13
1.5	Boden-Wasser Wechselwirkung .....	14
1.6	Methoden der Geotechnik .....	16
1.7	Vielfalt in der Geotechnik .....	16
<b>2</b>	<b>Entstehung der Gesteine und des Bodens</b> .....	21
<b>3</b>	<b>Aufbau des Bodens</b> .....	25
3.1	Kornverteilung .....	26
3.2	Bodenansprache .....	29
3.3	Mineralogische Zusammensetzung der Böden .....	30
3.4	Bodenstruktur .....	30
3.5	Spezielle Böden .....	32
<b>4</b>	<b>Bodenkenngrößen</b> .....	35
4.1	Dichten und andere Kennzahlen .....	35
4.2	Dichtebestimmung in situ .....	38
4.3	Schnellverfahren für die Bestimmung des Wassergehalts .....	38
4.4	Konsistenz .....	39
4.5	Bodenklassifikation .....	44
<b>5</b>	<b>Grundwasser</b> .....	47
5.1	Grundwasserströmung .....	48
5.2	Gesetz von Darcy .....	51
5.3	★ Elektroosmose .....	52
5.4	Durchlässigkeit .....	53
5.5	Bestimmung der Durchlässigkeit im Labor .....	54

5.5.1	Versuch mit konstanter Druckhöhe	54
5.5.2	Versuch mit veränderlicher Druckhöhe	55
5.6	Porenwasserdruck	56
5.7	Potentialgleichung	57
5.8	Freier Grundwasserspiegel	62
5.8.1	Stationärer Fall	62
5.8.2	★ Instationärer Fall	64
5.8.3	★ Anwendbarkeit des Gesetzes von DARCY bei Strömungen mit $dv/dt \neq 0$	67
5.9	Transport durch das strömende Grundwasser	68
5.10	Strömungskraft	70
5.11	Filter	70
5.12	Durchlässigkeit von Fels	71
<b>6</b>	<b>Spannungen im Boden</b>	<b>73</b>
6.1	Spannung	73
6.2	Spezielle Spannungszustände	75
6.3	Das Diagramm von Mohr	76
6.4	Spannungsfelder	77
6.5	Spannungsausbreitung	80
6.6	Setzungsberechnung	82
6.7	Deformation bei eindimensionaler Kompression	89
6.7.1	Beispiel einer Setzungsberechnung	96
6.8	Effektive Spannungen	98
6.8.1	Hydraulischer Grundbruch	102
6.8.2	★ Prinzip der effektiven Spannungen	103
<b>7</b>	<b>★ Ungesättigte Böden</b>	<b>107</b>
7.1	Kapillarität	107
7.2	Osmotische Saugspannung	109
7.3	Filter	110
7.4	Dampfdruck	111
7.5	Messung der Saugspannung	113
7.6	Transport von Wasser und Luft in ungesättigten Böden	114
7.6.1	Diffusiver Transport	114
7.6.2	Luftströmung	115
7.6.3	Wasserströmung	116
7.7	Kapillardruckkurve	117
7.8	Effektive Spannungen in ungesättigten Böden	118
<b>8</b>	<b>Scherfestigkeit</b>	<b>121</b>
8.1	Reibung zwischen starren Körpern	122
8.2	Innere Reibung	123
8.3	Kohäsion	126
8.4	Der Rahmenscherversuch	129

8.5	Der Triaxialversuch .....	131
8.6	Entfestigung und Restscherfestigkeit .....	134
8.7	Scherfestigkeit kohäsiver Böden .....	137
	8.7.1 Anmerkungen zur Kohäsion .....	138
8.8	★ Triaxialversuch, ergänzende Angaben .....	141
8.9	★ Durchführungsvarianten des Triaxialversuches .....	143
	8.9.1 Konsolidierungsphase .....	143
	8.9.2 D-Versuch .....	144
	8.9.3 CU-Versuch .....	145
	8.9.4 UU-Versuch .....	146
8.10	★ Fehlerquellen beim Triaxialversuch .....	146
8.11	★ Ergebnisse von Triaxialversuchen .....	148
8.12	★ Verhalten von undrängierten Proben .....	153
	8.12.1 ★ Undrängierte zyklische Belastung .....	156
8.13	★ Verflüssigung .....	157
8.14	Scherfestigkeit von Fels .....	162
	8.14.1 Elastizität .....	163
	8.14.2 Scherfestigkeit von Festgestein .....	164
	8.14.3 Zugfestigkeit von Felsgestein .....	165
	8.14.4 Sprödes und duktiles Verhalten .....	166
	8.14.5 Entfestigung .....	167
	8.14.6 Punktlastversuch .....	168
	8.14.7 Klufitreibung .....	169
	8.14.8 Anisotropie .....	170
	8.14.9 Geschwindigkeitsabhängigkeit von Boden und Fels .....	172
	8.14.10 Maßstabeffekt .....	174
	8.14.11 Diskrete Modelle .....	175
	8.14.12 Festigkeit der Felsmasse .....	176
	8.14.13 Quellen und Schwellen .....	179
	8.14.14 Felsmechanische Feldversuche .....	181
<b>9</b>	<b>Konsolidierung</b> .....	<b>185</b>
9.1	★ Herleitung der Differentialgleichung .....	186
9.2	Ablauf der Konsolidierung .....	190
9.3	★ Kriechen .....	195
<b>10</b>	<b>Erddruck</b> .....	<b>197</b>
10.1	Berücksichtigung der Kohäsion .....	202
10.2	Erddruck infolge Auflasten .....	203
10.3	Verschiebungsabhängigkeit des Erddruckes .....	204
10.4	Grafische Verfahren .....	205
	10.4.1 Verfahren von Culmann .....	205
	10.4.2 Verfahren von Engesser .....	205
10.5	★ Lösung von Rankine .....	206
10.6	Verteilung des Erddrucks .....	210

<b>11 Standsicherheit von Böschungen</b> .....	213
11.1 Die unendlich lange Böschung .....	213
11.2 Ebene Gleitfugen .....	215
11.3 Gleitkreise im homogenen Boden .....	217
11.4 Lamellenverfahren .....	220
11.5 Zusammengesetzte Starrkörper-Bruchmechanismen .....	223
11.5.1 Beispiel Böschungsstandsicherheit .....	224
11.6 Erdrutsche .....	231
11.7 Mobilisierung der Scherfestigkeit .....	233
<b>12 Grundbruch</b> .....	237
12.1 Gleitkreis im Boden ohne Reibung .....	237
12.2 Zusammengesetzte Starrkörper-Bruchmechanismen .....	238
12.3 Zonenbruch nach Prandtl .....	238
12.4 Schräge Lasten .....	241
<b>13 ★ Kollapstheoreme</b> .....	243
13.1 ★ Konstruktion von Spannungsfeldern .....	245
<b>14 ★ Stoffgesetze und Simulationen</b> .....	249
14.1 Bedeutung von Stoffgesetzen für die Geotechnik .....	249
14.2 Mathematische Struktur von Stoffgesetzen .....	250
14.2.1 Elastoplastische Stoffgesetze .....	251
14.2.2 Hypoplastische Stoffgesetze .....	254
14.3 Anforderungen an Stoffgesetze .....	255
14.4 Anmerkungen zu Stoffgesetzen .....	256
14.5 Mechanische Ähnlichkeit, Dimensionsanalyse und Modellversuche .....	261
14.5.1 Zentrifugen .....	263
14.5.2 ★ $\Pi$ -Theorem .....	263
<b>15 Flachgründungen</b> .....	265
15.1 Anforderungen .....	265
15.2 Gründungsarten .....	266
15.3 Zulässige Bodenpressungen .....	266
15.4 Gründungstiefe .....	268
15.5 Sohldruckverteilung .....	268
15.6 Das Spannungstrapez-Verfahren .....	269
15.7 Elastische Lösungen .....	269
15.7.1 Steifenzahlverfahren .....	269
15.7.2 Elastische Bettung .....	270
15.8 Starres Fundament auf elastischem Halbraum .....	274
15.9 Vergleich der Berechnungsverfahren .....	274
15.10 Stabilität von Türmen auf weichem Baugrund .....	274
15.11 Einzelfundamente .....	276
15.12 Plattengründungen .....	279

15.13	Abdichtung von Gründungen .....	280
15.14	Membrangründungen.....	280
<b>16</b>	<b>Pfahlgründungen .....</b>	<b>283</b>
16.1	Pfahltypen .....	283
16.2	Bohren zur Herstellung von Pfählen .....	291
16.2.1	Bohrhindernisse .....	296
16.2.2	Verrohrung .....	296
16.3	Vertikale Tragfähigkeit .....	297
16.3.1	Ermittlung der Pfahlkraft von Bohrpfählen aus Erfahrungswerten .....	298
16.3.2	Mantelreibung .....	300
16.3.3	Mantelverpressung .....	302
16.3.4	Zugpfähle .....	302
16.3.5	Schwell- und Wechselbelastung .....	302
16.4	Horizontale Tragfähigkeit .....	303
16.4.1	Seitliche Pfahlbelastung .....	303
16.4.2	Grenzlast von horizontal belasteten Pfählen .....	308
16.4.3	Berücksichtigung der nichtlinearen Bettung .....	310
16.4.4	Verdübelung kriechender Hänge .....	310
16.4.5	Knicken von axial belasteten Pfählen .....	313
16.5	Statische Probelastung .....	315
16.6	Dynamische Pfahlprüfung.....	318
16.6.1	Rammformeln .....	318
16.6.2	CAPWAP-Verfahren .....	320
16.6.3	Verfahren von Kolymbas .....	321
16.6.4	Integritätsprüfung .....	321
16.7	Gruppenwirkung .....	323
16.8	Pfahlroste .....	325
16.9	Pfahlplatten-Gründungen .....	329
<b>17</b>	<b>Baugrundverbesserung .....</b>	<b>331</b>
17.1	Bodenaustausch .....	331
17.1.1	Optimaler Wassergehalt nach Proctor .....	332
17.1.2	Plattendruckversuch .....	334
17.1.3	Beimischen von Kalk .....	336
17.2	Tiefenverdichtung .....	336
17.2.1	Rütteldruckverdichtung .....	336
17.2.2	Rüttelstopfverdichtung, Schottersäulen, Sandsäulen .....	337
17.2.3	Dynamische Intensivverdichtung .....	342
17.2.4	Sprengverdichtung .....	343
17.3	Konsolidierung durch Vorbelastung .....	344
17.4	Vertikaldrains .....	344
17.5	Injektionen .....	345
17.5.1	Niederdruckinjektionen .....	347

17.5.2	Felsinjektionen .....	349
17.5.3	Soil fracturing .....	350
17.5.4	Düsenstrahlverfahren .....	351
17.5.5	Injektionsmittel .....	352
17.6	Bodenvermörtelung .....	356
17.7	Bodenvereisung .....	357
17.7.1	Frosthebungen .....	359
<b>18</b>	<b>Grundwasserhaltung</b> .....	<b>363</b>
18.1	Dichtwände, Schmalwände .....	363
18.2	Injektionssohlen .....	364
18.2.1	Hochliegende Injektionssohlen .....	365
18.2.2	Tiefliegende Injektionssohlen .....	366
18.3	Unterwasserbetonsohlen .....	369
18.4	Wasserhaltung durch Brunnen .....	370
18.5	Senkkasten, Caissons .....	376
<b>19</b>	<b>Sicherung von Geländesprüngen</b> .....	<b>377</b>
19.1	Stützmauern .....	378
19.2	Grabenverbau .....	382
19.3	Trägerbohlwand .....	385
19.4	Spundwände .....	385
19.5	Bohrpfahlwände .....	389
19.6	Schlitzwände .....	394
19.6.1	Lösen des Bodens .....	394
19.6.2	Wandherstellung .....	396
19.6.3	Einphasen-Schlitzwand mit eingestellter Spundwand .....	399
19.6.4	Leitwand .....	399
19.6.5	Stützflüssigkeit .....	400
19.6.6	Fugen .....	403
19.6.7	Dichtigkeit .....	404
19.6.8	Standsicherheit bei der Herstellung .....	404
19.7	Statische Berechnung von Stützwänden .....	407
19.7.1	Berücksichtigung des Grundwassers .....	413
19.8	Anker .....	413
19.9	Bewehrte Erde .....	421
19.9.1	Faserbewehrter Boden .....	423
19.10	Vernagelte Geländesprünge .....	424
<b>20</b>	<b>Tunnelbau</b> .....	<b>431</b>
20.1	Einführung .....	431
20.2	Geschichtliches .....	431
20.3	Bezeichnungen im Tunnelbau .....	432
20.4	Vortrieb .....	434
20.4.1	Sprengvortrieb .....	435

20.4.2	Schildvortrieb .....	437
20.4.3	TBM-Vortrieb .....	441
20.5	Bergwasser .....	443
20.6	Sicherung .....	444
20.7	Tunnelstatik .....	445
20.7.1	Lösungen für tiefliegende Tunnel .....	445
20.7.2	Tragwirkung der Systemankerung .....	453
20.7.3	Einige Näherungslösungen für seichte Tunnel .....	454
20.8	Oberflächensetzungen infolge Tunnelvortriebs .....	466
<b>21</b>	<b>Staudämme .....</b>	<b>469</b>
<b>22</b>	<b>Geotechnische Untersuchungen, Untergrunderkundung .....</b>	<b>479</b>
22.1	Bodenerkundung .....	480
22.2	Erkundungsbohrungen .....	480
22.2.1	Trockenbohrverfahren – Spülbohrverfahren .....	489
22.2.2	Verrohrung .....	489
22.2.3	Verfüllen der Bohrlöcher .....	490
22.2.4	Kleinbohrungen .....	490
22.3	Bodenproben .....	490
22.4	Grundwasserbeobachtungsspiegel .....	491
22.5	Wasserprobenentnahme .....	491
22.6	Sondierungen .....	492
22.6.1	Rammsondierung, SPT-Versuch .....	493
22.6.2	Drucksondierung .....	494
22.6.3	Flügelsondierung .....	498
22.6.4	Schwedische Gewichtssonde .....	500
22.6.5	Pressiometer .....	500
22.6.6	Seitendrucksonde .....	501
22.6.7	Dilatometer .....	502
22.7	★Interpolation geotechnischer Daten, Kriging .....	502
22.8	Geotechnischer Bericht .....	506
<b>23</b>	<b>Meßtechnik .....</b>	<b>509</b>
23.1	Beobachtungsmethode .....	509
23.2	Statistische Grundlagen der Meßtechnik .....	510
23.3	Meßgeräte .....	513
23.3.1	Messung des Porenwasserdrucks .....	515
<b>24</b>	<b>Umweltgeotechnik .....</b>	<b>519</b>
24.1	Bewertung der Schadstoffe .....	519
24.2	Ausbreitung und Abbau der Schadstoffe .....	520
24.3	Sanierung von kontaminiertem Boden .....	520
24.3.1	Biologischer Abbau .....	521
24.3.2	Extraktion .....	523

24.3.3	Reaktive Wände, Funnels & Gates .....	523
24.4	Deponien .....	523
24.4.1	Deponie-Entgasung .....	525
24.4.2	Deponie-Sickerwasserfassung .....	527
24.5	Arbeitsschutz .....	528
<b>25</b>	<b>Geokunststoffe</b> .....	<b>531</b>
25.1	Prüfverfahren für Geotextilien .....	537
25.2	Einsatz von Geokunststoffen zur Bodenbewehrung .....	538
25.2.1	Einsatz von Geokunststoffen zur Belastung von Schottersäulen .....	538
<b>26</b>	<b>Sicherheit und Normen</b> .....	<b>541</b>
26.1	Neue Konzepte .....	542
26.1.1	Teilsicherheiten .....	542
26.1.2	Grenzzustände .....	543
26.1.3	Charakteristische Werte .....	543
26.1.4	Geotechnische Kategorien .....	544
26.1.5	Einwirkungen/Widerstände .....	544
26.2	EUROCODE 7 .....	545
26.3	Entstehung der Normen .....	545
26.4	★Begriffe aus der Wahrscheinlichkeitstheorie .....	546
26.5	★Sicherheit, wahrscheinlichkeitstheoretisch .....	548
26.6	★Risikobewertung .....	550