

Helmut Prinz Roland Strauß

Ingenieurgeologie

5. Auflage

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG



Ingenieurgeologie

Helmut Prinz

Roland Strauß

Ingenieurgeologie

5., bearbeitete und erweiterte Auflage

Professor Dr. **Helmut Prinz**
Stromberger Straße 38
55411 Bingen

Dr. **Roland Strauß**
Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
De-Greiff-Straße 195
47803 Krefeld
roland.strauss@gd.nrw.de

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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 hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

5. Auflage 2011

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2011

Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

11 12 13 14 15

5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Frank Wigger, Dr. Christoph Iven

Satz: klartext, Heidelberg

Umschlaggestaltung: SpieszDesign, Neu-Ulm

Titelfotografie: alter Steinbruch Dorndorf (Werratal) in Sandsteinen der Bernburg-Folge (Unterer Buntsandstein)
mit salzhangbedingten Zerrspalten. Foto: S. Schmidt/J. Wunderlich, Weimar.

Fotos/Zeichnungen: von den Autoren, wenn nicht anders angegeben

ISBN 978-3-8274-2472-3

Vorwort zur 5. Auflage

Die vorliegende fünfte Auflage ist in befruchtender Gemeinschaftsarbeit entstanden und zwar einerseits der größeren zur Verfügung stehenden Zeit eines Pensionärs und andererseits dem alltäglichen Zugang zu den Entwicklungen in der Praxis und der neueren Literatur.

Auch diese Auflage liegt noch in der Umstellungsphase auf eine einheitliche europäische Normung, was auch wieder eine teilweise Doppelbehandlung sowohl nach den neuen Europannormen als auch nach den bisherigen nationalen Normen erfordert.

Der bisherigen großen Resonanz entsprechend, soll auch diese fünfte Auflage sowohl Studierenden als auch im Beruf stehenden Geowissenschaftlern und Bauingenieuren ein praxisnahes Wissen vermitteln und auch anderen, an beruflicher Weiterbildung interessierten Lesern als Einführung in die ingenieurgeologisch-geotechnischen Untersuchungsmethoden und Problemlösungen sowie die speziellen Bauweisen dienen. Wer sich intensiver mit speziellen Fragestellungen befassen muss, findet entsprechende Literaturhinweise.

Die Autoren haben auch diesmal versucht, Fehler im Text und bei den Abbildungen möglichst zu vermeiden, was aber erfahrungsgemäß bei einem derartigen Umfang nie ganz möglich ist. Hinweise auf Fehler aller Art oder auch weiterführende Anregungen sind deshalb immer willkommen.

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schwerter, Hochschule Zittau/Görlitz, 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, Freiburg i. Br. für zahlreiche Anregungen sowie unseren Frauen, die den Zeitaufwand auch für diese Überarbeitung mit bewundernswerter Geduld ertragen haben.

Bingen am Rhein und Krefeld
im Dezember 2010

Helmut Prinz
Roland Strauß

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage	V	2.4.2 Lagerungsdichte bindiger Lockergesteine, Proctorversuch	32
1 Einleitung	1	2.5 Zustandsform, Konsistenzgrenzen	33
1.1 Aufgabenstellung der Ingenieurgeologie	1	2.6 Verformungsverhalten, Druck- und Zugfestigkeit	37
1.2 Verbindlichkeit von Normen und Richtlinien, Baugrundrisiko	2	2.6.1 Grundlagen	37
1.3 Formelzeichen, Einheiten	5	2.6.2 Wirkung des Wassers, Porenwasserdruck	38
2 Boden- und felsmechanische Kennwerte, ihre Ermittlung und Bedeutung	7	2.6.3 Spannungs-Verformungs-Beziehungen	40
2.1 Korngröße, Kornverteilung	9	2.6.4 Bodensteifigkeit, Steifemodul (E_s), Zeitsetzungsverhalten	41
2.1.1 Siebanalyse	9	2.6.5 Verformungsmodul (E_v) und Bettungsmodul (k_s) aus dem Plattendruckversuch	45
2.1.2 Sedimentationsanalyse	9	2.6.6 California Bearing Ratio (CBR)-Versuch	47
2.1.3 Sieb- und Sedimentationsanalyse	10	2.6.7 Verformungsmodul (E_v) aus Bohrlochaufweitungsversuchen	48
2.1.4 Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen	11	2.6.8 Diskussion der Verformungsmodul des Gebirges	48
2.1.5 Körnungen als Handelsbegriff	14	2.6.9 Primärspannungszustand	50
2.1.6 Hydraulische Instabilität und Filter für Dränmaßnahmen	15	2.6.10 Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Sprödigkeit	56
2.1.7 Filtersande und Filterkiese für den Brunnenbau	19	2.6.11 Volumenzunahme durch Quellen	64
2.1.8 Aufbau und Eigenschaften der Tonminerale	19	2.7 Scherfestigkeit	66
2.2 Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen	22	2.7.1 Grundlagen	66
2.2.1 Kalkgehalt (V_{Ca})	22	2.7.2 Direkter Scherversuch mit vorgegebener Scherfläche	68
2.2.2 Organische Bestandteile (V_{gl})	23	2.7.3 Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche	70
2.2.3 Schwefelverbindungen	24	2.7.4 Versuche zur Ermittlung der undrännierten Scherfestigkeit c_u	71
2.3 Das Drei-Stoff-System Boden und Fels	24	2.7.5 Großscherversuche	73
2.3.1 Wassergehalt (w), Sättigungszahl (S_r), Wasseraufnahmevermögen (w_A)	24	2.7.6 Diskussion der Scherfestigkeitsparameter (φ, c)	74
2.3.2 Korndichte bzw. Reindichte (ρ_s)	27	2.8 Durchlässigkeit	80
2.3.3 Dichte (ρ) und Wichte (γ)	27	2.8.1 Durchlässigkeit von Lockergesteinen	81
2.3.4 Porenanteil (n), Porenzahl (e), Porosität	30	2.8.2 Durchlässigkeit von Fels	82
2.4 Lagerungsdichte (D)	31		
2.4.1 Lagerungsdichte nichtbindiger Lockergesteine	31		

2.8.3	Laborversuche zur Ermittlung des k -Wertes	84	4.2.1	Geologische und ingenieurgeologische Karten	134
2.8.4	Feldversuche zur Ermittlung des k -Wertes	86	4.2.2	Gefahrenhinweis- und Risikokarten ...	135
2.8.5	Durchlässigkeitsbeiwerte	96	4.2.3	Erdbebengefährdung	137
2.8.6	Grundwasserfließparameter	99	4.2.4	Rezente tektonische Spannungen und Deformationen	145
2.8.7	Sickerwasser, Grundwasserneubildung, kapillare Steighöhe (h_k)	101	4.2.5	Erkundung tektonischer Störungszonen	148
3	Beschreibung und Klassifikation von Boden und Fels für bautechnische Zwecke	103	4.3	Indirekte Aufschlussmethoden ...	149
3.1	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden und Fels	103	4.3.1	Projektkartierungen, Luftbilddauswertung	149
3.2	Gruppeneinteilung der Böden nach DIN 18 196	103	4.3.2	Oberflächengeophysikalische Feldmethoden	150
3.2.1	Grobkörnige Böden	105	4.3.3	Gasgeochemisches Monitoring	154
3.2.2	Gemischtkörnige Böden	105	4.4	Direkte Aufschlussmethoden ...	156
3.2.3	Feinkörnige Böden	106	4.4.1	Zu beachtende gesetzliche Vorschriften	156
3.2.4	Organische und organogene Böden ...	106	4.4.2	Art und Umfang der Baugrunderkundung	157
3.2.5	Aufgeschüttete Bodenarten	106	4.4.3	Einteilung der Boden- und Gesteinsproben, Probenentnahmeverfahren ...	158
3.3	Beschreibung und Einstufung von Boden und Fels nach den ATV der VOB	107	4.4.4	Schürfe, Untersuchungsschächte und -stollen	160
3.3.1	Boden- und Felsklassen nach ATV DIN 18 300, Erdarbeiten	107	4.4.5	Bohrungen	162
3.3.2	Boden- und Felsklassen für Bohrarbeiten	108	4.4.6	Felduntersuchungen	167
3.3.3	Boden- und Felsklassen für Rohrvortriebsarbeiten	109	4.5	Aufnahme von Aufschlüssen (Schichtenverzeichnisse)	172
3.3.4	Sonstige Klassifizierungen nach ATV DIN	109	4.5.1	Aufnahme von Schürfen	172
3.4	Beschreibung von Gestein und Gebirge (Fels)	110	4.5.2	Aufnahme von Bohrungen im Lockergestein	173
3.4.1	Gesteinsbeschreibung für bautechnische Zwecke	110	4.5.3	Aufnahme von Bohrungen im Fels ...	176
3.4.2	Beschreibung von Gebirge (Fels), Verwitterung	114	4.6	Erfassen der Grundwasser- verhältnisse	179
3.4.3	Trennflächen und ihre Bedeutung ...	118	4.7	Darstellen der Boden- und Felsarten	185
3.4.4	Ausbildung und bruchmechanische Deutung von tektonischen Störungszonen	126	4.8	Bohrlochmessungen	186
3.4.5	Übersicht über die tektonischen Großstrukturen in Deutschland	130	4.8.1	Bohrlochsondierungen	186
4	Erkundungsmethoden	133	4.8.2	Bohrlochabweichungsmessungen ...	187
4.1	Grundlagen und Erkundungs- umfang	133	4.8.3	Geophysikalische Bohrlochmessungen .	187
4.2	Spezielle Arbeiten im Rahmen der Voruntersuchung	134	4.8.4	Verschiebungsmessungen in Bohrlöchern	190
			5	Einführung in die Berechnungsverfahren für Flachgründungen und Geländebruch	193
			5.1	Grundlagen	193
			5.2	Sicherheitsnachweise für Bauwerke	194
			5.3	Sohldruckverteilung in Fundamentsohle	197

5.3.1	Mittige und ausmittige Beanspruchung von starren Einzelfundamenten	198	6.2.2	Grundwasserabsenkung und Wasserentzug durch Bäume	230
5.3.2	Linien- und Einzellasten auf Streifenfundamenten	200	6.2.3	Entnahme von Erdgas und Erdöl	234
5.3.3	Grundlagen des Bettungsmodul- und Steifemodulverfahrens	200	6.2.4	Baugrundhebungen infolge Quellerscheinungen oder Kristallisationsdruck	234
5.4	Nachweis der Tragfähigkeit von Flächengründungen	201	6.2.5	Einfluss von Erschütterungen	235
5.4.1	Gleitsicherheit (EQU)	201	7	Flächengründung, Baugrundverbesserung	241
5.4.2	Kippsicherheit (EQU)	201	7.1	Prinzip der Flächengründung, Fundamentarten	241
5.4.3	Sicherheit gegen Aufschwimmen (UPL)	202	7.2	Festlegung der Gründungstiefe	241
5.4.4	Hydraulischer Grundbruch	203	7.3	Zulässiger Sohldruck in einfachen Fällen	242
5.4.5	Grundbruchsicherheit	204	7.4	Konstruktive und baugrundverbessernde Maßnahmen	244
5.5	Sohldruckverteilung und Setzungen von Flachgründungen	205	7.4.1	Konstruktive Maßnahmen	244
5.5.1	Theorie der Sohldruckverteilung	205	7.4.2	Abminderung des Sohldrucks	245
5.5.2	Sohldruckverteilung im Baugrund	206	7.4.3	Mechanische Baugrundverbesserungsverfahren	245
5.5.3	Ermittlung der Setzungen von Streifen- und Einzelfundamenten	206	7.4.4	Baugrundverfestigung durch Einpressen von Suspensionen oder Lösungen	248
5.6	Grundlagen für die Ermittlung des Erddrucks	212	7.4.5	Düsenstrahlverfahren	253
5.6.1	Erddruckarten	213	8	Pfahlgründung	255
5.6.2	Wahl des Erddruckansatzes	213	8.1	Einteilung und Tragverhalten der Pfähle	255
5.6.3	Bodenkennwerte für Erddruckberechnungen	214	8.1.1	Tragverhalten der Pfähle	255
5.7	Standsicherheitsnachweise für Geländebruch	215	8.1.2	Pfahlarten und Baustoffe	256
5.7.1	Berechnungsmodelle und Sicherheiten	215	8.2	Grundlagen der Pfahlbemessung	257
5.7.2	Standsicherheit bei ebener Gleitfläche	217	8.2.1	Ermittlung der Pfahltragfähigkeit durch Probelastungen	259
5.7.3	Standsicherheit bei gebrochener Gleitfläche	218	8.2.2	Bemessungsverfahren für Bohrpfähle aus Erfahrungs- bzw. Tabellenwerten	261
5.7.4	Standsicherheitsnachweis nach dem Lamellenverfahren	219	8.2.3	Tragfähigkeit von Reibungspfählen	263
5.7.5	Starrkörpermethode bzw. Blockgleitverfahren	220	8.2.4	Horizontale Einwirkung auf Pfähle	264
5.7.6	Standsicherheit von Felsböschungen	221	8.2.5	Negative Mantelreibung und Seitendruck auf Pfähle in weichen Böden	265
5.7.7	Mechanische Wirkung des Wassers	224	8.2.6	Tragfähigkeit von Pfahlgruppen	266
6	Ursachen von Setzungen, zulässige Setzungsunterschiede, Risseschäden	227	8.3	Rammpfähle	267
6.1	Setzungen und Setzungsunterschiede	227	8.3.1	Fertigpfähle	268
6.2	Ursachen von Rissen und Bauwerksschäden	229	8.3.2	Ortbetonrammpfähle	268
6.2.1	Erhöhung des Wassergehaltes, Wasserdurchströmung	230	8.4	Bohrpfähle	269
			8.4.1	Normalkalibrige Bohrpfähle	270
			8.4.2	Großbohrpfähle	271
			8.4.3	Pfähle mit kleinen Durchmessern	272

9	Schutz der Bauwerke vor Grundwasser	275	12	Erdarbeiten	315
9.1	Grundwasserstände, Bemessungswasserstand	275	12.1	Gewinnung und Förderung	317
9.2	Dränung von Bauwerken	277	12.2	Einbau und Verdichtung	319
9.3	Druckwasserhaltende Abdichtung von Bauwerken	278	12.2.1	Verdichtbarkeit der Boden- und Felsarten	320
9.4	Dezentrale Regenwasser-versickerung	279	12.2.2	Verdichtungsgeräte	321
9.5	Betonangreifende Wässer und Böden	280	12.2.3	Verdichtungsanforderungen nach ZTVE und RiL 836	322
9.5.1	Entnahme und Untersuchung von Grundwasser- und Bodenproben	280	12.2.4	Verdichtungskontrollen	324
9.5.2	Untersuchungsmethoden	282	12.2.5	Vorbereiten der Dammaufstandsfläche und Verdichten der Böschungsbereiche	326
9.5.3	Betonaggressive Stoffe und ihre Wirkung	282	12.2.6	Hinterfüllen und Überschütten von Bauwerken	327
9.5.4	Beurteilung der Aggressivität	285	12.3	Bodenverbesserung und Bodenverfestigung	328
9.5.5	Bauliche Schutzmaßnahmen	285	12.3.1	Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Kalk oder hydraulischen Bindemitteln	328
10	Baugruben	287	12.3.2	Bodenverfestigung	330
10.1	Baugrubenaushub	287	12.3.3	Verbesserung der Tragfähigkeit und der hydraulischen Stabilität durch Geokunststoffe	330
10.2	Geböschte Baugruben	288	12.4	Frostwirkung	334
10.3	Baugrubenverbau	288	12.4.1	Frostempfindlichkeit von Erdstoffen und Fels	334
10.3.1	Trägerbohlwandverbau	289	12.4.2	Tragschicht und Frostschuttschicht im Straßenbau	335
10.3.2	Spundwandverbau	290	12.4.3	Bettung, Frostschutz- und Planumschutzschicht bei Gleisanlagen	336
10.3.3	Bohrpfahlwände	290	13	Standsicherheit von Böschungen	339
10.3.4	Schlitzwände	291	13.1	Böschungsneigungen in Lockergesteinen	340
10.3.5	Sonderbauweisen	292	13.1.1	Grobkörnige Böden	340
10.4	Dichtwände	292	13.1.2	Feinkörnige Böden	340
10.4.1	Dichtwände im Schlitzwandverfahren	293	13.1.3	Gemischtkörnige Böden	341
10.4.2	Schmalwände	294	13.1.4	Heterogene (geschichtete) Böden	341
10.4.3	Sohldichtung von Baugruben	294	13.1.5	Aufgespülte Böden und Kippenböschungen	342
10.5	Ankersicherung	296	13.2	Böschungen im Fels	342
10.5.1	Herstellung von Verpressankern	296	13.2.1	Einfluss des Trennflächengefüges und der Frostbeständigkeit	342
10.5.2	Ankersysteme von Verpressankern	298	13.2.2	Böschungsneigungen und Böschungsformen	343
10.5.3	Prüfung der Anker	299	13.2.3	Herstellen von Felsböschungen	345
10.5.4	Bemessung der Anker	300	13.3	Sicherungsmaßnahmen	345
11	Wasserhaltung	303	13.3.1	Maßnahmen beim Böschungsbau	346
11.1	Rechtliche Grundlagen	303	13.3.2	Lebendverbaumaßnahmen	348
11.2	Offene Wasserhaltung	305	13.3.3	Entwässerungsmaßnahmen	349
11.3	Grundwasserabsenkung mit Brunnen	306			
11.4	Grundwasserabsenkung mittels Vakuumverfahren	309			
11.5	Elektroosmotische Entwässerung	310			
11.6	Berechnung einer Grundwasserabsenkung	311			
11.7	Grundwasserkommunikationsanlagen	313			

13.4 Erfahrungswerte von Böschungsneigungen in den deutschen Mittelgebirgen	349	15.3 Arten von Rutschungen, Klassifikation	384
13.4.1 Alte Gebirge	350	15.3.1 Fallen	384
13.4.2 Schichtgesteine	350	15.3.2 Kippen	386
13.4.3 Tertiäre und quartäre Gesteine, Braunkohletagebaue und Tagebaurestlöcher	351	15.3.3 Gleiten	386
13.5 Standsicherheit von Böschungen in Steine- und Erdenbetrieben	353	15.3.4 Driften	387
14 Standsicherheit und Verformung von Dämmen	355	15.3.5 Fließen	388
14.1 Standsicherheit von Dämmen	355	15.3.6 Komplexe Rutschungstypen	391
14.1.1 Grundbruchsicherheit	355	15.4 Berechnungsansätze und Diskussion der Scherparameter ..	391
14.1.2 Gleit- bzw. Spreizsicherheit	356	15.5 Vorbeugende Maßnahmen und Sanierung von Rutschungen	395
14.1.3 Sicherheit gegen Böschungsbruch ...	356	15.5.1 Verbesserung bzw. Wiederherstellung des Böschungsgleichgewichtes	396
14.1.4 Dämme auf wenig tragfähigem Untergrund	357	15.5.2 Oberflächendränung	398
14.2 Setzungen von Dämmen auf tragfähigem Untergrund	358	15.5.3 Tiefdränung	398
14.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit und Abminderung der Setzungen	360	15.5.4 Stabilisierung von Hangrutschungen ..	399
14.3.1 Maßnahmen bei der Dammschüttung .	360	15.5.5 Gründung von Bauwerken an rutschungsgefährdeten Hängen	401
14.3.2 Punkt- und streifenförmige Bodenstabilisierung	361	15.5.6 Risikobewertung, Überwachungs- und Warnanlagen	401
14.3.3 Teilweiser oder vollständiger Bodenaustausch	363	15.6 Rutschungsanfällige Schichten ...	403
15 Rutschungen	365	15.6.1 Grundgebirge	404
15.1 Ursachen von Rutschungen	366	15.6.2 Buntsandsteingebiete	406
15.1.1 Geologische Voraussetzungen	366	15.6.3 Grenze Röt/Muschelkalk und Mittlerer/Oberer Muschelkalk	407
15.1.2 Veränderungen der Neigung oder Höhe eines Hanges bzw. einer Böschung ...	367	15.6.4 Keuper	410
15.1.3 Wirkung des Wassers	367	15.6.5 Jura	412
15.1.4 Vegetation und menschliche Eingriffe .	369	15.6.6 Kreide	414
15.2 Erkennungsmerkmale und Untersuchungsmethoden	369	15.6.7 Tertiär	416
15.2.1 Beschreibung der wichtigsten Begriffe einer Rutschung	370	15.6.8 Quartär	419
15.2.2 Erkennen von Rutschungen und Rutschhängen im Gelände	371	16 Grundlagen für die Bewertung von Deponie- und Altlastenstandorten, Flächenrecycling, Bodenaushub sowie Bergbaufolgen	421
15.2.3 Lage- und höhenmäßige Aufnahme und Darstellung	374	16.1 Abfallrechtliche Grundlagen	421
15.2.4 Aufschlussarbeiten	376	16.2 Klassifikation der Abfallarten und Deponiekonzepte	423
15.2.5 Lagebestimmung der Gleitfläche und Bewegungsmessungen	378	16.2.1 Abfallarten und Übertagedeponien ...	423
15.2.6 Altersdatierung und Bewegungsablauf	380	16.2.2 Untertagedeponien	424
		16.3 Deponieuntergrund	426
		16.3.1 Standorterkundung	428
		16.3.2 Wasserbewegung und Schadstofftransport	430
		16.4 Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen	438
		16.4.1 Grundlagen	438

16.4.2	Untersuchung und Gefährdungs- abschätzung	440	17.4.2	Ingenieurgeologisches Nachtrags- management	514
16.5	Flächenrecycling	445	17.5	Standfestigkeit und Tragverhalten des Gebirges	516
16.6	Verwertung von Bodenaushub und Bauschutt	446	17.5.1	Lage, Richtung und Querschnitt des Hohlraumes, Bergschlaggefährdung ..	517
16.6.1	Verwertungsgebot, Abfallarten	446	17.5.2	Spannungszustand, Spannungs- umlagerung, Gebirgsdruck	519
16.6.2	Klassifikation der Abfallarten	447	17.5.3	Geotechnische Messungen und Verformungsverhalten bei Mittel- gebirgstunneln	525
16.6.3	Untersuchungsumfang, Probennahme ..	448	17.5.4	Verbundwirkung von Gebirge und Spritzbetonausbau	532
16.6.4	Anforderungen an die Verwertung ..	449	17.5.5	Bemessungsannahmen für die Tunnelstatik	536
16.7	Bergbaufolgen	452	17.6	Bauweisen	545
16.7.1	Zuständigkeit und Unterlagen der Bergbehörde	453	17.6.1	Offene und halboffene Bauweisen ..	545
16.7.2	Gefährdungsabschätzung und Risikobewertung	454	17.6.2	Konventioneller bergmännischer Vortrieb	546
16.7.3	Tagesnaher und oberflächennaher Bergbau	457	17.6.3	Teilschnittmaschinen	549
16.7.4	Tiefer Bergbau	459	17.6.4	Tunnelvortriebsmaschinen	550
16.7.5	Auswirkungen des Grubenwasser- anstiegs	460	17.6.5	Grabenloser Leitungsbau	560
16.7.6	Methangasaustritte	462	17.7	Ausbrucharbeiten	563
17	Tunnelbau	463	17.7.1	Bagger und Sprengvortrieb	563
17.1	Grundbegriffe des Tunnelbaus ..	463	17.7.2	Profilhaltung und Mehrausbruch ..	565
17.2	Aufgaben und Grenzen der ingenieurgeologischen Erkundung, Risikomanagement	464	17.8	Sicherungsarbeiten, Gebirgs- vergütung	566
17.2.1	Erkundungsinhalte, Richtlinien	464	17.8.1	Spritzbetonausbau	567
17.2.2	Risikomanagement und Gefährdungs- bilder	465	17.8.2	Ankersicherung	569
17.2.3	Spezielle Erkundungsmethoden	467	17.8.3	Firstsicherung durch Spieße, Dielen oder Schirme	574
17.2.4	Tunnelplanung in Karstgebieten	472	17.8.4	Gebirgsvergütung durch Injektionen ..	576
17.2.5	Erkundung und Auswirkungen der Grundwassersituation	475	17.8.5	Gebirgsvergütung durch Boden- vereisung	578
17.2.6	Auftreten von Gasen im Gebirge	492	18	Talsperrengeologie	579
17.2.7	Umweltbelastung	492	18.1	Ingenieurgeologische Arbeiten	580
17.2.8	Ermittlung geotechnischer Kennwerte	493	18.1.1	Voruntersuchungen für die Planung ..	580
17.2.9	Lösbarkeit und Erweichbarkeit	495	18.1.2	Untersuchung für die Bauausführung	580
17.3	Gebirgsklassifizierung	500	18.1.3	Mitarbeit bei Bauausführung, Probe- stau und Betrieb	581
17.3.1	Qualitative Gebirgsklassifizierung ..	501	18.2	Spezielle Problemstellungen	581
17.3.2	Quantitative Gebirgsklassifizierung ..	504	18.2.1	Durchlässigkeit des Untergrundes ..	582
17.3.3	Gebirgsverhaltenstypen und System- verhalten nach ÖGG-Richtlinie und SIA-Norm	508	18.2.2	Ermittlung der Sickerwasserverluste ..	586
17.3.4	Darstellung und Wertung der Gebirgs- typen bzw. -klassen	509	18.2.3	Raumstellung der Wasser leitenden Elemente	586
17.4	Ingenieurgeologische Baubetreuung	511	18.2.4	Erosionsgefährdung durch Sicker- wasserströmung	587
17.4.1	Ingenieurgeologisch-geotechnische Vortriebsdokumentation	511			

18.2.5 Veränderlich feste oder erweichbare Gesteine	589	19.4 Bautechnische Maßnahmen	630
18.2.6 Erdbebensicherheit und induzierte Seismizität	589	19.4.1 Schäden durch Senkungen und Erdfälle	631
18.2.7 Stauhaltungen in verkarstungsfähigen Gesteinen	590	19.4.2 Verbesserung des Untergrundes	632
18.2.8 Stabilität der Hänge	592	19.4.3 Konstruktive Maßnahmen	632
18.3 Absperrbauwerke	593	19.4.4 Frühwarnrichtungen	634
18.3.1 Staumauern	593	20 Geotechnische Aspekte der Geothermie	637
18.3.2 Dämme	594	20.1 Grundlagen der Geothermie	637
18.4 Untergrundabdichtung	597	20.1.1 Geothermischer Gradient	637
18.4.1 Horizontale Dichtungselemente	598	20.1.2 Geothermische Erkundung	638
18.4.2 Vertikale Dichtungswände	598	20.2 Geothermische Verfahren	640
18.4.3 Injektionsschleier	599	20.2.1 Oberflächennahe geothermische Systeme	641
19 Bauen in Erdfallgebieten	605	20.2.2 Tiefe geothermische Systeme	644
19.1 Karstterminologie	606	20.3 Bergrechtliche und wasserrechtliche Grundlagen	647
19.2 Ursachen der Bodensenkungen und Erdfälle sowie ihre hauptsächlichliche Verbreitung	608	20.3.1 Bergrecht	648
19.2.1 Karbonatkarst	608	20.3.2 Wasserrecht	648
19.2.2 Sulfatkarst	611	20.3.3 Weitere umweltrechtliche Einflüsse	649
19.2.3 Chloridkarst	619	Literatur	651
19.2.4 Erdfälle durch Erosions- und Suffosionserscheinungen	625	Anhang	697
19.3 Ingenieurgeologische Untersuchungsmethoden	626	Index	719
19.3.1 Geologisch-morphologische Verfahren	626		
19.3.2 Geophysikalische Messverfahren	628		
19.3.3 Geotechnische Untersuchungsverfahren	629		

1 Einleitung

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 erforscht. Dabei handelt es sich in zunehmendem Maße um Aufgaben, die heute nicht nur einen Generalisten, sondern einen Integralisten mit 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 vorausgesetzt, sondern auch Grundlagen der Boden- und Felsmechanik sowie die Fähigkeit zu zielorientierter Arbeit sowie zur Kommunikation und einer qualifizierten Teamarbeit. Unter Teamarbeit wird dabei eine offene und von wechselseitigem Respekt für unterschiedliche Denkansätze geprägte Zusammenarbeit verstanden, um die verschiedenen spezifischen Ansätze zur Problemlösung von vornherein berücksichtigen zu können.

1.1 Aufgabenstellung der Ingenieurgeologie

Die Ergebnisse der ingenieurgeologischen Voruntersuchungen bilden in der Regel die entscheidende Grundlage für die weitergehenden Planungs- und Ingenieurleistungen und zwar nicht nur während der Bearbeitungszeit, sondern teilweise auch noch in der Betriebsphase (Langzeitsicherheit, Kontrollmessungen). Dabei ist es nötig, die erforderlichen Erkundungsmaßnahmen von vornherein aufgrund von Feldbeobach-

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

Die Ingenieurgeologie steht heute vor erheblichen Veränderungen nicht nur hinsichtlich der Folgen der Umstrukturierung von den bisherigen Diplom-Studiengängen zu den zweistufigen Bachelor- und Masterabschlüssen sowie auch den künftigen Weiterbildungsprogrammen. Dazu kommen weiterhin die Diskussion um die Abgrenzung hauptsächlich wirtschaftlicher Einzelinteressen in der Geotechnik, sowie auch um die Entwicklungen auf europäischer Ebene, angefangen bei der Normung über die Ausbildung bis hin zur Niederlassungsfreiheit (Lit. s. Bock 2004). Ein derzeit viel diskutiertes Thema sind auch die Georisiken, d. h. das Erfassen und Bewerten der von Naturereignissen ausgehenden Gefahren. Ein weiteres relativ neues Arbeitsgebiet ist die Geothermie, die wie viele Bereiche der Ingenieurgeologie fachübergreifend behandelt werden muss. Diesen Erweiterungen mussten aus Platzgründen die Ausführungen über Deponietechnik und die Bewertung von Altlasten zum Opfer fallen, die teilweise an Aktualität verloren haben.

Diese 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 versuchen, die zunächst meist unvollständigen Einzelinformationen zu verdichten, um logische Strukturen und geotechnische Zusammenhänge zu erkennen. Dazu gehört auch, Daten und Messergebnisse schwachstellenbewusst zu interpretieren und die Erkenntnisse umzusetzen. Treten in den Lösungsansätzen bei der Suche nach dem kausalen Zusammenhang Widersprüche auf, so muss geprüft werden, ob es sich hierbei einfach um Fehler handelt, die es zu beseitigen gilt, oder um eine Chance für Neuerkenntnisse. Der Ingenieurgeologe muss sich darüber hinaus bemühen, seine Ergebnisse exakt und anschaulich vereinfacht auszudrücken und zu quantifizieren.

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 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.

Um diesem Aufgabenspektrum einigermaßen gerecht zu werden, wird nicht nur auf abgesicherte naturwissenschaftliche und geotechnische Zusammenhänge eingegangen, sondern vielfach auch auf die wissenschaftliche Diskussion geowissenschaftlicher Fragestellungen verwiesen. Die Anwendung solcher Hypothesen erfordert im Einzelfall vertiefendes Literaturstudium und 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 Zusam-

menhänge 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 betrifft auch das inzwischen zu umfangreich gewordene Literaturverzeichnis, so dass hinsichtlich der älteren Literatur (etwa vor 1990) im Wesentlichen auf die dritte Auflage verwiesen werden muss.

1.2 Verbindlichkeit von Normen und Richtlinien, Baugrundrisiko

Die nationalen Normen (DIN, ÖNORM, SIA bzw. SN) werden zunehmend durch **Euronormen** (Eurocodes, EC) des Europäischen Komitees für Normung (CEN) bzw. durch ISO-Normen ersetzt. Grundgedanke der Eurocodes war, eine europaweit einheitliche Ausgangslage für die Berechnungs- und Bemessungsnormen im Bauwesen zu erreichen. Die neuen europäischen Einzelnormen werden als EN bzw. in Zusammenarbeit mit der Internationalen Organisation für Normung (ISO) als EN ISO bezeichnet. Die deutschen Fassungen erhalten zunächst den Zusatz (D). 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 einem Nationalen Anhang (NA, National Annex) ausgelagert werden. Der Nationale Anhang darf nur Informationen über Verfahren und Kenngrößen enthalten, die in der Euronorm eigens der nationalen Festlegung vorbehalten

sind. Die technischen Verfahren (z. B. Laborversuche) werden künftig in unternormativen Technical Specifications (TS) behandelt (z. B. DIN ISO/TS 17 892-1 bis 12, welche die Normenreihe DIN 18 121 bis 18 137 ersetzen sollen).

In der derzeitigen Umstellungsphase von den bisherigen nationalen Normen auf die Euronormen und ihren nationalen Ergänzungen ist es schwierig, mit dem Stand der Veröffentlichung neuer Normen und Normenentwürfe Schritt zu halten. Redaktionsschluss für den Bearbeitungsstand dieser Auflage war März 2011.

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. Die nationale Fassung enthält den vollständigen Text der Euronorm. Sie stellt eine Rahmennorm dar, in der z. B. drei Nachweisverfahren für die geotechnische Bemessung zur Wahl gestellt werden. Um die Euronorm in den Mitgliedstaaten praktisch anwendbar zu machen, werden in einem Nationalen Anhang (DIN EN 1997-1/NA) die in Deutschland anzuwendenden Nachweisverfahren und die zugehörigen Teilsicherheitswerte festgelegt (s. VOGT et al. 2006; SCHUPPENER et al. 2008). Darüber hinaus wird die bisher gültige DIN 1054:2005 überarbeitet und alle Festlegungen gestrichen, die schon in dem EC 7-1 enthalten sind. Die neue DIN 1054-101 (E 2009) enthält nur ergänzende Regelungen zur DIN EN 1997-1 und ist nur mit dieser und dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-1/NA (E 2009) anwendbar. Beide sollen Ende 2010 als Norm veröffentlicht werden. Ab dem Ende der Koexistenzperiode (2010) besteht das betreffende deutsche Normenwerk dann aus drei Dokumenten, der DIN EN 1997-1:2009, dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-1/NA und der Ergänzungsnorm DIN 1054-neu. In diese Norm sollen auch Teile der bisherigen DIN 4020:2003 übernommen werden.

Eine ähnliche Regelung gilt für Teil 2 der EC 7 „Erkundung und Untersuchung des Baugrunds“, die seit 2007 in deutscher Fassung als DIN EN 1997-2 vorliegt. Das endgültige Normenwerk besteht ebenfalls aus der DIN EN 1997-2, dem Nationalen Anhang DIN EN 1997-2/NA und einer überarbeiteten DIN 4020 „Ergänzende Regelungen zur DIN EN 1997-2“. Zu diesen Standardnormen zur Erkundung und Untersuchung

des Baugrunds gehören dann noch eine Reihe von Einzelnormen, auf die in den jeweiligen Abschnitten eingegangen wird.

Der Verbreitung des Buches entsprechend werden im Anhang auch die Österreichischen und Schweizer Geotechnik-Normen (Ö-Norm; SIA bzw. SN) aufgelistet, soweit die Titel zur Verfügung standen. Die entsprechenden europäischen Normen werden in Österreich unter den Bezeichnungen ÖNORM EN ISO bzw. ÖNORM EN oder ÖNORM CEN ISO/TS geführt und entsprechen den im Anhang genannten Dokumentnummern. In der Schweiz sind die entsprechenden Bezeichnungen SN EN bzw. SN EN ISO. Informativ wird auch auf weitere europäische Geotechniknormen verwiesen, wie die BS = British Standard, die DFG = Dansk Geotechnisk Forening, die NEN = Nederlandse Norm, die NF = Norm Francaise und die SS = Svensk Standard.

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. Sie sind, trotz der teilweisen Überregulierung, schon aus juristischen Gründen bei allen entsprechenden Arbeiten zu beachten (s. a. KUNTSCHKE 2009). Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Normen nur zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe dem Stand der Technik entsprechen. Der Anwender handelt darüber hinaus immer in eigener Verantwortung. Außer den Normen gibt es noch eine Reihe weiterer privatrechtlicher **technischer Regelwerke** (Richtlinien, Merkblätter, Empfehlungen) die in der Ingenieurgeologie zu beachten sind. Außerdem sei auf weitere technische Regelwerke für das Straßenwesen, den Bauvorschriften und Richtlinien der Deutschen Bahn AG sowie den Empfehlungen der Arbeitskreise Baugruben (EAB) bzw. Ufereinfassungen (EAU) verwiesen.

Bei den allgemein **anerkannten Regeln der Technik** handelt es sich um im Bauwesen übliche wissenschaftlich-technische und handwerkliche Erfahrungen, die generell als bekannt, richtig und notwendig zu bezeichnen sind. Im Konfliktfall bedarf es zur Rechtsprechung der Aufklärung durch einen anerkannten Sachverständigen.

1 Anerkannte Regeln der Technik sind z. B.

- DIN-Normen, EN-Normen, ISO-Normen
- einschlägige gesetzliche Baubestimmungen
- eingeführte Technische Baubestimmungen
- Merkblätter und Richtlinien
- 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.

Ein **Baugrundgutachten** ist eine normenge-rechte, 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 für Gliederung und Inhalt von Baugrundgutachten finden sich in DIN EN 1997-1, Abs. 3.4 und in dem FGSV-Merkblatt M GUB 04. Das Gutachten 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 solche pauschalen 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 Wahrscheinlichkeitsausagen (s. DIN 4020). Dem Baugrundgutachter kann wider fachlichem Erwarten und zwischen sorgfältig, entsprechend der einschlägigen Normen angesetzten und ausgewerteten Aufschlüssen angetroffener problematischer Baugrund nicht angelastet werden.

Der Baugrund wird in der deutschen Rechtsprechung als Baustoff betrachtet, der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wird (ENGLERT 2006). Das **Baugrundrisiko** liegt deshalb in Deutschland beim Bauherrn. Diese Haftung gilt auch für Schäden, die bei Bauarbeiten von einem

Grundstück ausgehen, es sei denn der Grundstückseigentümer hat einen Rückgriffsanspruch gegenüber Dritten. Ein echtes Baugrundrisiko liegt vor, wenn trotz den Regeln der Technik entsprechender Erkundung der Baugrundverhältnisse und trotz Erfüllung aller Prüfungs- und Hinweispflichten seitens des Bauausführenden doch Abweichungen von den erkundeten Boden- und Grundwasserverhältnissen auftreten, die zu Leistungsänderungen, Bauverzögerungen oder gar Bauschäden führen. Diese unabwendbaren Umstände gehen immer zu Lasten des Auftraggebers (s. Abschn. 17.4.2).

Ein unechtes oder allgemeines Baugrundrisiko ist gegeben, wenn die Boden- und Grundwasserverhältnisse nicht ausreichend erkundet waren oder die Ausschreibung unzureichend war (§ 9 VOB/A), aber seitens des Auftragnehmers gegen die offenkundigen Mängel in der Ausschreibung keine Bedenken angemeldet wurden (s. a. Abschn. 17.4.2). Das unechte Baugrundrisiko trifft nach der Rechtsprechung immer dann den Auftragnehmer, wenn bei gebotener Überprüfung der Ausschreibung offenkundige Fehler und Lücken hätten erkannt und damit ein unechtes Baugrundrisiko hätte verhindert werden können (ENGLERT 2002; 2006).

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, Erfahrung und Objektivität. Unterschieden werden die in speziellen Bereichen „Anerkannten Sachverständigen“ nach dem Bauordnungsrecht (z. B. der Länder-Sachverständigen-Ordnung für Erd- und Grundbau-SEGVO) bzw. die „öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen“ gem. § 38 GWO. Streng genommen darf ein vereidigter Sachverständiger als solcher kein gerichtliches Gutachten erstellen, das nicht sein Sachgebiet betrifft, für das er vereidigt ist. Hinzu kommen dann noch die im „Verzeichnis der anerkannten Sachverständigen für

Erd- und Grundbau“ der Bundesingenieurkammer genannten Personen sowie Fachplaner und Prüfsachverständige bzw. Prüfsachverständige nach MBO.

Seit Ende der 1990er Jahre werden auch „Sachverständige nach § 18 Bundes-Bodenschutzgesetz“ (BBodSchG, s. Abschn. 16) geführt, die einen Sachkundenachweis in verschiedenen Teilbereichen der Altlasten vor der zuständigen Industrie- und Handelskammer ablegen müssen.

Zu den Aufgaben eines Sachverständigen gehören in der Regel Schiedsgutachten, Bauschadensgutachten, Wertgutachten und ggf. weitere Gutachtenthemen. Bei Beweissicherungsverfahren ist zwischen gesetzlicher, d.h. gerichtlich beauftragter Beweissicherung zu unterscheiden, bei welcher der benannte Beweissicherungsgutachter gleichzeitig Gerichtsgutachter ist, und einer privatrechtlichen Beweissicherung. Im Streitfall kann der privat beauftragte Beweissicherungsgutachter vom Gericht als sachverständiger Zeuge gehört werden, das Gericht wird aber in der Regel einen zusätzlichen Gerichtsgutachter bestellen.

1.3 Formelzeichen, Einheiten

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

Kraft in kN

Masse in kg

Moment in kNm

Dichte in kg/m^3

Wichte in kN/m^3

Spannung, Druck, Festigkeit und Steifigkeit in kN/m^2 (kPa), MN/m^2 (MPa)

Durchlässigkeit in m/s.

In den nationalen Normen werden auch künftig nur die Einheiten kN/m^2 und MN/m^2 benutzt. Darüber hinaus werden in dieser Auflage noch folgende Einheiten verwendet:

- K (Kelvin) bzw. mK (Millikelvin), Maßeinheit für Temperaturdifferenzen, wobei $1 \text{ K} \triangleq 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bq (Becquerel), Maßeinheit für die Aktivität einer radioaktiven Substanz mit $1 \text{ Bq} = 1$ Atomzerfall pro Sekunde; $1 \text{ MBq} = 1$ Million Bq

Tabelle 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	kp/mm^2	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	1			10	
		1000	10			100	0,1
			100			1000	1
			1000				

1 **Tabelle 1.2** SI-Einheiten für Teile des Vielfachen und Dezimalstellen mit Bezeichnungen.

Vielfaches		mathem. Zeichen	Bruchteil		mathem. Zeichen
$10^3 = 1000$	Tausend	k = kilo	10^{-3}	1 Tausendstel	m = milli
$10^6 = 1000000$	Million	M = Mega	10^{-6}	1 Millionstel	μ = Mikro
$10^9 = 1000000000$	Milliarde	G = Giga	10^{-9}	1 Milliardstel	n = Nano

- Darcy bzw. Millidarcy (mD), Maßeinheit für die Permeabilität von Gesteinen
 $1 \text{ Darcy} = 0,98697 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$
- Gon, in der Markscheiderei verwendete Einheit als 1/100 eines rechten Winkels ($1 \text{ gon} = 0,9^\circ$)

Für eine gelegentlich noch erforderliche Umrechnung aus alten Einheiten und Dimensionen dient

die Tabelle 1.1. In Tabelle 1.2 sind die dezimalen Teile und die Teile des Vielfachen der SI-Einheiten sowie ihre Bezeichnung und die mathematischen Vorsatzzeichen zusammengestellt. Die Tabelle 1.3 gibt eine Übersicht über die Verhältniszahlen der mit den heutigen Analysemethoden feststellbaren Spuren umweltrelevanter chemischer Stoffe.

Tabelle 1.3 Verhältniszahlen der mit den hochempfindlichen Analysemethoden feststellbaren Massenbruchteile.

1 Prozent ist 1 Teil von hundert Teilen	10 Gramm pro Kilogramm	10 g/kg
1 Promille ist 1 Teil von Tausend Teilen	1 Gramm pro Kilogramm	1 g/kg
1 ppm (part per million) ist 1 Teil von 1 Million Teilen	1 Milligramm (mg) pro Kilogramm	0,001 g/kg (10^{-3})
1 ppb (part per billion) ist 1 Teil von 1 Milliarde Teilen (b = billion; engl. für Milliarde)	1 Mikrogramm (μg) pro Kilogramm	0,000 001 g/kg (10^{-6})
1 ppt (part per trillion) ist 1 Teil von 1 Billion Teilen (t = trillion; engl. für Billion)	1 Nanogramm (ng) pro Kilogramm	0,000 000 001 g/kg (10^{-9})
1 ppq (part per quadrillion) ist 1 Teil von 1 Billiarde Teilen (q = quadrillion; engl. für Billiarde)	1 Picogramm (pg) pro Kilogramm	0,000 000 000 001 g/kg (10^{-12})

2 Boden- und felsmechanische Kennwerte, ihre Ermittlung und Bedeutung

Für bautechnische Zwecke werden Festgestein und Lockergestein bzw. Fels und Boden unterschieden. Zwischen beiden treten, bedingt durch unterschiedliche Verwitterung oder gelegentliche Verfestigung, zahlreiche Übergänge auf.

Der Begriff „**Boden**“ wird hier im bautechnischen Sinn als Sammelbezeichnung aller Lockergesteine und von lockergesteinsartig verwitterten Festgesteinen gebraucht. Dieser von der bodenkundlichen Begriffswelt abweichenden Definition steht heute auch noch die umfassende Definition im Sinne des „Bodenschutzes“ gegenüber (s. Abschn. 16.1).

Eine ähnlich umfassende Definition wird in den einschlägigen Normen (DIN 4020, DIN 1054 : 2005) auch für den Begriff **Baugrund** verwendet. Danach ist Baugrund gewachsener oder geschütteter Boden oder Fels, einschließlich Grundwasser und etwaiger Kontaminationen, auf den eine bauliche Anlage gegründet bzw. in den eine solche Anlage eingebettet wird. Nach DIN EN 1997-1 ist Baugrund „Boden, Fels und Auffüllung, die vor Beginn der Baumaßnahme vor Ort vorhanden waren“. Nach der Rechtsprechung ist Baugrund der gesamte Teil der unter der Erdoberfläche liegenden Boden- und Felschichten, 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 dem (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 in der Regel inhomogen, d. h. er hat nicht in jedem Punkt die gleichen

Eigenschaften, und er ist in hohem Maße anisotrop, was bedeutet, dass diese 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

Versuche zur Bestimmung und Klassifizierung der **Bodenart**:

- Korngröße, Kornverteilung
- Fließgrenze, Ausrollgrenze, Schrumpfgrenze
- Plastizitätszahl
- Kalkgehalt, organische und andere Beimengungen
- Tonmineralogie

zur Bestimmung der **Zustandsform**:

- Wassergehalt
- Dichte
- Porenanteil, Porenzahl
- Lagerungsdichte, Konsistenz

zur Bestimmung des **Verhaltens bei mechanischer Beanspruchung**:

- Bodensteifigkeit (Verformbarkeit)
- Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Sprödigkeit
- Scherfestigkeit

und zur Bestimmung des **Verhaltens bei hydraulischer Beanspruchung**:

- Durchlässigkeit.

Nach DIN EN 1997-2 werden fünf verschiedene **Arten von Bodenproben** unterschieden, gestörte,

2 ungestörte, aufgearbeitete (durchwalkte), wiederhergestellte und aufbereitete bzw. rekonsolidierte Proben (s. Abschn. 4.4.3). Die Untersuchung der Kornverteilung, der Korndichte, des Wassergehaltes, der Konsistenzahlen, des Wasseraufnahmevermögens, des Kalkgehaltes und des Glühverlustes erfolgt an strukturgestörten Proben. Zur Ermittlung der Dichte, des Porenanteils bzw. der Porenzahl, der Verformbarkeit und der Festigkeit sowie der Durchlässigkeit und der kapillaren Steighöhe sind ungestörte Bodenproben bzw. rissefreie 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, welche 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 derzeit noch die Normenreihe 18 121 bis 18 137, die künftig durch die derzeitigen Vornormen der Reihe DIN ISO/TS 17 892-1 bis -12 ersetzt werden sollen. Für Feldversuche gilt die Normenreihe DIN EN ISO 22 476-1 bis -13. Für Versuche an Festgesteinen und im Fels gelten die Richtlinien des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“ der DGGT. Diese Empfehlungen erscheinen in zwangloser Reihenfolge (1979 bis 2010 die Nr. 1 bis 21) in der Fachzeitschrift „Die Bautechnik“. Die Empfehlungen, die geotechnische Messungen zum Inhalt haben, sollen künftig durch die Normenreihe 4017 ergänzt bzw. ersetzt werden (s. Anhang). Die Loseblattsammlung „Technische Prüfvorschriften 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 gesteinstechnische 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 (2003) Tab. 7 bis 10.

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, so dass die mitgeteilten Werte nur allgemeine Gültigkeit haben und projektbezogene Einzelbestimmungen nicht ersetzen können. Eine Zusammenstellung charakteristischer Bodenkennziffern enthält auch DIN 1055-2 (E 2007).

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 eine Weiterverarbeitung der Daten muss dabei allerdings auf eine Kompatibilität der Datensysteme geachtet werden. Derzeit ist, 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 angegeben werden, Örtlichkeit, Probenkennzeichnung, Ent-

nahmestelle und -tiefe, Datum und das untersuchende Institut sowie Angaben zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse (SCHUPPENER et al. 2008).

2.1 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, Korngrößenverteilung (1996, E 2010), bzw. der Vornorm DIN ISO/TS 17 892-4 festgelegt. Korngrößen über 0,063 mm (Sand, Kies) werden durch Siebung, Korngrößen unter 0,125 mm durch Sedimentation ermittelt.

2.1.1 Siebanalyse

Die Probenmengen für die Siebanalyse betragen je nach geschätztem Größtkorn 150 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 vorherigem Trocknen und Wiegen die Probe aufgeschlämmt und die Feinanteile durch ein Feinsieb mit der Maschenweite 0,063 mm (oder 0,125 mm) gewaschen (Nasssiegung). Der Siebrückstand wird getrocknet und normal gesiebt, vom Siebdurchgang wird entweder nur die Trockenmasse bestimmt oder es wird eine Sedimentationsanalyse angeschlossen.

2.1.2 Sedimentationsanalyse

Die Korngrößenverteilung der Kornanteile unter 0,125 mm wird in der Bodenmechanik nach dem **Aräometerverfahren** ermittelt. Das Aräometer-

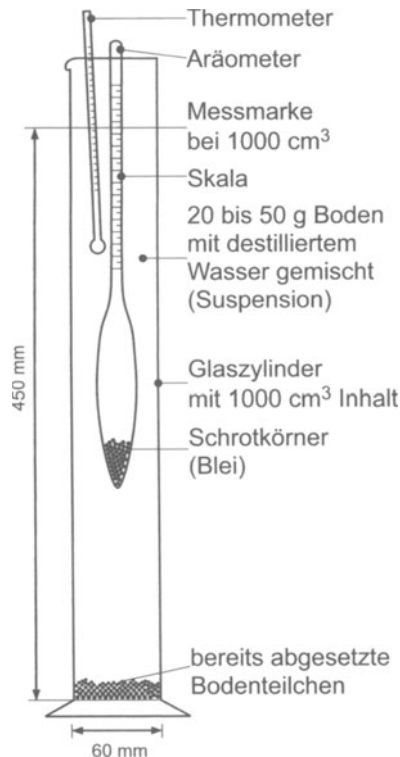


Abb. 2.1 Messzylinder für Sedimentationsanalysen.

prinzip (Abb. 2.1) beruht darauf, dass verschiedenen große Körner in einer Aufschlammung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit absinken (Sedimentation). Der Zusammenhang zwischen Korngröße, Kornwichte und Sinkgeschwindigkeit wird durch das Stoke'sche Gesetz angegeben. Die Methode bringt keine Trennung nach Korngrößen, sondern nach einheitlichen Korndurchmessern. Die Korndichte wird dabei als einheitlich vorausgesetzt.

Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgen nach DIN 18 123 bzw. der Vornorm DIN ISO/TS 17 892-4. Die Probenmengen betragen bei sandhaltigen Böden rd. 75 g, sonst 30 bis 50 g. Zur Verhinderung von Koagulation (Flockenbildung) bei der Sedimentation wird als Dispergierungsmittel 0,5 g Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) 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

2 mit 15%-igem 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 Hydrochloresäure bzw. 1 N HCl-Säure entkarbonatet.

Die Bestimmung der Trockenmasse darf bei bindigen Böden nicht durch Trocknen vor dem Versuch erfolgen, sondern durch vorherige Probenteilung bzw. nach dem neuen DIN-Entwurf durch Tauchwägung. Bei Trocknungstemperaturen über $100\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $> 0,06\text{ mm}$, wobei deutlich unzerteilte Tonaggregate zu beobachten sind.

Der bei der Sedimentationsanalyse physikalisch-mechanisch bestimmte Feinstkornanteil $< 0,002\text{ mm}$ ($2\text{ }\mu\text{m}$) entspricht häufig nicht dem röntgendiffraktometrisch ermittelten Tonmineralanteil, da sich nur die chemisch aktiven Tonminerale, wie z. B. Montmorillonit und auch Illit in der Fraktion $< 0,002\text{ mm}$ wiederfinden, während sich viele Primärkristallite, wie glimmerähnliche Illite, z. T. auch Kaolinit, Chlorit und besonders Feldspäte in der Fraktion zwischen $0,002\text{ mm}$ und $0,0063\text{ mm}$ 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 gegebenenfalls 6 bis 8 Stunden Schütteln oder Rühren
- 2 Wochen Einweichen und Behandlung wie vor
- Mörsern der Tonsteinproben, 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 verbleiben. Diese Aggregate lassen sich durch eine 5 bis 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 & LEMPP (2004). Durch wiederholte Trocknung bei $40\text{ }^\circ\text{C}$ 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 & WEWER (1980) die mehrmalige Behandlung mit einer $0,1\text{-molaren}$ Lösung Ethylendiamintetraessigsäure (EDTE, Titriplex® o. a.). Durch Auflösung des Bindemittels wird das Ausgangsgestein verändert.

2.1.3 Sieb- und Sedimentationsanalyse

Bei einem Feinkornanteil $< 0,063\text{ mm}$ 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, gegebenenfalls mit anschließender Siebung der groben Kornanteile. Ist dagegen der Anteil der Körner $> 0,063\text{ mm}$ (Sand) größer als 20% der Trockenmasse, so

müssen die groben Kornanteile vor der Sedimentation durch Nasssieben abgetrennt werden.

2.1.4 Darstellung und Beschreibung der Kornfraktionen

Die Verteilung der Kornfraktionen wird in der Regel 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). Bei der Darstellung 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 werden die Nebenanteile in der Reihenfolge ihrer Bedeutung dem Hauptanteil als Adjektiv nachgestellt und zwar als

- stark – wenn Nebenanteile > 30 %
- schwach – wenn 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:

- Schluff, stark tonig, schwach feinsandig mit 30 % Ton, 60 % Schluff, 10 % Sand und 0 % Kies = 3610 (bzw. weiter unterteilt in 3.321.100.0); s. Nr. 10 der Abb. 2.2
- Kiessand mit 0 % Ton, 0 % Schluff, 50 % Sand und 50 % Kies = 0055 (0.0.023.410); s. Nr. 5 der Abb. 2.2.

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

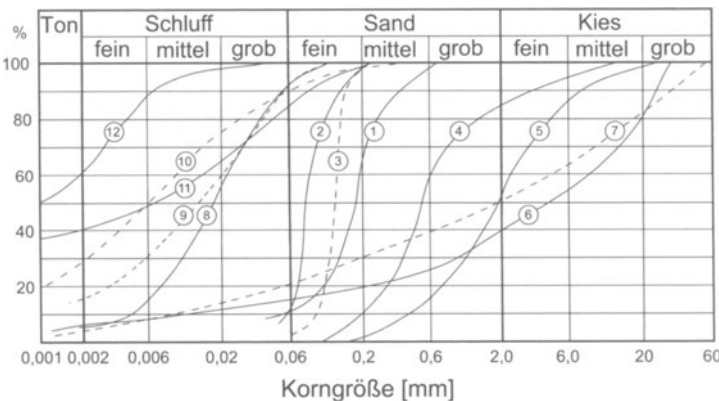
$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

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 (2006):

eng gestuft (E)	$C_u < 6$
weit gestuft (W)	$C_u > 6$

bzw. nach EN ISO 14 688-2 (2004):

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



- (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)

Abb. 2.2 Beispiele von Körnungslinien typischer Bodenarten.

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

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

Nach EN ISO 14 688-2 weisen eng gestufte Böden eine Krümmungszahl < 1 und weit gestufte eine solche von 1–3 auf.

Eine andere Kennzeichnung der geometrischen Form der Korngrößenverteilungslinie, wie sie für hydraulische Fragen verwendet wird, bringt HEIBAUM (2007, darin Lit.):

- linear = gleichmäßiger Kurvenverlauf zwischen d_{15} und d_{85}
- ausfallgekört = Zwischenkörnungen fehlen und die Linie ist unterhalb d_{30} flach
- aufwärtskonkav = Körnungslinie ist unterhalb d_{30} flach, steigt dann aber steil an.

Die **Benennung der mineralischen Lockergesteine** erfolgt nur nach Korngrößen, unabhängig vom Material und der Kornform. Die reinen Bodenarten sind in Tab. 2.1 zusammengestellt. Die geologischen Begriffe Psephite für die Korngrößengruppe 20 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, flachplattig, 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 Bodenarten sind Böden aus Kies und/oder Sand mit weniger als 10% 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.

Der Übergang von den nichtbindigen zu den bindigen Böden liegt im Schluffbereich und zwar hauptsächlich bei den Korngrößen 0,02 bis 0,006 mm (Mittelschluff). Hier beginnt sich das Wasserbindevermögen stärker bemerkbar zu machen, obwohl es sich bei der gesamten Schlufffraktion noch weitgehend um zerkleinerte Gesteinskörner, meist Quarz und Feldspat, handelt. Die **feinkörnigen oder bindigen Bodenarten** bestehen nach der Definition der DIN ISO/TS 17 892-4 aus mehr als 40% Feinkorn und teilweise Sand, aber nur wenig bis keine Kiesanteile. Sie bestehen immer aus einer Mischung der Ton- und Schlufffraktionen mit unterschiedlichem Anteil größerer Kornfraktionen. Die Ton- und Schlufffraktion besteht meist aus Quarz, Feldspat, Glimmer, Tonmineralen und löslichen Komponenten, wie Karbonaten. Das Verhalten dieser Böden wird bestimmt von der Plastizität, der geringen Durchlässigkeit, den Schrumpf- und Quelleigenschaften, dem Konsolidierungsverhalten sowie ihrem Rückhaltepotenzial.

Gemischtkörnige Böden bestehen nach DIN ISO/TS 17 892-4 aus Kies und Sand mit mehr als 10% Feinkorn. Nach der Definition nach DIN 18 196 handelt es sich um Sand und Kies mit einem Anteil von 5 bis 40% Ton und Schluff. Je nach Anteil der einzelnen Kornfraktionen ist das

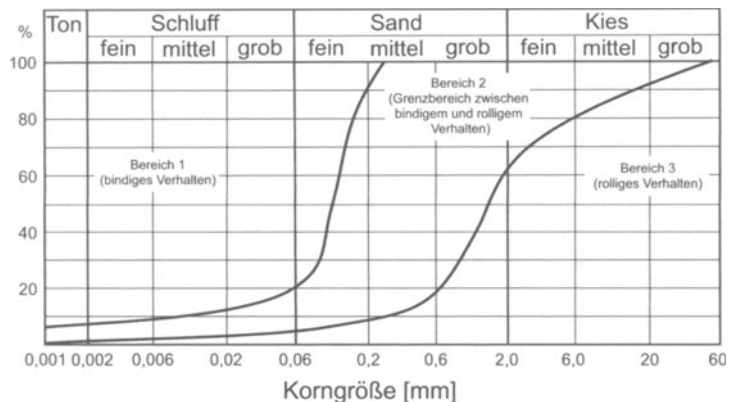


Abb. 2.3 Bereichsgrenzen für rolliges und bindiges Verhalten.

Tabelle 2.1 Zusammenstellung der Korngrößengrenzen der reinen Bodenarten mit Vergleichsgrößen.

Steine (Gerölle)		über 63 mm	
Kies	grob	20 bis 63 mm	
	mittel	6,3 bis 20 mm	
	fein	2 bis 6,3 mm	über Streichholzkopfgröße
Sand	grob	0,6 bis 2 mm	über Grobgrießgröße
	mittel	0,2 bis 0,6 mm	Grießgröße
	fein	0,063 bis 0,2 mm	Einzelkörner noch erkennbar
Schluff	grob	0,02 bis 0,063 mm	Einzelkörner mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar
	mittel	0,006 bis 0,002 mm	
	fein	0,002 bis 0,006 mm	
Ton		unter 0,002 mm	

bautechnische Verhalten solcher Mischböden vorwiegend rollig oder bindig (Abschn. 2.7.4). Bereits ein Anteil von nur 5 bis 10 % Ton- und Feinschluff gibt einem Boden leicht bindige Eigenschaften, wie z. B. eine merkbare Wasserempfindlichkeit bei Verdichtungsarbeiten (s. Abschn. 12.2.1). Ab 15 bis 20 % Ton und Schluff zeigen Böden deutlich bindiges Verhalten (Abb. 2.3). Ab diesem Grenzwert besteht in der Regel kein Korn-auf-Korn-Stützgerüst der Grobfraction mehr, was sich auf die Eigenschaften des

Bodens mehr oder weniger deutlich auswirkt. Die DIN 1054 zieht diese Grenze bei > 15 % Feinkornanteil < 0,063 mm. Die Einstufung gemischtkörniger Böden erfolgt gemäß DIN 18 196 nach den Massenanteilen im Grobkornbereich (> 40 % über 2 mm) und einem entsprechenden Feinkornanteil < 0,063 mm von 5–15 % bzw. 15–40 % (s. Tab. 3.1).

Gemischtkörnige Böden sind weit verbreitet. Typische Mischböden sind Verwitterungs- bzw. Solifluktuations- oder Hangschuttbildungen der ver-

Tabelle 2.2 Einteilung des Buntsandstein-Hangschuttes nach ingenieurgeologischen Gesichtspunkten.

Ausgangsgestein	Stratigraphische Einheit	Einteilung des Buntsandstein-Hangschuttes
Sandstein, einzelne Tonsteinlagen (Tst < 10 %)	Teile der Solling-Folge (S), des Hardegseiner Sandsteins (H,s), des Dethfurter Sandsteins (D,s) und des Volpriehausener Sandsteins (V,s)	sandig-kiesiger Mischboden bzw. Hangschutt (Ton- und Schluffanteil < 8 %)
sandsteinreiche Wechselfolge (Tst < 30 %)	Teile der S-Folge, der Basissandsteine und der Wechselfolgen (insbesondere H,st; D,st)	schwach oder stark tonig-schluffiger, gemischtkörniger Sand- bzw. Kiesboden mit Steinen bzw. schwach oder stark tonig-schluffiger, sandig-kiesiger Hangschutt mit Steinen (Ton- und Schluffanteil 8–20 % oder 20–40 %)
tonsteinreiche Wechselfolge (Tst > 30 %)	Teile der Wechselfolgen, insbesondere H,st; D,st; V,st; Bernburg-Folge (suBE)	
Tonstein, wenig Sandsteinlagen	Dethfurt-Ton (D,t), Röt-Folge (Rö)	bindige (feinkörnige) Mischböden bzw. tonig-schluffig-sandiger Hangschutt mit Ton- und Sandsteinbröckchen (Ton- und Schluffanteil > 40 %)

2

schiedenen geologischen Formationen, wie sie in Tab. 2.2 für die Buntsandsteinfolgen beispielhaft zusammengestellt sind, sowie vor allen Dingen viele Geschiebemergel und Geschiebelehme.

Dünnschichtige, mehrfache Wechsel verschiedenartiger Bodenarten, die aus praktischen Gründen zusammengefasst werden müssen, werden nach EN ISO 14688-1 als Wechsellagerungen von Mischböden bezeichnet. Für Böden vulkanischer Entstehung enthält diese Norm eine eigene Einteilung (Tuff, vulkanischer Sand, Schlacke, Bims, Lapilli, Bomben).

2.1.5 Körnungen als Handelsbegriff

Die Lieferkörnungen des Baustoffhandels sind in der Regel auf die Technischen Lieferbedingungen

für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04) abgestimmt, die für ungebrochene Mineralstoffe mit DIN EN 12620, Zuschlag für Beton, übereinstimmen. Folgende natürlichen Mineralstoffe werden unterschieden (s. a. Tab. 2.3):

- ungebrochene Mineralstoffe (Naturesand und Kies)
- gebrochene Mineralstoffe (Brechsand, Splitt und Schotter).

Weiterhin werden unterschieden:

- Lieferkörnungen nach einzelnen Korngruppen bzw. Korngemische aus zwei oder mehreren benachbarten Korngruppen
- Grubensand bzw. -kies oder Flusssand bzw. -kies (Material, wie es bei der Gewinnung anfällt; nicht in TL Gestein-StB enthalten)
- Recycling-Baustoffe aus Bauschutt und Betonbruch (sog. RC-Baustoffe).

Tabelle 2.3 Korngruppen nach TL Gestein-StB (2004) sowie von Recyclingmaterial. Die Zahlen geben die Korngrößen in mm an.

Naturesand, Kies		Schotter, Splitt, Brechsand		Edelsplitt, Edelbrechsand, Füller		Recycling-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte	
Naturesand	0/2	Splitt	5/11	Füller	0/0,09	Frostschutzmaterial	0/16 0/32
Kies	2/4	Splitt	11/22	Edelbrechsand	0/2		
Kies	4/8	Splitt	22/32	Edelsplitt	2/5	Schottermaterial	32/Überkorn
Kies	8/16	Schotter	32/45	Edelsplitt	5/8	Hochfenschlacke	0/300
Kies	16/32	Schotter	45/56	Edelsplitt	8/11	Schlackengranulat	2/20
Kies	32/63	Brechsand-Splitt-Gemisch	0/5	Edelsplitt	11/16	Flugasche	0/1
		Gemisch	0/32	Edelsplitt	16/22	Müllverbrennungssasche	0/120
		Gemisch	0/56				
		Schotter-Gemisch	32/56				

Der Anteil $<0,063$ darf bei Kies bzw. Splitt je nach Korngruppe 1 bis 3 % nicht überschreiten. Recycling-Baustoffe und andere industrielle Nebenprodukte sind ebenfalls in entsprechenden Regelwerken des Straßenbaus erfasst (s. Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau – MRC, 2002).

Die gebräuchlichen Lieferprogramme für Kies und Sand sind:

Filterkies für Dränmaßnahmen

0–8	2–8	8–16
0–16	2–16	8–32
0–32	2–32	16–32

Frostschutzmaterial gemäß der ZTVE/StB 09 geprüft nach RG Min-StB 93

0–32
0–45

Material für Planumsschutzschichten gemäß Rahmenvertrag mit der Deutschen Bahn

0–32
0–56

Die im Abfallrecht (s. Abschn. 16.6.1) festgeschriebenen Ziele einer umweltschonenden Wiederverwertung von **Recyclingmaterial** aus Baureststoffen und industriellen Nebenprodukten setzen gemäß MRC-02 voraus den

- Nachweis bautechnischer Eignung und den
- Nachweis wasserwirtschaftlicher Verträglichkeit.

Für die Körnung von **Gleisschotter** der Deutschen Bahn AG gelten deren Technische Lieferbedingungen für Gleisschotter und DIN EN 13 450. Die Körnungen von Gleisschotter werden mit Quadratlochsieben ermittelt. Die Lieferkörnung ist 22,4–63 mm. Bei der Aufbereitung von Altschotter fallen die Fraktionen aufbereiteter Altschotter (22,4–63 mm) und Siebrückstände ($<22,4$ mm) an, die im Regelfall etwa 25 % betragen (s. d. Richtlinie 880. 4010 „Verwertung von Altschotter“ von 2003). Altschotter kann außer der stofflichen Verschmutzung auch chemische Belastungen aufweisen (s. Abschn. 16.6.3).

2.1.6 Hydraulische Instabilität und Filter für Dränmaßnahmen

2

Unter dem Begriff hydraulische Instabilität werden die Vorgänge der Suffosion, Erosion und Kolmation zusammengefasst (s. PERZLMAIER & HASELSTEINER 2006). Dabei geraten bei Durchsickerung Bodenpartikel in Bewegung oder werden durch das fließende Wasser mitgerissen und abtransportiert (s. Abschn. 18.2.4). Diese Wechselwirkung des Systems Boden – Wasser kann in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Korntransport im Innern eines durchströmten Bodens infolge Sickerwasser- bzw. Porenwasserströmung, wofür die Begriffe Suffosion sowie innere Erosion, Kontakterosion und auch Fugenerosion verwendet werden
- Anströmung der Bodenoberfläche, was dem Phänomen der äußeren Erosion und der Kolkbildung entspricht.

Bei der **Suffosion** werden aus einem Erdstoff durch Wasserbewegung selektiv Feinteile erodiert, ohne die Matrix aus größeren Körnern zu stören. Der Vorgang führt zu einer Vergrößerung der Porenraums und der Durchlässigkeit. Die Suffosion wird unterteilt in innere, äußere und Kontaktsuffosion (Abb. 2.4). Bei fortschreitender Suffosion können nach einer gewissen Reaktionszeit Sackungen unterschiedlichen Ausmaßes eintreten.

Eine **Erosion** beginnt meist rückschreitend, wobei der Partikeltransport beim Austritt der Durchsickerung an einer freien Oberfläche beginnt. Als besonders erosionsanfällig gelten locker gelagerte, gleichkörnige Fein- und Mittelsande und Sand-Schluff-Gemische (SU) mit einer Plastizitätszahl $I_p = <7$. Bei schwach bindigen, sandigen Schluffen (z. B. Löss, s. Abschn. 19.2.4) sowie in schluffigen Sanden mit einem Feinkornanteil $>15\%$ kommt es zu einer Umstrukturierung des Bodens oder zur Ausbildung von z. T. stabilen Erosionskanälen. Diese bilden sich besonders in kleinräumig wechselnden Sedimentabfolgen mit nur dünnen Lagen erhöhter Durchlässigkeit, z. T. auch an Klufflächen. Bei nicht über längere Zeit standfesten Erosionskanälen kann es, ggf. zeitlich versetzt, zu kleinen Setzungstrichtern oder flachen Setzungsmulden kommen.

2

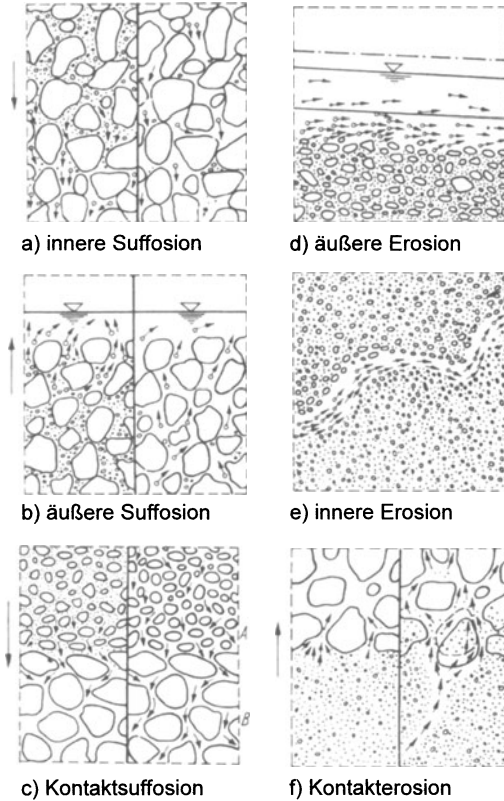


Abb. 2.4 Klassifizierung der Suffosions- und Erosionsvorgänge in einem Lockergestein.

Unter **Kolmation** versteht man die Umlagerung von Feinkorn innerhalb des Porenvolumens, wobei es zu einer Verringerung des Porenvolumens bis zur Selbstabdichtung kommen und sich ein Filterkuchen aufbauen kann.

Für die **Erosions- und Suffosionsanfälligkeit** müssen in der Regel drei Kriterien erfüllt sein:

- die Körner der feinen Fraktion müssen klein genug sein, um durch die Porenengstellen der größeren Fraktion zu passen
- der Anteil der feinen Fraktion muss so gering sein (< 30–40 %), dass die Zwischenräume der größeren Fraktion nicht ausgefüllt werden
- die Filtergeschwindigkeit muss groß genug sein, um die Feinanteile in der größeren Fraktion zu bewegen.

Bindige Böden gelten allgemein als erosions- und suffosionssicher, wenn sie eine ausreichende Plastizität ($I_p > 15$) und Kohäsion ($c_u < 15 \text{ kN/m}^2$)

haben und keine konzentrierte hydraulische Belastung (z. B. an einer Leckage) vorliegt. Als anfällig gelten in der Regel gleichkörnige grobschluffig-feinsandige Böden und weit gestufte Böden mit aufwärtskonkaver Körnungslinie sowie intermittierend gestufte Böden mit Ausfallkörnung und hohem Feinkornanteil. Dementsprechend gelten Schluffe und Fein- bis Mittelsande mit mehr als 10–15 % Schluffanteil und einer Ungleichkörnigkeit $C_u \leq 15$ als filtertechnische Problemböden (Abb. 2.5).

Ob Erosion einsetzt oder fortschreitet hängt in erster Linie davon ab, ob die Austrittsstelle des Sickerwassers durch ein angepasstes Filter geschützt ist oder nicht. Für den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulische Instabilität, allgemein als **Filterstabilität** bezeichnet, kommen geometrische und hydraulische Kriterien zur Anwendung. Gegen die Möglichkeit des Eindringens des Basiserdstoffs in den Filter werden allgemein geometrische Kriterien herangezogen. Als hydraulische Kriterien bezeichnet man die Tatsache, dass ein Partikeltransport erst stattfinden kann, wenn die Schleppkraft der Sickerströmung ausreichend groß ist. Der dafür nötige kritische hydraulische Gradient wird maßgeblich durch den Korndurchmesser und die Ungleichkörnigkeit beeinflusst (s. Abschn. 18.2.4).

Der Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegenüber Erosion ist erfüllt wenn

$$i_{\text{vorh}} \leq i_d \quad \text{mit } i_d = i_{\text{krit,k}} / (\gamma_i \cdot \gamma_s)$$

i_d = Bemessungswert des hydraulischen Gradienten

$i_{\text{krit,k}}$ = charakteristischer Wert des hydraulischen Gradienten

γ_i = Teilsicherheitsbeiwert

γ_s = Teilsicherheitsbeiwert, der die Untergrundsichtung berücksichtigt.

Die üblichen **Filterregeln** basieren im Wesentlichen auf geometrischen Kriterien. Sie sind entweder theoretisch von Kugelmodellen abgeleitet oder empirisch mittels hydraulischer Filterversuche ermittelt und haben deshalb begrenzte Gültigkeit. Die theoretischen Grundlagen sind bei WITTMANN (1980) ausführlich behandelt.

Für die in der Praxis am häufigsten angewandte Filterregel von TERZAGHI ist Voraussetzung, dass das Filtermaterial gleichkörnig gestuft ($C_u < 2$) und der Verlauf der Körnungslinie der des abzufilternden Bodens ähnlich ist. Damit ist

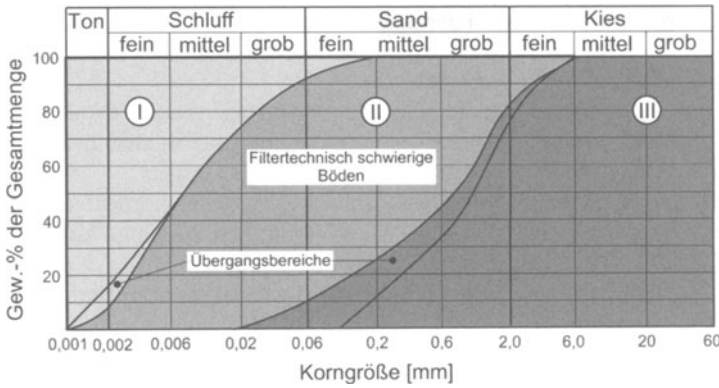


Abb. 2.5 Filtertechnisch schwierige Böden (aus SN 670 125a).

ihre Gültigkeit streng genommen auf steil verlaufende Körnungslinien beschränkt.

Filterregel nach TERZAGHI:

$$D_{15}/d_{85} < 4 < D_{15}/d_{15}$$

wobei

$D_{15}/d_{85} < 4$ die Regel zur Sicherheit gegenüber Erosion und

$D_{15}/d_{15} > 4$ die Durchlässigkeitsregel

bedeuten und D_{15} sich auf das Filtermaterial und d_{15} und d_{85} sich auf das Material des abzufilternden Bodens beziehen.

Eine gewisse Berücksichtigung der Ungleichkörnigkeit gegenüber dem Filtermaterial erfolgt bei der in der Praxis gebräuchlichen sog. erweiterten Filterregel von TERZAGHI (Abb. 2.6):

$$D_{15}/d_{85} \leq 4, D_{15}/d_{15} \geq 4, D_{50}/d_{50} \approx 10.$$

Viele Filterregeln, z. B. des US Bureau of Reclamation (USBR 1960), gehen allein vom Abstand der Körnungslinie des abzufilternden Basiserdstoffes und des Filtermaterials vom Durchmesser Verhältnis D_{50}/d_{50} aus, ebenfalls ohne direkte Berücksichtigung der Ungleichkörnigkeit:

Für gleichkörnige Feinsande gilt

$$D_{50}/d_{50} = 5 \text{ bis } 10$$

für ungleichkörnigen Feinsand bis Schluff

$$D_{50}/d_{50} = 12 \text{ bis } 58$$

$$D_{15}/d_{15} = 12 \text{ bis } 40.$$

Weitere Filterregeln enthält das Filtermerkblatt der BAW „Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Wasserstraßen“ (MSD, 2005). Eine Zusammenstellung verschiedener anderer Filterkriterien bringen FLOSS (2006) und PERTLMAIER & HASELSTEINER (2006).

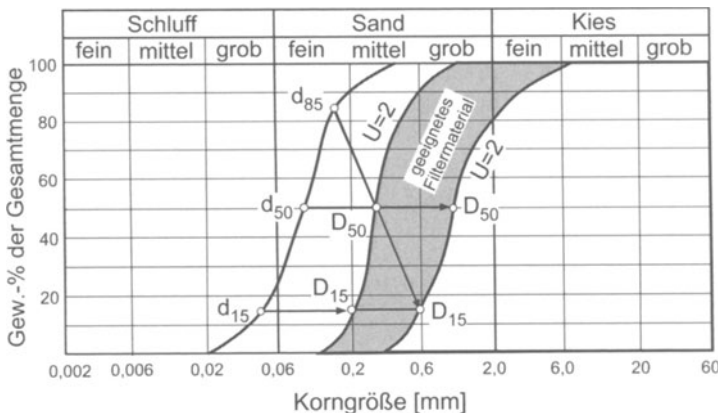


Abb. 2.6 Anwendung der sog. erweiterten Filterregel von TERZAGHI.

2

Als **Filtermaterial** werden Sand, Kies, Splitt und Schotter verwendet. Dabei soll der Anteil des Kornes $< 0,08$ mm (mittlerer Feinsandbereich) 5 % nicht überschreiten (DIN 19700). Dies ist bei nass gebaggertem Material praktisch immer gewährleistet, bei dem Kornanteile $< 0,1$ mm fast nicht vertreten sind (s. Abb. 2.2). Beim Einbau gemischtkörnigen Filtermaterials ist seine Neigung zur Entmischung zu beachten (s. SAUKE et al. 1999). Häufige Lieferkörnungen sind Kiessand 0/32 bzw. Brechsand-Splitt-Schotter-Gemische 0/32, 0/56. Bei Einbau von Filtervliesen (s. Abschn. 12.3.3) wird gerne Filterkies 16/32 verwendet. Die Kornfestigkeit der Filtermaterialien wird durch Kornzertrümmerungsversuche nach DIN 52 115, Teil 1 und Teil 2 ermittelt.

Die Kornverteilungen der Lieferkörnungen für Filtermaterial (0/32, 0/2, 0/4, 2/8 usw.) sind im Einzelfall auf ihre Eignung zu überprüfen. Falls sie nicht den Anforderungen der Filterregeln entsprechen, kann die geeignete Kornverteilung aus einzelnen Lieferkörnungen zusammengesetzt werden (z. B. 25 % 0/4 und 75 % 2/8).

Die Filterstabilität des Systems Boden – Wasser wird zunehmend durch **geotextile Filter** erreicht. Diese müssen so beschaffen sein, dass sie sowohl mechanisch filterwirksam sind (Bodenrückhaltevermögen) und gleichzeitig eine ausreichende hydraulische Filterwirksamkeit (druckverlustarme Wasserführung) aufweisen. Geotextile Filter haben den Vorteil einer geringen Dicke und können bei richtiger Dimensionierung ihre Funktion auch bei filtertechnischen Problemböden erfüllen. Für geotextile Filter gelten eigene Filterregeln, die u. a. bei HEIBAUM (2007, darin. Lit.) sowie bei SCHLÖTZER & STEINKE (2008) beschrieben sind. Die filtertechnische Bemessung geht dabei von der charakteristischen Öffnungsweite O_{90} des Geotextils aus. Diese entspricht dem Durchmesser d_{90} der Kornfraktion eines Prüfbodens, von dem 90-Massen-% zurückgehalten werden. Ausreichendes Bodenrückhaltevermögen gilt als gewährleistet, wenn für feinkörnige Böden ($d_{40} \leq 0,06$ mm)

$$O_{90, \text{zül}} \leq 10 \cdot d_{50}$$

und für grobkörnige Böden ($d_{40} \geq 0,06$ mm)

$$O_{90, \text{zül}} < 5 \cdot d_{10} \cdot \sqrt{c_u} \quad \text{bzw.} \quad < d_{90}$$

ist (kleinerer Wert maßgebend).

Bei der Anwendung dieser Filterregeln wird zwischen drei hydraulischen Sicherheitsfällen unterschieden:

- Sicherheitsfall I = geringe einseitige Anströmung bei kleinem hydraulischen Gefälle,
- Sicherheitsfall II = geringe wechselseitige bzw. mittlere einseitige Anströmung,
- Sicherheitsfall III = einseitig konzentrierte oder wechselseitig flächige Anströmung und hohem Wasseranfall.

Nach SCHLÖTZER & STEINKE (2008) gelten für den Sicherheitsfall I allgemein

$$0,06 \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,20 \text{ mm}$$

und für den Sicherheitsfall II in Abhängigkeit von der Bodenart folgende Grenzen für O_{90} des Filters:

- kohäsive (bindige) Böden: $0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,20 \text{ mm}$
- Grobschluff bis Feindand: $0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,11 \text{ mm}$
- Feinsand: $0,06 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,13 \text{ mm}$
- Mittelsand: $0,08 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,30 \text{ mm}$
- Grobsand: $0,12 \text{ mm} \leq \text{gew. } O_{90} \leq 0,60 \text{ mm}$.

Dabei wird ausreichende Erosions- und Suffosionssicherheit des abzufilternden Bodens vorausgesetzt. Außerdem muss sichergestellt sein, dass der geotextile Filter langfristig die gleiche Durchlässigkeit aufweist wie der abzufilternde Boden, mindestens aber $k = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Für filtertechnisch schwierige Böden (hydraulischer Sicherheitsfall III) ist ein gesonderter Nachweis zu führen (s. SCHLÖTZER & STEINKE 2008).

Heibaum (2007) bringt ähnliche Anwendungskriterien für geotextile Filter. Für die filtertechnische Bemessung im Wasserbau liegt ein Merkblatt „Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG 1993)“ vor.