

**Kempfert
Lüking**

**GEOTECHNIK nach Eurocode
Band 1: Bodenmechanik**

**Grundlagen
Nachweise
Berechnungsbeispiele**

5. Auflage

**Bauwerk BBB
Beuth**

**GEOTECHNIK nach Eurocode
Band 1: Bodenmechanik**

Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert
Prof. Dr.-Ing. Jan Lüking

GEOTECHNIK nach Eurocode

Band 1: Bodenmechanik

Grundlagen
Nachweise
Berechnungsbeispiele

5., vollständig
überarbeitete Auflage

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Bauwerk

© 2020 Beuth Verlag GmbH

Berlin · Wien · Zürich

Saatwinkler Damm 42/43

13627 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck und Bindung:

Druckerei Plump, Rheinbreitbach

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706.

ISBN 978-3-410-28835-0

Vorwort

Die Geotechnik umfasst im Wesentlichen die Arbeitsgebiete Bodenmechanik, Felsmechanik, Ingenieurgeologie, Erd- und Grundbau, Felsbau, Bauen mit Geokunststoffen, Altlasten, Deponiebau und neuerdings auch weitere Gebiete im umweltgeotechnischen Bereich wie Rückbau, Geothermie usw. Diese Fachgebiete haben im Bauingenieurwesen in den letzten Jahrzehnten laufend an Umfang und Bedeutung gewonnen. Die Lehrinhalte der Geotechnik sind dabei keine reinen Rechenfächer. Grundlagen für ein erfolgreiches Arbeiten auf dem Gebiet sind die sicheren Kenntnisse der theoretischen, experimentellen und praktischen Zusammenhänge sowie deren Anwendung in der Baupraxis.

„Geotechnik nach Eurocode“ in 2 Bänden fasst die Grundlagen von Bodenmechanik und Grundbau (Geotechnik) in kompakter, aber möglichst umfassender Form zusammen. Der theoretische Stoff ist ergänzt durch umfangreiche Sammlungen von Beispielen und Übungen auf der Grundlage der europäischen und nationalen Normung DIN EN 1997-1, DIN EN 1997-1/NA, DIN 1054 und DIN EN 1997-2, DIN 4020, DIN EN 1997-2/NA zusammengefasst in den Normen-Handbüchern Eurocode 7, Band 1 und Band 2.

Die Bände „Geotechnik nach Eurocode“ sind für Studierende der Bachelor- und Masterstudiengänge an Universitäten und Fachhochschulen als Begleitmaterial gedacht. Weiterhin sollen sie als Nachschlagewerk für den in der beruflichen Praxis stehenden Ingenieur dienen.

Wir danken unseren jetzigen und ehemaligen Mitarbeitern und Kollegen für Anregungen und Zuarbeit von inhaltlichen Teilen, die im Wesentlichen als Lehrunterlagen an der Universität Kassel und der Technischen Hochschule Lübeck entstanden sind. Besonders danken wir Herrn Dr.-Ing. Marc Raithel, der mit dem Erstautor die 1. bis 4. Auflage erstellt hat. Dem Verlag danken wir für die jahrelange gute Zusammenarbeit.

Über Hinweise und Anregungen zur Weiterentwicklung der Buchreihe per Mail würden wir uns freuen.

Hamburg, Lübeck, April 2020

Hans-Georg Kempfert
Jan Lükling

Autorenadressen

Univ.-Prof.(em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert
ehemals Universität Kassel · Institut für Geotechnik und Geohydraulik
privat:
Potosistraße 27
D-22587 Hamburg
kempfert@t-online.de

Prof. Dr.-Ing. Jan Lüking
Technische Hochschule Lübeck · Fachbereich Bauwesen · Fachgebiet Geotechnik
Mönkhofer Weg 239
D-23562 Lübeck
jan.lueking@th-luebeck.de

Inhaltsverzeichnis Band 1

1	Einführung	12
1.1	Entwicklung und Einordnung	12
1.2	Sachverständiger für Geotechnik	13
1.3	Geotechnische Berichte	16
1.4	Baugrundrisiko und Verpflichtung des Auftraggebers	16
1.5	Geotechnische Gesellschaften	18
2	Grundlagen zur Geologie und Struktur von Boden und Fels	19
2.1	Aufbau des Erdkörpers und geologische Einordnung	19
2.2	Gesteinsbildung	20
2.3	Regionalgeologie in Deutschland	24
2.4	Zusammensetzung und Struktur von Böden	25
2.5	Struktur und Gefüge von Gesteinen und Gebirge	29
3	Wasser im Untergrund	31
3.1	Physikalische Eigenschaften des Wassers	31
3.2	Erscheinungsformen des Wassers im Untergrund	32
3.3	Grundlagen der Wasserströmung im Untergrund	34
3.3.1	Grundgleichungen	34
3.3.2	Hydraulischer Gradient und Strömungskraft	35
3.3.3	Filtergeschwindigkeiten und <i>Darcy'sches</i> Filtergesetz	35
3.4	Erweiterung auf geschichtete Böden	37
3.4.1	Begriffe	37
3.4.2	Vertikale Strömung	38
3.4.3	Horizontale Strömung	38
3.4.4	Variationsmöglichkeiten der Untergrunddurchlässigkeiten	39
3.5	Potenzialtheorie	39
3.6	Näherungslösung der Potenzialtheorie mit Strömungsnetzen	42
3.7	Wassermengenbestimmung aus dem Potenzialnetz	44
3.8	Strom- und Potenziellinien bei Baugrundsichtung	44
4	Untersuchungen von Boden und Fels als Baugrund und Baustoff (Baugrunderkundung)	48
4.1	Normen und rechtliche Einordnung der Baugrunderkundung	48
4.2	Begriffe	50
4.3	Klassifizierung und Einordnung der Bodenarten	51
4.3.1	Allgemeines	51

4.3.2	Klassifizierung nach DIN EN ISO 14688 und DIN 4022	52
4.3.3	Klassifizierung nach DIN 18196	56
4.3.4	Klassifizierung nach VOB-Normen	61
4.3.5	Klassifizierung nach <i>Handbuch Eurocode 7-1 (2015)</i>	62
4.4	Zeichnerische Darstellung der Baugrunderkundungsergebnisse	63
4.5	Beschreibung der wichtigsten Bodenarten	63
4.6	Geotechnische Erkundungen und Untersuchungen für bautechnische Zwecke nach <i>Handbuch EC 7-2 (2011)</i>	65
4.6.1	Allgemeines	65
4.6.2	Aufgabenstellung bei geotechnischen Untersuchungen	66
4.6.3	Art und Umfang der geotechnischen Untersuchungen	67
4.7	Baugrunderkundung durch Bohrungen und Schürfe	69
4.7.1	Allgemeines	69
4.7.2	Schürfgruben und Schürfschlitze	71
4.7.3	Bohrungen	71
4.8	Geophysikalische Erkundungsmethoden	72
4.9	Baugrunderkundung durch Sondierungen	74
4.9.1	Sondiervverfahren und Ergebnisinterpretation	74
4.9.2	Rammsondierungen	76
4.9.3	Drucksondierungen	79
4.9.4	Flügelsondierungen	80
4.10	Beispiel der Darstellung einer Baugrunduntersuchung	81
5	Einführung in das geotechnische Feld- und Laborversuchswesen	83
5.1	Allgemeines	83
5.2	Bodenproben für Laborversuche	83
5.3	Durchführen und Auswerten von Laborversuchen	84
5.4	Versuche zur Klassifizierung und Einordnung der Böden	84
5.4.1	Korngrößenverteilung	84
5.4.2	Korndichte	86
5.4.3	Organische Anteile	86
5.4.4	Kalkgehalt	87
5.5	Versuche zur Zustandsbeschreibung von Böden	87
5.5.1	Dichte	87
5.5.2	Porenanteil und Porenziffer	88
5.5.3	Wassergehalt	88
5.5.4	Lagerungsdichte	88
5.5.5	Bestimmung der Zustandsgrenzen bindiger Böden	89
5.5.6	Sättigungsgrad	91
5.6	Rechnerische Beziehungen zwischen Bodenkenngrößen	91
5.7	Geohydraulische Eigenschaften von Böden	91
5.8	Bodenmechanische Kenngrößen zur Festigkeit und Verformung	94
5.9	Konventionelle erdbautechnische Prüfverfahren	94
5.9.1	Allgemeines	94
5.9.2	Proctorversuch	95
5.9.3	Bestimmung der Trockendichte des Bodens im Feld	96
5.9.4	Verdichtungsgrad D_{Pr}	97

5.9.5	Plattendruckversuch	97
6	Spannungszustände in der Bodenmechanik	100
6.1	Allgemeines	100
6.2	Definition von totalen, effektiven und Porenwasserdruckspannungen	100
6.3	Ruhedruckspannungen im elastisch-isotropen Halbraum – Primärspannungen	102
7	Elastizitätstheorie und Grenzzustände im Boden	106
7.1	Elastizitätstheorie	106
7.2	<i>Mohr</i> 'sche Darstellung der Spannungen	109
7.3	Grenzzustände (Bruchzustände)	113
7.4	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit	115
8	Zusatzspannungen und Setzungsberechnungen	116
8.1	Modellvorstellungen	116
8.2	Ermittlung von Zusatzspannungen aus Bauwerkslasten	116
8.3	Verfahren zur Setzungsberechnung	122
8.3.1	Grundlagen	122
8.3.2	Setzungsermittlung mithilfe vertikaler Spannungen im Boden	127
8.3.3	Setzungen und Verkantungen mithilfe von geschlossenen Formeln	129
9	Verformungs- und Scherfestigkeitsverhalten	133
9.1	Verformungsverhalten von Böden	133
9.1.1	Kenngrößen	133
9.1.2	Eindimensionaler Kompressionsversuch (KD-Versuch)	134
9.2	Festigkeitsverhalten von Böden (Scherfestigkeit)	138
9.2.1	Grundlagen und Begriffe	138
9.2.2	Bedeutung von totalen, effektiven und Porenwasserdruckspannungen für die Scherfestigkeit	141
9.2.3	Laborversuche zur Ermittlung der Scherparameter	143
10	Konsolidationstheorie	150
10.1	Einleitung	150
10.2	Größe des Porenwasserüberdrucks bei Spannungsänderung	151
10.3	Eindimensionale Konsolidationstheorie	152
10.3.1	Allgemeines	152
10.3.2	Herleitung der Differenzialgleichung für die eindimensionale Konsolidation nach <i>Terzaghi</i>	152
10.3.3	Lösung der Differenzialgleichung der eindimensionalen Konsolidationstheorie	155
10.3.4	Zeitabhängige Belastung	157
10.4	Mehrdimensionale Konsolidationstheorie	158
10.5	Konsolidationsbeschleunigung durch Vertikaldränagen	159
10.5.1	Wirkungsweise	159
10.5.2	Arten und Einbau von Vertikaldränagen	159
10.5.3	Berechnung des Konsolidationsvorgangs bei Vertikaldränagen	160
10.6	Sekundärkonsolidation	164
10.7	Bestimmung des Zeit-Setzungsverhaltens im Laborversuch	166

11 Bodenkenngrößen aus Erfahrungswerten und Korrelationen	168
11.1 Erfahrungswerte für Bodenkenngrößen	168
11.1.1 Allgemeines	168
11.1.2 Erfahrungswerte für Bodenkenngrößen aus <i>EAU (2012)</i>	168
11.1.3 Erfahrungswerte für Bodenkenngrößen aus <i>EAB (2012)</i>	171
11.2 Korrelationen zwischen Bodenkenngrößen	176
11.3 Ableitung von Bodenkenngrößen aus Sondierungen	176
12 Erd- und Wasserdruck	180
12.1 Einführung	180
12.2 Begriffe und Bezeichnungen	181
12.3 Erddrucktheorie nach <i>Coulomb</i> mit ebenen Gleitflächen	183
12.3.1 Annahmen	183
12.3.2 Aktiver Erddruck	184
12.3.3 Passiver Erddruck	185
12.4 Aktiver und passiver Grenzzustand im Halbraum – Flächenbruch- bzw. Zonenbruchtheorie nach <i>Rankine</i>	186
12.5 Bewertung der Theorien von <i>Coulomb</i> und <i>Rankine</i>	190
12.6 Praktische Erddruckberechnung	190
12.6.1 Allgemeines	190
12.6.2 Ansatz des Erddruckneigungswinkels	190
12.6.3 Erddruck infolge Bodeneigengewicht mit ebenen Gleitflächen	192
12.6.4 Erddruck infolge Kohäsion	193
12.6.5 Passiver Erddruck mit gekrümmten Gleitflächen	194
12.6.6 Mindesterdruddruck	196
12.6.7 Erdruhedruck	197
12.6.8 Erddruck infolge Nutzlasten auf der Geländeoberfläche	198
12.6.9 Erddruck bei geschichtetem Boden	200
12.6.10 Erddruck bei gebrochener Geländelinie bzw. geknickter Wand	201
12.7 Erddruck bei wassergesättigten, bindigen Böden	201
12.8 Verdichtungserddruck	202
12.9 Räumlicher Erddruck	202
12.10 Hydrostatischer Wasserdruck	203
12.11 Berücksichtigung der Wasserströmung	203
12.12 Maßgebliche Wasserspiegelhöhen	204
13 Sicherheitsnachweise in der Geotechnik nach Eurocode EC 7-1 / DIN 1054:2010-12	205
13.1 Stand der nationalen und europäischen Normen	205
13.1.1 Allgemeines	205
13.1.2 Geotechnische Normen zur Berechnung und Bemessung	206
13.1.3 Normenhandbuch EC 7-1	207
13.1.4 Europäische Ausführungsnormen für geotechnische und Spezialtiefbauverfahren	208
13.2 Berechnungsmodelle	209
13.3 Grundidee zum Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten	209
13.4 Anwendungshinweise und Grundgleichungen	211
13.5 Bemessungswerte von Einwirkungen mit Kombinationsbeiwerten	213

13.6	Nachweisverfahren, Grenzzustände und Grenzzustandsbedingungen	215
13.6.1	Grenzzustände in der Geotechnik	215
13.6.2	Grenzzustand der Lagesicherheit	216
13.6.3	Grenzzustand Versagen von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund	217
13.6.4	Grenzzustand der Gesamtstandsicherheit	217
13.7	Besondere Regelungen in der Geotechnik	218
13.7.1	Begriffsfestlegungen für Bauwerke	218
13.7.2	Geotechnische Kategorien	219
13.7.3	Bemessungssituationen bei geotechnischen Bauwerken	219
13.7.4	Berücksichtigung von Wasserdruck	220
13.8	Teilsicherheitsbeiwerte	221
13.9	Berechnungsverfahren und Berechnungsabläufe	221
14	Standicherheit von Böschungen und Geländesprüngen	226
14.1	Begriffe und Definitionen	226
14.2	Bruchkinematik und Berechnungsverfahren	226
14.3	Sicherheitsdefinition und Grenzzustandsbedingung	228
14.4	Bemessungswerte der Einwirkungen und Beanspruchungen	229
14.4.1	Eigengewichte	229
14.4.2	Lasten in oder auf dem Gleitkörper	230
14.4.3	Kräfte von vorgespannten Zuggliedern	230
14.4.4	Wasserdruck	230
14.4.5	Porenwasserüberdruck infolge Konsolidation	232
14.4.6	Sonstige Einwirkungen	232
14.5	Bemessungswerte der Widerstände	232
14.5.1	Scherfestigkeit des Bodens	232
14.5.2	Zugglieder	234
14.5.3	Äußere Kräfte und äußere Momente	236
14.6	Lamellenverfahren nach <i>Krey/Bishop</i> für kreisförmige Gleitflächen	237
14.6.1	Theoretische Grundlagen und Herleitung der Berechnungsformeln	237
14.6.2	Bemessungswerte der Beanspruchungen im Lamellenverfahren	239
14.6.3	Bemessungswerte der Widerstände im Lamellenverfahren	240
14.6.4	Lage der Gleitlinie	241
14.7	Sonderfall	241
14.8	Bestimmung des Böschungswinkels mithilfe von Nomogrammen	242
14.9	Blockgleitverfahren (Stützlinienvverfahren)	242
14.10	Verfahren mit inneren Gleitflächen	244
14.11	Berechnung des Ausnutzungsgrades μ beim Verfahren Blockgleiten und zusammengesetzte Mechanismen	248
15	Baugrundverbesserung und Stabilisierungssäulen	249
15.1	Einleitung	249
15.2	Verfahren ohne Bodenaustausch	250
15.2.1	Oberflächenverdichtung	250
15.2.2	Vorbelastung	251
15.2.3	Konsolidationsbeschleunigung durch Vertikaldränagen	252
15.2.4	Dynamische Intensivverdichtung	252
15.2.5	Weitere Verfahren	254

15.3	Verfahren mit vollem oder teilweise Bodenaustausch	254
15.3.1	Konventioneller Bodenaustausch	254
15.3.2	Kasten-Bodenaustausch Verfahren	255
15.3.3	Spülverfahren	255
15.3.4	Nassbaggerung	256
15.3.5	Bodenverdrängung	256
15.4	Tiefenrüttlung	256
15.4.1	Anwendungsbereiche	256
15.4.2	Rütteldruckverfahren	257
15.4.3	Rüttelstopfverfahren	258
15.4.4	Berechnung und Bemessung von Rüttelstopfsäulen	259
15.5	Geokunststoffummantelte Säulen	264
15.5.1	Verfahrensbeschreibung	264
15.5.2	Bemessung	264
15.5.3	Allgemeine Erfahrungen aus ausgeführten Projekten	267
15.6	Bindemittelgebundene Stabilisierungssäulen und Tragglieder	267
15.6.1	Tragverhalten und Abgrenzung	267
15.6.2	Vermörtelte Stopfsäulen und Betonrüttelsäulen	268
15.6.3	Kalk-Zement-Säulen	269
15.6.4	CSV-Verfahren	269
15.6.5	Fräs-Misch-Injektions-Verfahren (FMI)	270
15.6.6	Weitere pfahlartige Tragglieder	270
15.7	Geogitterbewehrte Tragschichten	271
15.7.1	Konstruktion	271
15.7.2	Berechnung und Bemessung	272
15.8	Prüfungen	274
16	Numerische Verfahren in der Geotechnik	275
16.1	Allgemeines	275
16.2	Grundlagen der Methode der Finiten-Elemente	275
16.2.1	Eigenschaften finiter Elemente am Beispiel eines Dreieckelements	275
16.2.2	Höherwertige Finite-Elemente-Typen	280
16.2.3	Physikalische Nichtlinearitäten bzw. Stoffgesetze von Böden	281
16.3	Stoffgesetze in Finite-Elemente Software	283
16.4	Berechnungsorganisation bei nichtlinearem Stoffverhalten	285
16.5	Diskontinuität	285
16.6	Berücksichtigung von Primärzuständen	286
16.7	Modellierung	287
16.8	Anwendungsgebiete	288
A	Tabellen, Formeln, Bodenkenngrößen	290
A-1	Abkürzungen und Formelzeichen	290
A-2	Formeln zur Ermittlung der passiven Erddruckbeiwerte nach <i>Pregl/Sokolovski</i> mit gekrümmten Gleitflächen	295
A-3	Räumlicher Erddruck	297
A-3.1	Räumlicher aktiver Erddruck nach DIN 4085	297
A-3.2	Räumlicher passiver Erddruck nach DIN 4085	298
A-4	Erfahrungswerte für Bodenkenngrößen, aus <i>v. Soos/Engel (2017)</i>	301

A-5	Korrelationen zwischen Bodenkenngrößen	303
A-5.1	Durchlässigkeit	303
A-5.2	Optimaler Wassergehalt und Proctordichte	303
A-5.3	Parameter der Zusammendrückbarkeit von Boden	304
A-5.4	Parameter der Scherfestigkeit	306
A-5.5	Weitere Korrelationen	307
A-6	Merkmale und Beispiele zur Einstufung in die Geotechnischen Kategorien – Anhang AA aus <i>Handbuch Eurocode 7-1 (2015)</i>	307
B	Zahlenbeispiele	313
B-3	Wasser im Untergrund	314
B-3.1	Strömungsgeschwindigkeit – Kontinuitätsgleichung	314
B-3.2	Wasserdruckermittlung und hydraulischer Gradient	314
B-3.3	Berechnung der effektiven Wichte infolge Strömung	315
B-3.4	Strom- und Potenziallinien	316
B-3.5	Sickerströmung bei geschichtetem Untergrund	318
B-4	Untersuchung und Klassifizierung von Boden u. Fels	322
B-4.1	Klassifizierung verschiedener Bodenarten	322
B-5	Einführung in das geotechnische Feld- und Laborversuchswesen	323
B-5.1	Bestimmung von klassifizierenden Kenngrößen	323
B-5.2	Prüfung der Lagerungsdichte eines nichtbindigen Bodens	323
B-5.3	Ermittlung der Konsistenz eines bindigen Bodens	324
B-5.4	Proctordichte und Verdichtungsgrad	325
B-6	Spannungszustände in der Bodenmechanik	327
B-6.1	Wichte und Bodenbestimmung	327
B-6.2	Totale, effektive und neutrale Spannungen	327
B-6.3	Totale, effektive und Porenwasserdruckspannungen	328
B-7	Elastizitätstheorie und Grenzzustände im Boden	329
B-7.1	Dreidimensionaler und eindimensionaler Spannungszustand	329
B-7.2	Spannungen und Verzerrungen in einer Bodenprobe	329
B-7.3	Spannungen und Verzerrungen, räumlich und eben	330
B-7.4	Beanspruchungen einer Bodenprobe, <i>Mohr</i> 'scher Spannungskreis	332
B-7.5	Spannungszustände aus verschiedenen Lastfällen	334
B-8	Berechnung von Zusatzspannungen und Setzungen	338
B-8.1	Horizontalspannungen im elastisch isotropen Halbraum infolge Li- nienlast	338
B-8.2	Zusatzspannungen im Untergrund für unterschiedliche Punkte	339
B-8.3	Setzungen unter einer Gründungsplatte	342
B-8.4	Zeitdauer für das Abklingen von Setzungen	343
B-8.5	Setzungen infolge von mehreren Fundamenten	344
B-8.6	Setzungsberechnung mit geschlossenen Formeln	346
B-8.7	Setzungsberechnung mit geschlossenen Formeln bei geschichtetem Untergrund	347
B-8.8	Setzungen und Fundamentverkantung unter einem Brückenpfeiler	347
B-9	Verformungs- und Scherfestigkeitsverhalten	349
B-9.1	Auswertung eines Kompressionsversuches	349
B-9.2	Spannungsermittlung bei Porenwasserüberdruck	351

B-9.3	Scherparameter aus Rahmenscherversuch	352
B-9.4	Auswertung eines Triaxialversuches	353
B-9.5	Triaxialversuche mit unterschiedlichen Randbedingungen	355
B-10	Konsolidationstheorie	362
B-10.1	Zeitlicher Setzungsverlauf	362
B-10.2	Spannungsverteilung in einer Tonschicht	363
B-10.3	Porenwasserüberdrücke zu unterschiedlichen Zeiten	364
B-10.4	Entwurf und Gründung mit Vertikaldränagen	365
B-12	Erddruck und Wasserdruck	367
B-12.1	Erddruckermittlung bei homogenem Boden	367
B-12.2	Erddruckermittlung bei geschichtetem Boden	369
B-12.3	Aktiver und passiver Erddruck auf eine Gewichtsstützwand	371
B-12.4	Erd- und Wasserdruckbelastung auf eine Spundwand	374
B-14	Standicherheit von Böschungen und Geländesprüngen	376
B-14.1	Lamellenverfahren – Böschungsbruchnachweis	376
B-14.2	Böschungsbruchnachweise unter Berücksichtigung einer Verankerung	379
B-14.3	Böschungsbruchnachweis unter Berücksichtigung einer Verankerung und Wasserdruck	381
B-14.4	Böschungsbruchnachweis mit Nomogramm	381
B-14.5	Böschungsbruchnachweise im Anfangszustand	382
B-14.6	Nachweis der Gesamtstandicherheit mit dem Blockgleitverfahren nach DIN 4084	386
B-14.7	Nachweis der Gesamtstandicherheit mit dem Verfahren Starrkörperbruchmechanismus	390
B-15	Verfahren zur Baugrundverbesserung	393
B-15.1	Rüttelstopfsäulen in einer Weichschicht	393
B-15.2	Geokunststoffummantelte Säulen in einer Weichschicht	394
B-15.3	Geogitterbewehrte Tragschicht über pfahlähnlichen Traggliedern	397
B-16	Numerische Verfahren	401
B-16.1	Berechnung einer tiefen Baugrube mit der FEM	401

Literaturverzeichnis **408**

Stichwortverzeichnis **424**

Inhaltsverzeichnis Band 2

- 17 Flach- und Flächengründungen
- 18 Gewichts- und Winkelstützwände
- 19 Berechnung von Flächengründungen und gebetteten Systemen
- 20 Pfahlgründungen
- 21 Berechnung von Pfahlrosten
- 22 Pfahlgruppen und Kombinierte Pfahl-Plattengründungen
- 23 Konstruktion und Ausführung von Baugruben
- 24 Wasserhaltung und Dränung
- 25 Spundwände
- 26 Schlitzwände
- 27 Verpressanker
- 28 Berechnung von Baugruben
- 29 Unterfangungen und Unterfahrungen

1 Einführung

1.1 Entwicklung und Einordnung

In den vergangenen Jahrzehnten insbesondere des letzten Jahrhunderts hat eine stürmische Entwicklung die theoretischen Grundlagen und praktischen Bauverfahren des klassischen Tiefbaus vorangetrieben. Entsprechend der Fächerbezeichnungen an den Hochschulen setzten sich für diesen Bereich des Bauingenieurwesens zunehmend die Begriffe Bodenmechanik und Grundbau durch. Gleichzeitig nahm die Bedeutung dieser Fächer für die Baupraxis kontinuierlich zu. Auch früher waren gründungstechnische Fragen zu lösen. Diese wurden aber weitgehend durch Beobachtung, Probieren oder Intuition, also rein empirisch, bewältigt.

Erste mathematische Theorien über Bodenbewegungen und Bodenkräfte wurden von dem französischen Physiker und Festungsbaumeister *Coulomb (1736–1806)* abgeleitet. Als die Geburtsstunde der Bodenmechanik und des Grundbaus gilt allgemein das Jahr 1925, in dem *Karl v. Terzaghi (1883–1963)* das Buch „Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage“ veröffentlichte.

Das Ziel geotechnischer Untersuchungen, Berechnungen und Ausführungsverfahren ist, die Bauwerke unter den wirkenden Lasten sicher auf oder im Untergrund zu errichten bzw. mit dem Baustoff Boden qualitätsorientiert und reproduzierbar zu bauen. Dabei muss das Bauwerk ausreichend weit entfernt sein vom Grenzzustand der Tragfähigkeit (Bruch bzw. vollständiges Versagen) und gebrauchstüchtig sein (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit), um es wie vorgesehen nutzen zu können.

Heute findet man als übergeordnete Bezeichnungsweise zunehmend den Begriff „Geotechnik“. Nachfolgend sind die betroffenen Fächer und Bezeichnungen definitionsmäßig voneinander abgegrenzt und eine Einordnung im Gesamtgebilde der geotechnischen Arbeitsgebiete vorgenommen. Dabei wird häufig auch die „Geomechanik“ als die Wissenschaft vom mechanischen Verhalten der Erdkruste definiert und die „Geotechnik“ als die technische oder konstruktive Anwendung des boden- oder felsmechanischen Wissens im Bauwesen. In jedem Fall geht es aber um den Boden bzw. den Fels als Baugrund oder Baustoff im Hinblick auf seine bautechnische oder umweltgerechte Nutzung.

Häufige Fächer- oder Begriffsbezeichnungen sind:

- *Ingenieurgeologie*: Zweig der angewandten Geologie, der sich mit der Untersuchung und Deutung geologischer und hydrogeologischer Verhältnisse für die Technik, vor allem für das Bauwesen, befasst.

- *Boden- und Felsmechanik*: Lehre von den mechanischen Eigenschaften und dem Verhalten des Baugrunds als Locker- oder Festgestein.
- *Grund- und Felsbau*: Lehre von dem Entwurf, der Bemessung, den Bauverfahren und der Ausführung von Bauwerken und Bauwerksteilen, deren Verhalten oder Einfluss auf ihre Umgebung wesentlich von den Eigenschaften des Baugrunds/Untergrunds als Locker- oder Festgestein abhängt.
- *Erdbau*: boden- und felsmechanische sowie entwässerungstechnische Vorgaben, Randbedingungen und Prüfverfahren, die für die gezielte Herstellung von Erdbauwerken – das sind durch Erdarbeiten im Abtrag oder Auftrag hergestellte Bauwerke, z. B. Damm, Einschnitt – notwendig und einzuhalten sind.
- *Tunnel- und Stollenbau*: Entwurf, Berechnung und Herstellung von Hohlraumbauten, z. B. Verkehrstunnel, Wasserstollen, unterhalb der Geländeoberfläche in offener oder geschlossener (bergmännischer) Bauweise.
- *Spezialtiefbau*: Dieser Begriff wird häufig von Baufirmen für die speziellen Herstellungsverfahren im Grundbau, z. B. Ankertechnik, Pfahlherstellung, Wasserhaltung usw., verwendet.
- *Deponiebau*: Neubau und Sanierung von Deponien mit geotechnischen und erdbau-technischen Methoden.
- *Altlastensanierung*: Sicherung und Sanierung von Altlasten im Untergrund mit geotechnischen Verfahren.
- *Geokunststoffe*: Bauen mit Geotextilprodukten u. Ä. in der Geotechnik.

Die Grenzen zwischen den vorstehend aufgelisteten Gebieten sind i. d. R. fließend und eine scharfe Abgrenzung gegeneinander nicht sinnvoll. In der jüngeren Zeit sind Themen aus dem Rückbau und der Geothermie der Umweltgeotechnik zuzuordnen. Des Weiteren hat die Geotechnik für den Verkehrswegebau (Straße, Bahn, Wasser, Flugplätze) eine große Bedeutung.

1.2 Sachverständiger für Geotechnik

In *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)* und *Handbuch Eurocode 7-2 (2011)* werden geotechnische Kategorien GK 1 bis GK 3 definiert und die Aufgaben des „Sachverständigen für Geotechnik“ angesprochen.

Nach *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)* ist der „Sachverständige für Geotechnik“ ein Sonderfachmann oder Fachplaner mit Sachkunde und Erfahrung auf dem Gebiet der Geotechnik. Er ist nach den Bauordnungen der Länder hinzuzuziehen, falls der Entwurfsverfasser nicht selbst über die erforderliche Sachkunde und Erfahrung auf dem Gebiet der Geotechnik verfügt.

Für die GK 1 ist nur im Zweifelsfall ein Sachverständiger für Geotechnik erforderlich. Liegt GK 2 vor, so fertigt der Sachverständige für Geotechnik i. d. R. einen geotechnischen Bericht in Anlehnung an *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)* und *Handbuch Eurocode 7-2*

(2011), siehe auch 1.3 bzgl. der Baugrunduntersuchung (Feld- und Laborversuche) mit Hinweisen zur Bauausführung an.

Bauwerke der GK 3 erfordern einen hohen geotechnischen Untersuchungsaufwand und umfassen insbesondere auch Bauwerke, bei denen die Beobachtungsmethode nach *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)* notwendig wird, sodass der Sachverständige für Geotechnik die Baumaßnahme von der Planung bis zur Fertigstellung begleitet und das Bauwerk auch nachträglich in Form von geotechnischen Messungen und Berechnungen überwacht. Weiterhin sind i. d. R. die Aufgaben des Sachverständigen für Geotechnik, dass dieser für die Einhaltung der Norm zu sorgen hat und insbesondere

- festzustellen hat, ob die allgemeinen Regeln für die geotechnischen Sicherheitshinweise eingehalten werden,
- die Einstufung von Bauwerken in die geotechnischen Kategorien vorzunehmen hat,
- die Angemessenheit und Hinlänglichkeit bei den Nachweisen der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen hat,
- die Notwendigkeit, Angemessenheit und Hinlänglichkeit der Beobachtungsmethode festzustellen hat,
- einen Geotechnischen Bericht über die oben genannten Punkte anfertigt.

Der Sachverständige für Geotechnik und ggf. auch der Fachplaner für Geotechnik ist demnach beratend und gutachterlich bei der Entwurfsplanung, als Verfasser geotechnischer Nachweise, baubegleitend und nötigenfalls auch nach der Fertigstellung des Bauwerks tätig. Unabhängig davon ist es aber zwingend notwendig, dass auch die Bauingenieure anderer fachlicher Ausrichtung solide Grundkenntnisse in Bodenmechanik und Grundbau besitzen, da sie bei ihren Arbeiten in der Praxis, z. B. Konstruktion und Berechnung sowie Bauausführung, immer mit dem Boden als Baugrund und Baustoff in Berührung kommen.

In der internationalen Literatur ist auf eine Veröffentlichung von *Lord (1997)* zu verweisen, der den in der Geotechnik tätigen Bauingenieur gegenüber Ingenieurgeologen dahingehend abgrenzt, dass sich der Ingenieur durch die Koppelung der Kenntnisse bezüglich des Bodenverhaltens, des Spannungs-Verformungs-Verhaltens und der Interaktion des Bauwerkes mit dem Baugrund auszeichnet. Weiterhin verfügt der Bauingenieur in der Geotechnik über die notwendigen mathematischen und mechanischen Grundlagen. Zur Anwendung der Bodenmechanik in der Praxis ist weiterhin eine sorgfältige Kenntnis der theoretischen und experimentellen Konzepte, ein umfassender Einblick in die gegenwärtigen und vergangenen Erfahrungen der fachlichen Kollegen und eine besondere Berücksichtigung der geologischen Aspekte notwendig.

National definieren *Floss et al. (2000)* die Trennung der Aufgabenbereiche der Bauingenieure und der Geologen in der Geotechnik. Danach ist die Aufgabe des Geotechnikingenieurs bzw. des in der Geotechnik ausgebildeten Bauingenieurs, ausgehend von geologischen, boden- und felsmechanischen Erkundungen und Untersuchungen ein zutreffendes, allgemein theoretisches, mathematisch-mechanisches und physikalisch-chemisches Modell der i. d. R. mehrphasigen Stoffe Boden und Fels als Baugrund und Baustoff zu entwickeln, die Gründung von Bauwerken zu entwerfen und die Standsicherheit und Gebrauchstaug-

lichkeit mit den Methoden der Boden- und Felsmechanik nachzuweisen. Die Aufgabe des Geologen bzw. Ingenieurgeologen kann hingegen sein, insbesondere bei Großprojekten die geologisch relevanten Eigenschaften des Baugrundes zu erkennen (z. B. Stratigrafie) und die Untergrunduntersuchungen zu planen, zu überwachen und im Hinblick auf ein geotechnisches Baugrundmodell in Zusammenarbeit mit dem in der Geotechnik tätigen Bauingenieur auszuwerten.

Die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik DGGT (siehe 1.5) hat in ihrer Empfehlung EASV, veröffentlicht durch ihren Arbeitskreis AK 2.11 der Fachsektion Erd- und Grundbau, die Anforderungen an Sachkunde und Erfahrung eines Sachverständigen für Geotechnik definiert, siehe *EASV (2016)*.

In der vorstehenden Empfehlung EASV sind ergänzend die folgenden geotechnischen Sachverständigen beschrieben, die einer besonderen Anerkennung bedürfen. Diese sind:

- **Fachplaner für Geotechnik**
Die Aufgaben und Funktionen eines Fachplaners sind in der Musterbauordnung (MBO) festgelegt. Dieser ist heranzuziehen, wenn ein Entwurfsverfasser nicht die erforderliche Sachkunde und Erfahrung auf einzelnen Fachgebieten hat. Der Begriff „Fachplaner für Geotechnik“ wird dabei jedoch nicht explizit in der MBO erwähnt, sondern findet sich nur in der DIN 1054.
- **Öffentlich bestellte und vereidigte (ö. b. u. v.) Sachverständige**
Diese Sachverständige werden von der Industrie- und Handelskammer für spezielle Teilgebiete der Geotechnik öffentlich bestellt und vereidigt. Sie verfügen auf dem bestellten Fachgebiet über besondere Sachkunde und Glaubwürdigkeit und werden i. d. R. von Gerichten und Behörden zur Beantwortung spezieller geotechnischer Fragestellungen beauftragt.
- **Prüfsachverständige für Erd- und Grundbau**
Die Kompetenz der Prüfsachverständigen für Erd- und Grundbau werden von einem Beirat der Bundesingenieurkammer geprüft und festgestellt. Diese Fachleute bescheinigen im Auftrag des Bauherrn oder der sonstigen nach Bauordnungsrecht Verantwortlichen die Einhaltung bauordnungsrechtlicher Anforderungen. Sie prüfen dabei insbesondere die Vollständigkeit und Richtigkeit der Angaben über den Baugrund hinsichtlich Stoffbestand, Struktur und geologischer Einflüsse, dessen Tragfähigkeit und die getroffenen Annahmen zur Gründung oder Einbettung der baulichen Anlage.
- **EBA Sachverständige**
Für Baumaßnahmen im Eisenbahnbau werden vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) Sachverständige für Geotechnik mit entsprechender Erfahrung im Eisenbahnbau nach einem Prüfverfahren als „Gutachter/Prüfer in Verwaltungsverfahren mit dem EBA“ anerkannt.

Ergänzende Hinweise können zusätzlich *Ziegler (2017)* entnommen werden.

1.3 Geotechnische Berichte

Nach *Handbuch Eurocode 7-2 (2011)* ist der „Geotechnische Bericht“ (häufig bisher auch als „Baugrund- und Gründungsgutachten“ bezeichnet) die Zusammenfassung und Kommentierung der Ergebnisse aller geotechnischer Untersuchungen sowie die daraus zu ziehenden Folgerungen für das Objekt und für die Objektdurchführung. Dieser Bericht wird i. d. R. durch ein Geotechnisches Ingenieurbüro / Institut erstellt. Diese können sein: Freiberuflich tätige Beratende Ingenieure für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau (Ingenieurbüros) oder öffentliche Einrichtungen wie z. B. Hochschulinstitute, Bundesanstalten für Straßenwesen oder Wasserbau sowie Materialprüfungsanstalten. In den Institutionen sind die in 1.2 genannten Sachverständigen für Geotechnik tätig.

Die Geotechnischen Berichte dienen dem Architekten oder Tragwerksplaner als Grundlage für Grob- und Detailplanung sowie der Bemessung von z. B. Gründungselementen oder Baugruben. Für die Geotechnischen Kategorien GK 2 und GK 3 sind Geotechnische Berichte zwingend erforderlich. Die darin aufzunehmenden Inhalte sowie Mustergliederungen finden sich in *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)* und *Handbuch Eurocode 7-2 (2011)*, wobei in den Normen unterschieden wird zwischen den folgenden geotechnischen Berichtstypen:

- Der „Geotechnische Untersuchungsbericht“ bezieht sich auf die im *Handbuch Eurocode 7-2 (2011)* geregelten Untersuchungen, wobei der „Geotechnische Bericht“ nach DIN 4020, wie er häufig in Deutschland zu finden ist, etwas darüber hinausgeht, siehe Abb. 1.1.
- Der „Geotechnische Entwurfsbericht“ sollte für die Geotechnischen Kategorien GK 2 und GK 3 die erforderlichen weiteren Schritte und Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Gründung enthalten.

Weitere Hinweise dazu finden sich auch im *Handbuch Eurocode 7-1 (2015)*.

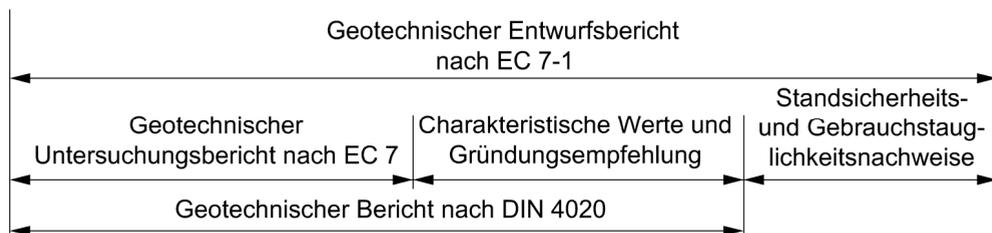


Abb. 1.1: Einordnung der Geotechnischen Berichte, aus *Handbuch Eurocode 7-2 (2011)*

1.4 Baugrundrisiko und Verpflichtung des Auftraggebers

Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen kann der Baugrund nur an bestimmten Stellen stichprobenartig untersucht werden.

Wie der Baugrund zwischen diesen Stellen beschaffen ist, kann nur vermutet werden. Die Tatsache, dass die Baugrundverhältnisse nur in beschränktem Maße bekannt sind, um die

gestellte bautechnische Aufgabe zu lösen, begründet ein „Baugrundrisiko“. Das Baugrundrisiko ist umso größer, je schwerwiegender die Folgen im Schadensfall sind, der dadurch verursacht sein kann, dass maßgebende Baugrundeigenschaften nicht erkannt wurden.

Das Baugrundrisiko trägt zunächst der Bauherr als Eigentümer des Baugrundes. Der Sachverständige für Geotechnik tritt jedoch durch seine Beauftragung mit in dieses Risiko ein, da nur er fachlich in der Lage ist, die Baugrundverhältnisse entsprechend der Aufgabenstellung zu beurteilen. Mit der Abgabe seines Gutachtens (Geotechnischer Bericht) übernimmt der Sachverständige für Geotechnik die Haftung für Schäden, die bei Einhaltung der im Gutachten genannten Angaben aus Baugrund und Gründung auftreten. Es sei denn, dass trotz geotechnischer Untersuchungen nach den Regeln der Technik unvorhersehbare Baugrundsituationen angetroffen werden.

Der Sachverständige für Geotechnik übernimmt außerdem die Verantwortung dafür, dass die in den Geotechnischen Berichten genannten konstruktiven Vorschläge zur baulichen Durchbildung, zur Baudurchführung und zum Bauablauf den allgemeinen anerkannten Regeln der Technik (z. B. Normen, Empfehlungen usw.) entsprechen. Er hat aber auch die Möglichkeit aufgrund seiner Untersuchungen und seinem Sachverstand von den anerkannten Regeln der Technik begründet abweichende Empfehlungen zu geben, wenn diese sicher, aber wirtschaftlicher sind.

Der Bauherr oder Auftraggeber hat bezüglich des Baugrundes nach VOB folgende Verpflichtungen:

- *„Die für die Ausführung der Leistung wesentlichen Verhältnisse der Baustelle, z. B. Boden- und Wasserverhältnisse, sind so zu beschreiben, dass der Bewerber ihre Auswirkung auf die bauliche Anlage und die Bauausführung hinreichend beurteilen kann.“ (VOB/A 2016, Teil A: § 7, (1), Pkt. 6.)*

Auch hieraus geht eindeutig hervor, dass das Baugrundrisiko grundsätzlich beim Bauherrn liegt und er dafür Sorge tragen muss, dass der Baugrund ausreichend für die Bauaufgabe erkundet und durch ein Baugrund- und Gründungsgutachten (Geotechnischer Bericht) beschrieben sein muss.

Bei Sondervorschlägen argumentiert der Auftraggeber häufig, dass die Baugrundverhältnisse für den Ausschreibungsentwurf ausreichend erkundet und notwendige Zusatzuntersuchungen für die Realisierung des Sondervorschlags/Nebenangebotes von der bietenden Firma zu übernehmen sind. Diese Auffassung wird i. d. R. auch seitens der Gerichte unterstützt.

In 4.1 finden sich weitere Hinweise zur rechtlichen Einordnung der Baugrunderkundung im Zusammenhang mit den Aufgaben der am Bau Beteiligten sowie zum Begriff „Baugrundrisiko“.

1.5 Geotechnische Gesellschaften

Die fachlichen Belange der in 1.1 zusammengestellten Fächer in der Geotechnik werden von geotechnischen Gesellschaften wahrgenommen.

International sind dies:

- International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE),
- International Society of Rock Mechanics (ISRM),
- International Geosynthetics Society (IGS),
- International Association of Engineering Geology (IAEG),
- International Tunneling Association (ITA).

National hat fast jedes Land eine eigene Gesellschaft, in Deutschland die

- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT).

In der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik sind dann wiederum die einzelnen Fachsektionen vertreten:

- Bodenmechanik
- Erd- und Grundbau
- Felsmechanik
- Ingenieurgeologie
- Kunststoffe in der Geotechnik
- Umweltgeotechnik.

2 Grundlagen zur Geologie und Struktur von Boden und Fels

2.1 Aufbau des Erdkörpers und geologische Einordnung

Die Erde ist etwa gemäß Abb. 2.1 schalenförmig aufgebaut. Die für die Geotechnik bereichsweise interessante äußere, sehr dünne Schale wird als Erdkruste bezeichnet, die sich grundsätzlich in eine Granitschicht (Oberkruste) und eine tiefere Basaltschicht (Unterkruste) unterteilt. Unter den Ozeanen wird in der Regel nur die Basaltschicht mit einer Mächtigkeit von 5 bis 10 km angetroffen.

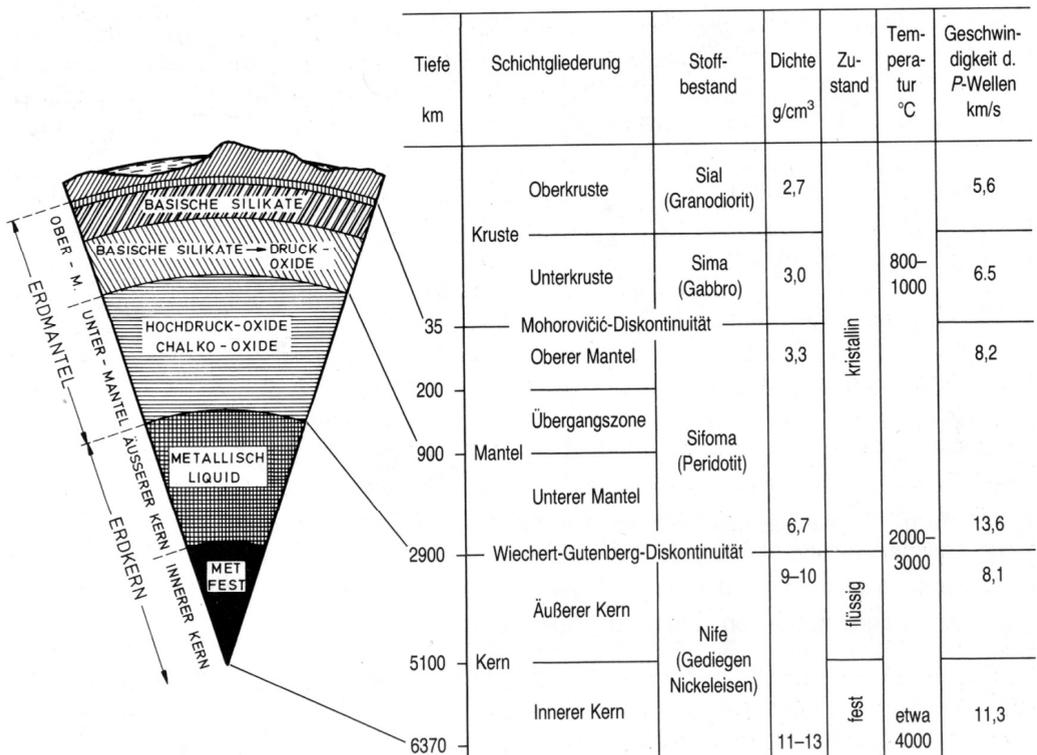


Abb. 2.1: Schematischer schalenförmiger Aufbau der Erde, aus Fecker/Reik (1995)

Die Erdgeschichte untergliedert sich in vier Zeitaltergruppen:

- Erdneuzeit (Kanäozoikum)
- Erdmittelalter (Mesozoikum)
- Erdaltertum (Paläozoikum)
- Erdfrühzeit (Präkambrium)

Jedes Zeitalter wird weiter in Systeme (Perioden), Abteilungen (Serien/Epochen), Stufen (Alter) und Zonen (Zeit) unterteilt. Die stratigrafische Gliederung der Erdkruste ist in Tab. 2.1 zusammengestellt.

Einen allgemeinen Überblick und Zusammenstellung der geologischen Grundlagen sind beispielsweise *Bahlburg/Breitkreuz (2017)* oder *Grotzinger/Jordan (2017)* zu entnehmen.

2.2 Gesteinsbildung

Die Gesteine werden entsprechend ihrer Entstehung in drei Hauptgruppen gegliedert:

- *Magmatite: Plutonite* (z. B. Granit, Diorit, Gabbro), *Vulkanite* (z. B. Basalt, Diabas, Porphyrit),
- *Sedimente: klastische* (z. B. Ton-, Sandstein), *chemische* (z. B. Gips), *organische* (z. B. Torf),
- *Metamorphite: Regionalmetamorphite* (z. B. Gneis, Phyllit), *Kontaktmetamorphite* (z. B. Hornfels).

a) Magmatische Gesteine:

Magmatische Gesteine entstehen aus der Schmelze der unteren Erdkruste (100–120 km Tiefe, teilweise auch näher unter der Erdoberfläche). Diese Gesteinsschmelze weist eine Temperatur von etwa 1300 °C auf. An Schwachstellen der Erdkruste kann es zu einem Ausfluss bzw. Ausbruch der Schmelze an die Erdoberfläche kommen. Ein größerer Teil der aufsteigenden Schmelze erreicht jedoch nicht die Erdoberfläche, sondern bleibt in ihr „stecken“ und erstarrt. Je nach Art der Entstehung werden die magmatischen Gesteine in drei Gruppen unterteilt:

- Ergussgesteine (Vulkanite): rasche Erstarrung des Magma an der Erdoberfläche,
- Tiefengesteine (Plutonite): langsame Erstarrung des Magma innerhalb der Erdkruste,
- Ganggesteine: langsame Erstarrung des Magma in Spalten innerhalb der Erdkruste, die aber auch bis an die Erdoberfläche reichen können.

Tab. 2.1: Erdgeschichtliche Untergliederungen, nach Dachroth (1992)

Erdzeit- alter	Formation (System)	Ab- teilung	Alter Dauer [10 ⁶ Jahre]	Wich- tige tekto- nische Ären	Faltungs- gebiete	Wichtige Gesteine (Mitteleuropa)	
						Witterungs- empfindlich	Witterungs- beständig
Erdneuzeit (Kanozoikum oder Neozoikum)	Quartär	Holozän (Alluvium = geolog. Gegen- wart)	0,020	Alpidische Ära	Himalaja	Gehänge-, Geschiebe-, Verwitterungs- und Auelehme, Tone, Torfe, Faulschlamm	Sande, Kiese, Schotter, Gerölle
		Pleistozän (Dilu- vium)	Eiszeit 1			Geschiebemergel, Löße, Lößlehme, Bändertone, Torfe, Faulschlamm	Sande, Kiese, Schotter, Gerölle, Travertin
	Tertiär (Braun- kohlezeit)	Pliozän, Miozän, Oligozän, Eozän, Paläozän	70		Alpen, Karpaten, Himalaja, Pyrenäen	Tone, Mergel, Lehme, lehmmige Sande, Sand- steine, glasreiche Basalte, Sonnenbrennerbasalt, Kieselgur	Sande, Kiese, glasarme Basalte, Phonolithe, Dazite, Andesite
Erdmittelalter (Mesozoikum)	Kreide	Dan, Senon, Emscher, Turon, Cenoman, Gault, Neoam	140	Anden, NW-D. (Bruch- faltung), Ost-Alpen Sibirien	Mergelsandsteine, (Pläner), Kreide- mergel, Schiefertone, Tonmergel	Quadersandsteine, Kreidekalke	
	Jura	Malm (weißer) Dogger (brauner) Lias (schwarz.)	180	Sierra Nevada, NW-D. (Bruch- faltung)	Tone, Mergel	Dolomite, reine Kalke, Marmor- kalke	
	Trias	Keuper	225	Japani- sche Inseln	Bunte Letten u. Mergel, Schiefertone, Gipsletten u. -mergel, Lettensandstein	Sandsteine, Kalksteine	
		Muschel- Kalk			Gips- und salzhaltige Mergel, mergelige Kalke	Dolomite, reine Kalkbänke	
Bunt- sandstein	Mergel, Gipsschiefer, Sandsteinschiefer, Schieferletten, Lettensandstein, Bröckelschiefer	Quarzsteine, Rogensteine					

Fortsetzung Tab. 2.1:

Erdzeit- alter	Formation (System)	Ab- teilung	Alter Dauer [10 ⁶ Jahre]	Wich- tige tekto- nische Ären	Faltungs- gebiete	Wichtige Gesteine (Mitteleuropa)		
						Witterungs- empfindlich	Witterungs- beständig	
Erdaltertum (Paläozoikum)	Perm	Zechstein	275	Varistische Ära	Ural	Schiefer u. Salztone, Stinkschiefer, Mergel, Salze, Schiefertone, Gipse, Anhydrit, Gipsletten u. -mergel	Dolomite, Kalke	
		Rot- liegendes				Tonige Konglomerate und Sandsteine, Schieferletten (Rötelschiefer)	Porphyre, Porphyrite, Melaphyre	
	Karbon (Stein- kohlezeit)	oberes Karbon (produk- tives K.), unteres Karbon	345		Asturien, europäi- sche Mittel- gebirge	Schiefertone, Ton- schiefer, Alaun- schiefer, tonige Sandsteine, tonige Graphitschiefer	Graphit, Diorite, Granodiorite, Syenite, Grau- wacken, Gabbros, Konglomerate, Kiesel- u. Dachschiefer	
		Devon	400		Rheini- sches Schiefer- gebirge	Ton- u. Graphit- schiefer, Grauwacken, Schalsteine, dolomi- tische Mergel	Grauwacken, Diabase, Kalke	
	Silur		450		Kaledonische Ära	Ardennen, Appala- chen, West- Norwegen	Alaunschiefer, Grapholiten- u. Tonschiefer, Graphit- u. Lederschiefer, Ockerkalke	Griffelschiefer, Kalke, Phyllit
	Ordovi- cium		490			Hebriden	Alaunschiefer, Tonschiefer, tonschieferreiche Grauwacken, Phyllit	Sandsteine, Grau- wacken, Kalke, Phyllit
	Kam- brium		580					
	Erdfrüh- zeit	Algon- kium	Jotnium Karelium		2200	Assyn- tische Ära	Balti- scher, Kana- discher, Sinischer,	Grauwacken, Glimmerschiefer, Kalksilikatge- stein, Quarzite, Marmor, Gneise, Leptite, Amphi- olite
Erd- urzeit	Archai- kum		4500	Lauten- tische	Afrika- nischer Schild			

b) *Sedimente:*

An der Erdoberfläche unterliegen alle Gesteine einem bis in geringe Tiefen reichenden Zerstörungsprozess, der Erosion bzw. Verwitterung, z. B. durch Sonneneinstrahlung, Frost, Wasser, Wind und Organismen.

Die physikalische Verwitterung führt zu einer Zersetzung der Gesteine, wobei jedoch die mineralogische Zusammensetzung dieser erhalten bleibt. Beispiele hierfür sind die Frostsprengung, äolische Erosion durch Quarzsand oder auch die Gesteinssprengung durch Wurzeldruck von Pflanzen.

Die chemische Verwitterung verändert die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine ohne jedoch zwingend zu einer Zerstörung der Struktur zu führen. Als Beispiel für die chemische Verwitterung sei auf die Umsetzung von Anhydrit in Gips verwiesen. Durch fließendes Wasser, Gletscher, Wind, Meeresbrandung und -strömungen werden die Verwitterungsprodukte transportiert und in Hohlformen der Erdkruste abgelagert (sedimentiert). Der Sedimenttransport kann zu einer weiteren Erosion der Sedimente führen, z. B. runde Sedimentkörner aufgrund von Schleifvorgängen während des Transportes im Wasser. Der Transport der Sedimente kann weiterhin zu einer Klassierung (Ordnung der Sedimentbestandteile nach bestimmter Größe) und/oder Sortierung (Ordnung nach Mineralbestandteilen des Sedimentes) führen. Mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit kommt es zur Ablagerung immer kleinerer Kornfraktionen. Je nach Art der Ablagerung können deutlich geschichtete Sedimente entstehen (z. B. bankiger Sandstein) oder auch nur unregelmäßige Sedimentanordnungen. Sedimente können entsprechend Tab. 2.2 gegliedert werden.

Tab. 2.2: *Beispiele für Sedimente und Sedimentgesteine*

Gliederung und Bezeichnung	Sediment	Sedimentgestein
Klastisch	Ton Sand vulkanischer Staub	Tonschiefer Sandstein Tuff
Chemisch		Kalkstein, Gips, Kreide, Steinsalz, Kalisalz, Dolomit
Organogen	pflanzliche Substanz tierische Substanz	Torf, Braunkohle, Steinkohle Erdöl, Erdgas Riffkalke, Schillkalke

Klastische Sedimente sind Lockergesteine, die aufgrund ihrer Korngröße unterschieden werden in Steine, Kiese, Sande, Schluffe und Tone. Nach einer Verfestigung der Sedimente werden diese in Brekzien (eckige Einzelbestandteile) und Konglomerate (runde, weit transportierte Bestandteile) unterteilt. Nach dieser Terminologie können alle Sandsteine z. B. als Konglomerate bezeichnet werden. Chemische und organische Sedimente sind nur bedingt gegeneinander abzugrenzen. Sie entstehen als Ausfällungsprodukte von Mineralen aus Wasser und im Fall der organischen Sedimente aus pflanzlichen oder tierischen Überresten, die verfestigt und durch Wärme beansprucht wurden, z. B. Kalkstein. Unterliegt ein Sediment der Verfestigung, bilden sich Sedimentgesteine (Tab. 2.2).

c) *Metamorphe Gesteine:*

Metamorphe Gesteine sind Umwandlungsgesteine, die infolge gebirgsbildender Vorgänge durch Temperatur- und Druckerhöhung entstehen. Es kommt zur Um- oder auch Neubildung von Mineralen in den Gesteinen. Dabei können sich kristalline Schiefer, Kontaktgesteine oder Mischgesteine bilden.

Eine ausführliche Übersicht zur Gesteinsbildung ist *Sebastian (2018)* zu entnehmen.

2.3 Regionalgeologie in Deutschland

Aus der erdgeschichtlich wichtigen Gebirgsbildung Mitteleuropas wird unterschieden in das Gebiet nördlich der Alpen mit konsolidiertem *Grundgebirge* und relativ ungestört aufgelagertem *Deckgebirge* (Tafelgebirge) sowie dem Alpenraum mit gefalteten Gebieten. Das jüngste Stockwerk ist das der Lockergesteine, welches im Wesentlichen aus tertiären und quartären Kiesen, Sanden, Schluffen und Tonen besteht. Im Hochgebirgsraum liegen auch die Schichten des Perm bis zur Kreide, teilweise sogar die des Tertiärs, gefaltet vor, sodass hier nur in Grundgebirgsstockwerk und den jungen Lockergesteinsmassen unterschieden wird.

Deutschland kann entsprechend Abb. 2.2 regionalgeologisch gegliedert werden in:

- *Tiefland*; mit vorwiegend jungen Lockergesteinen aus eiszeitlichen Ablagerungen,
- *Mittelgebirgsvorland*; mit im Wesentlichen sedimentären Felsgesteinen des Oberkarbon, des Perm und des Mesozoikum unter geringmächtigen Lockergesteinen,
- *Mittelgebirgsraum*; mit im Varistikum alpinotyp gefalteten sedimentären Felsgesteinen sowie Magmatiten und Metamorphiten des Grundgebirges,
- *dem Hochgebirge*; mit während der alpidischen Gebirgsbildung alpinotyp gefalteten Sedimenten, Metamorphiten und Magmatiten sowie jungen Lockergesteinen in den Talgebieten.

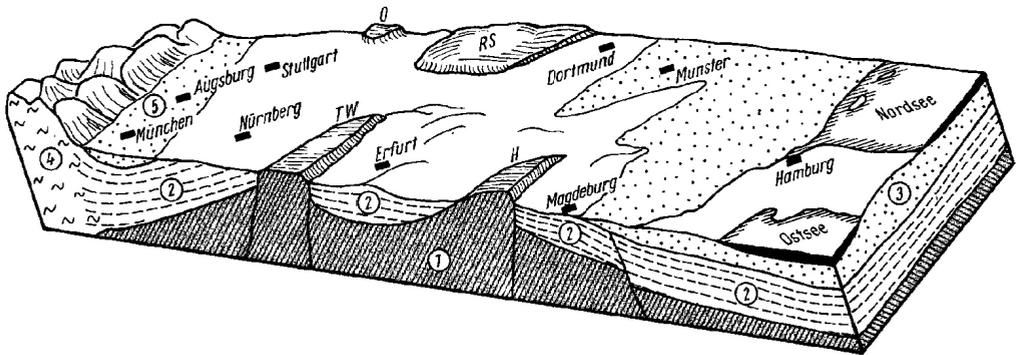
Abb. 2.2 zeigt schematisch eine geologische Unterteilung eines Blockstreifens aus Mitteleuropa. Dabei stellen die punktierten Bereiche das Tiefland, die weißen Bereiche das Mittelgebirgsvorland mit den herausragenden Mittelgebirgen und gewellt das Hochgebirge dar.

Unter Beachtung des geologischen Stockwerksbaus wird Mitteleuropa in vier große Baugrundbereiche eingeteilt.

- *Glaziogene und fluvioglaziogene Lockergesteine*: Das Liegende dieser Ablagerungen bilden im nördlichen Tiefland grundsätzlich die Festgesteine des Deckgebirges und Lockergesteine des Tertiärs. Diese können einige hundert Meter Mächtigkeit besitzen, welche nach Süden hin abnehmen. Hierzu gehören vor allem Geschiebemergel, Blockpackungen, Schmelzwasserkiese und -sande, Tone und Schluffe, Beckentone sowie Bändertone.
- *Äolische Lockergesteine*: Das Liegende dieser Windsedimente besteht aus glaziogenen und fluvioglazialen Lockergesteinen sowie den Festgesteinen des Deck- und Grund-

gebirges. Hierzu gehören Löße, Lößlehme und Sandlöße, die im Allgemeinen wenige Dezimeter bis Meter örtlich auch einige Dekameter mächtig sind.

- *Magmatische, sedimentäre und metamorphe Festgesteine und deren Verwitterungsprodukte:* Das Liegende bilden fast ausschließlich Magmatite und kristalline Schiefer. Zu nennen sind hier u. a. Granite, Porphyre und Basalte, Gneise, Granulite und Phyllite sowie auch Sand- und Tonsteine. Die Mächtigkeiten der einzelnen Gesteine differieren sehr stark und können nur örtlich festgelegt werden.
- *Fluviatile und Verlandunglockergesteine:* Das Liegende wird entsprechend der geografischen Lage aus einem der vorgenannten Baugrundbereiche aufgebaut. Diese Bereiche bestehen vor allem aus Flussschottern und -kiesen, Sanden, Auelehmen und -tonen sowie verschiedenen organischen Lockergesteinen und sind auf Flussauen großer Flüsse, auf den Nordrand des Molassebeckens und dem Norddeutschen Flachland konzentriert. Die Mächtigkeit dieser Ablagerungen beträgt einige Meter bis Dekameter.



1 Grundgebirge, 2 Deckgebirge, 3 Junge Lockermassen, 4 Grundgebirge im Hochgebirge, 5 Junge Lockermassen im Alpenvorland, H Harz, O Odenwald, RS Rheinisches Schiefergebirge, TW Thüringer Wald

Abb. 2.2: Schematischer Blockstreifen zur regionalgeologischen Gliederung von Deutschland, aus Klengel/Wagenbreth (1989)

Ein weiterer detaillierter Überblick zur Entstehungsgeschichte der Geologie Deutschlands kann *Meschede (2018)* und *Böse et al. (2018)* entnommen werden.

2.4 Zusammensetzung und Struktur von Böden

Im bautechnischen Sinne versteht man unter Boden die oberflächennahe nicht verfestigte Zone der Erdkruste (Lockergestein). Der Stoff „Boden“, mit dem sich die Bodenmechanik beschäftigt, unterscheidet sich wesentlich von den sonstigen Stoffen der Mechanik. Der Boden stellt ein Haufwerk von Feststoffen (Mineralen) dar, dessen Poren mit Wasser und Luft gefüllt sind (Dreiphasensystem). Man spricht hierbei von einem dispersen System (dispergere = verstreuen) mit den Anteilen: fester Teil (disperse Phase), Wasser (flüssige Phase) und Luft (gasförmige Phase). In seiner Gesamtheit weist der Boden völlig andere Eigenschaften als seine Bausteine (die Einzelkörner) auf. Für die anschauliche Betrachtung

eines bestimmten Bodenvolumens V mit der Masse m wird folgendes Gedankenmodell verwendet, siehe Abb. 2.3.

Für die Begriffe „Wichte γ “ und „Dichte ρ “ gilt folgender Zusammenhang mit $g = \text{Erdbeschleunigung}$ nach Gl. (2.1).

$$\gamma = g \cdot \rho \approx 10 \cdot \rho \text{ [kN/m}^3\text{]} \quad (2.1)$$

wobei gilt:

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} = \left[\frac{t}{m^3} \right] = \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$\text{Wichte} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Volumen}} = \left[\frac{kN}{m^3} \right]$$

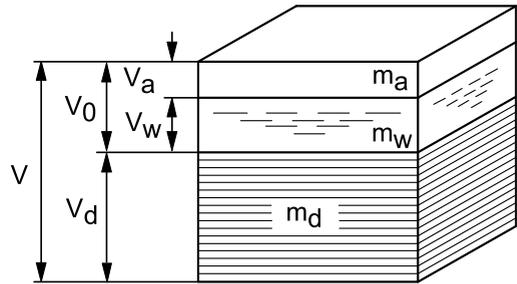


Abb. 2.3: Gedankenmodell eines Bodenvolumens (Index d: Feststoff, w: Wasser, a: Luft, 0: Poren)

Die nachfolgend definierten Dichten lassen sich in entsprechende Wichten mit Gl. (2.1) umrechnen:

- Korndichte: Kornmasse m_d bezogen auf das Volumen der Körner V_d (Kornwichte γ_s)

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d} \left[\frac{t}{m^3} \right] = \left[\frac{g}{cm^3} \right] \rightarrow \gamma_s = \rho_s \cdot g \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (2.2)$$

- Dichte: feuchte Masse des Bodens m bezogen auf das Gesamtvolumen V (Wichte γ)

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{t}{m^3} \right] \rightarrow \gamma = \rho \cdot g \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (2.3)$$

- Wenn alle Poren mit Wasser gefüllt sind, wird diese Dichte als Dichte des wassergesättigten Bodens ρ_r (wassergesättigte Wichte γ_r) bezeichnet.

- Trockendichte: trockene Masse des Bodens m_d bezogen auf das Gesamtvolumen V (Trockenwichte γ_d)

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \left[\frac{t}{m^3} \right] \rightarrow \gamma_d = \rho_d \cdot g \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (2.4)$$

- Dichte des Bodens unter Auftrieb: Ableitung der Wichte unter Auftrieb (γ') siehe 6.3.

$$\rho' = \rho_r - \rho_w \left[\frac{t}{m^3} \right] \quad (2.5)$$

- Wassergehalt: Verhältnis des Masseverlustes beim Trocknen m_w bezogen auf die verbleibende Trockenmasse m_d

$$w = \frac{m_w}{m_d} [-] \text{ bzw. } [\%] \quad (2.6)$$

Die Bestandteile der Böden sind miteinander nicht oder nur in so geringem Maße mineralisch verkittet, dass die Verkittung die Eigenschaften des Bodens nicht prägt (Lockergestein).

Je nach mineralischer Zusammensetzung weisen die einzelnen Bodenarten unterschiedliche Strukturen auf. Häufig wird auch vom „Gefüge des Bodens“ gesprochen. Bei globalen Unterteilungen in nichtbindige und bindige Böden besitzen die rein nichtbindigen Böden ein Einzelkorngefüge (Abb. 2.5a), deren Hohlräume je nach Entstehung dieser Böden unterschiedlich dicht gelagert bzw. mit feineren Anteilen gefüllt sind. Die Einzelkörner sind mehr oder weniger gut gerundet, zwischen 0,002 mm und 60 mm groß. Sie bestehen aus einem einzigen Mineral (Quarz, Calcit, Dolomit) oder aus einem Mineralgemenge (Ausgangsgestein, wie z. B. Quarz, Gneis, Sandstein). Der Grad der Rundung hängt von der Länge des Transportweges und vom Mineraltyp ab. Je weiter der Transportweg und weicher der Mineraltyp, desto ausgeprägter die Rundung (Abb. 2.4).



Abb. 2.4: Kornformen der Einzelkörner

Demgegenüber bilden Tone aufgrund der elektrostatischen Kräfte der Einzelteilchen (Rand positiv, Seiten negativ) ein Wabengefüge (Kartenhaus), siehe Abb. 2.5b. Dies ist charakteristisch für im Süßwasser sedimentierte Tone. Im Salzwasser haben sich mehr flockenartige Teilchen abgesetzt, die bereits während der Sedimentation aneinander gehaftet sind (Abb. 2.5c). Unter einer vertikalen Belastung ordnen sich diese Gebilde mehr horizontal parallel an. Diese feineren Bodenteilchen liegen überwiegend nicht als Körner vor, sondern als Plättchen. Die Plättchen sind praktisch reine Feldspatprodukte, d. h. sie sind aus der Verwitterung von Feldspäten hervorgegangen.

Aus den Feldspäten entsteht bei der Verwitterung durch Anreicherung von Ionen (Aggradierung) oder durch Freisetzen von Ionen (Degradierung) eine neue Mineralgruppe, die Tonminerale. Dies sind winzige Plättchen, die i. Allg. den Ton aufbauen.

Die drei häufigsten Tonminerale sind Kaolinit, Illit und Montmorillonit.

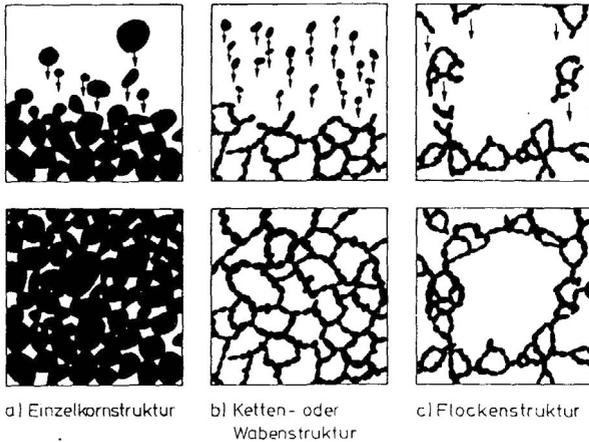


Abb. 2.5: Gefüge des Bodens nach Terzaghi (1925)

Tonminerale sind so klein, dass sie weder mit bloßem Auge noch mit optischem Mikroskop wahrgenommen werden können, sondern nur mit dem Elektronenmikroskop.

Einzelkörner können mit einer diffusen Hülle von Wasser umgeben sein, dieses Wasser ist durch elektrische Ladungen an die Körner gebunden (Abb. 2.6). Die mineralische Oberfläche ist negativ geladen und zieht die positiven Seiten der polaren Wassermoleküle an. Im Vergleich zum Durchmesser der Körner ist die diffuse Hülle allerdings sehr dünn. Sie ist auch nicht scharf begrenzt, daher diffus.

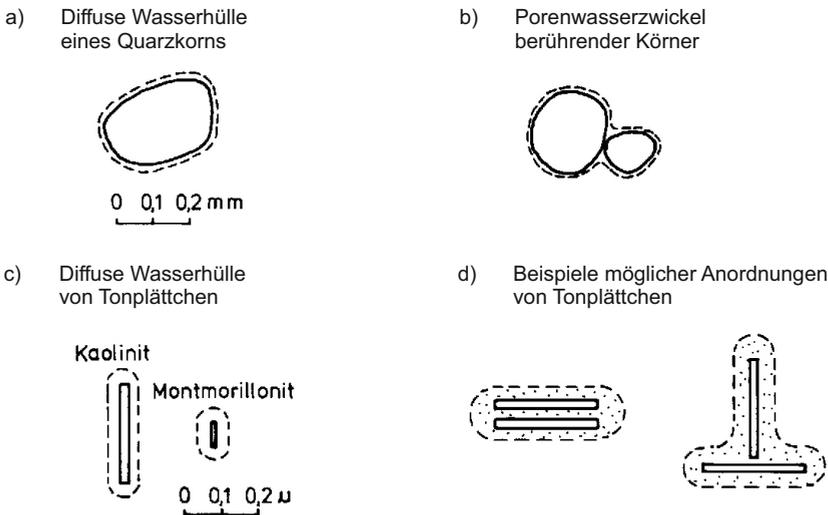


Abb. 2.6: Anordnung von Bodenteilchen und diffuse Wasserhülle, aus Gudehus (1981)

Die Tonplättchen sind ebenfalls von einer diffusen Wasserhülle umgeben. Sie ist im Verhältnis zur Dicke der Plättchen wesentlich dicker als bei den Körnern. Die Tonteilchen berühren sich praktisch nicht. Zwei Teilchen können wegen ihrer plattigen Form und der verhältnismäßig dicken Wasserhülle verschiedenartige Lagen zueinander haben.

Der Zusammenhang zwischen Teilchengröße und spezifischer Oberfläche macht den Unterschied zwischen Körnern und Plättchen (Tonmineralien) deutlich. Unter spezifischer Oberfläche wird die Oberfläche verstanden, die 1 g Masse Bodenteilchen aufweisen:

- Quarz (je nach Korngröße) 0,001 – 0,1 m²/g
- Kaolinit 2 – 20 m²/g
- Illit 5 – 100 m²/g
- Montmorillonit 80 – 1000 m²/g

Die Bodenteilchen bauen den Boden auf, der z. B. als Baugrund für Bauwerke von Bedeutung ist. Wenn im Weiteren von Bodenproben gesprochen wird, sollen diese so viele Teilchen enthalten, dass Angaben über Mittelwerte sinnvoll werden.

2.5 Struktur und Gefüge von Gesteinen und Gebirge

Gestein ist ein Gemenge gleicher oder verschiedener Minerale mit festem Kornverband (mineralische Bindung). Gebirge ist definiert als Gestein zuzüglich der Trennflächen.

Die Abgrenzung zwischen Locker- und Festgestein ist nicht immer zweifelsfrei und einfach durchzuführen. Der Unterschied wird durch den Zusammenhalt der Einzelteile bedingt. Das wichtigste Merkmal ist die Feststellung, ob eine Gesteinsprobe im Wasser zerfällt. Festgesteine zeigen wegen der mineralischen Kornbindung keine Veränderung des Kornzusammenhaltes, sie zerfallen also nicht (Ausnahme: Salinargesteine). Lockergesteine zerfallen dagegen im Wasser.

Neben dem Mineralbestand sind die Gefügemerkmale der Gesteine oder des Gebirges (Gesteinsverband mit Trennflächen) entscheidend für ihre ingenieurgeologische Bewertung. Verschiedene Gefüge sind in Abb. 2.7 beispielhaft dargestellt.

a) Kristallin - richtungslos
(z.B. Granit)

b) Klastisch - richtungslos
(z.B. Sandstein mit Feldspat
und Glimmer)

c) Kristallin mit Parallelgefüge
(z.B. Gneis)

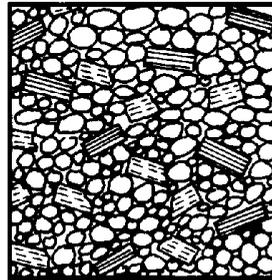
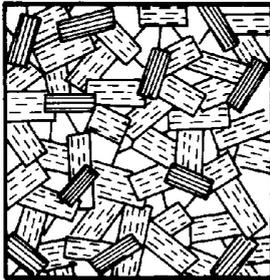


Abb. 2.7: Verschiedene Gefüge bei gleichem Mineralbestand, aus Klengel/Wagenbreth (1989)

Die Gesteinsstrukturen lassen sich auch wie folgt grob gliedern:

- *Kristallin* sind Felsgesteine, deren Körner in einem Kristallisationsvorgang entstanden sind. Sie sind i. d. R. fest und dicht. Kristallin sind viele Magmatite, die chemischen Sedimente und die Metamorphite.
- *Amorph* sind glasig erstarrte Schmelzflüsse, wie Vulkanite; amorphe Gesteine sind i. d. R. spröde.

- *Klastisch* sind Gesteine, deren Körner ihre Form durch einen Zertrümmerungsvorgang erhalten haben, auch wenn sie ursprünglich kristallin waren. Neben den klastischen Sedimenten sind auch die meisten vulkanischen Aschen klastisch, z. B. Tuffe.

Hinsichtlich des Aufbaus eines Gesteins sind vier weitere Oberbegriffe hervorzuheben, die auch zur Beschreibung des Gebirges gebräuchlich sind. Der innere Aufbau eines Gesteins wird maßgeblich vom Korn- und Mikrogefüge beeinflusst. Zur Beschreibung des Gesteinsaufbaus werden weiterhin die Begriffe Struktur und Textur verwendet. Unter dem Oberbegriff Struktur werden die Häufigkeit, Größe, Form und der Verband der Gesteinskomponenten bzw. beim Gebirge der Formelemente zusammengefasst. Die Textur umfasst die räumliche Verteilung und Ausrichtung der Gesteinskomponenten, wobei hier zusätzlich die Begriffe homogen/inhomogen und isotrop/anisotrop zu unterscheiden sind.

Neben den Gesteinen ist bautechnisch der Fels (Festgestein) zu unterscheiden, der i. d. R. von Trennflächen durchzogen ist, die maßgeblich die Eigenschaften des Festgesteins beeinflussen. Abb. 2.8a zeigt in einem Gefügemodell einen von einer Vielzahl von Trennflächen durchzogenen Gebirgskörper, wobei Trennflächen der Oberbegriff für Diskontinuitäten im Festgestein ist und Klüfte und Schichtfugen zusammenfasst.

Zur Beschreibung der Trennflächen sind folgende Begriffe zu unterscheiden:

- Kluffstellung: Raumstellung der Klüfte, beschrieben durch das Einfallen und Streichen, siehe Abb. 2.8b.
- Einfallen: Winkel der Horizontalen rechtwinklig zum Streichen.
- Streichen: Winkel zwischen der Sattelachse und geodätisch Nord.
- Kluffdichte Anzahl der Klüfte bezogen auf eine definierte Länge.
- Durchtrennungsgrad gibt an, in welchem Maß das Gebirge in einer Kluffebene durchtrennt ist bzw. ob noch Materialbrücken vorliegen.

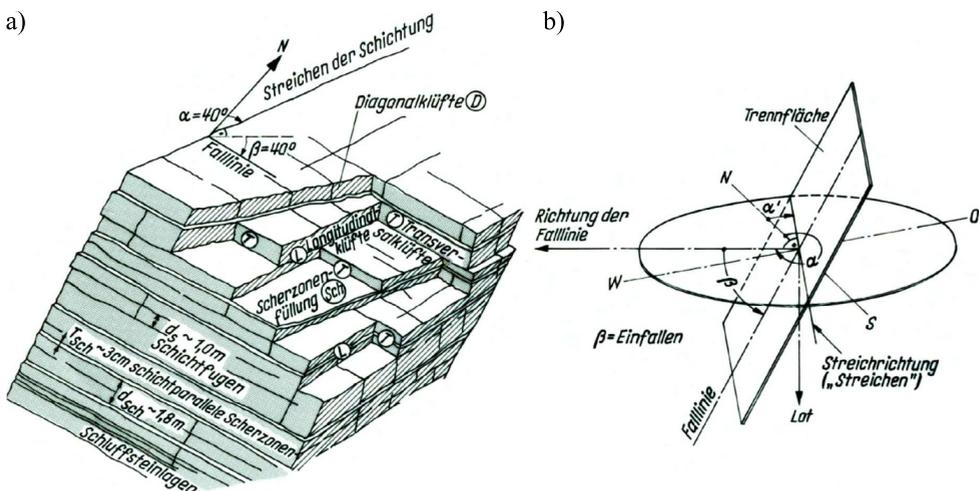


Abb. 2.8: a) Beispiel für ein Gefügemodell, nach Wittke/Ericksen (2001); b) Definition Fallwinkel β und Streichwinkel α

3 Wasser im Untergrund

3.1 Physikalische Eigenschaften des Wassers

Die allgemeinen Eigenschaften des Wassers wie z. B. chemischer Aufbau, Leitfähigkeit, Wasserhärte usw. können *D'Ans/Lax (1992)* entnommen werden.

Die Dichte ρ_w (Wichte γ_w) des Wassers ist abhängig von der Temperatur und bei +4 °C am größten. Für baupraktische Zwecke kann näherungsweise für normales Süßwasser von

$$\rho_w = 1 \left[\frac{t}{m^3} \right] \text{ bzw. } \gamma_w = 10 \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (3.1)$$

ausgegangen werden.

Bei Meerwasser ist die Dichte abhängig vom Salzgehalt. Z. B. beträgt sie für einen Salzgehalt von 3,5 ‰

$$\rho_w = 1,026 \left[\frac{t}{m^3} \right] \quad (3.2)$$

Aufgrund von molekularen Anziehungskräften der Wasserteilchen untereinander bzw. gegenüber anderen Medien (außer Luft), wirken i. d. R. Oberflächenspannungen. Die Oberflächenspannung zwischen der Grenzfläche Wasser-Luft beträgt bei einer Temperatur von 20 °C

$$\sigma = 0,073 \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.3)$$

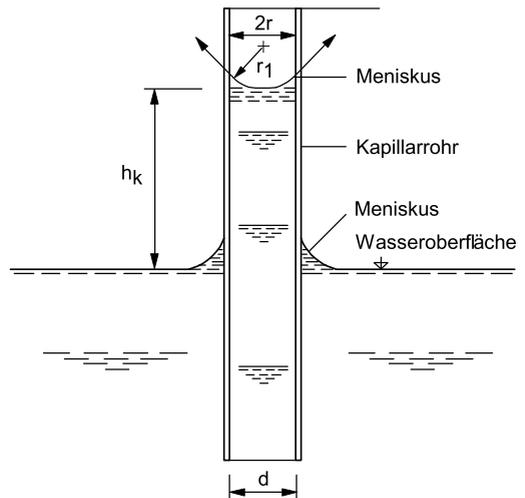


Abb. 3.1: Prinzip der kapillaren Steighöhe

Infolge von Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannungen wölbt sich die Wasseroberfläche im Nahbereich eines festen Körpers nach oben (Meniskus), siehe Abb. 3.1.

In einem Röhrchen mit sehr kleinem Durchmesser wird die Wassersäule infolge dieser wirkenden Spannungen σ so weit über die normale Wasseroberfläche gezogen bis das Gewicht der Wassersäule und die aus der Spannung resultierende Kraft im Gleichgewicht sind. Die

kapillare Steighöhe ist näherungsweise:

$$h_k \approx \frac{0,3}{d} [cm] \quad (3.4)$$

Die kapillare Steighöhe von Böden ist somit abhängig von der Größe und der Verteilung der Poren. Für praktische Fälle ist zu unterscheiden:

- *Passive kapillare Steighöhe* h_{kp} : das ist die Höhe, auf der das Kapillarwasser bei sinkendem Wasserspiegel gehalten wird. Nach *Schulze/Muhs (1967)* und *v. Soos (2001)* sind folgende Größenordnungen zu erwarten:

Mittel- bis Grobkies	$h_{kp} \approx 0,05 \text{ m}$
Kiessand	$h_{kp} \leq 0,2 \text{ m}$
Grobsand bzw. schluffiger Kies	$h_{kp} \leq 0,5 \text{ m}$
Fein- bis Mittelsand	$h_{kp} \leq 1,5 \text{ m}$
Schluff	$h_{kp} \leq 15 \text{ m}$
Ton	$h_{kp} \leq 50 \text{ m}$

- *Aktive kapillare Steighöhe* h_{ka} : Höhe, zu der das Wasser von unten aufsteigt. h_{ka} ist im Allgemeinen geringer als h_{kp} und stark abhängig vom Wassersättigungsgrad der Poren des Bodens. Bei feuchten Böden ist sie geringer als bei trockenen Böden.

Eine weitere wichtige physikalische Eigenschaft des Wassers ist seine Zähigkeit (Viskosität). Für eine Wassertemperatur von 20 °C gilt:

$$\eta = 1 \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = 10 \text{ Poise } [P] \quad (3.5)$$

Weitere Hinweise siehe z. B. *Kézdi (1969)*.

3.2 Erscheinungsformen des Wassers im Untergrund

Die nicht feste Phase des Bodens (Poren), siehe 2.4, kann Wasser gemäß Abb. 3.2 nach *Zunker (1930)* in folgenden Formen auftreten:

- *Sickerwasser*, welches von der Geländeoberfläche in den Untergrund versickert. Wenn sich dieses Wasser auf einer undurchlässigen Schicht staut, spricht man von *Schichtwasser*.
- *Haftwasser*, das infolge von Oberflächenspannungen auf den Körnern haftet, welches insbesondere in den Porenwinkeln ausgeprägt ist (Porenwinkelwasser).
- *Absorbiertes Wasser* an der Mineralkörneroberfläche. Man nennt dieses Wasser auch hygroskopisch gebundenes Wasser.
- *Kapillarwasser*: Der Kapillarwasserbereich wird auch als Kapillarsaum bezeichnet. In diesem Bereich werden Zugspannungen an den Menisken, siehe 3.1, als Druck auf

die Bodenkörner übertragen. Man spricht dort von Kapillardruck $\sigma_k = \gamma_w \cdot h_k$ als Zusatzspannungen auf den Boden.

- *Grundwasser*, das die Hohlräume des Untergrunds zusammenhängend ausfüllt. Echtes Grundwasser „trägt sich selbst“, siehe 6.2.

Im Festgestein (Fels) wird das Grundwasser als Bergwasser bezeichnet. Da der Fels i. d. R. keine ausgeprägten Poren aufweist, kommt das Wasser hier im Trennflächengefüge (Klüfte, Schichten, Spalten) als *Kluft-, Schicht- oder Spaltwasser* vor. Das freie Grund- und Bergwasser kann durch ein Beobachtungsrrohr (Pegel, Piezometerrohr) festgestellt werden. Ein durchlässiger Untergrundbereich wird auch als *Grundwasserleiter*, ein weniger durchlässiger als *Wasserstauer* bezeichnet. Durch wechselnde Lagerung von durchlässigen und undurchlässigen Schichten können sich mehrere übereinanderliegende Grundwasserleiter (Grundwasserstockwerke) ergeben, vgl. Abb. 3.3.

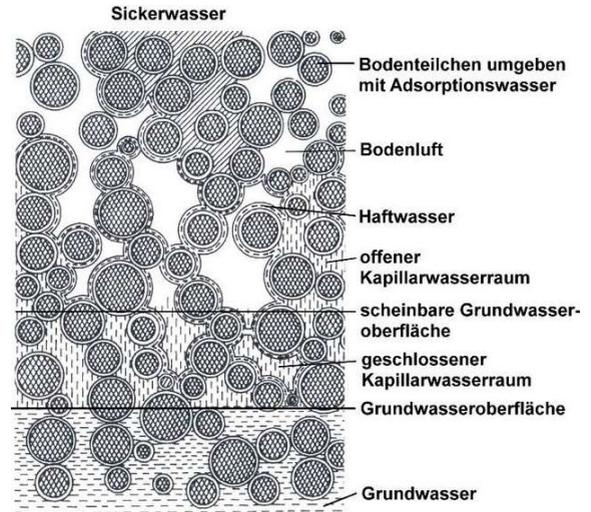


Abb. 3.2: Erscheinungsformen des Wassers in einem Porengrundwasserleiter, nach Hölting (1996)

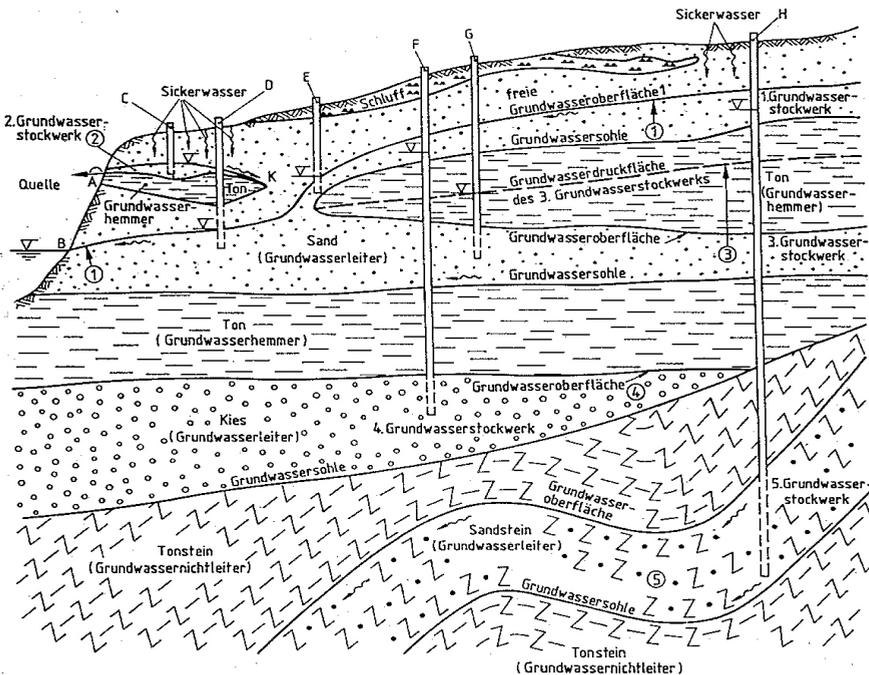


Abb. 3.3: Vorkommen von Grundwasser in mehreren Stockwerken, aus DIN 4021

Gespanntes Grundwasser ist vorhanden, wenn das Wasser von unten gegen eine wasserstauende Schicht drückt. Des Weiteren ist zu beachten, dass offene Gewässer häufig in Verbindung mit dem Grundwasserhorizont stehen bzw. zwischen beiden eine Wechselwirkung vorhanden ist.

3.3 Grundlagen der Wasserströmung im Untergrund

3.3.1 Grundgleichungen

Für die Wasserströmung im Untergrund werden folgende Grundgleichungen aus der Hydraulik benötigt:

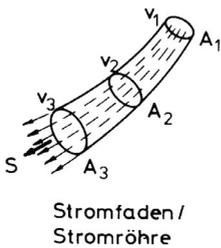
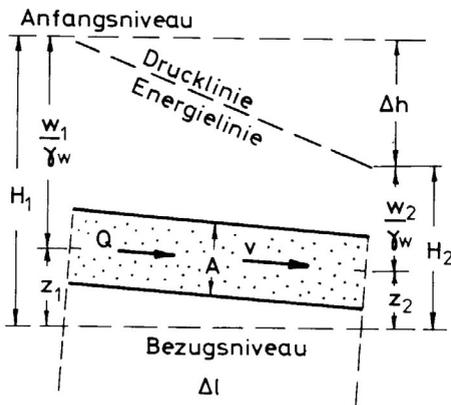


Abb. 3.4: Stromfaden bzw. Stromröhre und Kontinuitätsgleichung

a) Kontinuitätsgleichung

$$Q = v_i \cdot A_i = \text{const.} \quad [\text{m}^3] \quad (3.6a)$$

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_3 \cdot A_3 \quad (3.6b)$$



wegen v sehr klein; $\frac{v^2}{2g} \rightarrow 0$

Abb. 3.5: Systemskizze und Bernoulli'sche Gleichung

b) Bernoulli'sche Gleichung:

$$z_1 + \frac{w_1}{\gamma_w} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{w_2}{\gamma_w} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (3.7)$$

mit:

$H_{1,2}$: Energiehöhe, Potenzial

$\frac{w_{1,2}}{\gamma_w}$: Druckhöhe

$\frac{v^2}{2g}$: Geschwindigkeitshöhe

z : geodätische Höhe

Δh : Druckdifferenz
(Verlusthöhe infolge Reibung)

Δl : durchströmte Länge

Dabei wird in der Bodenmechanik i. d. R. die Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g} \rightarrow 0$ gesetzt.

3.3.2 Hydraulischer Gradient und Strömungskraft

Der Quotient nach Abb. 3.5 aus Druckdifferenz $\Delta h = H_1 - H_2$ und durchströmter Länge Δl wird mit

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} [-] \quad (3.8)$$

als *hydraulischer Gradient* (hydraulisches Gefälle) bezeichnet.

Wenn $i > 0$ ist, wirkt eine Druckdifferenz (Potenzialdifferenz). Das Wasser beginnt zu strömen, mit dem Ziel einen Druckausgleich zu erreichen. Die auf das Korngerüst wirkende Strömungskraft

$$f_s = i \cdot \gamma_w \quad (3.9)$$

ist eine Massenkraft, die in der Fließrichtung des Wassers dabei infolge des Strömungswiderstands vom Wasser an das Korngerüst des Bodens abgegeben wird. Bei senkrechter Strömung führt die Strömungskraft zur Änderung der Wichte des durchströmten Bodens (oftmals auch als „effektive Wichte“ bezeichnet), um

$$f_s = \Delta \gamma' = \pm i \cdot \gamma_w \quad (3.10)$$

auf

- Strömung von oben nach unten:

$$\gamma^* = \gamma' + i \cdot \gamma_w \quad (3.11)$$

- Strömung von unten nach oben:

$$\gamma^* = \gamma' - i \cdot \gamma_w \quad (3.12)$$

3.3.3 Filtergeschwindigkeiten und *Darcy'sches* Filtergesetz

Es sind zwei Geschwindigkeiten im durchströmten Korngerüst zu unterscheiden:

- Wahre Geschwindigkeit v_q : die wirkliche Geschwindigkeit, mit der das Wasser durch die Porenräume fließt (Porenströmung), d. h. $v_q = Q/A_{\text{Poren}}$.
- Filtergeschwindigkeit v : fiktive Geschwindigkeit, mit der das Wasser durch den gesamten Durchflussquerschnitt (Porenräume und Festschubstanz) fließt (Filterströmung), d. h. $v = Q/A$.

Mit dem *Durchlässigkeitsbeiwert* k [m/s] (Filtergeschwindigkeit eines Bodens mit $i = 1$) und dem vorhandenen i wurde experimentell das Gesetz von *Darcy* für die Filtergeschwindigkeit

$$v = k \cdot i \text{ [m/s]} \quad (3.13)$$

abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass diese lineare Beziehung nur für einen bestimmten, aber häufig in der Praxis vorliegenden Bereich (laminare Strömung) gültig ist. Abb. 3.6 zeigt schematisch den Gültigkeitsbereich von Gl. (3.13), wobei dieser nach *Gabener (1984)* für bindige Böden wie folgt erweitert werden kann:

$$v = k \cdot (i - i_0) \quad (3.14)$$

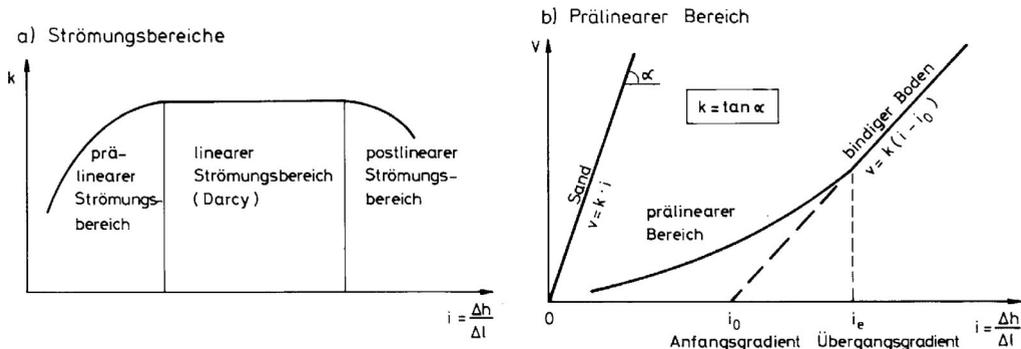


Abb. 3.6: Bereiche der Filterströmung

Größenordnungen der Übergangsgradienten und Anfangsgradienten sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

Tab. 3.1: Übergangs- und Anfangsgradienten, aus *Gabener (1984)*

Bodenart	Übergangsgradient	Anfangsgradient
Tonböden	$5 \leq i_e \leq 12$	$0,4 \leq i_0 \leq 3,7$
Schluffe	$2 \leq i_e \leq 9$	$0,3 \leq i_0 \leq 1,7$
Grobschluffe	$0 \leq i_e \leq 3$	$0 \leq i_0 \leq 0,5$

Wegen in der Regel vorhandener unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften des Bodens in horizontaler und vertikaler Richtung (Anisotropie) gilt häufig:

$$k_h \cong 10 \cdot k_v \quad (3.15)$$

Insgesamt gibt es folgende Einschränkungen für die Gültigkeit des *Darcy*-Gesetzes:

- *Sättigungsgrad des Bodens:* Vorausgesetzt wird vollständige Wassersättigung. Bei Teilsättigung gilt das Gesetz von *Darcy* in der vorliegenden Form nicht. Hinweise dazu siehe *Kézdi (1969)*.
- *Viskosität:* Das Gesetz von *Darcy* gilt für alle *Newton*'schen Flüssigkeiten. Mit der Viskosität einer Flüssigkeit ändert sich ihr Fließverhalten im Boden, d. h. sie fließt schneller oder langsamer als Wasser bei gleicher Beschaffenheit des Bodens und gleichem Gradienten.

- *Laminarer Bereich:* Das Gesetz von *Darcy* gilt nur für den linearen Strömungsfall, der auch als laminare Strömung bezeichnet wird. Abb. 3.6 zeigt dazu die Zusammenhänge.
- *Inkompressibel:* Die betrachtete Flüssigkeit wird als inkompressibel angenommen.
- *Einphasiger Fluss:* Das *Darcy*-Gesetz gilt ohne Modifikation grundsätzlich nur für einphasigen Fluss, also nicht für ein Gemisch zweier Flüssigkeiten. Als Beispiel sei auf ein Öl-Wasser-Gemisch verwiesen. Hierfür müsste die Gleichung wesentlich erweitert werden.

Für den allgemeinen räumlichen Fall (anisotroper, inhomogener Bodenkörper) kann Gl. (3.13) dreidimensional unter Verwendung eines räumlichen Koordinatensystems wie folgt beschrieben werden:

$$\{v\} = [k] \cdot \{i\} \quad (3.16a)$$

$$\text{mit: } \{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix}; [k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \text{ und } \{i\} = \begin{Bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{Bmatrix}$$

$\{v\}$ resultierende Geschwindigkeit als Vektor der Einzelgeschwindigkeiten dargestellt [m/s]

$\{i\}$ hydraulisches Gefälle des Gesamtsystems [-]

In der Regel sind im Untergrund verschiedene Durchlässigkeiten in x -, y - und z -Richtung vorhanden (Anisotropie). Die Strömung erfolgt in Richtung fallender Standrohrspiegelhöhen. Aus Gl. (3.16a) ergibt sich dann für das dreidimensionale Kontinuum:

$$v_x = -k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.16b)$$

$$v_y = -k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.16c)$$

$$v_z = -k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.16d)$$

3.4 Erweiterung auf geschichtete Böden

3.4.1 Begriffe

Die Strömung im Untergrund wird bei geschichteten Böden von den Kenngrößen der jeweiligen Schichten und deren Abfolge beeinflusst. Dabei sind:

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$	Durchlässigkeit der jeweiligen Schicht
$d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$	Dicke der jeweiligen Schicht
$q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$	Durchfluss durch die betrachtete Schicht
$i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$	hydraulisches Gefälle in der jeweiligen Schicht

3.4.2 Vertikale Strömung

Für vertikale Strömungen gilt, dass die Schicht mit der geringsten Durchlässigkeit (auch wenn sie nur sehr dünn ist) den k -Wert des gesamten Schichtensystems maßgeblich beeinflusst. Es wird davon ausgegangen, dass bei rein vertikaler Durchströmung eines gleichbleibenden Querschnitts der Durchfluss und die Fließgeschwindigkeit in jeder Schicht gleich groß sein muss (Abb. 3.7).

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = q_{const.} \quad (3.17)$$

mit

$$q = \text{const.}$$

$$v = \text{const.}$$

$$i \neq \text{const.}$$

Daraus ergibt sich

$$v = k_{1z} \cdot i_1 = k_{2z} \cdot i_2 = k_{3z} \cdot i_3 = \dots = k_{nz} \cdot i_n$$

$$i \cdot H = i_1 \cdot H_1 + i_2 \cdot H_2 + i_3 \cdot H_3 + \dots + i_n \cdot H_n$$

Der resultierende k -Wert für vertikale Strömung ist

$$k_z = \frac{H}{\frac{H_1}{k_{z1}} + \frac{H_2}{k_{z2}} + \frac{H_3}{k_{z3}} + \dots + \frac{H_n}{k_{zn}}} \quad (3.18)$$

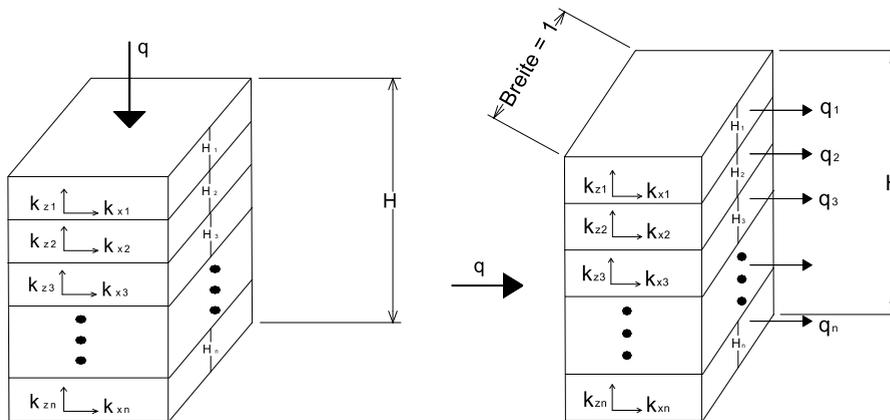


Abb. 3.7: Vertikale und horizontale Strömung in geschichteten Böden, nach Das (1997)

3.4.3 Horizontale Strömung

Für horizontale Strömungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Durchfluss der jeweiligen Schichten gleich groß ist. Vielmehr bemisst er sich aus der Durchlässigkeit der jeweiligen Schicht und des darin abgebauten hydraulischen Gefälles. Die Schichten

wirken weitestgehend unabhängig voneinander (Abb. 3.7). Es gilt

$$q = q_{x1} + q_{x2} + q_{x3} + \dots + q_{xn} \quad (3.19)$$

mit

$$q_{x1} = k_{x1} \cdot i \cdot H_1$$

$$q_{x2} = k_{x2} \cdot i \cdot H_2$$

$$q_{x3} = k_{x3} \cdot i \cdot H_3$$

und der sich daraus ergebende horizontale Durchlässigkeitsbeiwert für das betrachtete Schichtensystem

$$k_x = \frac{1}{H} \cdot (k_{x1} \cdot H_1 + k_{x2} \cdot H_2 + k_{x3} \cdot H_3 + \dots + k_{xn} \cdot H_n) \quad (3.20)$$

3.4.4 Variationsmöglichkeiten der Untergrunddurchlässigkeiten

Aus den allgemeinen Betrachtungen ergeben sich folgende Bedingungen nach Tab. 3.2 für mögliche Untergrunddurchlässigkeiten im 2D-Fall.

Tab. 3.2: Möglichkeiten der Untergrunddurchlässigkeiten im 2D-Fall

homogen, isotrop:	$\underbrace{k_{x1} = k_{x2}}_{\text{homogen}}$	$\underbrace{k_x = k_{z1}}_{\text{isotrop}}$	Es gilt: k_{x1}, k_{x2}, \dots
homogen, anisotrop:	$\underbrace{k_{x1} = k_{x2}}_{\text{homogen}}$	$\underbrace{k_{x1} \neq k_{z1}}_{\text{anisotrop}}$	horizontale Durchlässigkeitsbeiwerte in den jeweiligen Schichten
heterogen, isotrop:	$\underbrace{k_{z1} \neq k_{z2}}_{\text{heterogen}}$	$\underbrace{k_x = k_{z1}}_{\text{isotrop}}$	k_{z1}, k_{z2}, \dots vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte in den jeweiligen Schichten
heterogen, anisotrop:	$\underbrace{k_{z1} \neq k_{z2}}_{\text{heterogen}}$	$\underbrace{k_{x1} \neq k_{z1}}_{\text{anisotrop}}$	

3.5 Potenzialtheorie

Bei der Wasserströmung im Untergrund wird aufgrund von Reibung zwischen Wasser und Boden Energie bzw. Potenzial abgebaut. Die mechanische Beschreibung dieses Vorgangs wird als Potenzialtheorie bezeichnet und ist nachfolgend hergeleitet. Grundlage der Ableitung ist die Kontinuitätsgleichung und das Gesetz von *Darcy* im räumlichen Fall mit