

8. Auflage



GRUNDBAU-TASCHENBUCH

Teil 1: Geotechnische Grundlagen

Karl Josef Witt (Hrsg.)

Vorwort

Die 8. Auflage des Grundbau-Taschenbuchs setzt das Format der bisherigen Auflagen konsequent fort. Auch die aktuelle Fassung bringt den Stand der Wissenschaft und den Stand der Technik auf dem Gebiet des geotechnischen Ingenieurwesens in seinen wesentlichen Sparten zusammen.

Wozu eine neue Auflage, was hat sich in den vergangenen nahezu 9 Jahren geändert? Was bietet Ihnen dieser neue Grundlagenband?

Über die nationale Anwendung der *Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau* liegt mittlerweile reichlich Erfahrung vor und es gibt sogar ausgearbeitete Vorschläge einer Vereinfachung. Die *Baugrunduntersuchungen im Feld* orientieren sich nun an EC 7, Teil 2. Der Beitrag zu den *Eigenschaften von Boden und Fels* ist nach wie vor ein unersetzbares Nachschlagewerk und hilft dem Nichtexperten zum Verständnis der bodenmechanischen Zusammenhänge. Neu ist der Überblick zu den *statistischen Methoden* und der *probabilistischen Bemessung*, wenngleich auch eine Anwendung Erfahrung im Umgang mit diesen Methoden verlangt. Die *Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser* ist beim Gestalten der Umwelt noch mehr in den Fokus gerückt. Der Beitrag zum *Erddruck* wurde den aktualisierten Regelwerken angepasst, neben dem *Wie* wird auch das *Warum* erläutert. Während sich wissenschaftlich das Zeitalter der *Stoffgesetze für Böden* dem Ende zu nähern scheint, sind viele wertvolle Ansätze in der Praxis noch nicht angekommen, gewinnen aber gerade mit den modernen *numerischen Verfahren in der Geotechnik* zunehmend an Bedeutung. Für *Festgestein* scheinen die Stoffgesetze und die ingenieurpraktische Beschreibung noch komplexer zu sein. Hier trennen sich die Lehrmeinungen zwischen Kontinuumsansätzen und der Simulation mit diskreten Elementen, während in der Praxis die Empirie dominiert. Kenntnisse der *Bodendynamik* werden mit den zyklischen und dynamischen Belastungen des Baugrundes sowie mit erhöhten Anforderungen an den Erschütterungsschutz von der geotechnischen Ingenieurpraxis abverlangt. Nach wie vor ist die verlässliche Prognose der Standsicherheit ein zentrales Thema im Schnittfeld Bodenmechanik und Ingenieurgeologie. Der Beitrag zu den *Massenbewegungen* gibt hierzu Erläuterungen und Beispiele. Ein modernes und effektives Monitoring geotechnischer Bauwerke ist nicht nur dort gefordert, wo die Möglichkeiten der exakten Berechnungen mangels Kenntnis der Materialien oder Komplexität der Natur enden. Das Kapitel *Ingenieurgeodäsie – Zustandsdokumentation und Überwachungsmessungen* wurde vollkommen neu zusammengestellt. Die zeitgemäßen Methoden der *Instrumentierung und des Monitorings* werden mit neuen Beispielen vorgestellt.

Wie liest man dieses Buch? Natürlich nicht von vorn nach hinten! Ich benutze es in meiner Ingenieurpraxis und Beratungstätigkeit immer wieder als Nachschlagewerk, finde dort Antworten und Lösungen, wo das gefühlte Expertenwissen an seine Grenze kommt und ich Zusammenhänge vertieft verstehen möchte. Und nicht zuletzt greife ich

dann zum Grundbau-Taschenbuch, wenn ich mehr darüber erfahren möchte, was hinter der Vielzahl von Regeln in Empfehlungen, Richtlinien und Normen steht.

Meinen herzlichen Dank an alle Autoren für das große Engagement, dafür, dass sie ihr Expertenwissen hier zusammengetragen und zur Verfügung gestellt haben. Und Dank an den Verlag Ernst & Sohn für die Realisierung dieses für die Geotechnik so wichtigen Buches, hier ganz besonders an die Lektorin, Frau Dipl.-Ing. R. Herrmann.

Weimar, Januar 2017

Karl Josef Witt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autoren-Kurzbiografien	XIX
Verzeichnis der Autoren	XXV

1.1 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

Martin Ziegler

1	Einführung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Historischer Rückblick	4
2	Sicherheitskonzepte	9
2.1	Allgemeines	9
2.2	Globales Sicherheitskonzept	9
2.3	Teilsicherheitskonzept	10
3	Aufbau und Inhalte des Normenhandbuchs	11
3.1	Allgemeines	11
3.2	Inhaltsübersicht	11
3.3	Anwendungsbereich	13
3.4	Geotechnische Planung	13
3.5	Wichtige Begriffe der neuen Sicherheitsnorm	15
4	Grenzzustände und Nachweise	28
4.1	Allgemeines	28
4.2	Grenzzustände der Tragfähigkeit ULS	28
4.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS	34
4.4	Teilsicherheitsbeiwerte nach Normenhandbuch	35
5	Zukünftige Normung im Umfeld des EC 7	38
5.1	Entwicklung in Deutschland	38
5.2	Entwicklung in Europa	40
6	Zitierte Normen und Empfehlungen	42
7	Literatur	44

1.2 Baugrunduntersuchungen im Feld

Klaus-Jürgen Melzer, Edwin Fecker und Tilman Westhaus

1	Grundlagen	45
1.1	Normen und Richtlinien	45
1.2	Voruntersuchung	48

1.3	Hauptuntersuchung	48
1.4	Berichterstattung	52
2	Baugrundaufschluss durch Schürfe, Bohrungen und Probenentnahmen ..	53
2.1	Allgemeines	53
2.2	Bohrgeräte und Ausrüstung	54
2.3	Anforderungen	54
2.4	Aufschluss im Boden	55
2.5	Aufschluss im Fels	60
2.6	Aufschluss der Grundwasserverhältnisse	63
2.7	Behandlung, Transport und Aufbewahrung der Proben	66
2.8	Berichterstattung	66
3	Baugrundaufschluss durch Sondierungen	67
3.1	Allgemeines	67
3.2	Rammsondierungen	69
3.3	Standard Penetration Test und Bohrlochrammsondierung	75
3.4	Drucksondierungen	81
3.5	Flügelscherversuche	91
3.6	Gewichtssondierungen	94
4	Bohrlochaufweitungsversuche	98
4.1	Geräte und Versuchsdurchführung	98
4.2	Auswertung	104
5	Bestimmung der Dichte	110
5.1	Gravimetrische Verfahren	110
5.2	Radiometrische Verfahren	111
6	Geophysikalische Verfahren	113
6.1	Allgemeines	113
6.2	Beschreibungen der wichtigsten Verfahren	118
7	Literatur	121
8	Normen und Richtlinien	135

1.3 Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor

Paul von Soos und Jens Engel

1	Boden und Fels – Begriffe und Entstehung	139
2	Eigenschaften der Böden	140
2.1	Bodenschichten	140
2.2	Bodenproben	140
2.3	Durchführen und Auswerten von Laborversuchen	141
2.4	Bodeneigenschaften und Laborversuche	144
3	Eigenschaften von Fels	144
4	Kennwerte und Eigenschaften der festen Bodenkörner	145
4.1	Korngrößenverteilung	145
4.2	Korndichte	148
4.3	Mineralaufbau	149
4.4	Kornform und Kornrauigkeit	151

4.5	Spezifische Kornoberfläche	151
4.6	Gehalt an organischen Bestandteilen	152
4.7	Kalkgehalt	153
5	Kennwerte und Eigenschaften des Kornhaufens	153
5.1	Gefüge des Boden	153
5.2	Porenanteil und Porenzahl	154
5.3	Ermittlung der Dichte des Bodens	158
5.4	Grenzen der Lagerungsdichte	158
5.5	Wassergehalt	160
5.6	Konsistenzgrenzen	160
5.7	Wasseraufnahmevermögen nach <i>Enslin</i>	163
5.8	Verdichtungsverhalten in Abhängigkeit vom Wassergehalt	164
5.9	Absolute Porengröße und Filterwirkung	166
5.10	Kapillarität	167
5.11	Wasserdurchlässigkeit	170
5.12	Luftdurchlässigkeit	174
6	Versuche zur Ermittlung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens	175
6.1	Allgemeines	175
6.2	Kompressionsversuch (Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung) ..	178
6.3	Dreiaxialer Druckversuch	188
6.4	Einaxialer Druckversuch	192
6.5	Dreiaxialer Druckversuch mit $\sigma_2 \geq \sigma_3$ und zweiaxialer Druckversuch	192
6.6	Hohlzylinderversuch	193
6.7	Messen von Kriechverformungen	193
7	Scherfestigkeit; Ermittlung der Scherparameter	195
7.1	Allgemeines	195
7.2	Dreiaxialer Druckversuch	202
7.3	Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit	205
7.4	Rahmenscherversuch	206
7.5	Kreisringscherversuch	206
7.6	Versuch mit dem „Einfachschergerät“ (simple shear)	207
8	Ermittlung der Zugfestigkeit	208
9	Eigenschaften von Festgestein – felsmechanische Laborversuche	208
9.1	Vorbemerkung	208
9.2	Einaxialer Druckversuch an Gesteinsproben	209
9.3	Punktlastversuche an Gesteinsproben	209
9.4	Dreiaxialer Druckversuch an Gesteinsproben	210
9.5	Scherwiderstand in Felstrennflächen	213
9.6	Festigkeit des geklüfteten Fels	214
9.7	Zugversuche an Gesteinsproben	215
9.8	Kriechversuche an Gesteinsproben	215
9.9	Einaxiale Relaxationsversuche an Gesteinsproben	216
9.10	Quellversuche an Gesteinsproben	216
9.11	Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit von Gesteinen – Siebtrommelversuch	217
10	Benennen, Beschreiben und Klassifikation von Boden und Fels	218

10.1	Benennen und Beschreiben von Boden	218
10.2	Benennen und Beschreiben von Fels	220
10.3	Bodenklassifikation	223
10.4	Felsklassifikation	226
11	Literatur	232

1.4 Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung

Maximilian Huber und Karl-Josef Witt

1	Einleitung	243
2	Sicherheit und Zuverlässigkeit in der geotechnischen Bemessung	244
2.1	Begriffe und Überblick	244
2.2	Teilsicherheitsbeiwerte und probabilistische Bemessung	247
2.3	Grundlagen der Statistik	249
2.4	Grundlagen der Geostatistik	252
3	Grundlagen der probabilistischen Methoden	256
3.1	Bewertung der Unsicherheit von Systemen	256
3.2	Monte-Carlo-Simulation	259
3.3	First Order Reliability Method	259
3.4	Antwortflächenverfahren	259
3.5	Sensitivitätsanalyse	260
4	Komplexe Fragestellungen der probabilistischen Bemessung	260
5	Berücksichtigung von Messungen in einer probabilistischen Analyse im Rahmen der Beobachtungsmethode	261
5.1	Datenassimilation und inverse Analyse	261
5.2	Probabilistische Analyse von Bestandsbauwerken	261
6	Anwendung von probabilistischen Methoden in der Geotechnik	262
6.1	Teilsicherheitskonzept in der DIN EN 1997-1 (EC 7, Teil 1)	262
6.2	Regelungen in den nationalen Anhängen des EC 7	264
6.3	Literaturüberblick zur probabilistischen Bemessung	265
7	Zusammenfassung	269
8	Literatur	271
	Normen, Empfehlungen und Richtlinien	277
9	Anhang	278
9.1	Statistische Momente	278
9.2	Maximum-Likelihood-Methode	278
9.3	Zusammenhang zwischen Normalverteilung und Log-Normalverteilung	280
9.4	Bayes'sches Updaten	281
9.5	Variogramm	282
9.6	FORM	284

1.5 Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser*Andreas Claussen*

1	Grundlagen	287
2	Anorganische Matrix des Untergrunds	288
3	Organische Matrix des Untergrunds	289
4	Schadstoff	292
5	Anorganische Schadstoffe	294
6	Organische Schadstoffe	296
6.1	Allgemeines	296
6.2	Mineralölartige Kohlenwasserstoffe (KW-Index)	296
6.3	Einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe	299
6.4	Mehrkernige aromatische Kohlenwasserstoffe	302
6.5	Halogenierte Kohlenwasserstoffe	302
7	Bewertungsmatrix	304
8	Untersuchungserfordernisse	306
9	Untersuchungsplanung	307
10	Grundlagen der Bewertung	308
10.1	Allgemeines	308
10.2	Bewertung von Verdachtsflächen	308
10.3	Arbeits- und Gesundheitsschutz	310
10.4	Gefährdungen über Bodenluft	311
10.5	Verwertungsmöglichkeiten oder Entsorgungserfordernisse	311
11	Literatur	314

1.6 Erddruck*Achim Hettler*

1	Einführung	317
2	Begriffe, Formelzeichen und Indizes	318
2.1	Begriffe	318
2.2	Formelzeichen	319
2.3	Indizes	320
3	Methoden zur Ermittlung des Erddrucks	321
3.1	Übersicht	321
3.2	Kinematische Methoden beim aktiven Erddruck	322
3.3	Kinematische Methoden beim passiven Erddruck	325
3.4	Statische Methoden	329
3.5	Versuche und Messungen	335
3.6	Finite-Elemente-Methode	348
4	Ebener aktiver Erddruck	363
4.1	Grundsätzliche Überlegungen	363
4.2	Bodeneigengewicht, großflächige Auflasten und Kohäsion	365
4.3	Kohäsion, rechnerische Zugspannungen und Mindesterdruk	367
4.4	Vertikale Linien- und Streifenlasten	371

4.5	Horizontale Linien- und Streifenlasten	377
4.6	Geschichteter Boden	377
4.7	Geknickter Geländeverlauf	379
4.8	Geknickte Wandflächen	380
4.9	Verteilung des aktiven Erddrucks	381
5	Erdruehdruck	381
5.1	Bodeneigengewicht und großflächige Auflasten	381
5.2	Punkt-, Linien- und Streifenlasten	386
6	Ebener passiver Erddruck	390
6.1	Grundsätzliche Überlegungen	390
6.2	Eigengewicht, großflächige Auflasten und Kohäsion bei Parallelbewegung	391
6.3	Drehung um den Kopf- oder den Fußpunkt	395
6.4	Verteilung des passiven Erddrucks	397
7	Räumlicher aktiver Erddruck	398
7.1	Grundsätzliche Überlegungen	398
7.2	Kreiszyklindrische Flächen	400
7.3	Stützwände quer zur Böschung	403
8	Räumlicher passiver Erddruck	405
8.1	Übersicht	405
8.2	Fußwiderstand vor Bohlträgern nach <i>Weißbach</i>	406
8.3	Verfahren nach DIN 4085 für begrenzte Wandabschnitte	408
9	Sonderfälle	409
9.1	Verdichtungserddruck	409
9.2	Silodruck	411
9.3	Wiederholte quasistatische Beanspruchungen	413
9.4	Dynamische Beanspruchungen	415
9.5	Einfluss des Grundwassers auf den Erddruck	415
9.6	Winkelstützwände	418
9.7	Weitere Hinweise	421
10	Mobilisierung des Erddrucks	424
10.1	Übersicht	424
10.2	Grenzwerte der Verschiebung bei Erreichen des aktiven Erddrucks	425
10.3	Grenzwerte der Verschiebung bei Erreichen des passiven Erddrucks	426
10.4	Mobilisierungsfunktionen	428
11	Anwendungshinweise	433
11.1	Erddruckneigung und Wandreibungswinkel	433
11.2	Ansatz des Erddrucks in Abhängigkeit der Verschiebung	436
11.3	Erddruckumlagerung	439
11.4	Erddruck als günstige Einwirkung	440
12	Literatur	441
Anhang		448

1.7 Stoffgesetze für Böden*Dimitrios Kolymbas und Ivo Herle*

1	Einführung	458
2	Frequently asked questions	459
3	Bedeutung von Stoffgesetzen für die Geotechnik	461
4	Merkmale des Bodenverhaltens	462
4.1	Elementversuche	462
4.2	Kompressionsverhalten	463
4.3	Scherverhalten	465
4.4	Druck- und Dichteabhängigkeit	468
4.5	Verhalten undrännierter Proben	469
4.6	Kritische Zustände	470
4.7	Einfluss der Deformationsgeschichte	472
4.8	Zyklisches Verhalten	473
4.9	Realität	473
5	Mathematische Struktur von Stoffgesetzen	474
5.1	Grundbegriffe, Tensoren	474
5.2	Elastische Stoffe im Allgemeinen	475
5.3	Einfluss der Geschichte	476
5.4	Homogenität	477
5.5	Invarianz, Isotropie, Objektivität	478
5.6	Eindeutigkeit	479
5.7	Maßstabeffekt	480
5.8	Kontinuumsmechanische und diskrete Betrachtungen	480
6	Hierarchie und Bestandteile von Stoffgesetzen	481
6.1	Lineare Elastizität	481
6.2	Elastoplastische Stoffgesetze	483
6.3	Hypoplastische Stoffgesetze	493
6.4	Antwortumhüllende	494
7	Besondere Fragestellungen	495
7.1	Wassergesättigter Boden	495
7.2	Stoffgesetze für teilgesättigten Boden	497
7.3	Stoffgesetze für schnelle Verformungen	497
7.4	Zeitabhängigkeit	498
7.5	Zementierung	498
7.6	Kornbruch	499
7.7	Thermische, chemische und biologische Effekte	499
8	Ergänzende Aspekte von Stoffgesetzen	499
8.1	Allgemeinheit	499
8.2	Kalibrierung	499
8.3	Stoffkonstanten und Zustandsgrößen	500
8.4	Thermodynamische Konsistenz	501
8.5	Große Verformungen	501
8.6	Entfestigung	502
8.7	Höhere Kontinua	502

9	Stoffgesetze in der Praxis	503
10	Literatur	504

1.8 Stoffgesetze und Bemessungsansätze für Festgestein

Erich Pimentel

1	Einführung	511
2	Allgemeine Eigenschaften	511
2.1	Fels und Boden	511
2.2	Diskontinuitäten	514
2.3	Genität, Tropie und Betrachtungsbereich	519
2.4	Bruch- und Verformungsverhalten	522
3	Stoffgesetze	525
3.1	Allgemeines	525
3.2	Elastisches Materialverhalten	525
3.3	Elastoplastisches Materialverhalten	527
3.4	Viskoplastisches Materialverhalten	534
3.5	Trennflächen	535
3.6	Homogenisierung	544
3.7	Schädigungsmodelle	546
4	Durchströmung des Gebirges	547
4.1	Allgemeines	547
4.2	Durchströmung von Gestein und einer Trennfläche	548
4.3	Homogenisierung	550
4.4	Nicht homogenisierbare Fälle und Sonderfälle	551
5	Bemessungsansätze	552
5.1	Allgemeines	552
5.2	Gleiten – ebener Fall	555
5.3	Gleiten – räumlicher Fall	557
5.4	Kippen	560
5.5	Knicken	565
5.6	Steinfall	566
6	Literatur	569

1.9 Bodendynamik

Christos Vrettos

1	Einleitung	573
2	Schwingungen einfacher Systeme	574
2.1	Allgemeines	574
2.2	Freie Schwingungen	575
2.3	Erzwungene, gedämpfte Schwingungen	577
2.4	Viskose Dämpfung	579
3	Wellenausbreitung im Boden	581

3.1	Allgemeines	581
3.2	Eindimensionale Wellenausbreitung	582
3.3	Verhalten von Wellen an Trennflächen	583
3.4	Ausbreitung von vertikal propagierenden Wellen in einer Bodenschicht	584
3.5	Oberflächenwellen	585
4	Bodenverhalten bei zyklischer Belastung	587
4.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	587
4.2	Äquivalent-lineares Modell	590
4.3	Nichtlineare Modelle	601
4.4	Zyklische Setzungen	606
5	Messung von dynamischen Bodenkenngößen	608
5.1	Feldversuche	608
5.2	Laborversuche	613
6	Dynamisch belastete Fundamente	616
6.1	Steifigkeitsfunktionen	616
6.2	Boden-Bauwerk-Interaktion	621
6.3	Pfahlgründungen	622
7	Literatur	623

1.10 Numerische Verfahren in der Geotechnik

Peter-Andreas von Wolffersdorff und Helmut F. Schweiger

1	Einleitung	633
2	Besonderheiten der Geotechnik	634
3	Bedeutung der Stoffmodelle für den Baugrund	637
4	Die verschiedenen numerischen Verfahren	640
4.1	Übersicht über numerische Verfahren	640
4.2	Kurzbeschreibung mathematischer und mechanischer Grundlagen	649
5	Verformungsberechnungen typischer geotechnischer Aufgaben	672
5.1	Vorbemerkungen	672
5.2	Gründungen	672
5.3	Dämme	682
5.4	Gesicherte Böschungen und Verbaukonstruktionen	687
6	Standsicherheitsberechnungen typischer geotechnischer Aufgaben	697
6.1	Vorbemerkungen	697
6.2	Verkehrsbauliche Dämme	697
6.3	Wasserbauliche Dämme	698
6.4	Böschungen	702
6.5	Baugrubenwände	707
7	Weitere Anwendungen numerischer Verfahren	708
7.1	Vorbemerkungen	708
7.2	Verformungsberechnungen beim Einsatz von Geokunststoffen	708
7.3	Dynamische Verformungsberechnungen bei Erdbebenbeanspruchungen	711
8	Schlussbemerkungen	713
9	Literatur	714

1.11 Massenbewegungen*Dieter D. Genske*

1	Einleitung	721
2	Mechanismen	732
2.1	Gleiten	733
2.2	Kippen, Knicken, Abscheren	742
2.3	Fallen	746
2.4	Fließen	748
2.5	Kriechen und Driften	754
3	Auslöser	758
3.1	Veränderung der Hanggeometrie	758
3.2	Veränderung der Bergwasserverhältnisse	759
3.3	Veränderung der Lasten	762
3.4	Veränderung der Festigkeit	763
4	Erkennen von Bewegungspotenzialen	764
4.1	Erkundung	764
4.2	Geomorphologische Ansprache	765
4.3	Bodenansprache	766
4.4	Gebirgsansprache	769
4.5	Hydrogeologische Ansprache	775
4.6	Biologische Ansprache	776
4.7	Anthropogene Ansprache	777
4.8	Synthesekarte	777
5	Gefahrenabwehr	778
5.1	Gefährdungskarten	778
5.2	Monitoring	780
5.3	Schutzmaßnahmen	782
5.4	Stabilisierungsmaßnahmen	785
5.5	Geokompatible Böschungsbildung	786
6	Klimawandel	788
6.1	Trigger im Klimawandel	788
6.2	Driver des Klimawandels	788
6.3	Anpassung an den Klimawandel	790
7	Zusammenfassung und Ausblick	791
8	Literatur	792

1.12 Ingenieurgeodäsie – Zustandsdokumentation und Überwachungsmessung*Otto Heunecke*

1	Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie	815
2	Inhalte ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen	816
3	Rekapitulation geodätischer Grundlagen	818
3.1	Allgemeines	818

3.2	Geodätische Bezugssysteme	819
3.3	Korrekturen und Reduktionen geodätischer Observablen	822
3.4	Koordinatentransformationen	825
3.5	Geodätische Netzausgleichung	827
4	Ingenieurgeodätische Messverfahren	831
4.1	Allgemeines	831
4.2	Bestimmung einzelner Messgrößen	832
4.3	Linienweise Messungen	840
4.4	3-D-Koordinatenbestimmungen	844
4.5	Geosensornetze	853
5	Auswertemethoden	855
5.1	Allgemeines	855
5.2	Deskriptive Verformungsanalyse	855
5.3	Zeitreihenauswertung	858
5.4	Integrierte Auswertemodelle	862
6	Literatur	864

1.13 Instrumentierung und Monitoring in der Geotechnik

*Hans Jakob Becker, Marcel Hubrig, Markus Stolz, Arno Thut und
Holger Wörsching*

1	Einleitung	867
2	Ziel geotechnischer Messungen	868
2.1	Instrumentierung und Feldversuche in der Sondierphase	869
2.2	Sicherheit und Beweissicherung	869
2.3	Qualitätskontrolle	869
2.4	Instrumentierungen bei der Beobachtungsmethode	869
3	Messgrößen	870
3.1	Messgrößen im Baugrund	870
3.2	Messgrößen während der Bauausführung	871
3.3	Messgrößen in Tragteilen	872
3.4	Messgrößen bei angrenzenden Objekten	872
3.5	Messgrößen bei permanenten Bauwerken	873
3.6	Messgrößen bei Sanierungen von Bauwerken	873
4	Messkonzept	874
4.1	Begriffe der Messtechnik	874
4.2	Sensoren und Sensorsysteme	875
4.3	Instrumentierung	877
4.4	Monitoring	878
4.5	Datenerfassungsarten	879
4.6	Datenmanagement	880
5	Messinstrumente in der Geotechnik	885
5.1	Verschiebungsmessungen	885
5.2	Messungen des Porenwasserzustands	910
5.3	Dehnungs-, Kraft- und Spannungsmessungen	919

5.4	Temperaturmessungen	921
5.5	Prüfungen	924
5.6	Immissionsmessungen / Erschütterungsmessungen	926
6	Fallbeispiele	928
6.1	Tiefe Baugruben, angrenzende Gebäude	928
6.2	Probeschüttungen, Barcelona und Venedig	939
6.3	Kavernen und Staumauerbau: Pumpspeicherwerk Limmern	941
6.4	Überwachung instabiler Hänge	952
6.5	Probelastungen an Tragteilen und Pfählen	957
6.6	Sanierung eines Bauwerks: Adlertunnel	960
6.7	Anwendung von linienweisen Messungen	964
7	Literatur	966
Stichwortverzeichnis		969
Inserentenverzeichnis		987

Autoren-Kurzbiografien

Hans Jakob Becker, Jahrgang 1972, studierte Geodäsie an der Technischen Universität Darmstadt. Der Berufseinstieg erfolgte im Tunnelbau. Ab 2000 als Projektleiter für messtechnische Instrumentierung und Monitoring bei der Solexperts AG in der Schweiz leistete er maßgebliche Mitarbeit zur Weiterentwicklung der Systeme zur Datenerfassung und zum Datenmanagement. Seit 2013 ist er Leiter der Abteilung Geotechnik.

Andreas Claussen, Jahrgang 1960, studierte an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg i. Br. Diplom-Geographie mit der Fachrichtung Hydrologie. Im Anschluss an das Studium promovierte er als wissenschaftlicher Angestellter des Instituts für Bodenkunde der Universität Hamburg über die bodenmechanischen und chemischen Eigenschaften von thermisch und nassmechanisch gereinigten Bodenmaterialien. Vom Institut für Bodenkunde wechselte er in ein Ingenieurbüro für Grundbau, Bodenmechanik und Umweltechnik und bearbeitete schwerpunktmäßig unterschiedlichste altlastverdächtige Flächen und Altlasten. Seit 2001 ist er in einem Planungsbüro mit Fragen des Bodenschutzes und der Bodenbewertung sowie der Altlastensanierung und des Flächenrecyclings befasst. Seit 2008 ist er von der HK Hamburg als Sachverständiger gemäß § 2 Abs. 1 der HmbVVSU nach §18 BBodSchG für das Sachgebiet 2 Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden – Gewässer anerkannt.

Jens Engel, Jahrgang 1963, ist seit 2003 Professor für Geotechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH) Dresden. Zu den Schwerpunkten an der Hochschule gehören Forschungsprojekte aus den Bereichen Eigenschaften von Böden, Bauen mit Geokunststoffen, Entwicklung neuer Grundbaukonstruktionen, Geotechnische Datenbanken und Deponiebau. Im Rahmen der Mitwirkung in Ausschüssen und Arbeitsgruppen ist er u. a. in die Weiterentwicklung geotechnischer Untersuchungsverfahren eingebunden. Er ist Sachverständiger für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau und betreut als selbstständiger beratender Ingenieur Baumaßnahmen aus den Bereichen Grundbau, Deponiebau, Erd- und Dammbau sowie Verkehrsbau. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens in Dresden und einem Aufenthalt an der Universität Karlsruhe promovierte er an der Technischen Universität Dresden über die Entwicklung bodenmechanischer Datenbanken und habilitierte an der gleichen Universität über Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von Böden.

Edwin Fecker, Jahrgang 1944, studierte an den Universitäten Freiburg und Karlsruhe Geologie. Am Institut für Boden- und Felsmechanik in Karlsruhe promovierte er mit einer Arbeit über den Spitzenreibungswiderstand auf großen Kluftflächen. Umfangreiche praktische Erfahrung hat er sich zunächst als Assistent am Institut für Boden- und Felsmechanik und schließlich als Geschäftsführer eines Ingenieurbüros für Baugeologie und Baumesstechnik erworben. 1991 wurde er zum Honorarprofessor der Universität Tübingen bestellt. Von 1996 bis zu seinem Ruhestand 2009 war er Geschäftsführer und Gesellschafter des Geotechnischen Ingenieurbüros Professor Fecker

und Partner GmbH. Er ist Mitglied mehrerer Ausschüsse und Arbeitsgruppen des DIN, der UNESCO und des Europarats.

Dieter D. Genske, geboren 1956, studierte Geo- und Ingenieurwissenschaften in Deutschland (Wuppertal, Aachen) und den USA und promovierte über ein probabilistisches Sicherheitskonzept für Böschungen bei Bernhard Walz und Karl-Heinz Heitfeld. Im Rahmen eines Post-Doktorats der Alexander von Humboldt-Stiftung ging er an die Universität von Kyoto (Japan). 1990 wurde er Projektmanager bei der Deutschen Montan Technologie DMT Essen und leitete eine Reihe von Großprojekten, u. a. im Rahmen der Internationalen Bauausstellung IBA Emscher Park und der Entwicklung des Berliner Spreebogens als neuen Regierungssitz. Dieter D. Genske unterrichtete an verschiedenen Hochschulen in Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz und wurde zu Forschungsaufenthalten nach Südafrika und Japan eingeladen. In Afrika und Osteuropa führte er eine Reihe von Projekten zur Entwicklungszusammenarbeit durch. Sein interaktives Distance Learning-Projekt wurde durch den Rat der Eidgenössischen Technischen Hochschulen ausgezeichnet. Seine Forschungsschwerpunkte sind Umwelt- und Geotechnik. Dieter Genske lehrte an der TU Delft und der ETH Lausanne/Zürich und ist nun Studiendekan an der Hochschule Nordhausen (Thüringen).

Ivo Herle, geboren 1966, hat sein Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität in Prag im Jahr 1989 abgeschlossen und war anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Theoretische und Angewandte Mechanik (ITAM) der Tschechischen Akademie der Wissenschaften. 1993 wechselte er an das Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, wo er im Jahr 1997 promovierte. Nach seiner Rückkehr an die Tschechische Akademie der Wissenschaften wurde er im Jahr 2000 stellvertretender Direktor und lehrte gleichzeitig an der Karls-Universität in Prag. Mit einer Förderung des Marie-Curie Individual Fellowship Programms forschte er ab 2002 am Institut für Geotechnik und Tunnelbau der Universität Innsbruck, wo er 2003 habilitierte. Seit 2004 ist er Professor für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Dresden. Seine Forschungsschwerpunkte sind theoretische und experimentelle Untersuchungen des mechanischen Bodenverhaltens, Standsicherheit von Böschungen und numerische Modellierung von geotechnischen Randwertproblemen.

Achim Hettler, Jahrgang 1953, leitet seit 1994 als Nachfolger von Prof. Weißenbach den Lehrstuhl für Baugrund – Grundbau an der Technischen Universität Dortmund. Er ist Mitglied in zahlreichen Normenausschüssen und Obmann des Arbeitskreises Baugruben sowie des DIN-Ausschusses „Baugrund; Berechnungsverfahren“. Seit Jahren Mitglied im Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und Leiter der Fachsektion „Bodenmechanik“. Forschungsschwerpunkte sind u.a. Themen zu Baugruben und Erddruckfragen. Nach dem Studium des Bauingenieurwesens in Karlsruhe und in Lyon Promotion und Habilitation am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik bei Prof. Gudehus in Karlsruhe. Seitdem über 20-jährige praktische Erfahrung u.a. bei einem großen Baukonzern im Spezialtiefbau, bei einem überregionalen Planungsbüro in der Geotechnik und bei der Sanierung von großen Altstandorten. In den letzten Jahren verstärkte Tätigkeit als Sachverständiger für Schäden im Grundbau und für Altlasten. Autor des Buches „Gründung von Hochbauten“ und Koautor der Bücher „Der

Bausachverständige vor Gericht“ (zusammen mit Stefan Leupertz, ehemals Richter am BGH) sowie der 2. Auflage von „Baugruben, Berechnungsverfahren“ (zusammen mit Anton Weißenbach).

Otto Heunecke, Jahrgang 1960, studierte von 1983 bis 1989 an der Universität Hannover Vermessungswesen. Von 1989 bis 2002 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter, seit 1999 Oberingenieur am Geodätischen Institut in Hannover, an dem er 1995 mit einer Arbeit für die Anwendung der Kalman-Filterung auf die Auswertung von Überwachungsmessungen promovierte. Seit 2002 hat er die Professur für Ingenieurgeodäsie im Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich automatisierter Verfahren bei Überwachungsaufgaben und der Nutzung neuer Messverfahren wie etwa dem terrestrischen Laserscanning. Er ist Mitglied in verschiedenen Arbeitskreisen zu Themen der Ingenieurgeodäsie.

Maximilian Huber, geboren 1979, studierte Bauingenieurwesen und Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Graz. Danach sammelte er erste Erfahrungen in der Industrie, bevor er als akademischer Mitarbeiter am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart arbeitete, an dem er 2013 bei Prof. P. A. Vermeer zum Thema „*Soil variability and its consequences in geotechnical engineering*“ promovierte. Danach setzte er seinen akademischen Werdegang am *Graduiertenkolleg GRK 1462-Modellqualität* der Bauhaus-Universität Weimar fort. Nach seiner Anstellung bei Deltares (NL) ist Maximilian Huber beim technischen Büro der Firma Ed. Züblin AG beschäftigt.

Marcel Hubrig, Jahrgang 1976, studierte an der Technischen Universität Dresden Geodäsie. Seit 2002 ist er Mitarbeiter der Firma Solexperts AG in die Schweiz. Er leitet messtechnische Instrumentierungen in Großprojekten im Bereich Staumauern und Kavernen sowie Monitoringprojekte im innerstädtischen Bereich.

Dimitrios Kolymbas, geboren 1949 in Athen, besuchte dort die deutsche Schule und studierte in Karlsruhe Bauingenieurwesen. Am Institut für Boden- und Felsmechanik dieser Universität hat er 1978 promoviert und 1988 habilitiert. Sein Hauptforschungsgebiet sind Stoffgesetze für Böden, er hat die Theorie der Hypoplastizität als Alternative zur Elastoplastizität eingeführt. Als Oberingenieur am o. g. Institut befasste er sich u. a. mit der Gründung des Kernkraftwerks Neckarwestheim 2 und war Mitglied von zwei Sonderforschungsbereichen. Seit 1994 ist er ordentlicher Professor für Geotechnik und Tunnelbau an der Universität Innsbruck. Er hat zahlreiche Konferenzen und Kurse organisiert sowie mehrere Bücher, darunter die Lehrbücher „Geotechnik“ (4. Ausgabe 2016) und „Tunnelling and Tunnel Mechanics“ (letzte Ausgabe 2008), veröffentlicht.

Klaus-Jürgen Melzer, Jahrgang 1935, studierte an der RWTH Aachen Bauingenieurwesen. Am Institut für Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik promovierte er mit einer Arbeit über Sonden für Baugrunduntersuchungen, wobei er gleichzeitig praktische Erfahrung in der Grundbauberatung sammelte. 1968 ging er zur USA Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI, wo sich der Schwerpunkt seiner Tätigkeit auf die Untersuchung der Mobilität geländegängiger Fahrzeuge verschob. 1974 bis

1993 arbeitete er bei der Battelle-Organisation, wo er u. a. sieben Jahre die Battelle Motor- und Fahrzeugtechnik GmbH als alleiniger Geschäftsführer leitete. Danach war er bis zum Erreichen des Ruhestands als Berater für mittelständische Industrieunternehmen tätig. In der gesamten Zeit hielt er die enge Verbindung zu seinem ursprünglichen Fachgebiet aufrecht. So leitete er u. a. von 1984 bis 1993 den Normenausschuss „Feldversuche“. Er gehörte und gehört auch noch heute verschiedenen internationalen und nationalen Ausschüssen und professionellen Gesellschaften an.

Erich Pimentel, geboren 1958, studierte an der Päpstlichen Katholischen Universität von Peru Bauingenieurwesen und arbeitete anschliessend zweieinhalb Jahre in Lima für ein geotechnisches Ingenieurbüro. Danach absolvierte er ein Aufbaustudium am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Dort promovierte er als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Felsmechanik mit einer Arbeit über das Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein. Seit 2004 ist er an der Professur für Untertagbau des Institutes für Geotechnik der ETH Zürich als Dozent und Oberassistent sowie als Leiter des dortigen Felslabors tätig. Darüber hinaus ist er seit 2008 im Vorstand der Geotechnik Schweiz und seit 2010 zusätzlich als Sekretär dieser Gesellschaft tätig.

Helmut F. Schweiger, Jahrgang 1954, studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Graz und Finite-Elemente-Methoden an der University of Wales, Swansea (Dissertation 1989). Danach intensive Beschäftigung mit numerischen Methoden in der Geotechnik im Rahmen seiner Forschungs- und Lehrtätigkeit am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz. Seine Habilitation erfolgte 1995, seit 1999 ist er Leiter der Arbeitsgruppe „Numerische Geotechnik“. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung und Anwendung numerischer Methoden auf praktische Aufgabenstellungen in der Geotechnik, insbesondere unter Berücksichtigung moderner Stoffgesetze. Er ist im „Editorial Board“ einiger internationaler Fachzeitschriften, wie z. B. Computers and Geotechnics, International Journal of Geomechanics und war von 2004 bis 2007 im „Advisory Panel“ von Geotechnique. Er ist Mitglied mehrerer „Technical Committees“ der ISSMGE und war im internationalen Expertenkomitee zur Klärung des Einsturzes der tiefen Baugrube „Nicoll Highway“ in Singapur.

Paul von Soos, Jahrgang 1925, begann 1944 das Studium des Bauingenieurwesens zunächst an der Technischen Universität Budapest und setzte es an der TH München fort, wo er 1950 diplomierte. Der weitere Berufsweg führte ihn als Betriebsleiter zum Institut und heutigen Prüfamts für Grundbau und Bodenmechanik der TU München, das er als Akademischer Direktor bis zum Eintritt in den Ruhestand leitete. Die Schwerpunkte lagen nicht nur auf dem Gebiet des bodenmechanischen Versuchswesens, an dessen Entwicklung und Standardisierung er maßgeblich beteiligt war, er war ebenso wissenschaftlich, lehrend und beratend bei herausfordernden Projekten des über- und unterirdischen Verkehrswegebbaus, des Wasserbaus und des Ingenieurbaus tätig. Seine Erfahrungen und sein sicheres Urteilsvermögen brachte und bringt er auch in die Mitarbeit bei zahlreichen Arbeitskreisen und Ausschüssen ein, von denen er jene für „Laborversuche“ und für die „Untersuchung von Boden und Fels“ über Jahrzehnte als Obmann leitete.

Markus Stolz, Jahrgang 1975, studierte an der Technischen Universität München Bauingenieurwesen. Nach einer Anstellung bei der Firma Ed. Züblin AG wechselte er 2004 zur Firma Solexperts AG in die Schweiz. Seit 2010 ist er für das Tochterunternehmen MeSy-Solexperts GmbH tätig und leitet dort die Abteilung Geotechnik am Firmensitz in Kempten. Gegenwärtig ist er Mitglied des Arbeitskreises „AK 2.10 Geomesstechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.

Arno Thut, geboren 1939. Abschluss als Dipl.-Bauing an der ETH Zürich 1963. Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau an der ETH Zürich bis 1969. Abschluss mit Dissertation. 1969 bis 1973 Aufenthalte in Marokko, Leitung Sondierkampagne für Stauwerke, Paris Studienbüro Solétanche, und in München Bauleitung Injektionen und Anker für Staudamm. 1973 bis 2014 Aufbau der Solexperts AG, Schweiz und Filialen in Frankreich und Deutschland, als Besitzer und Geschäftsleiter, Expertisen für Abdichtungen bei Stauwerken sowie Geotechnische und Hydrogeologische Instrumentierungen und Feldversuche. Ab 2014 Experte bei Solexperts AG und Besitzer der GEO IMMO AG, Beteiligung an GEOEXPERTS, Zilina, Slowakische Republik, Geotechnische Instrumentierungen.

Christos Vrettos, Jahrgang 1960, studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Boden- und Felsmechanik promovierte er dort im Jahre 1988. Postdoktorand an der Universität Kyoto in Japan und am M.I.T. in Boston. Anschließend bis 1996 Oberingenieur am Grundbauinstitut der TU Berlin, wo er habilitierte. Umfangreiche praktische Erfahrung durch die nachfolgende Tätigkeit in dem Technischen Büro eines Baukonzerns und in einem großen geotechnischen Planungsbüro. Seit 2004 leitet er den Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau an der TU Kaiserslautern. Berater für bedeutende Projekte im In- und Ausland. Forschungsschwerpunkte umfassen die dynamische Boden-Bauwerk-Interaktion, die experimentelle Bodendynamik, die Modellierung und Dimensionierung von Gründungen und geotechnischen Bauwerken sowie die Terramechanik.

Tilman Westhaus, Jahrgang 1958, studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und promovierte 1988 am Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig. Danach war er bis 1992 bei der Philipp Holzmann AG im Spezialtiefbau tätig. Bis 1997 war er Geschäftsführer / Gesellschafter der Baugrundinstitut Franke – Meißner und Partner GmbH und seit 1997 ist er Geschäftsführer / Gesellschafter der Baugrundinstitut Dr.-Ing. Westhaus GmbH. Seit 1994 ist er Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau nach Bauordnungsrecht. Er ist ferner Prüfer bei der Ingenieurkammer Hessen für die Zulassung von öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen für Geotechnik. Darüber hinaus ist er seit 2000 Mitglied im Normenausschuss Bauwesen im DIN NA 005-05 09 AA Arbeitsausschuss Baugrund, Feldversuche, geotechnische Messtechnik, Spiegelausschuss zum CEN/TC 341 und seit 2014 als Obmann im DIN und auf europäischer Ebene Vertreter Deutschlands im CEN/TC 341 und bei der Neufassung des EC 7.2 für den Bereich Felduntersuchungen.

Karl Josef Witt, geboren 1951, ist seit 1997 Universitäts-Professor für Geotechnik an der Bauhaus-Universität Weimar und ist Gesellschafter sowie wissenschaftlicher Berater des Ingenieurbüros witt & partner geoprojekt GmbH. Seine Forschungsschwerpunkte decken den Bereich Bodenstrukturen, Sicherheit von geotechnischen Bauwerken

und Umweltgeotechnik ab. Er ist Mitglied zahlreicher Ausschüsse und Arbeitsgruppen, Sachverständiger und Vermittler bei komplexen Schadens- und Streitfällen sowie gefragter Prüflingenieur für Erd- und Grundbau. Er studierte an der Universität Karlsruhe Bauingenieurwesen und promovierte am Institut für Grundbau Bodenmechanik und Felsmechanik mit einer Arbeit über Filtrationseigenschaften weitgestufter Erdstoffe. Die über 30-jährige praktische Erfahrung und die Nähe zu Projekten des Erd- und Grundbaus im Schnittbereich zwischen Ingenieurpraxis und Wissenschaft hat er sich zunächst in einem wasserbaulichen Planungsbüro und schließlich als Beratender Ingenieur in einem geotechnischen Planungsbüro erworben.

Peter-Andreas von Wolffersdorff, geboren 1951, ist seit 2000 Geschäftsführer der BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft GmbH. Er studierte an der HAB Weimar, der heutigen Bauhaus-Universität, Bauingenieurwesen und promovierte dort im Bereich kommunaler Tiefbau zu bodenmechanischen Stoffgesetzen. Seine wissenschaftliche Laufbahn setzte er Ende der 1980er-Jahre an der Universität Karlsruhe am Institut für Boden- und Felsmechanik bei Prof. Gudehus fort und schloss diese Zeit mit der Habilitation zu Verformungen von Stützkonstruktionen ab. Umfangreiche praktische Erfahrungen sammelte er während seiner Tätigkeit im technischen Büro der Ed. Züblin AG in Stuttgart, wo er an vielfältigen Bauvorhaben des Verkehrswegebbaus, Wasserbaus und Grundbaus im In- und Ausland mitwirkte. Er hat Lehraufträge an der OTH Regensburg und an der TU Bergakademie Freiberg, an der er seit 2010 auch als Gastprofessor in der Lehre tätig ist. Er ist ehrenamtlich in verschiedenen Ausschüssen des DIN und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik tätig. Seine langjährigen Erfahrungen bei der Anwendung numerischer Berechnungsmethoden setzt er u. a. als Obmann des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ der DGGT um.

Holger Wörsching, Jahrgang 1975, studierte an der Universität Karlsruhe Bauingenieurwesen und war anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Boden- und Felsmechanik an der Universität Karlsruhe tätig. 2006 Wechsel zur Solexperts AG in der Schweiz und Leitung zahlreicher In-situ-Versuche sowie messtechnische Instrumentierungen und Überwachungen in Europa und Afrika. Er ist gegenwärtig Schweizer Delegierter der ISO TC-182/WG2 Geotechnical Monitoring.

Martin Ziegler, Jahrgang 1954, ist seit April 2000 Inhaber des Lehrstuhls für Geotechnik im Bauwesen und Leiter des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau an der RWTH Aachen University. Er ist in verschiedenen mit der Normung befassten Gremien engagiert, so u. a. als Mitglied in verschiedenen Sachverständigenausschüssen des Deutschen Instituts für Bautechnik, im Normenausschuss zur DIN 1054, im Lenkungsausschuss der Initiative Praxisgerechte Regelwerke im Bauwesen e. V. (PRB) und auf europäischer Ebene in verschiedenen Arbeitsgruppen innerhalb des SC7 Geotechnical Design. Im Rahmen seiner Forschungsarbeiten zur Normung hat er u. a. an der Erarbeitung eines Leitfadens zur Vereinfachung von Bemessungsnormen mitgewirkt und zahlreiche Vergleichsrechnungen zu den verschiedenen Nachweisverfahren innerhalb Europas durchgeführt. Er ist Verfasser des Buches Geotechnische Nachweise nach EC 7 und DIN 1054 in der Reihe Bauingenieur-Praxis. Vor seiner Berufung an die RWTH Aachen University hat er in der Bauindustrie langjährige Erfahrungen in Planung und Bauausführung anspruchsvoller geotechnischer Projekte gesammelt.

1.1 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

Martin Ziegler

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Die Aufgabe des entwerfenden Ingenieurs liegt darin, ein Bauwerk so zu konzipieren, dass es sicher und gebrauchstauglich ist sowie wirtschaftlich erstellt und betrieben werden kann. Daneben sind die Umweltverträglichkeit und eine mögliche Beeinträchtigung der Umgebung während des Baus, aber auch über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks zu beachten. Für die Realisierung dieser Aufgabe gibt es keine eindeutige Lösung. Einige der genannten Anforderungen konkurrieren unmittelbar miteinander und werden von den am Projekt Beteiligten durchaus auch unterschiedlich gesehen und bewertet (Bild 1). So wird beispielsweise der Investor die kostenoptimierte Errichtung eines Bauwerks mit eher billigen und kurzlebigen Elementen verfolgen, während der Betreiber im Hinblick auf die Instandhaltung und Wartung stärker an einer höherwertigen Erstausrüstung interessiert ist.

Ähnliche Spannungsfelder ergeben sich auch zwischen Investor und Bauausführendem, Betreiber und Nutzer, aber auch im Verhältnis zur allgemeinen Öffentlichkeit. Konflikte treten in diesem Zusammenhang insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der Sicherheitsanforderungen an ein Bauwerk auf. Die Allgemeinheit fordert schnell die Einhaltung höchster Sicherheitsvorkehrungen, muss dafür aber zumindest vordergründig meistens nicht direkt ins finanzielle Obligo bei der Umsetzung treten. Dabei ist die Verbesserung eines bereits hohen Sicherheitsniveaus ungleich schwieriger und vor allem kostspieliger als ein entsprechender Sicherheitszuwachs von geringerem Niveau



Bild 1 Anforderungen und Beteiligte bei einem Bauprojekt

1.2 Baugrunduntersuchungen im Feld

Klaus-Jürgen Melzer, Edwin Fecker und Tilman Westhaus

1 Grundlagen

1.1 Normen und Richtlinien

In der europäischen Norm EN 1997-1 (s. a. Kapitel 1.1) befasst sich der Abschnitt 3 u. a. mit den Baugrundaufschlüssen. Dort wird verlangt, dass Felduntersuchungen nach international anerkannten Standards und Empfehlungen auszuführen sind; bezüglich der Anforderungen an die Planung sowie allgemeine Geräte- und Versuchsdurchführungen von Labor- und Feldversuchen wird auf EN 1997-2 verwiesen. Die angesprochenen Felduntersuchungen sollen außer bodenmechanischen Aufschlüssen auch ingenieurgeologische und hydrogeologische Erkundungen – auch unter umweltrelevanten Aspekten – einbeziehen, wobei sich der Umfang der Untersuchung an den geotechnischen Kategorien (s. Kapitel 1.1, 3.4.2) des Bauvorhabens orientieren sollte. Wichtig ist auch die Forderung, dass der Umfang der Baugrunderkundung auch nach Baubeginn zu ergänzen ist, wenn neu zu Tage tretende Umstände das erfordern.

Allgemein muss eine Baugrunduntersuchung alle Daten beschaffen, die für die Festlegung der vom jeweils betrachteten Baugrund-Bauwerk-System abhängigen charakteristischen Baugrundkenngrößen (s. Kapitel 1.1, 3.5) erforderlich sind und für eine Bauwerksplanung oder die Gewinnung von Baustoffen relevant sein können.

Zu den relevanten Normen bzw. Normengruppen gehören:

EN 1997-2	Geotechnical Design – Part 2: Ground investigation and testing (DIN EN 1997-2).
DIN 4020	Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke.
DIN 4020	Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
EN ISO 22475	Geotechnical investigation and testing – Sampling methods and groundwater measurements – Part 1-3.
EN ISO 22476:	Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1-12, 15.
DIN 4094-2	Baugrund – Felduntersuchungen – Teil 2: Bohrlochrammsondierung.
ISO 14688	Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1-2.
ISO 14689-1	Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of rock – Part 1: Identification and description.

1.3 Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor

Paul von Soos und Jens Engel

1 Boden und Fels – Begriffe und Entstehung

Boden im bautechnischen Sinne ist die oberflächennahe, nicht verfestigte Zone der Erdkruste. Seine Bestandteile sind miteinander nicht oder nur in so geringem Maße mineralisch verkittet, dass die Verkittung die Eigenschaften des Bodens nicht prägt („Lockergestein“).

Fels ist jene Zone der Erdkruste, deren Bestandteile miteinander mineralisch fest verkittet sind. Seine Eigenschaften sind durch diese Verkittung und in der Regel zusätzlich durch Systeme von Trennflächen bestimmt, entlang denen der feste Zusammenhalt aufgehoben ist („Festgestein“).

Boden und Fels bilden *Baugrund*, wenn sie im Einflussbereich zu errichtender Bauwerke anstehen. Sie sind *Baustoff*, wenn sie zur Errichtung von Bauwerken oder Bauteilen dienen.

Mineralischer Boden ist durch Verwitterung von Festgesteinen entstanden. Er steht entweder in ursprünglicher Lagerung an (*Verwitterungsboden*) oder er wurde durch Wind, Wasser oder Eis transportiert und abgelagert (*Sedimente*).

Organische oder *organogene Böden* enthalten Reste organischer Lebewesen.

Von den Festgesteinen entstammt ein Teil dem flüssigen Erdinneren: *magmatische Gesteine* (z.B. Granit). Ein anderer Teil hat sich aus Böden und den Ausscheidungen der Gewässer gebildet, die unter Druck durch Verkittung (Diagenese) zu *Sedimentgesteinen* (z.B. Sandstein) umgewandelt wurden. Unter hohen Drücken und Temperaturen wurden Magmatische und Sedimentgesteine zu *metamorphen Gesteinen* umkristallisiert (z.B. Gneis). Die gesteinsbildenden Vorgänge und der Kreislauf Verwitterung – Transport – Ablagerung – Verfestigung konnten im Laufe der Erdgeschichte durch Änderung von Oberflächengestalt und Klima an beliebiger Stelle unterbrochen werden oder neu ansetzen. Die vielgestaltigen Möglichkeiten in Ursprung und Geschichte erklären die große Mannigfaltigkeit der Böden und Felsen und das weite Band, in dem ihre bautechnischen Eigenschaften sich abstufen.

1.4 Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung

Maximilian Huber und Karl-Josef Witt

1 Einleitung

Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung ist ein komplexer und schwer zur durchdringender Gegenstand für die Ingenieurpraxis. Es ist ein Versuch, mittels mathematisch-statistischer Konzepte die Folgen der Variabilität der Einwirkungen und der Eigenschaften des Baugrunds in Nachweisen der Standsicherheit und in Prognosen des Verhaltens von Bauwerk, Baugrund und Grundwasser zu quantifizieren. Zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema zeigen deutlich das Potenzial dieser Herangehensweise für den Entwurf und die Ausführung von geotechnischen Bauwerken auf, vor allem um den Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit als Entscheidungsgrundlage transparent darzustellen.

Dieses Kapitel des Grundbau-Taschenbuchs hat das Ziel, Entwicklungen, Erkenntnisse und Berechnungsmethoden auf statistischen und probabilistischen Grundlagen vorzustellen und Möglichkeiten der Implementierung in die empirischen, analytischen und numerischen Methoden der geotechnischen Bemessung aufzuzeigen. Die für die Geotechnik charakteristische Unschärfe in Prognosen muss dennoch akzeptiert werden. Dies ist im Wesentlichen der Unkenntnis der Variabilität und der Korrelation der Einflussgrößen sowie der Einfachheit der Modelle geschuldet. Die Anwendung von (geo) statistischen und probabilistischen Methoden bietet jedoch zumindest eine Chance, diese Unschärfe als Entscheidungsgrundlage quantitativ zu erfassen, was die Beurteilung durch einen Experten nicht ersetzt, aber stützen kann.

Nach einer Einführung in Sicherheitskonzepte und in die Methoden der Statistik und Geostatistik werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse beschrieben. Exemplarisch werden daraufhin komplexe Fragestellungen der Probabilistik und die Berücksichtigung von Messungen in einer probabilistischen Analyse behandelt. Für Anwendungen statistischer und probabilistischer Methoden auf typische Nachweis- und Bemessungsaufgaben der Geotechnik in Anlehnung an DIN EN 1997-1 (EC 7 Teil 1) [108] werden Erkenntnisse und Schlüsselpublikationen aufgeführt. In einem Anhang finden sich zu den wichtigsten Methoden die mathematischen Formeln.

1.5 Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser

Andreas Claussen

1 Grundlagen

In der geotechnischen Betrachtung des Untergrunds stehen die bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften im Vordergrund. Betrachtet man den Untergrund von der chemischen Seite aus, dann handelt es sich in seinem Ausgangszustand um ein heterogenes Stoffgemisch, das in den überwiegenden Fällen aus anorganischen Mineralien besteht.

In Lockergesteinen liegen die Mineralien in Form einzelner Mineralkörner der Ton-, Schluff-, Sand- oder Kiesfraktion oder in Form von Bruchstücken aus Mineralgemischen der Sand-, Kies-, Stein- und Blockfraktion vor. Vom Grundsatz her kann davon ausgegangen werden, dass je kleiner das Bodenpartikel ist, es umso wahrscheinlicher aus einer einzelnen Mineralart besteht. In Festgesteinen liegen die einzelnen Mineralien noch in einem festen Verbund in Gesteinsschichten vor. Durch die Bewegung der Erdkruste und die Verwitterung werden diese Gesteinsschichten aufgebrochen, sodass sich aus vormals festen Gesteinen die Lockergesteine bilden konnten.

In diese anorganisch mineralische Matrix können in unterschiedlichem Maße auch organische Stoffe eingebunden sein, wie z. B. in Lockergesteinen in Form fein verteilter organischer Substanzen, sei es rezent in Seen, Mooren, Marschen, Küsten sowie fossil in ehemaligen wassergefüllten Senken oder marinen Becken. Auch in Festgesteinen kommen organische Substanzen in fein verteilter Form vor, wie in Tongesteinen (z. B. Grube Messel) oder kohlehaltigen Gesteinen, die je nach Mächtigkeit und Kohlegehalt (z. B. in Flözen) abgebaut werden. Darüber hinaus kann es im Bereich von Mooren und Sümpfen auch zur Ausbildung fast reiner organischer Schichten aus pflanzlichen Überresten kommen.

Der Untergrund besteht aus mehreren Phasen. Hierzu gehört die feste Phase bestehend aus allen Feststoffen wie den mineralischen oder organischen Feststoffpartikeln. Darüber hinaus gehören dazu die Bodenluft und das Bodenwasser. Im mit Wasser ungesättigten Untergrund ist das Bodenwasser auf die feineren Poren, die das Wasser gegen die Schwerkraft halten können, die Menisken, und die feuchten Oberflächen der Feststoffe beschränkt. Die gröberen Poren werden von der Bodenluft erfüllt. Im mit Wasser gesättigten Untergrund werden die Poren innerhalb des Feststoffs vollständig vom Wasser gefüllt.

1.6 Erddruck

Achim Hettler

1 Einführung

Das Thema Erddruck gehört zu den ältesten und umfangreichsten Kapiteln der Bodenmechanik und des Grundbaus. Die ersten schriftlichen Quellen, die auf *Vitruv* zurückgehen, sind über 2000 Jahre alt und sind somit weitaus älter als die allgemein bekannten Theorien von *Coulomb* (1773) [17] oder *Rankine* (1857) [89]. *Vitruv* befasst sich im ersten und im sechsten Band seiner zehn Bücher mit der Wirkungsweise des Erddrucks auf Stützmauern und schlägt Strebepfeiler vor. *Vauban*, einer der größten Baumeister der Geschichte, veröffentlichte schon 1684 Bemessungstabellen für Stützmauern mit Höhen bis zu 15 m, die auch nach heutigem Stand nicht weiter optimierbar sind. Die Entwicklung der Erddrucktheorie wird von *Kurrer* ausführlich in Kapitel 5 der erweiterten Auflage „Geschichte der Baustatik“ [71] beschrieben. Der vorliegende Beitrag kann nur eine beschränkte Auswahl aktueller Berechnungsgrundlagen beinhalten. Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, wie schon in der 7. Auflage, den Grundbauingenieuren und den Tragwerksplanern in Baufirmen, Ingenieurbüros sowie in der Bauverwaltung eine Sammlung von Arbeitsanleitungen zur Verfügung zu stellen. Um das Verständnis zu wecken, werden zunächst in Abschnitt 3 die wesentlichen Grundlagen zur Ermittlung des Erddrucks vorgestellt. Die Abschnitte 4 bis 8 beinhalten die für die Praxis wichtigsten Verfahren zum aktiven und passiven Erddruck sowie zum Erduhrdruck. Dabei werden in den Abschnitten 7 und 8 auch räumliche Wirkungen berücksichtigt. Ein Anliegen des Beitrags ist, in knapper Form auch Hinweise zu nicht alltäglichen Fragestellungen zu geben und auf weiterführende Literatur zu verweisen (s. Abschnitt 9). In den letzten Jahren ist immer mehr die Verschiebungsabhängigkeit des Erddrucks in den Blickpunkt getreten. Dies betrifft nicht nur den passiven, sondern auch den aktiven Fall (s. Abschnitt 10). Der Beitrag schließt mit Anwendungshinweisen für die Praxis in Abschnitt 11 und wird durch Erddrucktabellen für die wichtigsten Grundlagenfälle ergänzt.

Der Aufbau des Beitrags in der 8. Auflage ist im Wesentlichen identisch mit den Ausführungen in der 7. Auflage. Neuere Entwicklungen, insbesondere auch in DIN 4085, deren Neufassung für 2017 geplant ist, sind berücksichtigt.

Für die sorgfältige Prüfung des Manuskriptes sowie zahlreiche Anregungen und Verbesserungsvorschläge dankt der Verfasser Herrn Prof. *Anton Weißenbach*. Herrn Prof. *Franke* gilt mein Dank für die Hilfe bei der Beschaffung von Literatur und die fachlichen Diskussionen. Ein Dank ergeht nicht zuletzt an die Mitarbeiter des Lehrstuhls in Dortmund, insbesondere für die Manuskript- und Bilderstellung sowie die Erstellung der Tafel 5 im Anhang. Gedankt sei auch dem Verlag und dem Herausgeber Herrn

1.7 Stoffgesetze für Böden

Dimitrios Kolymbas und Ivo Herle

Symbolverzeichnis

B	Kompressionsmodul
c	Kohäsion
c_u	undrained Kohäsion
d_{ij} , $\mathbf{D}$	Verzerrungsgeschwindigkeit, Stretching-tensor
e	Porenzahl
e_c	kritische Porenzahl
e_0	Referenzporenzahl
E	Elastizitätsmodul
E_t	Tangentialsteifigkeit
f	Funktion; Fließfunktion
g	plastisches Potential, Erdbeschleunigung
G	Schubmodul
h	skalärer Verfestigungsparameter (Zustandsvariable)
k	Durchlässigkeitskoeffizient
K	Kompressionsmodul
K_0	Erdruhedruckbeiwert
M	Grenzspannungsparameter
M_{ijkl}	Steifigkeitsmatrix
n	Porenanteil, Porosität
$\mathbf{n}$	Einheitsvektor
N_{ij}	Spannungsfunktion
p	mittlere Spannung, Porenwasserdruck (Abschnitt 7)
p'	effektive mittlere Spannung
p_c	Konsolidierspannung
p_0	Referenzspannung
q	Deviatorspannung
R_i	Volumenkraft
s_u	undrained Scherfestigkeit
t	Zeit
dt	Zeitinkrement
$\mathbf{t}$	Spannungsvektor
$\mathbf{T}$	Spannungstensor

u	Verschiebung, Porenwasserdruck
v	Geschwindigkeit
α_{ij}	tensorieller Verfestigungsparameter (Zustandsvariable)
δ_{ij}	Kronecker-Symbol
ε	Dehnung
ε^e	elastische Dehnung
ε^p	plastische Dehnung
ε^{vp}	viskoplastische Dehnung
$\Delta\varepsilon, d\varepsilon$	Dehnungsinkrement
$\dot{\varepsilon}$	Dehnungsrate
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Hauptdehnung
$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$	volumetrische Dehnung
$\varepsilon_{ij}, \varepsilon$	Dehnungstensor
φ	Reibungswinkel
φ_c	kritischer Reibungswinkel
λ	Lamé-Parameter; Multiplikator
μ	Lamé-Parameter
ν	Poisson-Zahl
ψ	Dilatanzwinkel
ρ	Dichte
σ	Spannung
σ'	effektive Spannung
$\Delta\sigma, d\sigma$	Spannungsinkrement
$\dot{\sigma}$	Spannungsrate
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_{ij}, σ	Spannungstensor
τ	Schubspannung

1 Einführung

Stoffgesetze präsentieren sich heute als ein kaum zu durchdringendes Feld von nicht zu durchschauender Komplexität. Lohnt es sich, sich mit Stoffgesetzen zu befassen? Eigentlich schon, denn sie sollen das mechanische Verhalten von Boden mathematisch beschreiben. Wohlgermerkt, dies ist ein ehrgeiziges Anliegen, denn das Bodenverhalten ist äußerst komplex und noch Gegenstand intensiver Forschung weltweit. Entsprechend kompliziert sind daher die vielen vorgeschlagenen Stoffgesetze, und die Nachsicht hat derjenige, der auf sie angewiesen ist, ohne die erforderliche Übersicht und Erfahrung zu haben. Das vorliegende Kapitel des Grundbau-Taschenbuchs hat sich zum Ziel gesetzt, Benutzern von Stoffgesetzen zu helfen, eine Übersicht zu gewinnen.

Die Vielfalt des mechanischen Verhaltens von Böden, die enormen Schwierigkeiten bei seiner mathematischen Modellierung sowie ihre zentrale Bedeutung bei der numeri-

schen Simulation machen Stoffgesetze zu einem faszinierenden Forschungsthema, für welches ein zunehmendes Interesse nicht nur im Bauingenieurwesen, sondern auch im Bergbau, in der Geologie und neuerdings auch in der Physik (siehe z. B. [44]) aufkommt.

2 Frequently asked questions

Sogenannte *frequently asked questions* werden gerne herangezogen, um Leser in ein komplexes Feld einzuführen. Es wurden folgende Fragen ausgewählt:

1. *Stoffgesetze sind kaum verständliche Theorien. Braucht sie ein Bauingenieur wirklich? Wozu?*

Stoffgesetze sind nicht nur der Kern jeder numerischen Simulation, sondern sie stellen Rahmen auf, die zum Verständnis des Stoffverhaltens erforderlich sind. Die Bedeutung und die Messung von Bodeneigenschaften machen nur im Zusammenhang mit einem bestimmten Stoffgesetz Sinn.

2. *Machen komplizierte Theorien einen Sinn, wenn man bedenkt, wie inhomogen der Boden aufgebaut ist und welche Streuung die üblichen Versuchsergebnisse haben?*
- Die Inhomogenität des Bodens hat nichts mit seinem Verhalten und demnach mit einem Stoffgesetz zu tun. Ist das Stoffgesetz erst einmal festgelegt, so können die Inhomogenität des Bodens, die Streuung der Versuchsergebnisse und ihre Konsequenzen – zumindest im Prinzip – mit stochastischen Methoden erfasst werden.

3. *Es fällt auf, dass Ergebnisse von Laborversuchen (etwa eine Spannungs-Dehnungs-Linie aus einem Triaxialversuch) durch Stoffgesetze nur ungenau reproduziert werden. Ist dies ein Hinweis dafür, dass Stoffgesetze unvollkommen oder gar mangelhaft sind, sodass sie im Grunde genommen keine besondere Beachtung bei ihrer Auswahl, Kalibrierung und Implementation verdienen?*

Stoffgesetze sind Theorien. Theorien reduzieren und abstrahieren die Erfahrung und beruhen auf zusätzlichen Annahmen, die es erlauben, Versuchsergebnisse zu interpretieren. In diesem Sinn stellt jede Theorie eine Approximation dar und die damit verknüpfte Abweichung von der Realität darf nicht als Fehler aufgefasst werden und sollte kein Anlass sein, auf logische und mathematische Strenge zu verzichten [90].

4. *Warum gibt es so viele unterschiedliche Stoffgesetze? Kann man nicht für den Hausgebrauch mit irgendeinem möglichst einfachen Stoffgesetz hinreichend gut auskommen?*

Da ein absolut überzeugendes und zufriedenstellendes Stoffgesetz noch nicht vorliegt, stellen die verschiedenen zurzeit verfügbaren Stoffgesetze lediglich Versuche dar. Jedes hat seine Stärken und Schwächen, daher sollte man ein Stoffgesetz für ein konkretes Problem mit Bedacht wählen.

5. *Warum wird immer noch an Stoffgesetzen geforscht? Welche sind die noch offenen Fragen?*

Da man nicht a priori weiß, welche Verformungen bei einem bestimmten Problem auftreten, sollte ein Stoffgesetz allgemeingültig sein, d. h. es soll für alle erdenklichen Beanspruchungen aller Bodenarten realistische Voraussagen liefern. Da diese Forderung noch nicht erfüllt worden ist, werden immer wieder Versuche unter-

1.8 Stoffgesetze und Bemessungsansätze für Festgestein

Erich Pimentel

1 Einführung

Im Grundbau ist es aufgrund des unterschiedlichen Materialverhaltens zweckmäßig, zwischen Boden und Fels zu unterscheiden. Wie bei jeder Wissenschaft ist der Bedarf der Gesellschaft an Erkenntnissen hinsichtlich bestimmter Aufgabenstellungen die treibende Kraft für einen Großteil der Forschungsarbeiten. Dadurch bedingt hat die systematische Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Fels später begonnen als beim Boden. Das erklärt nur zum Teil, weswegen die Anzahl der Stoffgesetze zur Beschreibung des Verhaltens von Fels geringer ausfällt als bei der Bodenmechanik. Ein anderer Grund liegt sicherlich nicht in der Komplexität, da das Verhalten von Fels nicht minder komplex ist als das von Boden. Aufgrund der höheren Festigkeit des intakten Festgesteins reichten oft nur einfachere Stoffgesetze bzw. Bemessungsansätze, um Aufgabenstellungen zufriedenstellend zu bewerkstelligen. Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts hat sich das Aufgabenspektrum zunehmend erweitert und damit auch die Erkenntnisse zum Materialverhalten von nicht nur intaktem Festgestein.

Zielsetzung des vorliegenden Kapitels ist, das überwiegend in Fachpublikationen gestreute Wissen zu diesen Themen praxisnah zusammenzustellen. Um ein besseres Verständnis der theoretischen Zusammenhänge zu ermöglichen, werden in Abschnitt 2 die Unterschiede zwischen Fels und Boden sowie die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von Fels, Diskontinuitäten und Gebirge bzw. ihr Materialverhalten qualitativ beschrieben.

In Abschnitt 3 und 4 werden Stoffgesetze und -gleichungen zur Beschreibung des mechanischen bzw. hydraulischen Materialverhaltens erläutert. In Abschnitt 5 werden Bemessungsansätze vorgestellt, die ohne den Einsatz numerischer Methoden umsetzbar sind. Mit diesen Ansätzen kann eine Vielzahl der in der Praxis gestellten Aufgaben des Grundbaus im felsigen Untergrund gelöst werden.

2 Allgemeine Eigenschaften

2.1 Fels und Boden

Die Begriffe Boden und Lockergestein bzw. Fels und Gestein werden oft als Synonyme verwendet. Boden bzw. Lockergestein besteht aus Festsubstanzen und Poren, die im unterschiedlichen Grade mit Flüssigkeiten oder Gasen gefüllt sind. Erstere bestehen

1.9 Bodendynamik

Christos Vrettos

1 Einleitung

Die Bodendynamik spielt eine maßgebende Rolle bei einer Vielzahl von geotechnischen Problemstellungen. Die wichtigsten darunter sind:

- Gründung von Maschinenfundamenten,
- Geotechnisches Erdbebeningenieurwesen (Stabilität von Dämmen, Böschungen, Gründungen, Stützwänden und Tunneln),
- Erschütterungen und Setzungen infolge Verkehr und Baubetrieb,
- Gründung von Offshore-Konstruktionen.

Die wesentlichen Unterschiede zu der klassischen (statischen) Bodenmechanik liegen in den folgenden Punkten:

Die Bodendynamik untersucht Fälle, bei denen die Lasten sich mit der Zeit schnell ändern. Dies hat als Folge die Entstehung von Trägheitskräften. Das jeweilige Problem wird durch Bewegungsgleichungen und nicht durch Gleichgewichtsbedingungen, wie im statischen Fall, beschrieben. Die Lösungsmethoden sind entsprechend unterschiedlich.

Die durch dynamische Beanspruchungen erzeugten Wellen breiten sich im Boden aus. Dies führt dazu, dass der Einflussbereich von Lasten und Verformungen in der Bodendynamik erheblich größer ist als in der Bodenmechanik. Dies ist noch ausgeprägter bei Belastungen durch Erdbeben: Die Beanspruchung des Bodens und demzufolge auch der Gründungen wird durch kinematische Größen (Beschleunigung, Geschwindigkeit, Verschiebung) beschrieben und nicht mittels Spannungen wie bei statischer Belastung durch Bauwerkslasten. Die Ermittlung der Belastungsmerkmale wird dadurch erheblich erschwert. Des Weiteren ist die seismische Belastung meistens als einfache Scherung anstatt als triaxiale Kompression zu modellieren und bei der Dimensionierung einer Baukonstruktion sind horizontale und nicht vertikale Kräfte und Verschiebungen maßgebend.

In der Bodendynamik sind die eingepprägten Lasten und Verformungen nicht nur zeitabhängig, sondern auch zyklisch bzw. transient. Das Bodenverhalten (Spannungs-Verformungs-Beziehung) unter zyklischer Last unterscheidet sich wesentlich vom Verhalten bei monotoner, statischer Belastung. Zum Beispiel ist die inelastische, hysteretische Art des Bodenverhaltens bei der zyklischen Belastung von Bedeutung. Überschreiten die Bodendehnungen einen bestimmten Wert, entstehen bleibende Verformungen, die mit der Zyklenzahl zunehmen und eventuell zu einem fortschreitenden Versagen

1.10 Numerische Verfahren in der Geotechnik

Peter-Andreas von Wolffersdorff und Helmut F. Schweiger

1 Einleitung

Numerische Verfahren haben sich zur Beurteilung des Verformungsverhaltens geotechnischer Bauwerke in der Praxis etabliert. Der im Eurocode 7 verankerte Nachweis der Gebrauchstauglichkeit kann für komplexe Strukturen meist nur mit numerischen Analysen geführt werden. Auch beim Nachweis von Grenzzuständen erlangen numerische Berechnungen zunehmend an Bedeutung. Möglich gemacht wurde dies durch intensive Forschung insbesondere auf dem Gebiet von Stoffmodellen für Geomaterialien sowie der Entwicklung von effizienten Lösungsalgorithmen für nichtlineare Gleichungssysteme, die nunmehr auch in kommerziellen Programmsystemen umgesetzt sind und nicht nur der wissenschaftlichen Forschung zur Verfügung stehen. Dreidimensionale Berechnungen können heute problemlos auf Standard-PCs durchgeführt werden. Trotz dieser erfreulichen Entwicklung muss festgehalten werden, dass numerische Methoden in der Geotechnik nicht den Stellenwert besitzen wie in anderen Fachbereichen, z. B. im konstruktiven Ingenieurbau. Der Grund liegt darin, dass auch bei entsprechender Baugrunduntersuchung das Bodenprofil nicht in allen Einzelheiten für das gesamte durch die Baumaßnahme beeinflusste Gebiet erfasst werden kann. Darüber hinaus sind Bodenkennwerte, insbesondere Steifigkeiten, immer mit Unsicherheiten behaftet und können im Allgemeinen nur innerhalb einer gewissen Bandbreite angegeben werden. Schlussendlich stellt die mathematische Beschreibung des Materialverhaltens von Geomaterialien trotz der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte nach wie vor eine Herausforderung dar. Daher hält auch der Eurocode 7 im Abschnitt 2.4.1(2) fest: *„Es sollte berücksichtigt werden, dass die Kenntnis der Baugrundverhältnisse vom Umfang und von der Güte der Baugrunduntersuchungen abhängt. Deren Kenntnis und die Überwachung der Bauarbeiten sind im Allgemeinen wichtiger für die Einhaltung der grundsätzlichen Anforderungen als die Genauigkeit der Rechenmodelle und der Teilsicherheitsbeiwerte.“*

Dieses Kapitel soll dem in der geotechnischen Praxis tätigen Ingenieur Hinweise zur erfolgreichen Modellierung unterschiedlicher Problemstellungen geben, wobei numerische Analysen für den Tunnelbau und die Modellierung von Grundwasserströmungen, soweit es sich nicht um stationäre Sickerlinienberechnungen handelt, ausgeklammert bleiben, da diese an anderer Stelle behandelt werden.

Neuere Methoden, die auch große Bodendeformationen – wie sie bei der numerischen Simulation von Herstellungsverfahren (z. B. von Pfählen) und Eindringvorgängen (z. B. von Spundwänden) entstehen können – berücksichtigen, sind in dieses Kapitel aufgenommen worden. Es werden jedoch nur deren Grundprinzipien kurz erläutert.

1.11 Massenbewegungen

Dieter D. Genske

1 Einleitung

Unter Massenbewegung versteht man die talabwärts gerichtete Verlagerung von Gebirgsmassen. Sie unterliegen Mechanismen (Abschnitt 2), deren Erkennung eine Untersuchung des geologischen Aufbaus des Hangs und seiner Umgebung sowie die Erfassung der wirksamen Kräfte voraussetzt. Ein Hang bewegt sich entsprechend seiner

- äußeren Geometrie (Geomorphologie) und
- seines inneren Aufbaus (Geologie).

Es lassen sich entsprechend externe und interne Faktoren unterscheiden, wie dies bereits *Howe* [159] und *Terzaghi* [363] getan haben. Schließlich bedarf es eines auslösenden Ereignisses, eines *Triggers*, „soll die Talfahrt erfolgen“ [1] (Abschnitt 3). Dieser Trigger ermöglicht einen Initialmechanismus, dem Postfailure-Mechanismen und Sekundäreffekte folgen können. Damit ein Hang in Bewegung gerät, müssen somit zwei Bedingungen erfüllt sein [116]:

- Zum einen muss sich ein Bewegungsmechanismus ausbilden können (kinematische Bedingung).
- Zum anderen muss ein Trigger das Gleichgewicht der Kräfte stören, sodass sich der Hang jenseits des Grenzzustands befindet, in dem die treibenden Kräfte die haltenden überwiegen (mechanische Bedingung).

Die geomorphologischen und geologischen Vorgaben zu erkennen, ist Teil der Erkundungsarbeiten (Abschnitt 4). Die Geomorphologie resultiert aus der Wirkung der Atmosphäre auf die Geosphäre. Verwitterung und Abtragung geben dem Hang seine Form (im Gegensatz zur Böschung, die künstlich angelegt wird). Die Geologie wird durch das Gestein und seine tektonische Überprägung bestimmt. Aus der Sicht des Ingenieurs wird dabei zwischen Lockergestein und Festgestein unterschieden. Aus der Sicht des Geowissenschaftlers handelt es sich dagegen generell um Gebirge, in dem Diskontinuitäten intakte Bereiche voneinander trennen. Bei den intakten Bereichen kann es sich sowohl um Lockergestein als auch um Festgestein handeln. Zusätzlich wird eine Gruppe von veränderlich festen Gesteinen definiert, um mögliche, für den Bemessungszeitraum relevante Veränderungen der Festigkeitseigenschaften in Betracht zu ziehen.

Im Festgestein werden die Bewegungsmechanismen von Diskontinuitäten dominiert, die sich (bei Belastung) ausweiten und vernetzen können. Im (homogenen) Lockergestein können sich Bewegungsfugen frei ausbilden. Allerdings können auch im Lo-

1.12 Ingenieurgeodäsie – Zustandsdokumentation und Überwachungsmessung

Otto Heunecke

1 Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie

Die *Ingenieurgeodäsie* bildet das Spektrum an Vermessungsarbeiten, die mit technischen Projekten – u. a. im Grundbau – in Verbindung stehen. Die Aufgabenbereiche umfassen die Aufnahme, die (geometrische) Projektierung, die Absteckung, die Abnahme und die Überwachung [5] von baulichen Anlagen sowie beispielweise Maschinen- und Industrieanlagen; nachfolgend als Messobjekte subsumiert. Zu den Messobjekten zählen zudem Überwachungen von Rutschhängen und Senkungsgebieten infolge der Rohstoffgewinnung. Zur Erfüllung dieser Aufgaben sind die geeignete Sensorik und die Messverfahren (s. Abschnitt 4) sowie ein adäquates geodätisches Bezugssystem (s. Abschnitt 3.2) so zu wählen, dass vorgegebene Qualitätsanforderungen, z. B. Vollständigkeit, Korrektheit, Verfügbarkeit und Aktualität, erreicht werden. Häufig stehen diese Vermessungsarbeiten in enger Ergänzung und Wechselwirkung zu den Verfahren der Bau- und Geomesstechnik.

Eine *ingenieurgeodätische Aufnahme* besteht in der Erfassung geometrischer Größen des Istzustands eines Messobjekts mit dem Ziel, den gegenwärtigen Zustand zu dokumentieren und damit Planungsunterlagen zu schaffen, z. B. Lage- und Höhenpläne. Dabei ist heute ein durchgehend digitaler Datenfluss von der Messwertgewinnung bis zur Ergebnisdarstellung gegeben. Für viele derartige Anwendungen kann auf *Geobasisinformationen* zurückgegriffen werden, insbesondere das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) und das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS). ATKIS beinhaltet u. a. die mittels Airborne Laserscanning (ALS) gewonnenen digitalen Geländemodelle (DGM), die in der höchsten Auflösung bundesweit als $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ Raster mit einer Höhengenaugigkeit von 2 bis 3 dm vorgehalten werden. ALKIS ermöglicht vor allem den Zugriff auf die Eigentums Grenzen. Aufbauend auf der Bestandsdokumentation beinhaltet die *Projektierung* die Festlegung geometrischer Größen des Sollzustands eines zur Realisierung anstehenden Vorhabens. Gemäß Terminologie der HOAI [12] zählen die Aufnahme und die Projektierung zur *planungsbegleitenden Vermessung*.

Die ingenieurgeodätischen Arbeiten zur Ausführung eines Projekts – die HOAI spricht von der Bauvermessung – umfassen die Übertragung geometrischer Größen einer Projektierung in die Örtlichkeit sowie Bauausführungsvermessungen zur Kontrolle und Dokumentation des Baufortschritts. Wird ein Bauvorhaben nach VOB [20] durchgeführt, ist es gemäß Teil B, § 3 Sache des Auftraggebers, die Hauptachsen der zu errich-

1.13 Instrumentierung und Monitoring in der Geotechnik

*Hans Jakob Becker, Marcel Hubrig, Markus Stolz, Arno Thut und
Holger Wörsching*

1 Einleitung

Die Bemessung von Bauwerken im Grundbau basiert auf den geotechnischen Kennwerten und Lastannahmen. Durch die meist große Heterogenität des Baugrunds ist die Festlegung der Kennwerte schwierig. Die Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk kann deshalb meist nur mit Messungen am Bauwerk und im Baugrund beurteilt werden. Die zunehmende verdichtete Bautätigkeit und die Beschränkung des zur Verfügung stehenden Baulands im städtischen Bereich erfordert auch mehr Baumaßnahmen im Untergrund, dies unbeschrieben von schwierigen geotechnischen Konditionen.

Bei umfassenden Baumaßnahmen wie bei Dammschüttungen (beispielsweise für den Schutz vor steigendem Meeresspiegel), bei tiefen Baugruben etc., wird in vielen Fällen für die Planung der Projekte die Beobachtungsmethode angewandt. Mit bestehenden geotechnischen Messverfahren und der Entwicklung neuer Instrumente wird den Ingenieuren, Geotechnikern und Geologen ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das ihnen vertiefte Kenntnisse in der Geotechnik und im Verhalten von Bauwerksteilen ermöglicht. In der Projektierungsphase können damit zusätzliche Informationen gewonnen werden und in der Ausführungsphase erlauben sie die berechneten mit den effektiv auftretenden Größen zu vergleichen. Die Berechnungsmodelle können darauf basierend angepasst werden und bei geschickter Anordnung der Messquerschnitte sind einerseits Optimierungen und Einsparungen möglich, andererseits kann bei Überschreiten von Grenzwerten rechtzeitig korrigierend eingegriffen werden.

Im städtischen Bereich besteht die Gefahr, dass bei Baumaßnahmen angrenzende Gebäude in Mitleidenschaft gezogen werden. Im Hinblick auf die Sicherheit und auf die Beweissicherung stehen heute für die Beobachtung angrenzender Gebäude automatische Messsysteme mit Echtzeitvisualisierungen zur Verfügung. Die kontinuierlichen Messungen von Setzungen und Verkipnungen der Gebäude, korreliert mit den geotechnischen Messungen im Lockergestein und den Messungen am Bauwerk, erlauben Schlüsse zwischen der Ursache von Schäden und der jeweiligen Bauphase zu ziehen. Mehrere Fallbeispiele zeigen den hohen Stellenwert solcher Messungen.

Der Sicherheit, dem Schutz von Leben und Gut muss die höchste Priorität zukommen, die geotechnischen Messungen tragen Wesentliches zu dieser Sicherheit bei. Die Stabilität von Hängen beispielsweise wird mit der Überwachung der Verschiebungen und der Porenwasserspannungen kontrolliert. In kritischen Situationen hat die automatische Überwachung hier ebenfalls eine große Bedeutung, sie ermöglicht mit der Festle-