

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung – Was ist Geotechnik?	1
1.1 Geschichte der Geotechnik	5
1.2 Anwendungen der Geotechnik	9
1.3 Mechanisches Verhalten von Geomaterialien	9
1.4 Selbstorganisation und Musterbildung.....	16
1.5 Boden-Wasser-Wechselwirkung.....	17
1.6 Methoden der Geotechnik	18
1.7 Vielfalt in der Geotechnik	19
2 Entstehung der Gesteine und des Bodens	23
3 Aufbau des Bodens	27
3.1 Kornverteilung	28
3.2 Bodenansprache	30
3.3 Mineralogische Zusammensetzung der Böden	31
3.4 Bodenstruktur	32
3.5 Spezielle Böden	34
4 Bodenkenngrößen	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
5 Grundwasser.....	47
5.1 Grundwasserströmung.....	49
5.2 Gesetz von Darcy	50
5.3 ★ Elektroosmose.....	52
5.4 Durchlässigkeit.....	52
5.5 Bestimmung der Durchlässigkeit im Labor.....	53

XII Inhaltsverzeichnis

5.5.1	Versuch mit konstanter Druckhöhe	53
5.5.2	Versuch mit veränderlicher Druckhöhe	54
5.6	Porenwasserdruck	55
5.7	Potentialgleichung	56
5.8	Freier Grundwasserspiegel	60
5.8.1	Stationärer Fall	60
5.8.2	★ Instationärer Fall	62
5.8.3	★ Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy bei Strömungen mit $dv/dt \neq 0$	65
5.9	★ Anisotrope Durchlässigkeit	66
5.10	Transport durch das strömende Grundwasser	68
5.11	Strömungskraft	69
5.12	Filter	69
5.13	Durchlässigkeit von Fels	70
6	Spannungen im Boden	73
6.1	Spannung	73
6.2	Spezielle Spannungszustände	74
6.3	Das Diagramm von Mohr	75
6.4	Spannungsfelder	76
6.5	Spannungsausbreitung	79
6.6	Setzungsberechnung	81
6.7	Deformation bei eindimensionaler Kompression	87
6.7.1	Beispiel einer Setzungsberechnung	93
6.8	Effektive Spannungen	96
6.8.1	Hydraulischer Grundbruch	100
6.8.2	★ Prinzip der effektiven Spannungen	100
7	Scherfestigkeit	103
7.1	Reibung zwischen starren Körpern	104
7.2	Innere Reibung	105
7.3	Kohäsion	108
7.4	Der Rahmenscherversuch	110
7.5	Der Triaxialversuch	113
7.6	Entfestigung und Restscherfestigkeit	119
7.7	Scherfestigkeit kohäsiver Böden	122
7.7.1	Anmerkungen zur Kohäsion	124
7.8	★ Durchführungsvarianten des Triaxialversuches	127
7.8.1	Konsolidierungsphase	127
7.8.2	D-Versuch	128
7.8.3	CU-Versuch	128
7.8.4	UU-Versuch	129
7.9	★ Fehlerquellen beim Triaxialversuch	130
7.10	★ Ergebnisse von Triaxialversuchen	131
7.11	★ Verhalten von undränierten Proben	136

7.11.1	★ Undranierte zyklische Belastung	139
7.12	★ Verflüssigung	139
8	★ Ungesättigte Böden	145
8.1	Kapillarität	145
8.2	Osmotische Saugspannung	147
8.3	Filter	148
8.4	Dampfdruck	150
8.5	Messung der Saugspannung	151
8.6	Transport von Wasser und Luft in ungesättigten Böden	152
8.6.1	Diffusiver Transport	152
8.6.2	Luftströmung	153
8.6.3	Wasserströmung	154
8.7	Kapillardruckkurve	155
8.8	Effektive Spannungen in ungesättigten Böden	155
9	Felsmechanik	157
9.1	Scherfestigkeit von Festgestein	157
9.2	Zugfestigkeit von Festgestein	158
9.3	Sprödes und duktiles Verhalten	159
9.4	Entfestigung	159
9.5	Punktlastversuch	160
9.6	Trennflächen und ihre Raumlage	161
9.7	Kluftreibung	162
9.8	Anisotropie	162
9.9	Geschwindigkeitsabhängiges Verhalten von Boden und Fels	164
9.10	Bruchmechanik	166
9.11	Sprödbruch und plastisches Fließen	168
9.12	Maßstabseffekt	173
9.13	Diskrete Modelle	175
9.14	Festigkeit der Felsmasse	175
9.15	Quellen und Schwellen	178
9.16	Felsmechanische Feldversuche	180
10	Konsolidierung	183
10.1	★ Wassergesättigter Boden als Zweiphasenstoff	184
10.2	★ Herleitung der Differentialgleichung	186
10.3	Ablauf der Konsolidierung	190
10.4	★ Kriechen	194
11	Erddruck	197
11.1	Berücksichtigung der Kohäsion	201
11.2	Erddruck infolge Auflasten	202
11.3	Verschiebungshängigkeit des Erddruckes	203
11.4	Grafische Verfahren	203

XIV Inhaltsverzeichnis

11.4.1	Verfahren von Culmann	204
11.4.2	Verfahren von Engesser	204
11.5	★ Lösung von Rankine	205
11.6	Verteilung des Erddrucks	208
12	Standsicherheit von Böschungen	211
12.1	Unendlich lange Böschung	211
12.2	Ebene Gleitfugen	213
12.3	Gleitkreise im homogenen Boden	214
12.4	Lamellenverfahren	218
12.5	Zusammengesetzte Starrkörper-Bruchmechanismen	220
12.5.1	Beispiel Böschungsstandsicherheit	221
12.6	Erdrutsche	228
12.7	Mobilisierung der Scherfestigkeit	229
13	Grundbruch	233
13.1	Gleitkreis im Boden ohne Reibung	233
13.2	Zusammengesetzte Starrkörper-Bruchmechanismen	234
13.3	Zonenbruch nach Prandtl	234
13.4	Schräge Lasten	237
14	★ Nachweis der Standsicherheit	239
14.1	Kollapsmodelle	239
14.2	Konstruktion von Spannungsfeldern	241
15	★ Stoffgesetze und Simulationen	245
15.1	Bedeutung von Stoffgesetzen für die Geotechnik	245
15.2	Kontinuierliche und diskrete Körper	246
15.3	Mathematische Struktur von Stoffgesetzen	246
15.3.1	Lineare Elastizität	247
15.3.2	Elastoplastische Stoffgesetze	249
15.3.3	Hypoplastische Stoffgesetze	252
15.4	Anforderungen an Stoffgesetze	253
15.5	Ergänzende Betrachtungen zu Stoffgesetzen	254
15.6	Mechanische Ähnlichkeit, Dimensionsanalyse und Modellversuche	259
15.6.1	Zentrifugen	260
15.6.2	II-Theorem	261
16	★ Bodendynamik	263
16.1	Wellen – mathematische Grundlagen	263
16.1.1	Singuläre Flächen	264
16.1.2	Kinematische Wellen	265
16.1.3	Elastische Wellen in eindimensionalen Kontinua	266
16.1.4	Wellen in endlichen Körpern	272
16.1.5	Elastische Wellen im Vollraum (<i>body waves</i>)	273
16.1.6	Rayleigh-Wellen	276

16.2	Erdbeben	276
16.2.1	Aufbau der Erde und Plattentektonik	277
16.2.2	Stärke von Erdbeben	279
16.2.3	Seismografen	280
16.2.4	Charakterisierung der Bodenbewegung	283
16.2.5	Gefährdung durch Erdbeben	284
16.2.6	Bemessung von Konstruktionen für Erdbeben	286
16.3	Messtechnische Geräte	289
16.3.1	Feldversuche	290
16.4	Verhalten des Bodens bei dynamischer Beanspruchung	291
17	Flachgründungen	295
17.1	Anforderungen	295
17.2	Gründungsarten	296
17.3	Zulässige Bodenpressungen	296
17.4	Gründungstiefe	297
17.5	Sohldruckverteilung	298
17.6	Das Spannungstriangel-Verfahren	298
17.7	Elastische Lösungen	299
17.7.1	Steifezahlverfahren	299
17.7.2	Elastische Bettung	300
17.8	Starres Fundament auf elastischem Halbraum	303
17.9	Vergleich der Berechnungsverfahren	303
17.10	Stabilität von Türmen auf weichem Baugrund	304
17.11	Einzelfundamente	305
17.12	Plattengründungen	308
17.13	Abdichtung von Gründungen	308
17.14	Membrangründungen	309
18	Pfahlgründungen	311
18.1	Pfahltypen	311
18.2	Bohren zur Herstellung von Pfählen	319
18.2.1	Bohrhindernisse	324
18.2.2	Verrohrung	324
18.2.3	Setzungen	325
18.3	Vertikale Tragfähigkeit	325
18.3.1	Ermittlung der Pfahlkraft von Bohrpfählen aus Erfahrungswerten	326
18.3.2	Mantelreibung	328
18.3.3	Mantelverpressung	330
18.3.4	Zugpfähle	331
18.3.5	Schwell- und Wechselbelastung	331
18.4	Horizontale Tragfähigkeit	331
18.4.1	Seitliche Pfahlbelastung	331
18.4.2	Grenzlast von horizontal belasteten Pfählen	336

XVI Inhaltsverzeichnis

18.4.3	Berücksichtigung der nichtlinearen Bettung	338
18.4.4	Verdübelung kriechender Hänge	338
18.4.5	Knicken von axial belasteten Pfählen	341
18.5	Statische Probebelastung	343
18.6	Dynamische Pfahlprüfung	346
18.6.1	Rammformeln	347
18.6.2	CAPWAP-Verfahren	348
18.6.3	Verfahren von Kolymbas	349
18.6.4	Integritätsprüfung	349
18.7	Gruppenwirkung	350
18.8	Pfahlroste	352
18.9	Pfahlplatten-Gründungen	356
19	Baugrundverbesserung	357
19.1	Bodenaustausch	357
19.1.1	Optimaler Wassergehalt nach Proctor	358
19.1.2	Plattendruckversuch	360
19.1.3	Beimischen von Kalk	361
19.2	Tiefenverdichtung	362
19.2.1	Rütteldruckverdichtung	362
19.2.2	Rüttelstopfverdichtung, Schottersäulen, Sandsäulen	363
19.2.3	Dynamische Intensivverdichtung	368
19.2.4	Sprengverdichtung	369
19.3	Konsolidierung durch Vorbelastung	369
19.3.1	Vertikaldrains	369
19.4	Injektionen	371
19.4.1	Niederdruckinjektionen	372
19.4.2	Felsinjektionen	375
19.4.3	Hebungsinjektionen (<i>soil fracturing</i>)	375
19.4.4	Düsenstrahlverfahren	376
19.4.5	Injektionsmittel	378
19.5	Bodenvermörtelung	381
19.6	Bodenvereisung	382
19.6.1	Frosthebungen	384
20	Grundwasserhaltung	387
20.1	Dichtwände, Schmalwände	387
20.2	Injektionssohlen	388
20.2.1	Hochliegende Injektionssohlen	389
20.2.2	Tiefliegende Injektionssohlen	390
20.3	Unterwasserbetonsohlen	393
20.4	Wasserhaltung durch Brunnen	395
20.5	Senkkästen, Caissons	400

21 Sicherung von Geländesprüngen	401
21.1 Stützmauern	402
21.2 Grabenverbau	405
21.3 Trägerbohlwand	408
21.4 Stahlspundwände	409
21.5 Bohrpfahlwände	414
21.6 Schlitzwände	417
21.6.1 Lösen des Bodens	418
21.6.2 Wandherstellung	420
21.6.3 Einphasen-Schlitzwand mit eingestellter Spundwand	422
21.6.4 Leitwand	423
21.6.5 Stützflüssigkeit	423
21.6.6 Fugen	426
21.6.7 Dichtigkeit	428
21.6.8 Standsicherheit bei der Herstellung	428
21.7 Statische Berechnung von Stützwänden	430
21.7.1 Berücksichtigung des Grundwassers	435
21.8 Anker	438
21.9 Bewehrte Erde	445
21.9.1 Faserbewehrter Boden	446
21.10 Vernagelte Geländesprünge	448
22 Tunnelbau	455
22.1 Einführung	455
22.2 Geschichtliches	455
22.3 Bezeichnungen im Tunnelbau	456
22.4 Vortrieb	457
22.4.1 Sprengvortrieb	460
22.4.2 Schildvortrieb	461
22.4.3 TBM-Vortrieb	464
22.5 Bergwasser	465
22.6 Sicherung	467
22.7 Tunnelstatik	469
22.7.1 Lösungen für tieffliegende Tunnel	470
22.7.2 Tragwirkung der Systemankerung	476
22.7.3 Einige Näherungslösungen für seichte Tunnel	478
22.8 Oberflächensetzungen infolge Tunnelvortriebs	489
23 Staudämme	493
23.1 Allgemeine Übersicht	493
23.2 Entwurf	494
23.2.1 Abdichtung	494
23.2.2 Erosion	494
23.2.3 Filter	496
23.2.4 Spannungen, Verformungen, Standsicherheit	497

XVIII Inhaltsverzeichnis

23.3	Bau	499
23.3.1	Boden	499
23.3.2	Steinschüttung	499
23.4	Erdbeben	500
23.5	Überwachung	500
24	Geothermie	503
24.1	Überblick	503
24.2	Wärme- und Kältemaschinen	504
25	Geotechnische Untersuchungen, Untergrunderkundung	507
25.1	Untergrunderkundung	508
25.2	Erkundungsbohrungen	508
25.2.1	Trockenbohrverfahren – Spülbohrverfahren	515
25.2.2	Verrohrung	515
25.2.3	Verfüllen der Bohrlöcher	516
25.2.4	Kleinbohrungen	516
25.2.5	Grundwasserbeobachtungspegel	516
25.2.6	Wasserprobenentnahme	517
25.3	Bodenproben	518
25.4	Versuchsprogramm	518
25.4.1	Probenaufbereitung	519
25.4.2	Art und Umfang der Versuche	519
25.5	Sondierungen	520
25.5.1	Rammsondierung, SPT-Versuch	520
25.5.2	Drucksondierung	523
25.5.3	Flügelsondierung	526
25.5.4	Pressiometer	527
25.5.5	Seitendrucksonde	527
25.5.6	Dilatometer	529
25.6	Geophysikalische Erkundung	529
25.6.1	Inverse Probleme	529
25.6.2	Geophysikalische Methoden	530
25.7	★Interpolation geotechnischer Daten, Kriging	531
25.8	Geotechnischer Bericht	534
26	Messtechnik	537
26.1	Beobachtungsmethode	537
26.2	Statistische Grundlagen der Messtechnik	538
26.3	Messgeräte	541
26.3.1	Messung des Porenwasserdrucks	543

27 Umweltgeotechnik	547
27.1 Bewertung der Schadstoffe	547
27.2 Ausbreitung und Abbau der Schadstoffe	548
27.3 Sanierung von kontaminiertem Boden	548
27.3.1 Biologischer Abbau	549
27.3.2 Extraktion	551
27.3.3 Reaktive Wände, Funnels & Gates	551
27.4 Deponien	551
27.4.1 Deponie-Entgasung	553
27.4.2 Deponie-Sickerwasserfassung	555
27.5 Arbeitsschutz	556
28 Geokunststoffe	559
28.1 Prüfverfahren für Geotextilien	565
28.2 Einsatz von Geokunststoffen zur Bodenbewehrung	566
28.2.1 Einsatz von Geokunststoffen zur Belastung von Schottersäulen	566
29 Sicherheit und Normen	569
29.1 Neue Konzepte	569
29.1.1 Teilsicherheiten	569
29.1.2 Grenzzustände	571
29.1.3 Charakteristische Werte	571
29.1.4 Geotechnische Kategorien	571
29.1.5 Einwirkungen/Widerstände	572
29.2 EUROCODE 7	572
29.3 Entstehung der Normen	573
29.4 ★Begriffe aus der Wahrscheinlichkeitstheorie	573
29.5 ★Sicherheit, wahrscheinlichkeitstheoretisch	575
29.6 ★Risikobewertung	577
Sachverzeichnis	579