



Helmut Prinz · Roland Strauß

Ingenieur- geologie

6. Auflage



Springer Spektrum

Ingenieurgeologie

Helmut Prinz
Roland Strauß

Ingenieurgeologie

6. Auflage

Helmut Prinz
Bingen
Deutschland

Roland Strauß
Geologischer Dienst NRW Landesbetrieb
Krefeld
Deutschland

ISBN 978-3-662-54709-0 ISBN 978-3-662-54710-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54710-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1982, 1991, 1997, 2006, 2011, 2018
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Frank Wigger

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Einbandabbildung: alter Steinbruch Dorndorf (Werratal) in Sandsteinen der Bernburg-Folge (Unterer Buntsandstein) mit salzhangbedingten Zerrspalten.

Foto: S. Schmidt/J. Wunderlich, Weimar

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 6. Auflage

Die vorliegende 6. Auflage wurde ergänzt und thematisch aktualisiert und es sind die geostrategischen Fragestellungen der Zeit aufgenommen worden. Der bisher großen Resonanz entsprechend soll auch die 6. Auflage sowohl Studierenden als auch im Beruf stehenden Geowissenschaftlern und Bauingenieuren ein praxisnahes Wissen vermitteln und auch als Nachschlagewerk dienen. Wer sich intensiver mit speziellen ingenieurgeologischen Problemen befassen muss, findet entsprechende Literaturzitate. Hinweise auf Fehler aller Art und auch weiterführende Anregungen sind immer willkommen.

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schwerter, Putzkau, der freundlicherweise eine fachliche Durchsicht vorgenommen und viele Anregungen gegeben hat. Sehr zu danken haben wir auch den Herren Dr. S. Schmidt, Weimar, und Dr. H.-M. Möbus, Wiesbaden, für zahlreiche Anregungen.

Speziell bedanken wollen wir uns bei Frau C. Lerch und Frau K. Beifuß für das ausgezeichnete und geduldige Lektorat. Besonderer Dank gebührt auch Lilli Prinz, die den Zeitaufwand auch für diese Überarbeitung mit bewundernswerter Geduld ertragen hat.

Prof. Dr. Helmut Prinz

Bingen

Prof. Dr. Roland Strauß

Krefeld

Im Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Verbindlichkeit von Normen und Richtlinien, Baugrundrisiko	3
1.3	Formelzeichen, Einheiten	6
2	Boden- und felsmechanische Kennwerte, ihre Ermittlung und Bedeutung	9
2.1	Definitionen, Richtlinien, Normen	11
2.2	Korngröße, Kornverteilung	13
2.2.1	Siebanalyse	13
2.2.2	Sedimentationsanalyse	13
2.2.3	Sieb- und Sedimentationsanalyse	15
2.2.4	Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen	15
2.2.5	Körnungen als Handelsbegriff	17
2.2.6	Hydraulische Instabilität und Filter für Dränmaßnahmen	19
2.2.7	Filtersande und Filterkiese für den Brunnenbau	23
2.2.8	Aufbau und Eigenschaften der Tonminerale	23
2.3	Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen	26
2.3.1	Kalkgehalt (V_{Ca})	27
2.3.2	Organische Bestandteile (V_{gl})	28
2.3.3	Schwefelverbindungen	29
2.4	Das Dreistoffsystem Boden bzw. Fels	29
2.4.1	Wassergehalt (w), Sättigungszahl (S_r), Wasseraufnahmevermögen (w_A)	29
2.4.2	Korndichte (ρ_s), Reindichte (ρ_r), Feststoffdichte (ρ_p)	32
2.4.3	Dichte (ρ) und Wichte (γ)	33
2.4.4	Porenanteil (n), Porenzahl (e), Porosität (p)	36
2.5	Lagerungsdichte (D)	38
2.5.1	Lagerungsdichte nichtbindiger Lockergesteine	38
2.5.2	Lagerungsdichte bindiger Lockergesteine, Proctorversuch	38
2.6	Zustandsform, Konsistenzgrenzen	40
2.7	Verformungsverhalten, Druck- und Zugfestigkeit	44
2.7.1	Grundlagen	44
2.7.2	Wirkung des Wassers, Porenwasserdruck	46
2.7.3	Spannungs-Verformungs-Beziehungen	48
2.7.4	Bodensteifigkeit, Steifemodul (E_s), Zeitsetzungsverhalten	49
2.7.5	Verformungsmodul (E_v) und Bettungsmodul (k_s) aus dem Plattendruckversuch	55
2.7.6	California-Bearing-Ratio-Versuch (CBR-Versuch)	57
2.7.7	Verformungsmodul (E_v) aus Bohrlochaufweitungsversuchen	58
2.7.8	Diskussion der Verformungsmoduln des Gebirges	59
2.7.9	Primärspannungszustand	60
2.7.10	Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Sprödigkeit	67
2.7.11	Volumenzunahme durch Quellen	76

2.8	Scherfestigkeit	79
2.8.1	Grundlagen	79
2.8.2	Direkter Scherversuch mit vorgegebener Scherfläche	81
2.8.3	Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche	82
2.8.4	Undrained Scherfestigkeit c_u	84
2.8.5	Großscherversuche	86
2.8.6	Diskussion der Scherfestigkeitsparameter (φ, c)	89
2.9	Durchlässigkeit	95
2.9.1	Durchlässigkeit von Lockergesteinen	95
2.9.2	Durchlässigkeit von Fels	97
2.9.3	Laborversuche zur Ermittlung des k -Wertes	99
2.9.4	Feldversuche zur Ermittlung des k -Wertes	100
2.9.5	Durchlässigkeitsbeiwerte	112
2.9.6	Grundwasserfließparameter	116
2.9.7	Kapillarität, kapillare Steighöhe (h_k), Saugspannung (s)	118
2.9.8	Sickerwasser, Grundwasserneubildung	120
3	Beschreibung und Einstufung von Boden und Fels, Bruchtektonik	123
3.1	Benennung und Beschreibung von Boden und Fels	124
3.2	Gruppeneinteilung der Böden nach DIN 18 196	124
3.2.1	Grobkörnige Böden	126
3.2.2	Gemischtkörnige Böden	126
3.2.3	Feinkörnige Böden	126
3.2.4	Organische und organogene Böden	127
3.2.5	Aufgeschüttete Bodenarten	128
3.3	Einstufung von Boden und Fels nach den ATV-Normen der VOB	128
3.3.1	Boden- und Felsklassen für Erdarbeiten nach DIN 18 300	131
3.3.2	Boden- und Felsklassen für Bohrarbeiten nach DIN 18 301	133
3.3.3	Benennung und Einstufung von Boden und Fels nach DIN 18 304, Ramm-, Rüttel- und Pressarbeiten	134
3.4	Beschreibung von Gesteinen und Fels	134
3.4.1	Gesteinsbeschreibung für bautechnische Zwecke	135
3.4.2	Verwitterung	140
3.4.3	Trennflächen und ihre Bedeutung	142
3.5	Plattentektonik, bruchmechanische Deutung und Ausbildung tektonischer Störungszonen	152
3.5.1	Bruchmechanische Deutung	154
3.5.2	Ausbildung und Erkundung tektonischer Strukturen	158
3.5.3	Rezente tektonische Spannungen und Deformationen	162
3.5.4	Übersicht über die tektonischen Großstrukturen in Deutschland	165
4	Erkundungsmethoden	175
4.1	Grundlagen und Erkundungsumfang	176
4.2	Spezielle Arbeiten im Rahmen der Voruntersuchung	177
4.2.1	Geologische und ingenieurgeologische Karten	178
4.2.2	Gefahrenhinweis- und Risikokarten	178
4.2.3	Erdbebengefährdung	180
4.3	Indirekte Erkundungsmethoden	191

4.3.1	Projektkartierungen, Luftbildauswertung	191
4.3.2	Geophysikalische Erkundung	193
4.3.3	Gasgeochemisches Monitoring	199
4.4	Direkte Aufschlussmethoden	203
4.4.1	Gesetzliche Vorschriften	203
4.4.2	Art und Umfang der Baugrunderkundung	206
4.4.3	Boden- und Gesteinsproben, Probenentnahme	207
4.4.4	Schürfe, Untersuchungsschächte und -stollen	209
4.4.5	Bohrungen	210
4.4.6	Sondierungen	217
4.5	Aufnahme von Aufschlüssen	224
4.5.1	Aufnahme von Schürfen	224
4.5.2	Aufnahme von Bohrungen im Lockergestein	225
4.5.3	Aufnahme von Bohrungen im Fels	228
4.6	Erfassung der Grundwasserverhältnisse	231
4.7	Darstellung der Boden- und Felsarten	237
4.8	Bohrlochmessungen	237
4.8.1	Bohrlochsondierungen	237
4.8.2	Bohrlochabweichungsmessungen	239
4.8.3	Geophysikalische Bohrlochmessungen	240
4.8.4	Verschiebungsmessungen in Bohrlöchern	243
5	Einführung in die Berechnungsverfahren für Flachgründungen und Geländebruch	247
5.1	Grundlagen	249
5.2	Sicherheitsnachweise für Bauwerke	249
5.2.1	Berechnungsmodelle, Nachweisverfahren	251
5.2.2	Grenzzustand und Bemessungssituation	253
5.2.3	Geotechnische Einwirkungen und Widerstände	253
5.2.4	Charakteristische Werte geotechnischer Kenngrößen	254
5.2.5	Bemessungswerte, Teilsicherheitsbeiwerte	254
5.3	Sohldruckverteilung in der Fundamentsohle	255
5.3.1	Mittige und ausmittige Beanspruchung von starren Einzelfundamenten	256
5.3.2	Linien- und Einzellasten auf Streifenfundamenten	258
5.3.3	Grundlagen des Bettungsmodul- und Steifemodulverfahrens	258
5.4	Nachweis der Tragfähigkeit von Flachgründungen	259
5.4.1	Gleitsicherheit (EQU)	259
5.4.2	Kippsicherheit (EQU)	260
5.4.3	Sicherheit gegen Aufschwimmen (UPL)	260
5.4.4	Hydraulischer Grundbruch (HYD)	262
5.4.5	Grundbruchsicherheit	264
5.5	Sohlspannungsverteilung und Setzung von Flachgründungen	265
5.5.1	Theorie der Sohlspannungsverteilung	265
5.5.2	Sohlspannungsverteilung im Baugrund	266
5.5.3	Ermittlung der Setzungen von Streifen- und Einzelfundamenten	268
5.6	Grundlagen für die Ermittlung des Erddrucks	274
5.6.1	Erddruckarten	274
5.6.2	Wahl des Erddruckansatzes	274

5.6.3	Bodenkennwerte für Erddruckberechnungen	276
5.7	Stand sicherheitsnachweise für Geländebruch	277
5.7.1	Berechnungsmodelle und Sicherheiten	277
5.7.2	Stand sicherheit bei ebener Gleitfläche	280
5.7.3	Stand sicherheit bei gebrochener Gleitfläche	281
5.7.4	Stand sicherheitsnachweis nach den Lamellenverfahren	282
5.7.5	Starrkörpermethode bzw. Blockgleitverfahren	284
5.7.6	Stand sicherheit von Felsböschungen	284
5.7.7	Mechanische Wirkung des Wassers	287
6	Flachgründung, Setzungen, Ursache von Risschäden	291
6.1	Prinzip der Flächengründung, Fundamentarten	292
6.2	Gründungstiefe	292
6.3	Bemessungswerte des Sohlwiderstands in einfachen Fällen	292
6.4	Setzungen und Setzungsunterschiede, Risschäden	295
6.4.1	Setzungsunterschiede, verträgliche Setzungen	295
6.4.2	Ursachen und Deutung von Rissen	297
6.5	Ursache unkonventioneller Setzungen	299
6.5.1	Vernässung, Wasserdurchströmung	299
6.5.2	Thermischer und vegetationsbedingter Feuchtigkeitsentzug	299
6.5.3	Grundwasserabsenkung und Wegfall des Auftriebs	302
6.5.4	Entnahme von Erdgas und Erdöl	303
6.5.5	Baugrundhebungen infolge von Quellerscheinungen oder Kristallisationsdruck	304
6.5.6	Einfluss von Erschütterungen	305
7	Baugrundverbesserung	311
7.1	Konstruktive Maßnahmen	312
7.2	Mechanische Baugrundverbesserungsverfahren	313
7.2.1	Verdichtung und Bodenaustausch	313
7.2.2	Rüttelstopfverdichtung, Stabilisierungssäulen	315
7.2.3	Dynamische Intensivverdichtung	317
7.3	Injektionen	318
7.3.1	Feststoffinjektionen	318
7.3.2	Chemische Injektionen	321
7.3.3	Umweltverträglichkeit der Injektionsmittel	322
7.4	Frac-Verfahren	322
7.5	Düsenstrahlverfahren	324
8	Pfahlgründung	327
8.1	Einteilung und Tragverhalten der Pfähle	328
8.1.1	Tragverhalten der Pfähle	328
8.1.2	Pfahlarten und Baustoffe	329
8.2	Grundlagen der Pfahlbemessung	330
8.2.1	Ermittlung der Pfahltragfähigkeit durch Probelastung	332
8.2.2	Bemessungsverfahren für Bohrpfähle aus Erfahrungs- bzw. Tabellenwerten	334
8.2.3	Tragfähigkeit von Reibungspfählen	336
8.2.4	Horizontale Einwirkung auf Pfähle	338
8.2.5	Negative Mantelreibung und Seitendruck auf Pfähle in weichen Böden	339

8.2.6	Tragfähigkeit von Pfahlgruppen	340
8.3	Verdrängungspfähle	341
8.3.1	Fertigpfähle	342
8.3.2	Ortbetonrammpfähle	343
8.3.3	Schraubpfähle	343
8.4	Bohrpfähle	344
8.4.1	Normalkalibrige Bohrpfähle	345
8.4.2	Großbohrpfähle	346
8.5	Pfähle mit kleinen Durchmessern	347
9	Baugruben	349
9.1	Baugrubenaushub	350
9.2	Geböschte Baugruben	350
9.3	Baugrubenverbau	351
9.3.1	Trägerbohlwandverbau	352
9.3.2	Spundwandverbau	353
9.3.3	Bohrpfahlwände	354
9.3.4	Schlitzwände	354
9.3.5	Nagelwände	355
9.4	Baugrubenverbau mit begrenzter Durchlässigkeit (Dichtwände)	357
9.4.1	Schlitzwandverfahren	358
9.4.2	Bohrpfahlwände oder DS-Säulenkörper	358
9.4.3	Schmalwände	359
9.4.4	Sohldichtung von Baugruben	359
9.5	Ankersicherung	361
9.5.1	Herstellung von Verpressankern	362
9.5.2	Ankersysteme von Verpressankern	364
9.5.3	Prüfung der Anker	366
9.5.4	Bemessung der Anker	366
10	Schutz der Bauwerke vor Grundwasser, Versickerung	371
10.1	Grundwasserstand, Bemessungswasserstand	372
10.2	Dränung und Abdichtung von Bauwerken	374
10.3	Druckwasserhaltende Abdichtung	375
10.4	Dezentrale Regenwasserversickerung	376
10.5	Betonangreifende Wässer und Böden	377
10.5.1	Entnahme und Untersuchung von Grundwasser- und Bodenproben	378
10.5.2	Untersuchungsmethoden	380
10.5.3	Betonaggressive Stoffe und ihre Wirkung	380
10.5.4	Beurteilung der Aggressivität	383
10.5.5	Bauliche Schutzmaßnahmen	384
11	Wasserhaltung	387
11.1	Rechtliche Grundlagen	388
11.2	Offene Wasserhaltung	390
11.3	Grundwasserabsenkung mit Brunnen	391
11.4	Grundwasserabsenkung im Vakuumverfahren	394
11.5	Elektroosmotische Entwässerung	396

11.6	Berechnung einer Grundwasserabsenkung	396
11.7	Grundwasserkommunikationsanlagen	399
12	Erdarbeiten	401
12.1	Gewinnung und Förderung	403
12.2	Einbau und Verdichtung	406
12.2.1	Verdichtbarkeit der Boden- und Felsarten	407
12.2.2	Verdichtungsgeräte	409
12.2.3	Verdichtungsanforderungen nach ZTVE und RIL 836	410
12.2.4	Verdichtungskontrollen	412
12.2.5	Dammaufstandsfläche und Dammschultern	415
12.2.6	Hinterfüllen und Überschütten von Bauwerken	415
12.2.7	Erdbaumaßnahmen in Wasserschutzgebieten	416
12.3	Bodenverbesserung und Bodenverfestigung	417
12.3.1	Bodenverbesserung mit Kalk	418
12.3.2	Bodenverfestigung mit Zement	419
12.3.3	Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Mischbindemitteln	419
12.3.4	Verbesserung der Tragfähigkeit und der hydraulischen Stabilität durch Geokunststoffe	420
12.4	Frostwirkung	423
12.4.1	Frostempfindlichkeit von Erdstoffen und Fels	423
12.4.2	Tragschicht und Frostschutzschicht im Straßenbau	425
12.4.3	Bettung, Frostschutz- und Planumschutzschicht bei Gleisanlagen	426
12.5	Verwertung von Bodenaushub und Bauschutt	427
12.5.1	Verwertungsgebot, Abfallarten	427
12.5.2	Klassifikation und Dokumentation der Abfälle	429
12.5.3	Untersuchungsumfang, Probennahme	429
12.5.4	Anforderungen an die Verwertung	431
13	Standsicherheit von Böschungen	435
13.1	Böschungsneigungen in Lockergesteinen	437
13.1.1	Grobkörnige Böden	437
13.1.2	Feinkörnige Böden	438
13.1.3	Gemischtkörnige Böden	438
13.1.4	Heterogene (geschichtete) Böden	438
13.1.5	Halden- und Kippenböschungen	439
13.2	Böschungen im Fels	439
13.2.1	Einfluss des Trennflächengefüges und der Frostbeständigkeit	439
13.2.2	Böschungsneigungen und Böschungsformen	440
13.2.3	Herstellen von Felsböschungen	442
13.3	Sicherungsmaßnahmen	444
13.3.1	Bautechnische Maßnahmen beim Böschungsbau	444
13.3.2	Erosionsschutz- und Lebendverbaumaßnahmen	447
13.3.3	Entwässerungsmaßnahmen	449
13.4	Erfahrungswerte von Böschungsneigungen in Mittelgebirgen	450
13.4.1	Alte Gebirge	450
13.4.2	Schichtgesteine	451
13.5	Tertiäre und quartäre Gesteine, Braunkohletagebaue	452
13.6	Böschungen in Steine- und Erdenbetrieben	453

14	Standsicherheit und Verformung von Dämmen	455
14.1	Standsicherheit von Dämmen	456
14.1.1	Grundbruchsicherheit	456
14.1.2	Gleit- bzw. Spreizsicherheit	456
14.1.3	Sicherheit gegen Böschungsbruch	457
14.1.4	Dämme auf wenig tragfähigem Untergrund	458
14.2	Setzungen von Dämmen auf tragfähigem Untergrund	460
14.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit und Abminderung der Setzungen	462
14.3.1	Maßnahmen bei der Dammschüttung	462
14.3.2	Punkt- und streifenförmige Bodenstabilisierung	464
14.3.3	Teilweiser oder vollständiger Bodenaustausch	466
15	Rutschungen	467
15.1	Ursachen von Rutschungen	469
15.1.1	Geologische Voraussetzungen	470
15.1.2	Veränderungen der Neigung oder Höhe eines Hanges bzw. einer Böschung	471
15.1.3	Wirkung von Wasser und Klima	471
15.1.4	Vegetation und menschliche Eingriffe	473
15.2	Erkennungsmerkmale und Untersuchungsmethoden	474
15.2.1	Beschreibung der wichtigsten Begriffe einer Rutschung	474
15.2.2	Kartenunterlagen und -darstellungen	476
15.2.3	Erkennen von Rutschungen und Rutschhängen im Gelände	477
15.2.4	Lage- und höhenmäßige Aufnahme und Darstellung	479
15.2.5	Aufschlussarbeiten	481
15.2.6	Lagebestimmung der Gleitfläche und Bewegungsmessungen	482
15.2.7	Altersdatierung und Bewegungsablauf	485
15.3	Arten von Rutschungen, Klassifikation	489
15.3.1	Fallen	489
15.3.2	Kippen	491
15.3.3	Gleiten	491
15.3.4	Driften	493
15.3.5	Fließen	494
15.3.6	Kriechen	495
15.3.7	Komplexe Rutschungstypen	497
15.4	Berechnungsansätze und Diskussion der Scherparameter	498
15.5	Vorbeugende Maßnahmen und Sanierung von Rutschungen	502
15.5.1	Verbesserung bzw. Wiederherstellen des Böschungsgleichgewichts	503
15.5.2	Oberflächendrainage	505
15.5.3	Tiefdrainage	506
15.5.4	Stabilisierung von Hangrutschungen	507
15.5.5	Gründung von Bauwerken an rutschgefährdeten Hängen	508
15.5.6	Risikobewertung, Überwachungs- und Warnanlagen	510
15.6	Rutschungsanfällige Schichtenfolgen	512
15.6.1	Grundgebirge	512
15.6.2	Schiefergebirge und Permgebiete	513
15.6.3	Buntsandsteingebiete	515
15.6.4	Grenze Röt/Muschelkalk und Mittlerer/Oberer Muschelkalk	516

15.6.5	Keuper	519
15.6.6	Jura	521
15.6.7	Kreide	523
15.6.8	Tertiär	524
15.6.9	Braunkohlentagebau- und Kippenböschungen	528
15.6.10	Quartär	530
16	Umweltschadstoffe, geologische Barriere, Untertagedeponien, Bergbaufolgen, Methan- und Schiefergas	533
16.1	Umweltschadstoffe, Grundbelastung	535
16.1.1	Geogene und ubiquitäre Grundbelastung	535
16.1.2	Schadstoffgruppe der Kohlenwasserstoffe	537
16.2	Untergrund als geologische Barriere für nichtradioaktive Schadstoffe	538
16.2.1	Anforderungen an Barrieregesteine	539
16.2.2	Wasserbewegung und Schadstofftransport	541
16.2.3	Schadstoffrückhaltung (Sorption)	542
16.2.4	Chemische Beständigkeit der Tonminerale	545
16.3	Untertagedeponien und geologische Tiefenlager	545
16.3.1	Untertagedeponien für chemotoxische Abfälle	545
16.3.2	Geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle	547
16.3.3	Speicherung von CO ₂ oder anderen Gasen in tiefen geologischen Formationen	552
16.4	Bergbaufolgen	554
16.4.1	Zuständigkeit und Unterlagen der Bergbehörden	554
16.4.2	Bergbaubedingte Bodenbewegungen und ihre Behandlung	555
16.4.3	Folgen des tagesnahen und oberflächennahen Bergbaus	560
16.4.4	Folgen des tiefen Bergbaus	564
16.4.5	Großräumige bergbaubedingte Grundwasserabsenkungen	564
16.4.6	Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs	567
16.5	Methangasaustritte, Flözgas, Schiefergas	571
16.5.1	Methangasaustritte	571
16.5.2	Flözgas, Grubengas	572
16.5.3	Exploration auf Schiefergas	573
17	Tunnelbau	577
17.1	Grundbegriffe des Tunnelbaus	579
17.2	Aufgaben und Grenzen der Erkundung, Risikomanagement	579
17.2.1	Erkundungsinhalte, Richtlinien	580
17.2.2	Baugrundrisiko, Risikomanagement und Baumethodenentscheidung	581
17.2.3	Spezielle Erkundungsmethoden	584
17.2.4	Tunnelplanung in Karstgebieten	589
17.2.5	Erkundung und Auswirkungen der Grundwassersituation	594
17.2.6	Auftreten von Gasen im Gebirge	611
17.2.7	Verwendung des Tunnelausbruchmaterials und Umweltbelastung	612
17.2.8	Ermittlung geotechnischer Kennwerte	615
17.2.9	Lösbarkeit, Erweichbarkeit, Verklebungspotenzial	616
17.3	Gebirgsklassifizierung für konventionelle Vortriebe	625
17.3.1	Qualitative Gebirgsklassifizierung	625
17.3.2	Quantitative Gebirgsklassifizierung	628

17.3.3	Gebirgsverhaltenstypen und Systemverhalten nach ÖGG-Richtlinie.....	633
17.3.4	Darstellung und Wertung der Gebirgstypen bzw. -klassen	636
17.4	Ingenieurgeologische Baubetreuung	637
17.4.1	Ingenieurgeologisch-geotechnische Vortriebsdokumentation bei konventionellen Vortrieben	637
17.4.2	Ingenieurgeologisches Nachtragsmanagement	641
17.5	Standfestigkeit und Tragverhalten des Gebirges	644
17.5.1	Lage, Richtung und Querschnitt des Hohlraums, Versagensmechanismen.....	644
17.5.2	Spannungszustand, Spannungumlagerung, Gebirgs- und Quelldruck.....	646
17.5.3	Geotechnische Messungen und Verformungsverhalten in Mittelgebirgstunneln	654
17.5.4	Verbundwirkung von Gebirge und Spritzbetonausbau	662
17.5.5	Bemessungsannahmen für die Tunnelstatik	665
17.6	Bauweisen	676
17.6.1	Offene und halboffene Bauweisen	677
17.6.2	Konventioneller bergmännischer Vortrieb	678
17.6.3	Teilschnittmaschinen.....	681
17.6.4	Tunnelvortriebsmaschinen	681
17.6.5	Rohrvortrieb und verwandte Verfahren	698
17.7	Ausbrucharbeiten bei konventionellem Tunnelvortrieb	701
17.7.1	Bagger und Sprengvortrieb	701
17.7.2	Profilhaltung und Mehrausbruch	703
17.8	Sicherungsarbeiten, Gebirgsvergütung	704
17.8.1	Spritzbetonausbau.....	704
17.8.2	Ankersicherung	707
17.9	Baubehelfsmaßnahmen	712
17.9.1	Firstsicherung durch Spieße, Dielen oder Schirme	712
17.9.2	Gebirgsvergütung durch Injektionen	715
17.9.3	Gebirgsvergütung und temporäre Abdichtung durch Bodenvereisung.....	717
18	Talsperrengeologie	719
18.1	Ingenieurgeologische Arbeiten	720
18.1.1	Voruntersuchungen für die Planung	721
18.1.2	Untersuchungen für die Bauausführung	721
18.1.3	Mitarbeit bei Bauausführung, Probestau und Betrieb	721
18.2	Spezielle Problemstellungen	722
18.2.1	Durchlässigkeit des Untergrundes	723
18.2.2	Ermittlung der Sickerwasserverluste	726
18.2.3	Raumstellung der wasserleitenden Elemente	728
18.2.4	Erosionsgefährdung durch Sickerwasserströmung	728
18.2.5	Veränderlich feste oder erweichbare Gesteine.....	730
18.2.6	Erdbebensicherheit und induzierte Seismizität	730
18.2.7	Stauhaltung in verkarstungsfähigen Gesteinen	733
18.2.8	Stabilität der Hänge.....	734
18.3	Absperrbauwerke	735
18.3.1	Staumauern	735
18.3.2	Dämme.....	736
18.4	Untergrundabdichtung	739
18.4.1	Horizontale Dichtungselemente.....	740

18.4.2	Vertikale Dichtungswände	741
18.4.3	Injektionsschleier	741
19	Bauen in Erdfall- und Senkungsgebieten	747
19.1	Karstterminologie	750
19.2	Ursachen von Senkungen und Erdfällen sowie ihre hauptsächliche Verbreitung	751
19.2.1	Karbonatkarst	751
19.2.2	Sulfatkarst	755
19.2.3	Chloridkarst	765
19.2.4	Erdfälle durch Erosions- und Suffosionserscheinungen in nichtlöslichen Lockergesteinen	771
19.3	Ingenieurgeologische Untersuchungsmethoden	772
19.3.1	Risikobewertung und Sicherheitskonzept	773
19.3.2	Geologisch-morphologische Verfahren	774
19.3.3	Geophysikalische Messverfahren	775
19.3.4	Geotechnische Untersuchungsverfahren	777
19.4	Bautechnische Maßnahmen	778
19.4.1	Schäden infolge von Schiefstellung oder Längenänderung	780
19.4.2	Verbesserung des Untergrundes	781
19.4.3	Konstruktive Maßnahmen	781
19.4.4	Frühwarnrichtungen	783
20	Geotechnische Aspekte der Geothermie	785
20.1	Grundlagen der Geothermie	786
20.1.1	Geothermischer Gradient	786
20.1.2	Geothermische Erkundung	787
20.2	Geothermische Verfahren	792
20.2.1	Oberflächennahe geothermische Systeme	792
20.2.2	Tiefe geothermische Systeme	799
20.3	Potenzielle Risiken bei geothermischen Anlagen	803
20.3.1	Geologische Gefährdungen	804
20.3.2	Bohrtechnisches Risiko	805
20.3.3	Anlagenbedingtes Risiko	808
20.4	Bergrechtliche und wasserrechtliche Grundlagen	808
20.4.1	Bergrecht, Lagerstättenrecht	808
20.4.2	Wasserrecht	809
	Serviceteil	811
	Anhang	812
	Literatur	832
	Stichwortverzeichnis	880



Einleitung

- 1.1 **Aufgabenstellung – 2**
- 1.2 **Verbindlichkeit von Normen und Richtlinien,
Baugrundrisiko – 3**
- 1.3 **Formelzeichen, Einheiten – 6**

Ingenieurgeologie ist eine komplexe interdisziplinäre Wissenschaft, die das Verhalten von Locker- und Festgesteinen einzeln und im Gebirgsverband entsprechend den genetisch bedingten Materialeigenschaften im Hinblick auf eine ganzheitliche Lösung von Ingenieur- und Umweltproblemen behandelt. Dabei handelt es sich in zunehmendem Maße um Aufgaben, die einen Integralisten mit umfassender Problemlösungskompetenz und weitreichenden naturwissenschaftlichen und technischen Kenntnissen sowie der Bereitschaft zu einer interdisziplinären Kooperation erfordern. Von einem Ingenieurgeologen moderner Prägung werden daher nicht nur fundierte Kenntnisse in den Natur- und Geowissenschaften verlangt, sondern auch Grundlagen der Boden- und Felsmechanik sowie die Fähigkeit zur Kommunikation und einer zielorientierten, qualifizierten Teamarbeit. Unter Teamarbeit wird dabei eine offene und von wechselseitigem Respekt für unterschiedliche Denkansätze geprägte Zusammenarbeit verstanden, um die verschiedenen Wissensquellen und spezifischen Ansätze zur Problemlösung von vornherein berücksichtigen zu können.

1.1 Aufgabenstellung

Die Ergebnisse ingenieurgeologischer Voruntersuchungen bilden in der Regel die Grundlage für die weitergehenden Planungs- und Ingenieurleistungen, und zwar nicht nur während der Planung und Bauausführung, sondern teilweise auch noch in der Betriebsphase (Langzeitsicherheit, Kontrollmessungen). Dabei ist es nötig, die erforderlichen Erkundungsmaßnahmen von vornherein aufgrund von Feldbeobachtungen oder Erfahrungen aus Aufgaben in vergleichbarer geologischer Situation einzugrenzen. In einer frühen Phase der Projektbearbeitung erkennt der Ingenieurgeologe am besten, auf welche geotechnischen Einzelheiten und genetischen Zusammenhänge es bei der Beurteilung des Untergrundes bzw. des Gebirges mit seinen erdgeschichtlich bedingten Problembereichen und Schwachstellen ankommt.

Darüber hinaus muss der Ingenieurgeologe immer bemüht sein, sich einen Überblick über den Stand der wissenschaftlichen Diskussion zu verschaffen, und überlegen, welche geowissenschaftlichen und geotechnischen Spezialdisziplinen zur Lösung bestimmter Probleme beitragen können.

Die genannten Aufgaben erfordern von einem Ingenieurgeologen nicht nur ein lineares, dem Prinzip von Ursache und Wirkung geltendes Denken, sondern eine rationale und intuitive Denkweise entsprechend der Vernetzung und dem z. T. scheinbaren Chaos natürlicher Zusammenhänge. Der Ingenieurgeologe muss die zunächst meist unvollständigen Einzelnformationen verdichten, um logische Strukturen und geotechnische Zusammenhänge zu erkennen. Dazu gehört auch, Daten und Messergebnisse schwachstellenbewusst zu interpretieren. Treten in den Lösungsansätzen bei der Suche nach dem kausalen Zusammenhang Widersprüche auf, so muss geprüft werden, ob es sich dabei einfach um Fehler handelt, die es zu beseitigen gilt, oder um eine Chance für Neuerkenntnisse. Der Ingenieurgeologe muss sich darüber hinaus bemühen, seine Ergebnisse so in Worte zu fassen und zu quantifizieren, dass sie im Team aufgenommen und umgesetzt werden können.

Die Ingenieurgeologie steht heute vor einigen Veränderungen. Dazu gehört nicht nur das Thema Georisiken, d. h. das Erfassen und Bewerten der von Naturereignissen ausgehenden Gefahren. Weitere aktuelle Arbeitsgebiete sind die Tieflagerung von gefährlichen Abfällen, Bergbaufolgen und die Geothermie. Diesen Erweiterungen wurden – aus Platzgründen – die Ausführungen über Deponietechnik und die Bewertung von Altlasten, die teilweise an Aktualität verloren haben, geopfert.

Bei Anwendung von Rechenmodellen muss der Ingenieurgeologe auf eine entsprechende Realitätsnähe der Modellvorstellung achten und darauf drängen, dass diese durch baubegleitende Messungen und Rückrechnungen überprüft wird. Der enorme Zuwachs an Wissen in den gesamten Geowissenschaften und in der Geotechnik ist nur noch durch computergestützte

Arbeitsmethoden zu beherrschen. Mit kommerziellen Programmsystemen auf PC-Basis können zwar Auswertungen mit vertretbarem Aufwand vorgenommen und Berechnungen optimiert werden, für grundsätzliche Ideen und analytisch-naturwissenschaftliches Überdenken der Zusammenhänge ist man aber nach wie vor auf das Denkvermögen des Bearbeiters angewiesen.

In unserem verzweigten Fachgebiet gibt es oft keine wissenschaftlichen Gewissheiten, sondern nur Wahrscheinlichkeiten oder Annahmen, die bei neuen Aufschlussresultaten oder Erkenntnissen überdacht und angepasst werden müssen. Als Hilfestellung für ein solches Vorgehen wird in den einzelnen Abschnitten immer wieder auch auf die wissenschaftliche Diskussion geowissenschaftlicher Fragestellungen verwiesen. Die Anwendung solcher Hypothesen erfordert im Einzelfall ein vertiefendes Literaturstudium und ein sorgfältiges Abwägen der Zusammenhänge. Besonderer Wert muss auch auf die Kenntnis der einschlägigen Klassifikationen, Normen und Richtlinien gelegt werden, auch wenn diese inzwischen viel zu umfangreich sind und insgesamt eine deutliche Überregulierung nicht zu übersehen ist, wodurch das Erfahrungswissen zunehmend unterbewertet wird.

Ingenieurmäßige Berechnungsansätze werden nur einführend und zum Verständnis der Zusammenhänge gebracht. Darüber hinaus wird auf die einschlägigen Normen verwiesen. Im Vordergrund der ingenieurgeologischen Arbeit stehen der Aufbau eines auf das Bauwerk bezogenen geologischen Modells mit dem Boden- bzw. Felsinventar (einschließlich der Parameter) sowie den genetisch bedingten geologischen Risiken und nicht die Berechnungsverfahren selbst.

Da der begrenzte Umfang des Buches eine strenge Beschränkung erfordert, wird geologisches Grundlagenwissen vorausgesetzt. Ebenso wird auf Rechenbeispiele verzichtet, und auch die verschiedenen Versuche können nur im Grundsatz, nicht aber in der Versuchsdurchführung und Auswertung besprochen werden. Diese Beschränkung gilt bis zu einem gewissen

Grad auch für das inzwischen umfangreich gewordene Literaturverzeichnis.

1.2 Verbindlichkeit von Normen und Richtlinien, Baugrundrisiko

Die nationalen Normen (DIN, ÖNORM, SIA bzw. SN) sind in den letzten Jahren durch **Euro-normen** (EC, EN) des Europäischen Komitees für Normung (CEN) bzw. durch ISO-Normen ersetzt worden. Grundgedanke der Eurocodes ist, eine europaweit einheitliche Ausgangslage für die Berechnungs- und Bemessungsnormen im Bauwesen zu erreichen. Die europäischen Einzelnormen werden als EN bzw. in Zusammenarbeit mit der Internationalen Organisation für Normung (ISO) als EN ISO bezeichnet. Den Status einer nationalen Norm erreichen die europäischen Normen durch Veröffentlichung des identischen Textes als DIN EN bzw. DIN EN ISO, wobei Definitionen oder Festlegungen aus bisherigen DIN-Normen, die keinen Eingang in die internationale Normung gefunden haben, in einen Nationalen Anhang („National Annex“, NA) ausgelagert werden. Ein Nationaler Anhang darf nur Informationen über Verfahren und Kenngrößen enthalten, die in der Euronorm eigens der nationalen Festlegung vorbehalten sind.

Bei den derzeitigen Normungsaktivitäten ist es schwierig, mit dem Stand der Veröffentlichung neuer Normen und Normenentwürfe Schritt zu halten. Redaktionsschluss für den Bearbeitungsstand dieser Auflage war Ende 2016.

Die grundlegende **europäische Geotechnik-Norm, EC 7**: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, liegt in deutscher Fassung seit 2005 als DIN EN 1997-1 vor (s. Anhang). Sie stellt eine Rahmennorm dar, in der z. B. drei Nachweisverfahren für die geotechnische Bemessung zur Wahl gestellt werden. Um die Euronorm in den Mitgliedsstaaten praktisch anwendbar zu machen, werden in einem Nationalen Anhang (DIN EN 1997-1/NA) die in Deutschland

anzuwendenden Nachweisverfahren und die zugehörigen Teilsicherheitswerte festgelegt. Dazu gehört auch die DIN 1054: 2010 „Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1“, in der spezielle deutsche Erfahrungen enthalten sind, z. B. die Tabellen für die Sohldruckspannungen (► Abschn. 6.3).

Mit dem Eurocode 7-1 (DIN EN 1997-1: 2009 – die Neufassung 2014 wurde bis jetzt in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt) in Verbindung mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-1/NA: 2010 und der DIN 1054: 2010 liegen jetzt für Bemessungsaufgaben in der Geotechnik drei Normen vor. Mit der DIN EN 1997-1 ist auch eine Trennung von Bemessung und Ausführung verbunden. Letztere ist jetzt in den Ausführungsnormen des Spezialtiefbaus verankert. Hier sind auch noch die nationalen Ergänzungsdokumente zu den Ausführungsnormen zu nennen, die als Vornormen DIN SPEC ergänzende Festlegungen zu den nationalen Normen enthalten.

Eine ähnliche Regelung gilt für Teil 2 des EC 7 „Erkundung und Untersuchung des Baugrundes“. Das Normenwerk besteht ebenfalls aus der DIN EN 1997-2: 2010, dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-2/NA:2010 und der DIN 4020: 2010 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2“. Diese drei Normen regeln Planung, Durchführung und Auswertung von Baugrunderkundungen.

Im Zuge einer Überarbeitung des EC 7 ist auch ein Teil 3 „Geotechnische Bauwerke“ vorgesehen (bisher in Teil 1).

Um die Anwendung dieser sehr umfangreichen Normentexte zu vereinfachen, steht das vom Deutschen Institut für Normung herausgegebene Normenhandbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung – zur Verfügung:

- Band 1: Allgemeine Regeln (2011)
- Band 2: Erkundung und Untersuchung (2011)

Hinzu kommen die vier Bände des Normenhandbuchs Spezialtiefbau (2013) Verdrängungspfähle, Bohrpfähle, Mikropfähle und Verpressanker.

Zu diesen Standardnormen für die Erkundung des Baugrundes und die Bemessungsaufgaben in der Geotechnik kommt dann noch eine ganze Reihe von Einzelnormen, die in den jeweiligen Abschnitten behandelt werden.

Der Verbreitung des Buches entsprechend wird auch auf einige andere europäische Geotechniknormen verwiesen, so etwa der BS (= British Standard), die DGF (= Dansk Geoteknisk Forening), die NEN (= Niederlande Norm), die NF (= Norme Française), der SS (= Svensk Standard) und auch die ASTM (= American Standard Method). Zahlreiche französische Prüfnormen sind z. B. in Anhang C der DIN EN 17 907 (E 2016) aufgelistet.

Das Baurecht ist in der Bundesrepublik Deutschland im Wesentlichen Landesrecht. **Normen** sind zunächst privatrechtliche, allgemein anerkannte Regeln der Technik, die durch Aufnahme in die Musterliste der Technischen Baubestimmungen und öffentliche Bekanntmachung in den einzelnen Bundesländern zu bauaufsichtlich eingeführten Technischen Regeln werden. Für öffentliche Verkehrsbauten des Bundes und der Deutschen Bundesbahn gelten die dortigen Listen der technischen Baubestimmungen. Die Festlegungen in den Normen sind in der Regel keine Richtwerte, sondern Mindestwerte. Normen werden heute nach etwa 10 Jahren überarbeitet und neu herausgegeben, um aktuelle Entwicklungen berücksichtigen zu können.

Normen sind trotz des zunehmenden Umfangs und der teilweisen Überregulierung schon aus juristischen Gründen bei allen entsprechenden Arbeiten zu beachten, auch wenn nicht „eingeführte“ Normen genau genommen nur durch Verträge verbindlich werden. Besonders im Tiefbau, wo im Schadensfall die Beweisführung wesentlich schwieriger ist als im Hochbau, erhält die Beachtung von Normen durch die im sog. Baugruben-Urteil des Bundesgerichtshofs vom 19.4.1991 (V ZR 349/89) aufgestellte Beweislastumkehr zusätzliche Bedeutung. Werden bei Tiefbauarbeiten die einschlägigen Normen nicht beachtet, so spricht die „widerlegliche Vermutung“ juristisch dafür, dass die Schäden auf diese Missachtung zurückzuführen

sind. Der Betroffene hat dann zu beweisen, dass die Schäden nicht auf der Verletzung anerkannter Regeln der Technik beruhen.

Außer den Normen gibt es noch eine Reihe weiterer privatrechtlicher **technischer Regelwerke** (Richtlinien, Merkblätter, Empfehlungen), die auch in der ingenieurgeologischen Praxis zu beachten sind. Außerdem sei auf weitere technische Regelwerke für das Straßenwesen, die Bauvorschriften und Richtlinien der Deutschen Bahn AG sowie die Empfehlungen der Arbeitskreise Baugruben (EAB) bzw. Ufer-einfassungen (EAU) verwiesen.

Bei den **allgemein anerkannten Regeln der Technik** handelt es sich um im Bauwesen übliche wissenschaftlich-technische Erkenntnisse und handwerkliche Erfahrungen, die generell als bekannt, richtig und notwendig zu bezeichnen sind und deren Einhaltung erwartet werden kann. Im Konfliktfall wird sich jeder Sachverständige darauf beziehen. Unter den Begriffen „Stand der Technik“ oder „Stand der Wissenschaft“ versteht man dagegen das derzeit Machbare, dessen Wirksamkeit in der praktischen Umsetzung aber noch nicht ausreichend erprobt ist. Allgemein anerkannte Regeln der Technik sind z. B.:

- Normen
- eingeführte, öffentlich-rechtliche Technische Baubestimmungen
- Merkblätter und Richtlinien
- Empfehlungen der DGGT
- Zulassungen für neue Bauverfahren
- Unfallverhütungsvorschriften

Die anerkannten Regeln unterliegen einem ständigen Anpassungsprozess, woraus sich für alle am Bau Beteiligten die Notwendigkeit zur Fort- und Weiterbildung ergibt.

Der Baugrund gilt im juristischen Sinne als „uneinsichtig“ und muss als Vorgabe des Bauherrn beschrieben werden. Ein **Baugrundgutachten** bzw. der **Geotechnische Bericht** sind eine normengerechte sachverständige Stellungnahme, welche die Vielgestaltigkeit des Baugrundes in eine bauwerksbezogene Modellvorstellung bringen soll, mit der im Rahmen der anerkannten technischen Regeln und

einem gewissen Ermessensspielraum eine hinreichend gesicherte technische Bearbeitung einer Bauaufgabe erfolgen kann. Hinweise auf die je nach Aufgabenstellung etwas unterschiedlichen Gliederungen und Inhalte von Baugrundgutachten finden sich in DIN EN 1997-1, Abs. 3.4 und im FGSV-Merkblatt M GUB 04 (s. a. ► [Abschn. 4.1](#)). Auch andere Gliederungen sind üblich. Das Gutachten bzw. der Bericht muss darüber hinaus erkennen lassen, welche Tatsachen zugrunde gelegt sind und aus welchen Gründen bestimmte Annahmen vom Gutachter getroffen werden. Der Ingenieurgeologe ist in der Praxis sehr oft auf solche Annahmen angewiesen, er sollte aber ihre Aussagekraft aufzeigen und allgemein verständlich darlegen (s. DIN 4020). Für die spätere Verantwortlichkeit stellt sich dabei die Frage, wieweit pauschale Hinweise, die nicht durch Bohrungen belegt bzw. ohne konkrete Lokalisierung sind, vertragsrelevant sein können.

Ein Baugrundgutachten kann nicht immer sichere Aussagen über die komplexe Materie Baugrund enthalten, sondern immer nur begrenzt nachvollziehbare Wahrscheinlichkeitsaussagen (s. DIN 4020). Dem Baugrundgutachter kann wider fachliches Erwarten und zwischen normengerecht angesetzten und ausgewerteten Aufschlüssen angetroffener problematischer Baugrund nicht angelastet werden.

Der **Baugrund** ist unverzichtbarer Bestandteil oder Träger eines Bauwerks und ist gleichzeitig ein „Baustoff“, der vom Bauherrn zur Verfügung gestellt wird. Das **Baugrundrisiko**, d. h. die geotechnische Tatsache des Risikos, dass der „Baustoff Baugrund“ in seiner Beschaffenheit nicht den Vorstellungen bzw. Vorgaben entspricht, liegt damit zunächst beim Bauherrn. Um dieses Risiko einzuzugrenzen, bestehen Gesetzesvorgaben und Vertragsvereinbarungen. Zunächst hat der Architekt als erster Vertreter des Bauherrn die Verpflichtung zur Untersuchung und Beschreibung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse nach den Regeln der Technik. Das Baugrundrisiko seitens des Bauherrn kommt damit nur zum Tragen, wenn trotz einer den Regeln der

Technik entsprechenden Erkundung der Baugrundverhältnisse und trotz Erfüllung aller Prüfungs- und Hinweispflichten aller am Bau Beteiligten doch Abweichungen von den erkundeten Boden- und Grundwasserverhältnissen auftreten, die dann zu Bauschäden führen. Diese unabwendbaren Umstände gelten als Systemrisiko, das dem Auftraggeber zuzuordnen ist (s. Entachner und Fuchs 2016 und ► [Abschn. 17.4.2](#)). Das Baugrundrisiko betrifft auch Schäden, die bei Bauarbeiten von einem Grundstück ausgehen.

Kommt der Auftragnehmer seinen Hinweispflichten auf die für einen Fachmann erkennbaren Folgen der vorgegebenen Art der Bauausführung nicht nach, gilt im Schadensfall vielfach auch eine an sich ordnungsgemäße Bauleistung als mangelhaft.

In den Ländern der Europäischen Union ist die Behandlung des Baugrundrisikos unterschiedlich. Die deutsche Rechtsordnung findet sich mit gewissen Ausnahmeregelungen im österreichischen Recht sowie in den Niederlanden wieder. In Ländern wie Frankreich, Spanien, Belgien und Großbritannien steht das Baugrundrisiko primär im Verantwortungsbereich des Auftragnehmers und bedarf einer vertraglichen Regelung.

Die **Berufsbezeichnung Sachverständiger** ist in Deutschland weder rechtlich geschützt noch in Rechtsnormen präzisiert. Vorausgesetzt werden entsprechende Sachkunde durch ein Hochschulstudium, langjährige Erfahrung und Objektivität. Die „öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen“ gem. § 36 GWO sind für spezielle Fachgebiete von den Industrie- und Handelskammern bestellt und vereidigt. Dies betrifft auch die Teilgebiete der Geotechnik. Streng genommen darf ein vereidigter Sachverständiger als solcher kein gerichtliches Gutachten erstellen, das nicht sein Sachgebiet betrifft, für das er vereidigt ist.

Um das Berufsbild eines „**Sachverständigen für Geotechnik**“ bzw. des entsprechenden „Fachplaners für Geotechnik“ im Sinne der DIN EN 1997, DIN 1054 und DIN 4020 zu regeln, liegt seit 2013 eine Empfehlung der DGGT vor

(geotechnik 36:1). Darin werden neben Fragen der Ausbildung auch Fragen der erforderlichen Berufserfahrung sowie der Fort- und Weiterbildung angesprochen. Das Arbeitsgebiet umfasst sowohl Fragen des Baugrundes und des Grundwassereinflusses auf Bauwerke und Infrastrukturprojekte aller Art, einschließlich möglicher Schadstoffbelastung der Böden, als auch die Sicherheit vor Naturgefahren.

Zu den **Aufgaben eines Sachverständigen** gehören außer der Abfassung geotechnischer Berichte gem. ► [Abschn. 4.1](#) auch Schiedsgutachten, Bauschadensgutachten, Wertgutachten und ggf. weitere Gutachtenthemen. Bei Beweissicherungsverfahren ist zu unterscheiden zwischen gesetzlicher, d. h. gerichtlich beauftragter Beweissicherung, bei welcher der benannte Beweissicherungsgutachter gleichzeitig Gerichtsgutachter ist, und einer privatrechtlichen Beweissicherung. Dabei nimmt der Gutachter vor Beginn einer Baumaßnahme die betroffenen Gebäude in Augenschein, hält den Bestand fotografisch fest und kontrolliert und bewertet nach Abschluss der Bauarbeiten, ob Schäden aufgetreten sind, die möglicherweise im Zusammenhang mit den Arbeiten stehen. Im Streitfall wird ein privat beauftragter Beweissicherungsgutachter vom Gericht als sachverständiger Zeuge gehört werden, das Gericht kann aber auch einen zusätzlichen Gerichtsgutachter bestellen. Darauf hinzuweisen ist, dass ein Sachverständiger zu persönlicher und fristgerechter Gutachtenerstattung verpflichtet ist.

1.3 Formelzeichen, Einheiten

In der vorliegenden Auflage werden die in EN 1990:2002 vereinheitlichten Begriffe, Formelzeichen und Einheiten verwendet, die weitestgehend den internationalen SI-Einheiten entsprechen:

- Kraft in kN
- Masse in kg, t
- Moment in kNm
- Dichte in g/cm^3 , kg/m^3 , Mg/m^3 , t/m^3

■ **Tab. 1.1** Umrechnung aus alten Einheiten für Flächenlasten, Spannungen, Festigkeiten und Drucke (at = Atmosphäre, N = Newton, Pa = Pascal p = pond, WS = Wassersäule)

Alte Einheiten			Gesetzliche Einheiten			
kp/m ² mmWS	Mp/m ² mWS	kp/cm ² at, bar	N/m ² Pa	kN/m ² kPa	MN/m ² N/mm ² MPa	GPa
0,1			1			
1			10			
10			100	0,1		
100			1000	1		
1000	1			10		
	10	1		100	0,1	
	100	10		1000	1	
	1000	100			10	
		1000			100	0,1
					1000	1

- Wichte in kN/m³
- Lasten, Spannung, Druck, Festigkeit und Steifigkeit in kN/m² (kPa), MN/m² (MPa)
- Durchlässigkeit in m/s

Außerdem werden folgende Einheiten verwendet:

- K (Kelvin) bzw. mK (Millikelvin), Maßeinheit für Temperaturdifferenzen, wobei $1\text{ K} \triangleq 1^\circ\text{C}$ bedeutet, allerdings mit anderem absolutem Nullpunkt
- Bq (Becquerel), Maßeinheit für die Aktivität einer radioaktiven Substanz. $1\text{ Bq} = 1$ Atomzerfall pro Sekunde; $1\text{ kBq} = 1000\text{ Bq}$, $1\text{ MBq} = 1$ Million Bq
- Sv (Sievert), Maßeinheit für die durch ionisierende Strahlung (Alpha-, Beta-, Gamma- oder Röntgenstrahlen) verursachte Strahlenbelastung biologischer Organismen (Äquivalenzdosis). Angaben meist in mSv (Millisievert)
- Darcy (D) bzw. Millidarcy (mD), Maßeinheit für die Permeabilität von

Gesteinen: $1\text{ Darcy} = 0,98697 \times 10^{-12}\text{ m}^2$
($\approx 1 \times 10^{-12}\text{ m}^2$)

- Gon, in der Markscheiderei verwendete Einheit als 1/100 eines rechten Winkels ($1\text{ gon} = 0,9^\circ$)
- J (Joule) bzw. kJ ist die Einheit für Energie, Arbeit und Wärmemenge. Arbeit: $1\text{ J} = 1\text{ N} \times \text{m}$ (auch Fallenergie); Wärmemenge: $1\text{ Watt} = \text{J/s}$

Für eine gelegentlich noch erforderliche Umrechnung aus alten Einheiten und Dimensionen dient ■ **Tab. 1.1**; ■ **Abb. 1.1** zeigt das griechische Alphabet.

A	α	alpha	I	ι	iota	P	ρ	rho
B	β	beta	K	κ	kappa	Σ	σ	sigma
Γ	γ	gamma	Λ	λ	lambda	T	τ	tau
Δ	δ	delta	M	μ	mue	Φ	φ	phi
E	ε	epsilon	N	ν	nue	X	χ	chi
Z	ζ	zeta	Ξ	ξ	ksi	Ψ	ψ	psi
H	η	eta	O	ο	omikron	Ω	ω	omega
Θ	θ	theta	Π	π	pi			

■ **Abb. 1.1** Griechisches Alphabet



Boden- und felsmechanische Kennwerte, ihre Ermittlung und Bedeutung

- 2.1 Definitionen, Richtlinien, Normen – 11**
- 2.2 Korngröße, Kornverteilung – 13**
 - 2.2.1 Siebanalyse – 13
 - 2.2.2 Sedimentationsanalyse – 13
 - 2.2.3 Sieb- und Sedimentationsanalyse – 15
 - 2.2.4 Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen – 15
 - 2.2.5 Körnungen als Handelsbegriff – 17
 - 2.2.6 Hydraulische Instabilität und Filter für Dränmaßnahmen – 19
 - 2.2.7 Filtersande und Filterkiese für den Brunnenbau – 23
 - 2.2.8 Aufbau und Eigenschaften der Tonminerale – 23
- 2.3 Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen – 26**
 - 2.3.1 Kalkgehalt (v_{Ca}) – 27
 - 2.3.2 Organische Bestandteile (v_{gl}) – 28
 - 2.3.3 Schwefelverbindungen – 29
- 2.4 Das Dreistoffsystem Boden bzw. Fels – 29**
 - 2.4.1 Wassergehalt (w), Sättigungszahl (S_r), Wasseraufnahmevermögen (w_A) – 29
 - 2.4.2 Korndichte (ρ_s), Reindichte (ρ_r), Feststoffdichte (ρ_F) – 32
 - 2.4.3 Dichte (ρ) und Wichte (γ) – 33
 - 2.4.4 Porenanteil (n), Porenzahl (e), Porosität (p) – 36
- 2.5 Lagerungsdichte (D) – 38**
 - 2.5.1 Lagerungsdichte nichtbindiger Lockergesteine – 38
 - 2.5.2 Lagerungsdichte bindiger Lockergesteine, Proctorversuch – 38

2.6 Zustandsform, Konsistenzgrenzen – 40

2.7 Verformungsverhalten, Druck- und Zugfestigkeit – 44

- 2.7.1 Grundlagen – 44
- 2.7.2 Wirkung des Wassers, Porenwasserdruck – 46
- 2.7.3 Spannungs-Verformungs-Beziehungen – 48
- 2.7.4 Bodensteifigkeit, Steifemodul (E_s), Zeitsetzungsverhalten – 49
- 2.7.5 Verformungsmodul (E_v) und Bettungsmodul (k_b) aus dem Plattendruckversuch – 55
- 2.7.6 California-Bearing-Ratio-Versuch (CBR-Versuch) – 57
- 2.7.7 Verformungsmodul (E_v) aus Bohrlochaufweitungsversuchen – 58
- 2.7.8 Diskussion der Verformungsmoduln des Gebirges – 59
- 2.7.9 Primärspannungszustand – 60
- 2.7.10 Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Sprödigkeit – 67
- 2.7.11 Volumenzunahme durch Quellen – 76

2.8 Scherfestigkeit – 79

- 2.8.1 Grundlagen – 79
- 2.8.2 Direkter Scherversuch mit vorgegebener Scherfläche – 81
- 2.8.3 Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche – 82
- 2.8.4 Undrained Scherfestigkeit c_u – 84
- 2.8.5 Großscherversuche – 86
- 2.8.6 Diskussion der Scherfestigkeitsparameter (φ, c) – 89

2.9 Durchlässigkeit – 95

- 2.9.1 Durchlässigkeit von Lockergesteinen – 95
- 2.9.2 Durchlässigkeit von Fels – 97
- 2.9.3 Laborversuche zur Ermittlung des k -Wertes – 99
- 2.9.4 Feldversuche zur Ermittlung des k -Wertes – 100
- 2.9.5 Durchlässigkeitsbeiwerte – 112
- 2.9.6 Grundwasserfließparameter – 116
- 2.9.7 Kapillarität, kapillare Steighöhe (h_k), Saugspannung (s) – 118
- 2.9.8 Sickerwasser, Grundwasserneubildung – 120

2.1 Definitionen, Richtlinien, Normen

Für bautechnische Zwecke werden Festgesteine und Lockergesteine bzw. Boden und Fels unterschieden. Zwischen beiden treten, bedingt durch unterschiedliche Verwitterung oder gelegentliche Verfestigungen, zahlreiche Übergänge auf.

Der Begriff „**Boden**“ wird hier im bautechnischen Sinn als Sammelbezeichnung für alle Lockergesteine und lockergesteinsartig verwitterte Festgesteine gebraucht. Dieser von der bodenkundlichen Begriffswelt abweichenden Definition steht heute auch noch die Definition im Sinne des „Bodenschutzes“ gegenüber.

Eine ähnlich weitläufige Definition wird in den einschlägigen Normen (DIN 4020, DIN EN 1997-2) auch für den Begriff Baugrund bzw. bei Untertagebauarbeiten für das Gebirge verwendet. **Baugrund** ist erdgeschichtlich vorgegebener, gewachsener Boden oder Fels, einschließlich seiner Inhaltsstoffe bzw. Füllungen wie Grundwasser, Fremdbestandteile (Auffüllung) und etwaiger Kampfmittel- oder sonstiger Kontaminationen sowie auch ehemaliger Baubehelfsmittel. Nach DIN EN 1997-1 versteht man unter Baugrund „Boden, Steine und Auffüllung, die vor Beginn der Baumaßnahme vor Ort vorhanden waren“. Nach der Rechtsprechung ist Baugrund der gesamte Teil der der Erdoberfläche liegenden Boden- und Felsschichten, einschließlich Grundwasser und der dort befindlichen, auch nicht durch die Natur entstandenen Einschlüsse aller Art (Englert 2006). Eine Unterscheidung in Baugrund im Einflussbereich einer baulichen Anlage und (tieferen) Untergrund wird weder in den Normen noch in der Rechtsprechung getroffen.

Bei der Behandlung von **Festgesteinen** muss streng unterschieden werden zwischen Gestein und Fels bzw. Gebirge. Das Gestein in der Größenordnung einzelner Kluftkörper besitzt ganz andere Eigenschaften als der Fels im Gebirgsverband, der von Trennflächen verschiedener Art durchsetzt ist. Fels ist i. d. R. inhomogen – d. h., er hat nicht in jedem Punkt die gleichen Eigenschaften – und in hohem Maße anisotrop, was bedeutet, dass diese Eigenschaften auch richtungsabhängig sind.

Die **boden- und gesteinsphysikalischen Eigenschaften** werden in weitgehend genormten Labor- oder Feldversuchen ermittelt und zahlenmäßig durch Kennzahlen ausgedrückt. Das Untersuchungsprogramm ist darauf abzustellen, dass die wesentlichen Kennwerte, die den Entwurf, die Baugrubensicherung und das Bauverfahren sowie die Kosten beeinflussen, im Baugrundgutachten angegeben werden können. Dabei werden vier Hauptgruppen von Versuchen unterschieden, nämlich:

1. Versuche zur Bestimmung und Klassifizierung der **Bodenart**, sog. inhärenter Parameter (nicht veränderlicher Eigenschaften):
 - Korngröße, Kornverteilung
 - Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze
 - Plastizitätszahl Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen
 - Tonmineralogie
 2. Versuche zur Bestimmung der **Zustandsform** (sog. Zustandsparameter):
 - Wassergehalt
 - Dichte
 - Porenanteil, Porenzahl, Porosität
 - Lagerungsdichte, Konsistenz
 3. Versuche zur Bestimmung des Verhaltens bei mechanischer Beanspruchung:
 - Bodensteifigkeit (Verformbarkeit)
 - Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Sprödigkeit
 - Scherfestigkeit
- und
4. Versuche zur Bestimmung des Verhaltens bei hydraulischer Beanspruchung: Durchlässigkeit, Permeabilität

Nach DIN EN 1997-2 werden fünf verschiedene **Arten von Bodenproben** unterschieden: gestörte, ungestörte, aufgearbeitete (durchwalkte), wiederhergestellte und aufbereitete bzw. rekonsolidierte Proben (► Abschn. 4.4.3). Die Untersuchung der Kornverteilung, der Korndichte, des Wassergehalts, der Konsistenzzahlen, des Wasseraufnahmevermögens, des Kalkgehalts und des Glühverlusts erfolgt an strukturgestörten Proben. Zur Ermittlung der Dichte, des

Porenanteils bzw. der Porenzahl, der Verformbarkeit und der Festigkeit sowie der Durchlässigkeit sind ungestörte Bodenproben bzw. rissfreie Kernstücke erforderlich. Dabei muss man sich darüber im Klaren sein, dass es wirklich ungestörte Proben praktisch nicht geben kann. Die Proben sind von der Entnahme über den Transport bis zum Einbau in die Versuchseinrichtung unvermeidlichen Einwirkungen ausgesetzt, die ihre Struktur und auch den Wassergehalt merkbar verändern können. Weiche Böden sind sehr empfindlich gegen Erschütterungen jeder Art und weisen oft keine ausreichende Festigkeit für die Herstellung von Teilproben auf. Bei halbfesten Böden kann es sowohl bei der Entnahme als auch beim Einbau zu Auflockerungen kommen, wodurch die Ergebnisse von Festigkeitswerten zu niedrig ausfallen können.

Als **Indexversuche** werden einfache Versuche bezeichnet, die einen ersten Anhalt über eine Boden- bzw. Felseigenschaft liefern, die aber nicht zwingend einen repräsentativen Kennwert darstellen (DIN EN 1997-2).

Bei der Ermittlung der Eigenschaften und Kennwerte von Lockergesteinen sind zahlreiche **Richtlinien und Normen** zu beachten. Für die Durchführung der einzelnen Labor- und Feldversuche an Böden gelten die Grundsatznorm DIN EN 1997-2 sowie die Normenreihe 18 121 bis 18 137. Letztere werden zunehmend abgelöst von den europäischen Versuchsnormen der Reihe DIN EN ISO 17 892-1 bis -12, von denen bereits einige deutsche Ausgaben vorliegen. Etliche der alten 18er-Normen bleiben aber bestehen. Für Feldversuche gilt die Geräte- und Ausführungsnormenreihe DIN EN ISO 22 476-1 bis -15. Für Versuche an Festgesteinen und im Fels gelten die Richtlinien des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels der DGGT, die Normenreihe DIN 4107 „Geotechnische Messungen“ und die Normenreihe 18 141 „Untersuchung von Gesteinsproben“.

Für geotechnische Messungen zur Überwachung von Baugrund und Bauwerk gilt heute die Normenreihe DIN EN ISO 18 674 mit 10 Teilnormen.

Die Loseblattsammlung „Technische Prüfverfahren für Boden und Fels im Straßenbau“

(TP BF StB) enthält sowohl die fachbezogenen Normen als auch die Empfehlungen „Versuchstechnik Fels“ sowie darüber hinausgehende spezielle Prüfverfahren des Erdbaus (s. Anhang). Als weitere Grundlage für gesteintechnische Versuche können die ISRM-Empfehlungen herangezogen werden. Eine tabellarische Übersicht über alle Laborversuche an Boden- und Gesteinsproben sowie auch die entsprechenden Feldversuche enthält auch DIN 4020, Beiblatt 1 (2010) ■ Tab. 7 bis 10. Eine umfassende Liste mit Erdstoff-Prüfnormen (EN, ISO) enthält auch die DIN EN 16 907.3 (E 2015).

Laborversuche können die Bedingungen, wie sie in der Natur anzutreffen sind, in vielen Fällen, so besonders im Fels, nicht oder nur unvollständig erfassen. Die Ergebnisse von Laborversuchen sind in solchen Fällen durch entsprechende **Feldversuche** unter natürlichen Bedingungen oder durch großräumige 1:1-Versuche in Schächten oder Stollen zu überprüfen.

Um den Erwartungen der Praxis gerecht zu werden, sind in den einzelnen Abschnitten dieses Buches nach Möglichkeit **Erfahrungswerte für Kennziffern** von Böden bzw. Gesteinen und Fels zusammengestellt. Solche Kennziffern sind naturgemäß im Einzelfall von lokalen Umständen und anderen Faktoren abhängig, sodass die mitgeteilten Werte nur allgemeine Gültigkeit haben und projektbezogene Einzelbestimmungen nicht ersetzen können. Eine Zusammenstellung charakteristischer Bodenkennziffern enthält auch DIN 1055-2.

Die nachfolgende Beschreibung der Laborversuche kann nur im Grundsatz, nicht aber in der detaillierten Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgen. Dafür wird auf die einschlägigen Normen und auf die Spezialliteratur verwiesen. Darüber hinaus besteht zunehmend der Trend zu einer automatischen Versuchsauswertung und Datendokumentation. Für Letztere müssen die Daten erfasst, verwaltet und in geowissenschaftlichen Projekten qualifiziert verarbeitet werden. Eine solche weiterführende **Geoinformatik für geotechnische Problemstellungen** bis hin zu tektonischer oder gebirgsmechanischer Modellierung bedarf möglichst guter Kenntnisse in der Informatik. Für

die Weiterverarbeitung der Daten muss dabei auf Kompatibilität der Datensysteme geachtet werden. Derzeit befindet sich, auch im Zusammenhang mit einer stärkeren Betonung von örtlichen Erfahrungen in der Geotechniknorm DIN EN 1997-1 (2009), der Aufbau einer deutschlandweiten Kennwertdatenbank von Ergebnissen boden- und felsmechanischer Laborversuche in einer Pilotphase, die später von möglichst vielen Instituten beschickt und genutzt werden soll. Zu jedem Kennwert eines Versuchs sollen Örtlichkeit, Probenkennzeichnung, Entnahmestelle und -tiefe, Datum und das untersuchende Institut sowie Angaben zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse angegeben werden (Schuppener et al. 2008).

2.2 Korngröße, Kornverteilung

Die Korngröße (d) und Kornverteilung sind ein Maßstab für die Einteilung und Benennung der mineralischen Lockergesteine. Der Anteil der Korngrößen wird in Prozent der Gesamttrockenmasse angegeben.

Die Verfahren und Geräte zur Ermittlung der Korngrößenverteilung sind in DIN 18 123 (2011) bzw. künftig der DIN EN ISO 17 892-4, Bestimmung der Korngrößenverteilung (E 2014) festgelegt. Korngrößen von über 0,063 mm (Sand, Kies) werden durch Siebung, Korngrößen von unter 0,125 mm durch Sedimentation (Schlämmanalyse, optische Verfahren) ermittelt.

2.2.1 Siebanalyse

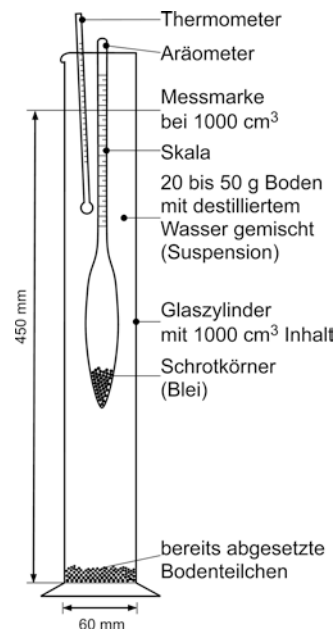
Die Probenmengen für die Siebanalyse betragen je nach geschätztem Größtkorn 100 g bis >2 kg.

Bei Böden ohne oder mit nur sehr geringen Feinanteilen <0,063 mm wird die sog. Trockensiebung angewendet, und zwar meist mit Analysensiebmaschinen mit dreidimensionaler Siebbewegung und automatischer Amplitudensteuerung, die reproduzierbare Ergebnisse gewährleisten. Bei Böden mit Ton- und Schluffanteilen wird nach Trocknen und Wiegen die

Probe aufgeschlämmt, anschließend werden die Feinanteile durch ein Feinsieb mit der Maschenweite 0,063 mm (oder 0,125 mm) gewaschen (Nasssiebung). Der Siebrückstand wird getrocknet und normal gesiebt; vom Siebdurchgang wird entweder nur die Trockenmasse bestimmt, oder es wird eine Sedimentationsanalyse angeschlossen.

2.2.2 Sedimentationsanalyse

Die Korngrößenverteilung der Kornanteile unter 0,125 mm wird in der Bodenmechanik nach dem **Aräometerverfahren** ermittelt. Das Aräometerprinzip (■ Abb. 2.1) beruht darauf, dass verschieden große Körner in einer Aufschlämmung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit absinken (Sedimentation). Der Zusammenhang zwischen Korngröße, Kornwichte und Sinkgeschwindigkeit wird durch das Gesetz von Stokes angegeben. Die Methode bringt keine Trennung nach Korngrößen, sondern nach einheitlichen Korndurchmessern. Die Korndichte wird dabei als einheitlich vorausgesetzt.



■ Abb. 2.1 Messzylinder für Sedimentationsanalysen

Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgen nach DIN 18 123. Die Probenmengen betragen bei sandhaltigen Böden rd. 75 g, sonst 30–50 g. Zur Verhinderung von Koagulation (Flockenbildung) bei der Sedimentation wird als Dispergierungsmittel 2 g/l Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times 10 \text{H}_2\text{O}$) zugegeben. Besonders anfällig für Flockenbildung sind gelhaltige Böden vulkanischer Herkunft und solche mit Humusanteilen. Bei Humusgehalten über 1,5 % müssen die organischen Bestandteile vorab durch Oxidation mit 20-prozentigem H_2O_2 zerstört werden. Ab Humusgehalten von etwa 15 % versagt auch dieses Verfahren. Bei Böden mit Karbonatgehalten >10 % wird, um Fehlbestimmungen der Korngrößenverteilung durch Karbonatfällung zu vermeiden, das Probenmaterial mit 0,2 M HCl-Säure entkarbonatet.

Die Bestimmung der Trockenmasse darf bei bindigen Böden nicht durch Trocknen vor dem Versuch erfolgen, sondern durch vorherige Probeteilung bzw. nach dem neuen DIN-Entwurf durch Tauchwägung. Bei Trocknungstemperaturen über 100 °C kommt es besonders bei Montmorillonit-Mixed-Layer-Tonmineralen zu einer Teilchenagglomeration, und es ist nachher kaum noch möglich, eine Dispergierung bis hin zur Primärkornverteilung zu erreichen. Man erhält einen erhöhten Schluffkornanteil >0,06 mm, wobei deutlich unzerteilte Tonaggregate zu beobachten sind.

Der bei der Sedimentationsanalyse physikalisch-mechanisch bestimmte Feinstkornanteil <0,002 mm (2 μm) entspricht häufig nicht dem röntgendiffraktometrisch ermittelten Tonmineralanteil, da sich nur die chemisch aktiven Tonminerale wie z. B. Montmorillonit und auch Illit in der Fraktion <0,002 mm wiederfinden, während sich viele Primärkristallite wie glimmerähnliche Illite, z. T. auch Kaolinit, Chlorit und besonders Feldspäte in der Fraktion zwischen 0,002 mm und 0,0063 mm anreichern (Schick et al. 2003).

Für Kornverteilungsanalysen von stark überkonsolidierten Tonen oder **Tongesteinen** besteht keine einheitliche Regelung. Die schonende Nasssiebung gibt mehr einen Anhalt über den Verwitterungsgrad als eine Aussage über den Feinkornanteil des Gesteins. In der Laborpraxis sind folgende Aufbereitungsmethoden üblich:

- 24 Stunden Einweichen und schonendes Zerdrücken von Tonsteinbröckchen sowie ggf. 6–8 Stunden Schütteln oder Rühren,
- 2 Wochen Einweichen und Behandlung wie vor, Mörsern der Tonsteinproben eigener Spiegelstrich,
- mehrtägiges Einweichen und schonendes Zerdrücken oder Rühren.

Je nach Festigkeit bzw. Bindemittel der Tonsteinproben ergeben sich hierbei sehr unterschiedliche Körnungslinien und Tongehalte. Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) haben gezeigt, dass in vielen Fällen ein hoher Anteil von nicht zerlegten Tonmineralaggregaten in der Schluff- und Sandfraktion verbleibt. Diese Aggregate lassen sich durch eine 5–30 Minuten lange Behandlung mit dem Ultraschall-Schwingstab weitgehend zerlegen. Um zu vermeiden, dass hierbei schon eine Zerstörung größerer Tonminerale stattfindet, sind Versuchsreihen und eine Kontrolle mit dem REM zweckmäßig.

Einen anderen Weg gehen Bönsch und Lempp (2004). Durch wiederholte Trocknung bei 40 °C und Wiederbefeuchtung findet ein zunehmender Zerfall der Tonsteinaggregate statt, und die Körnungslinien verschieben sich zunehmend zu den feinen Kornfraktionen. Mit jedem weiteren Zerfallsvorgang wird der Unterschied zwischen den Kornverteilungslinien geringer, wobei die Kurven einen annähernd parallelen Verlauf zeigen. Die letzte Linie dürfte weitestgehend der sog. primären Kornverteilung entsprechen, d. h. der tatsächlichen Körnung bei der Sedimentation. Um eine Kornverteilungsanalyse von Tonsteinmaterial bewerten zu können, muss auf jeden Fall die Probenaufbereitung angegeben werden.

Inwieweit es bei mergeligen bzw. kalkigen Gesteinen zweckmäßig ist, karbonatische Bindemittel durch Säurebehandlung zu „zerstören“, hängt letztlich von der Aufgabenstellung ab. Als schonende Säurebehandlung empfehlen Kohler und Wewer (1980) die mehrmalige Behandlung mit einer 0,1-molaren Lösung Ethylendiamintetraessigsäure (EDTE, Titriplex® o. a.). Durch Auflösung des Bindemittels wird das Ausgangsgestein verändert.

2.2.3 Sieb- und Sedimentationsanalyse

Bei einem Feinkornanteil $<0,063$ mm von weniger als 10 % (bis 20 %) wird meist nur eine Siebanalyse durchgeführt. Dementsprechend wird bei einem bindigen Boden mit einem Sandanteil von weniger als 20 % ebenfalls nur eine Sedimentationsanalyse vorgenommen, ggf. mit anschließender Siebung der groben Kornanteile. Ist dagegen der Anteil der Körner $>0,063$ mm (Sand) größer als 20 % der Trockenmasse, so müssen die groben Kornanteile vor der Sedimentation durch Nasssieben abgetrennt werden.

2.2.4 Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen

Die Verteilung der Kornfraktionen wird meist als **Körnungslinie**, auch Korngrößenverteilung genannt, dargestellt. Die Körnungslinie wird als Summenkurve in einfach logarithmischem Maßstab (Logarithmus zur Basis 10) aufgetragen, wodurch auch die kleinen Kornfraktionen entsprechend zur Geltung kommen (■ Abb. 2.2). Für die Bewertung einzelner Körnungslinien ortsüblicher Bodenarten kann es von Vorteil sein, obere und untere Grenzlinien für die Korngrößenverteilung anzugeben.

Natürliche Böden sind Gemische der einzelnen Fraktionen, wobei Haupt- und Nebenanteile

unterschieden werden. Bei der Bodenansprache gem. ► Abschn. 3.1 werden die Nebenanteile in der Reihenfolge ihrer Bedeutung dem Hauptanteil als Adjektiv nachgestellt, und zwar als

- als stark, wenn die Nebenanteile >30 %, und
- als schwach, wenn die Nebenanteile <15 %.

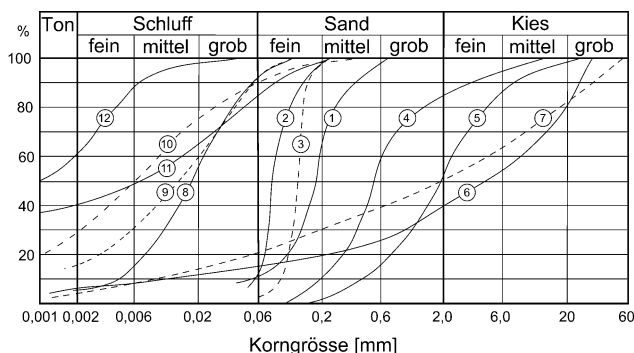
Die prozentualen Anteile der Korngruppen der Körnungslinie ergeben auf 10 % aufgerundet und durch 10 dividiert die **Kornkennziffer**. Als Beispiel seien hier zwei Bodenarten aus ■ Abb. 2.2 angeführt:

Die Neigung der Körnungslinie gibt die **Gleichkörnigkeit bzw. Ungleichkörnigkeit** eines Bodens an, die für verschiedene Bodeneigenschaften, z. B. die Verdichtbarkeit, von Bedeutung ist (► Abschn. 12.2). Der zahlenmäßige Ausdruck dafür ist die Ungleichkörnigkeitszahl

$$C_u = d_{60} / d_{10}$$

Dabei sind d_{60} und d_{10} die Korngrößen in mm, bei denen die Summenkurve die 60 % bzw. 10 %-Linie schneidet. Als Grenzwerte gelten nach DIN 18 196 (2011) bzw. nach DIN EN ISO 14 688-2 (2011):

eng gestuft	$C_u < 6$	(steil verlaufend)
mittel gestuft	$C_u = 6-15$	(mäßig steil verlaufend)
weit gestuft	$C_u > 15$	(flach verlaufend)



■ **Abb. 2.2** Beispiele für Körnungslinien typischer Bodenarten (1) Fein-/Mittelsand (Tertiär) (2) Feinsand (Tertiär) (3) Flugsand (Holozän) (4) Flusssand, nass gebaggert (5) Kiessand (6) Hochterrassenkiese (Pleistozän) (7) Verwitterungslehm, steinig-sandig (ähnlich auch Geschiebelehm) (8) Löß (9) Lößlehm (10) Lehm, tonig (Schluff, stark tonig, leicht feinsandig) (11) Ton, stark schluffig (Tertiär) (12) Ton, schluffig (Tertiär)

Zur Kennzeichnung der Krümmung der Körnungslinie dient die **Krümmungszahl C_c** :

$$C_c = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60})$$

Nach DIN EN ISO 14 688-2 weisen eng gestufte Böden eine Krümmungszahl <1 und weit gestufte eine solche von 1–3 auf. Die Krümmungszahl ist auch ein Maß für den Porenanteil (► Abschn. 2.4.4).

Die **Benennung der mineralischen Lockergesteine** erfolgt nur nach Korngrößen, unabhängig vom Material und von der Kornform. Die reinen Bodenarten sind in Tab. 2.1 zusammengestellt. Die geologischen Begriffe „Psephite für die Korngrößengruppe 2,0 bis 200 mm, „Psammite für 0,06 bis 2,0 mm und „Pelite für $<0,06$ mm sowie „Silt“ anstelle von Schluff werden im Bauwesen nicht verwendet. Bei den größeren Kornfraktionen werden nur bei Bedarf die Kornform (kubisch, flach-plattig, länglich-stängelig) und der Rundungsgrad (scharfkantig, kantig, kantengerundet, angerundet, gerundet, gut gerundet) angesprochen.

Insgesamt werden **drei Hauptgruppen von Bodenarten** unterschieden (Abb. 2.3).

Grobkörnige kohäsionslose (rollige) Bodenarten sind Böden aus Kies und/oder Sand mit weniger als 5 % Feinbestandteilen. Sie werden

bis zu einer Beimengung von 5 % Schluff und Ton noch als reine Sande und Kiese bezeichnet (DIN 1054 und DIN 18 196). Zwischen den einzelnen Körnern treten normalerweise keine Anziehungskräfte auf.

Die Klassifikation für sehr grobkörnige Bodenarten lautet gem. DIN EN ISO 14 688-2 (2011):

	Massenanteil (in%)
geringer Steinanteil	<10
mittlerer Steinanteil	10–20
hoher Steinanteil	>20
geringer Blockanteil	<5
mittlerer Blockanteil	5–20
hoher Blockanteil	>20

Zum Abschätzen der Grobkornanteile sind nötigenfalls Greiferbohrungen einzusetzen. Bei der Bewertung des Stein- oder Blockanteils für Bohr- und Rohrvortriebsarbeiten gem. ► Abschn. 3.3.2 und 3.3.3 liegt die Einstufung der Volumenprozentage bei 30 (statt 20).

Der Übergang von den nichtbindigen zu den bindigen Böden liegt im Schluffbereich, und zwar hauptsächlich bei den Korngrößen 0,02–0,006 mm (Mittelschluff). Hier beginnt

Tab. 2.1 Zusammenstellung der Korngrößengrenzen der reinen Bodenarten mit Vergleichsgrößen

Steine (Gerölle)		>63 mm	
Kies	Grob	20–63 mm	
	Mittel	6,3–20 mm	
	Fein	2–6,3 mm	über Streichholzkopfgröße
Sand	Grob	0,6–2 mm	über Grobgrießgröße
	Mittel	0,2–0,6 mm	Grießgröße
	Fein	0,063–0,2 mm	Einzelkörner noch erkennbar
Schluff	Grob	0,02–0,063 mm	Einzelkörner mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar
	Mittel	0,006–0,002 mm	
	Fein	0,002–0,006 mm	
Ton		$<0,002$ mm	