

Conrad Boley (Hrsg.)

Handbuch Geotechnik

Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen

PRAXIS



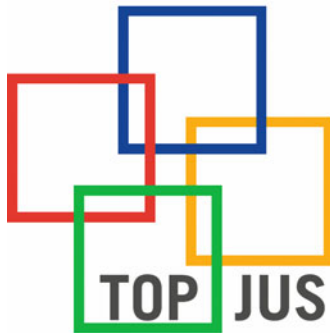
**VIEWEG+
TEUBNER**

Conrad Boley (Hrsg.)

Handbuch Geotechnik

KOMPETENZ IM (SPEZIAL-)TIEF- UND TUNNELBAURECHT

www.topjus.de



RECHTSANWÄLTE
**KUPFERSCHMID ENGLERT
PICHL GRAUVOGL & PARTNER**
MÜNCHEN
INGOLSTADT
PFAFFENHOFEN
SCHROBENHAUSEN
NORDHAUSEN

TOPJUS – Rechtsanwälte mit 5 Standorten in Deutschland und über 80 Mitarbeitern befassen sich seit über 35 Jahren mit allen Rechtsfragen, die das „*Bauen in der (oft unbekannten) Tiefe*“ mit dem Überraschungsbaustoff Baugrund bzw. Gebirge im In- und Ausland mit sich bringen. Zahlreiche Spezialveröffentlichungen und viele Schulungsveranstaltungen an Universitäten und Hochschulen, bei Bauindustrieverbänden sowie Inhouse-Seminaren unterstreichen dies.

Dazu zählen insb. das „*Handbuch des Baugrund und Tiefbaurechts*“ (4. Aufl. 2011), das „*Baurecht-Taschenbuch: Sonderbauverfahren Tiefbau*“ (1. Aufl. 2011), der „*Beck'sche Vergaberechts- und VOB-Kommentar, Teil C*“ (2. Aufl. 2008), das „*Handbuch Nebenangebote – Sondervorschläge im Vergabe – und Vertragsrecht*“ (1. Aufl. 2009) und der „*Baukommentar*“ (2. Aufl. 2010).

TOPJUS-Rechtsanwälte beraten und begleiten in juristischer Hinsicht z.B. bei großen Pipeline-Vorhaben, Tunnelbauten, Baugruben, Tiefgaragenanlagen, Kanal- und Gleisbaustrecken, Straßenbau-, Wasserstraßen- und Schleusenprojekten oder auch Deponiesanierungen, beginnend bei der Planungsvorbereitung über die Ausschreibung, Vergabe, Ausführung, Beweissicherung, Abrechnung und Nachtragsbearbeitung bis zum Abschluss der Mängelhaftung.

Die Anwälte übernehmen die außergerichtliche und gerichtliche Vertretung und sind als Schlichter, Rechtsgutachter, Adjudikatoren oder Schiedsrichter in dieser schwierigen Materie tätig. Die Kenntnis der Tiefbautechnologien ist dabei unerlässlich.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. jur. Klaus Englert

Präsident des Instituts für Deutsches und Internationales Baurecht an der Humboldt-Universität zu Berlin
Hon.-Prof. an der Hochschule Deggendorf
Wiss.Beirat der STUVA und des CBTR

Mitglied Normenausschuss DIN EN 1997-2
Mitglied DVA-Arbeitsgruppe ATV DIN 18301, 18302 und 18305; Fachanwalt für Bau- und Architektenrecht; Mediator

Dr. jur. Bastian Fuchs, LL.M.

Vorstandsmitglied des CBTR
Lehrbeauftragter für Tiefbaurecht an der Universität der Bundeswehr München
Mitglied Normenausschuss DIN EN 1997-2
Fachanwalt für Bau- und Architektenrecht

Prof. Dr. jur. Josef Langenecker

Fachanwalt für Arbeitsrecht, ordentl. Prof. für Handels-, Gesellschafts-, Bauarbeits- u. Umweltrecht an der Hochschule Deggendorf

Josef Grauvogl

Vizepräsident des CBTR
Centrum für Deutsches und Internationales Baugrund- und Tiefbaurecht
Fachanwalt für Bau- und Architektenrecht; Lehrbeauftragter für Baurecht an der Technischen Hochschule Stuttgart

Michael Maurer

Wiss.Beirat des CBTR
Lehrbeauftragter für Bau- und Bauversicherungsrecht
Hochschule Deggendorf
FA Bau- u. Architektenrecht

Florian Englert

Rechtsanwalt, Schwerpunkt Bau- u. Wirtschaftsstrafrecht

Angela Oblinger-Grauvogl

Wissenschaftliche Beirätin des CBTR
Lehrbeauftragte für Tiefbaurecht an der Hochschule Augsburg
Fachanwältin für Bau- und Architektenrecht

Martin Vens-Cappell

Wissenschaftl. Beirat des CBTR
Fachanwalt für Bau- und Architektenrecht

Dr. jur. Günther Schalk

Vorstandsmitglied des CBTR
Lehrbeauftragter für Bau-, Vergabe- und Umweltrecht an der Hochschule Deggendorf
Chefredakteur Unternehmerbrief Bauwirtschaft
Fachanwalt für Bau- und Architektenrecht

Stephanie Englert, LL.M.

Rechtsanwältin, Schwerpunkt Internationales Recht, gewerblicher Rechtsschutz

Kontakt:

Lenbachstr. 40, 86529 Schrobenhausen, Tel.: 08252/89460 Fax: 08252 / 894645

e-mail: englert@topjus.de / grauvogl@topjus.de / fuchs@topjus.de

Conrad Boley (Hrsg.)

Handbuch Geotechnik

Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen

Mit 620 Abbildungen und 185 Tabellen

Die Autoren

Dietmar Adam, Sonja Bente, Conrad Boley,
Roland Börger, Gebhard Dausch, Klaus Englert,
Winfried Entenmann, Helmut Ferrari, Bastian Fuchs,
Alfred Haack, Roman Marte, Claas Meier,
Friederike Meyer, Karl Morgen, Monika Paulus-Grill,
Florian Scharinger, Stefan Schmitz, Bernd Schuppener,
Siegfried Stelzig, Ulrich Trunk, Christian Paul Waibel,
Jimmy Wehr, Jörg Zimbelmann und Yazhou Zou

PRAXIS



**VIEWEG+
TEUBNER**

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.

1. Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Karina Danulat | Annette Prenzer

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



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

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

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Umschlagbild: ARGE City-Tunnel Leipzig Los C

von Michael Wieser, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Berlin

Satz: FROMM MediaDesign, Selters im Taunus

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0372-6

Vorwort

Geotechnik ist sowohl ein theoretisch sehr anspruchsvolles Fach als auch ein Gebiet, in dem Erfahrung und praxisgerechte Lösungen eine große Rolle spielen. Daraus erwachsen besondere Anforderungen für die Lösung geotechnischer Aufgabenstellungen. Hierbei möchte das vorliegende Werk als Handbuch Unterstützung leisten.

Möglich wird dies vor allem durch die mitwirkenden Autoren, die alle theoretisch exzellent ausgewiesen sind und gleichzeitig durch ihre langjährige Praxiserfahrung das erforderliche Wissen für einzelne Aufgabenstellungen genau kennen. Vielfältiges Know-How in einem Handbuch übersichtlich zu vereinen, war eine Leitlinie aller Autoren. Damit verbunden war der Anspruch, für die in der Praxis in Planung und Ausführung tätigen Ingenieure als auch für Studierende das Buch so zu konzipieren, dass es eine erste Wissensquelle auf dem Schreibtisch sein möge.

Die einzelnen Kapitel dokumentieren die Vielfalt, die unser Fach mittlerweile besitzt. Dabei werden die Wurzeln der Geotechnik, die sich über die Jahrzehnte aus dem Wasserbau zu einem eigenständigen Fachgebiet entwickelt hat, immer wieder sichtbar. „Without Water there will be no Soil Mechanics“, stellte bereits der Begründer der modernen Bodenmechanik Karl von Terzaghi fest. Daran hat sich bis heute nichts geändert. Und somit nimmt das Wasser im Baugrund sowohl hinsichtlich der theoretischen Beschreibung seiner Wirkungen als auch hinsichtlich seiner konstruktiven Beherrschung im vorliegenden Werk einen besonderen Stellenwert ein.

Die Grundlagen der Bodenmechanik werden so vermittelt, dass trotz einer kompakten Darstellung das vertiefte Verständnis ohne Vereinfachungen erhalten bleibt. Auf längere Herleitungen und Begründungen wird überwiegend verzichtet und ausführlich auf die entsprechende Literatur verwiesen. Nachweiskonzepte und Sicherheitsfragen in der Geotechnik werden im Zusammenhang in einem Kapitel behandelt. Hierbei werden besonders das mittlerweile vollständig umgesetzte Teilsicherheitskonzept sowie der derzeitige Stand der nationalen und europäischen Normung erläutert.

In der geotechnischen Praxis, insbesondere im Spezialtiefbau, hat häufig die Geräte- und Verfahrenswahl entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Lösungen. Somit wurde diesen Aspekten der notwendige Platz eingeräumt und hierbei die Erfahrungen aus der Baupraxis besonders betont.

Das vorliegende Werk schließt mit einem Kapitel über Baugrund- und Tiefbaurecht und somit an einer wichtigen und oft entscheidenden Schnittstelle unseres Faches zu einem angrenzenden Fachgebiet.

Das Handbuch Geotechnik wird geprägt von seinen durchweg in der Praxis stehenden Autoren, die in ihrem beruflichen Alltag in Baufirmen, Ingenieurbüros und in der öffentlichen Verwaltung hohe Verantwortung tragen. Zusätzlich zu ihren vielen Verpflichtungen haben sie noch die Zeit gefunden, ihr Wissen in diesem Buch zu dokumentieren und so anderen Ingenieuren zur Verfügung zu stellen. Dafür gilt ihnen mein herzlicher Dank.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Mitarbeiter Dipl.-Ing. Jörg Zimbelmann, der mich mit hohem Engagement und großer Umsicht bei der Organisation des Werkes unterstützt hat.

Dem Verlag Vieweg+Teubner und hier insbesondere Frau Karina Danulat danke ich für die jederzeit konstruktive Zusammenarbeit.

München, September 2011

Conrad Boley

Autorenverzeichnis

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Dietmar Adam** leitet den Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien und ist mit seinem Ziviltechnikerbüro Geotechnik Adam ZT GmbH weltweit als Konsulent mit Schwerpunkt Geotechnik tätig.

Dr.-Ing. **Sonja Bente** arbeitet nach Promotion am Institut für Statik der TU Braunschweig als Bauingenieurin bei der WTM Engineers GmbH in Hamburg. Ihre Tätigkeitsschwerpunkte liegen im Bereich der Objekt- und Tragwerksplanung im konstruktiven Ingenieurbau.

Prof. Dr. **Roland Börger** bearbeitet als Diplom-Geologe unter anderem Verfahren zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Altlasten, kontaminierten Standorten sowie von Boden- und Gewässer-Verunreinigungen. Schwerpunkt der Tätigkeit sind organische Kontaminationen in Grundwasserleitern und Oberflächengewässern.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Conrad Boley** ist Ordinarius für Bodenmechanik und Grundbau an der Universität der Bundeswehr München. Er ist Inhaber des Büros Boley Geotechnik, Beratende Ingenieure mit Standorten in München und Stuttgart. Prof. Boley ist Mitglied in zahlreichen Normenausschüssen und Fachgremien. Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Erd-, Grund- und Felsbau und von der Bayerischen Ingenieurekammer-Bau eingetragen als Beratender und bauvorlageberechtigter Ingenieur. Vom Eisenbahnbundesamt (EBA) ist Prof. Boley anerkannt als Gutachter und Prüfer für Erd- und Grundbau, Spezialtiefbau und Tunnelbau.

Dipl.-Ing. **Gebhard Dausch** ist Mitglied der Geschäftsführung der Bilfinger Berger Spezialtiefbau GmbH in Frankfurt. Zudem ist er Mitarbeiter des Technischen Komitee CEN/TC 288 und einiger nationaler Normenausschüsse im Spezialtiefbau.

Dipl.-Ing. (FH), BEng (Hons) **Helmut Ferrari** ist Bauingenieur und Geschäftsführer der EDR GmbH, einem Münchener Ingenieurbüro mit den Schwerpunkten Wasserbau, Wasserkraft, Tunnelbau, Spezialtiefbau und Projektmanagement.

Dr. jur. **Bastian Fuchs**, LL.M. ist Fachanwalt und Lehrbeauftragter für Bau-, Vergabe- und Architektenrecht an der Universität der Bundeswehr München und Mitglied im DIN-Normungsausschuss DIN EN 1997-2 mit DIN 4020 sowie im VDI-Ausschuss VDI 6202. Er ist außerdem Attorney-at-Law in New York, USA.

Prof. Dr. jur. **Klaus Englert** ist Fachanwalt und Honorarprofessor für Bau- und Architektenrecht an der Hochschule Deggendorf, Mitglied unter anderem im DIN-Normungsausschuss DIN EN 1997-2 mit DIN 4020 sowie im Arbeitsausschuss „Sachverständiger für Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und Präsident des Deutschen Instituts für Baurecht an der Humboldt-Universität zu Berlin.

Dipl.-Geol. Dr. **Winfried Entenmann** ist seit 1984 Mitarbeiter der IGB Ingenieurgesellschaft, Hamburg. Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für den Gefährdungspfad Boden – Wasser und tätig in den Bereichen Projektsteuerung, Bauoberleitung, umwelttechnische und geotechnische Beratung.

Prof. Dr.-Ing. **Alfred Haack** ist Bauingenieur und arbeitet seit 45 Jahren bei und mit der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. – STUVA, Köln (bis Ende 2007 als geschäftsführendes Vorstandsmitglied und seitdem als freier Mitarbeiter). Seine Tätigkeitsschwerpunkte liegen im Bereich der Bauwerksabdichtung und des Brandschutzes für unterirdische Verkehrsanlagen und im Ingenieurbau. Zudem ist er seit 15 Jahren Honorarprofessor an der TU Braunschweig.

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Roman Marte** ist Ingenieurkonsulent für Bauwesen und Teilhaber des Ingenieurbüros GDP ZT-OG mit Standorten in Graz, Klagenfurt und Oberalm/Salzburg, Österreich. Zudem unterrichtet er als Lehrbeauftragter am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU-Graz und wird dort 2012 die Leitung des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau als Universitätsprofessor übernehmen.

Dr.-Ing. **Claas Meier** ist Projektleiter im Ingenieurbüro Boley Geotechnik in München und aktives Mitglied des Arbeitskreises Rüstungsaltslasten des Ingenieurtechnischen Verbands für Altslastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA).

Dr.-Ing. Dipl.-Geol. **Friederike Meyer** ist als Projektleiterin im Bereich Geotechnik bei CDM Consult in Berlin tätig. Ihre thematischen Schwerpunkte liegen in der Umweltgeotechnik und der geotechnischen Baugrundbeurteilung.

Dr.-Ing. **Karl Morgen** ist Bauingenieur und Prüfeningenieur sowie geschäftsführender Gesellschafter des Ingenieurbüros WTM ENGINEERS GmbH. Zudem arbeitet er in zahlreichen Normungsgremien und berufsständischen Verbänden mit.

Dr. phil. **Monika Paulus-Grill** promovierte an der Uni Salzburg in Erdwissenschaften (Petrographie, Mineralogie und Geologie) und ist Mitarbeiterin im Ingenieurbüro GDP ZT-OG in Oberalm/Salzburg, Österreich mit Arbeitsschwerpunkten im Bereich der Baugrunderkundung und Umweltgeologie.

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Florian Scharinger** ist Bauingenieur und Mitarbeiter im Ingenieurbüro GDP ZT-OG in Graz, Österreich. Im Rahmen des Doktoratsstudiums an der TU-Graz widmete er sich der Weiterentwicklung eines Stoffgesetzes für weiche Böden, während die aktuellen Tätigkeitsschwerpunkte im Bereich der Planung und Ausführung von geotechnischen Projekten liegen.

Dr.-Ing. **Stefan Schmitz** ist Bauingenieur und Mitarbeiter der Bauer Spezialtiefbau GmbH. Herr Schmitz war neben der Leitung der Gruppe Messtechnik unter anderem als Projektleiter und Projektdirektor im In- und Ausland tätig. Derzeit leitet Herr Schmitz den Bereich Kleinbohrtechnik im Unternehmen.

Dr.-Ing. **Bernd Schuppener** war Leiter der Abteilung Geotechnik der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe und Vorsitzender des für den Eurocode 7 zuständigen CEN-Ausschusses „Geotechnische Bemessung“. Er ist Leiter des Lenkungsremiums Grundbau, Geotechnik des Normenausschusses Bauwesen im DIN und Vorsitzender des Ausschusses Sicherheit im Erd- und Grundbau.

Dipl.-Ing. **Siegfried Stelzig** ist Inhaber des Büros IGU in Mindelheim. Schwerpunkt des Büros sind die Erarbeitung von Problemlösungen für Grundwasserabsenkungen und Bodenstabilisierung durch Grundwasserentzug.

Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Trunk** ist Dozent für Geotechnik an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Muttenz/Basel in den Bereichen Lehre, Forschung und Beratung und war zuvor lange Jahre bei einem international ausgerichteten Unternehmen im Spezialtiefbau tätig.

Dipl.-Ing. **Christian Paul Waibel** ist Absolvent der Studienrichtung Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Wien und arbeitet als Geotechniker im Zivilingenieurbüro BGG Consult, Wien.

Dr.-Ing. **Wolfgang Wehr** M.Sc. ist als Bauingenieur Leiter der Abteilung Corporate Services beim Spezial-Tiefbauunternehmen Keller Holding GmbH. Weiterhin ist er in verschiedenen Arbeitskreisen der DGGT vertreten als auch Lehrbeauftragter für Spezialtiefbau an der TU Dresden.

Dipl.-Ing. **Jörg Zimbelmann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau an der Universität der Bundeswehr München. Davor war er mehrere Jahre als Projekttingenieuer im Technischen Büro Tiefbau der Ed. Züblin AG in Stuttgart tätig.

Dr.-Ing. **Yazhou Zou** ist Bauingenieur und wissenschaftlicher Laborleiter (Oberingenieur) für Bodenmechanik und Grundbau am Lehrstuhl der Universität der Bundeswehr München.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	VII
1 Grundlagen der Geologie	1
1.1 Begriffsdefinitionen und Spektrum	1
1.2 Der Kreislauf der Gesteine	1
1.3 Glossar ausgewählter Fest- und Lockergesteine	2
1.3.1 Festgesteine	2
1.3.2 Lockergesteine	6
1.4 Literatur	11
2 Eigenschaften und Klassifikation von Böden	13
2.1 Zusammensetzung von Böden und Bodengefüge	13
2.1.1 Korngrößen und Korngrößenverteilung	13
2.1.2 Entstehung und Mineralbestand von Bodenkörnern	15
2.1.3 Kornformen und Kornrauigkeit	16
2.1.4 Kornoberfläche	17
2.1.5 Bodengefüge	17
2.1.6 Porenwasser und Porenluft	19
2.2 Physikalische Eigenschaften von Böden	21
2.2.1 Bodenkenngrößen	21
2.2.2 Zustandskenngrößen	25
2.3 Mechanische Eigenschaften von Böden	29
2.3.1 Wechselwirkung zwischen Wasser und Bodenkörnern	29
2.3.2 Verdichtungseigenschaften von Böden	34
2.3.3 Kompressionseigenschaften und Formänderungsverhalten	37
2.3.4 Festigkeit	43
2.4 Bodenklassifikation	51
2.5 Literatur	59
3 Baugrunderkundung, geotechnische Labor- und Feldversuche	61
3.1 Baugrunderkundung	61
3.1.1 Aufgaben der Baugrunderkundung	61
3.1.2 Geologische Grundlagen	62
3.1.3 Grundlagen gemäß DIN 4020 und EC 7-2	62
3.1.4 Erkundungsverfahren	63
3.1.5 Ausbau von Bohrungen zu Grundwassermessstellen	94
3.1.6 Bohrlochgeophysikalische Verfahren	95
3.2 Laborversuche	96
3.2.1 Versuche zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften	96
3.2.2 Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	109

3.3	Feldversuche	128
3.3.1	Dichtebestimmung im Feld	129
3.3.2	Plattendruckversuche	131
3.3.3	Flügelsondierungen	133
3.3.4	Porenwasserdruckmessungen	133
3.3.5	SPT-Test, Bohrlochrammsondierung	133
3.3.6	Seitendrucksondierung	134
3.3.7	Erddruckmessungen	134
3.4	Literatur	135
4	Bodenmechanik	139
4.1	Grundlagen der Elastizitätstheorie	139
4.1.1	Spannungen auf ein Volumenelement	139
4.1.2	Hauptspannungen	139
4.1.3	Dehnungen	140
4.1.4	Elastizitätsgleichungen für einen isotropen Stoff	141
4.1.5	Ebener Verformungszustand	142
4.1.6	Zusammenstellung der Beziehungen zwischen elastischen Parametern	144
4.2	Spannungsermittlung	144
4.2.1	Spannungen infolge Eigengewicht	144
4.2.2	Spannungen infolge von Lasten	147
4.3	Berechnung von Zeitsetzungen	159
4.3.1	Einleitung	159
4.3.2	Eindimensionale Konsolidationssetzung	159
4.3.3	Konsolidationssetzungen bei Vertikaldrainagen	165
4.3.4	Sekundärsetzungen	167
4.3.5	Bestimmung des Konsolidationsbeiwertes	167
4.4	Erddruck	169
4.4.1	Begriffe und Bezeichnungen	169
4.4.2	Erddrucktheorie nach Coulomb	171
4.4.3	Erddrucktheorie nach Rankine	181
4.4.4	Berechnungsverfahren für praktische Anwendungen	185
4.5	Materialmodelle	199
4.5.1	Einführung	199
4.5.2	Grundbegriffe	199
4.5.3	Grundlagen der Materialmodelle für elastisches Materialverhalten	203
4.5.4	Grundlagen der elastoplastischen Materialmodelle	206
4.5.5	Elastoplastische Materialmodelle für Böden	212
4.6	Literatur	223
5	Nachweiskonzepte und Sicherheit in der Geotechnik	225
5.1	Eurocodes und Deutsche Normen (DIN) des Bauingenieurwesens	225
5.1.1	Die Eurocodes	225
5.1.2	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik	227
5.1.3	Die Einführung der Eurocodes in Deutschland	228
5.1.4	Pflege und Weiterentwicklung der Eurocodes	230

5.2	Das „Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung“	
	Band 1 „Allgemeine Regeln“	231
5.2.1	Einführung	231
5.2.2	Geotechnische Kategorien	232
5.2.3	Bemessungssituationen	232
5.2.4	Charakteristische Werte	234
5.2.5	Grenzzustände der Tragfähigkeit	238
5.2.6	Versagen des Baugrunds (GEO)	240
5.2.7	Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit (EQU)	250
5.2.8	Grenzzustand des Aufschwimmens (UPL)	251
5.2.9	Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping (HYD)	252
5.2.10	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	253
5.2.11	Beobachtungsmethode	254
5.3	Die Finite-Elemente-Methode zum Nachweis von Grenzzuständen	255
5.3.1	Allgemeines	255
5.3.2	Grenzzustände der Tragfähigkeit	256
5.3.3	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	256
5.4	Literatur	257
6	Wasserhaltung	259
6.1	Wozu Wasserhaltung?	259
6.2	Ziel der Wasserhaltung	259
6.3	Arten der Wasserhaltung	260
6.3.1	Offene Wasserhaltung	260
6.3.2	Geschlossene Wasserhaltung	261
6.3.3	Kombination von offener und geschlossener Wasserhaltung	261
6.3.4	Ausführungstechnik Grundwasserentnahme	261
6.4	Berechnung der Grundwasserabsenkung für stationäre Verhältnisse	263
6.4.1	Grundlagen allgemein	263
6.4.2	Grundlagen der Berechnung von Grundwasserabsenkungen	268
6.4.3	Besondere Einflüsse auf die Grundwasserabsenkung	279
6.5	Berechnung der Wasserhaltung	283
6.5.1	Grundwasserabsenkung durch Brunnen	283
6.5.2	Grundwasserentspannung	289
6.5.3	Vakuumbeaufschlagung von Schwerkraftbrunnen	295
6.5.4	Vakuumwasserhaltung Kleinbrunnen	298
6.5.5	Offene Wasserhaltung	299
6.5.6	Restwasserhaltung in dichten Trögen	307
6.5.7	Versickerung	312
6.6	Ausführung der Wasserhaltung	316
6.6.1	Schwerkraftentwässerung mit Brunnen	316
6.6.2	Vakuumentwässerung	319
6.6.3	Offene Wasserhaltung	320
6.7	Fehlerquellen der Wasserhaltung	321
6.7.1	Wahl des Wasserhaltungssystemes	321
6.7.2	Dimensionierung der Wasserhaltung	322
6.7.3	Ausführung	323
6.8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Baugrubensystem – Wasserhaltung	324
6.9	Literatur	325

7	Altlasten, Kontaminationen und Kampfmittel	327
7.1	Begriffsdefinitionen	329
7.2	Rechtliche und gesetzliche Grundlagen	335
7.3	Kategorisierung und Klassifizierung von Boden-, Bodenluft- und Gewässerverunreinigungen	337
7.3.1	Chemische Kontaminationen	339
7.4	Branchentypische Kontaminationsprofile	354
7.5	Erkundung kontaminationsverdächtiger Standorte	357
7.5.1	Erfassung und Erstbewertung (Phase I)	359
7.5.2	Orientierende Untersuchungen (Phase II a)	360
7.5.3	Gefährdungsabschätzung (Phase II b)	361
7.5.4	Sanierung, Sicherung und Nachsorge (Phase III)	362
7.6	Praxisbeispiele	364
7.6.1	Altstandorte	364
7.6.2	Altablagerungen	370
7.7	Sicherungs- und Sanierungsverfahren	371
7.7.1	Allgemein	371
7.7.2	Sicherung	373
7.7.3	Umlagerung von Boden	374
7.7.4	Dekontamination	375
7.7.5	Grundwassersanierung	376
7.7.6	Sicherung von Deponien	379
7.8	Einschlägige Normen	385
7.8.1	Allgemeines	385
7.8.2	Geotechnische Erkundung, Durchführung von Boden-, Bodenluft-, Deponiegas- sowie Gewässeruntersuchungen	385
7.9	Literatur	392
7.10	Gesetze und Verordnungen	394
8	Geotechnische Bauverfahren	397
8.1	Einleitung	397
8.2	Bohrtechnik	398
8.2.1	Einleitung	398
8.2.2	Bohrverfahren und Bohrwerkzeuge für Kleinlochbohrungen	401
8.2.3	Bohrverfahren und Bohrwerkzeuge für Großlochbohrungen	406
8.3	Pfähle	413
8.3.1	Einleitung	413
8.3.2	Regelwerke	414
8.3.3	Bohrpfähle ($0,3 \text{ m} \leq D \leq 3,0 \text{ m}$)	414
8.3.4	Verdrängungspfähle	422
8.3.5	Mikropfahl ($\varnothing < 0,3 \text{ m}$)	426
8.4	Ankertechnik	428
8.4.1	Einleitung	428
8.4.2	Regelwerke	429
8.4.3	Aufbau von Verpressankern	430
8.4.4	Stahlzugglieder bei Verpressankern	430
8.4.5	Korrosionsschutz bei Verpressankern	432

8.4.6	Herstellung von Verpressankern	434
8.4.7	Spannverfahren	435
8.4.8	Sonderanker	436
8.5	Schlitzwandtechnik	436
8.5.1	Einleitung	436
8.5.2	Regelwerke	437
8.5.3	Ausrüstung	437
8.5.4	Herstellungsverfahren	440
8.5.5	Ausführungsschritte	442
8.6	Spundwandbauweise	448
8.6.1	Allgemeines	448
8.6.2	Baustoffe und Spundwandprofile	448
8.6.3	Einbringtechniken	452
8.6.4	Einbringhilfen	460
8.6.5	Lagegenauigkeit	462
8.6.6	Ziehen von Spundbohlen	464
8.6.7	Dichtigkeit – Probleme und Maßnahmen zur Ertüchtigung	464
8.6.8	Hinweise zu Entwurf und Ausführung	465
8.7	Literatur	466
9	Baugrundverbesserung	469
9.1	Einleitung	469
9.2	Vertikaldrains	469
9.2.1	Einleitung	469
9.2.2	Verfahren und Geräte	470
9.2.3	Entwurf und Bemessung	474
9.2.4	Überwachung und Prüfung	476
9.2.5	Zusammenfassung	477
9.3	Tiefenrüttelverfahren	478
9.3.1	Einleitung	478
9.3.2	Verfahren und Geräte	478
9.3.3	Entwurf und Bemessung	481
9.3.4	Überwachung und Prüfung	487
9.3.5	Zusammenfassung	489
9.4	Fallplattenverdichtung	489
9.4.1	Einleitung	489
9.4.2	Verfahren und Geräte	489
9.4.3	Entwurf und Bemessung	492
9.4.4	Überwachung und Prüfung	494
9.4.5	Zusammenfassung	495
9.5	Düsenstrahlverfahren	495
9.5.1	Einleitung	495
9.5.2	Verfahren und Geräte	495
9.5.3	Entwurf und Bemessung	498
9.5.4	Überwachung und Prüfung	500
9.5.5	Zusammenfassung	501

9.6	Verdichtungsinjektion	501
9.6.1	Einleitung	501
9.6.2	Verfahren und Geräte	501
9.6.3	Entwurf und Bemessung	504
9.6.4	Überwachung und Prüfung	505
9.6.5	Zusammenfassung	506
9.7	Hebungsinjektion	506
9.7.1	Einleitung	506
9.7.2	Verfahren und Geräte	506
9.7.3	Entwurf und Bemessung	509
9.7.4	Überwachung und Prüfung	511
9.7.5	Zusammenfassung	512
9.8	Injektionen ohne Baugrundverdrängung	513
9.8.1	Einleitung	513
9.8.2	Verfahren und Geräte	513
9.8.3	Entwurf und Bemessung	521
9.8.4	Überwachung und Prüfung	524
9.8.5	Zusammenfassung	526
9.9	Tiefe Bodenvermörtelung	527
9.9.1	Einleitung	527
9.9.2	Verfahren und Geräte	528
9.9.3	Entwurf und Bemessung	534
9.9.4	Überwachung und Prüfung	538
9.9.5	Zusammenfassung	539
9.10	Zusammenfassung	539
9.11	Literatur	539
10	Flachgründungen	543
10.1	Einführung	543
10.2	Bemessung von Flachgründungen	544
10.2.1	Beschreibung der Boden-Bauwerk-Interaktion zur Ermittlung von Sohldruckverteilung und Setzungen	545
10.2.2	Geotechnische Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	560
10.2.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	565
10.2.4	Nachweisführung mit Hilfe der aufnehmbaren Bodenpressung	568
10.3	Praxis-Hinweise zu Bemessung und Ausführung	568
10.4	Literatur	569
11	Pfahlgründungen	571
11.1	Einleitung	571
11.1.1	Anwendungsbereich	571
11.1.2	Maßgebliche nationale technische Vorschriften für Pfähle	571
11.1.3	Pfahlgründungssysteme – Einzelpfahllösungen, Pfahlroste, Pfahlgruppen, Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP)	572
11.1.4	Baugrunduntersuchungen für Pfahlgründungen	572
11.2	Einzelpfähle – Tragverhalten und Widerstände bei axialer Belastung	575
11.2.1	Allgemeines	575
11.2.2	Axiales Tragverhalten	575

11.2.3	Ermittlung der Pfahlwiderstände für axiale Belastung – Allgemeines ...	578
11.2.4	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus statischen Probelastungen ...	578
11.2.5	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus dynamischen Probelastungen	580
11.2.6	Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten	581
11.2.7	Axiale Pfahlwiderstände aus empirischen und erdstatistischen Verfahren	593
11.2.8	Pfahlwiderstände bei Mantel- und Fußverpressung	594
11.3	Einzelpfähle – Tragverhalten und Widerstände bei Belastung quer zur Pfahlachse	595
11.3.1	Biegeeweiche Pfähle – Bettungsmodulverfahren	596
11.3.2	Kurze starre Pfähle – Dalbentheorie nach Blum	597
11.4	Bemessung	598
11.4.1	Sicherheitskonzept	598
11.4.2	Einwirkungen aus dem Baugrund	599
11.4.3	Nachweis der Tragfähigkeit	607
11.4.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	610
11.5	Pfahlgruppen	610
11.5.1	Axial beanspruchte Pfahlgruppen	610
11.5.2	Tragverhalten und Nachweise von horizontal beanspruchten Pfahlgruppen	612
11.6	Probelastungen	613
11.6.1	Statische axiale Pfahlprobelastungen	614
11.6.2	Statische Probelastungen quer zur Pfahlachse	615
11.6.3	Dynamische Pfahlprobelastungen	617
11.7	Qualitätssicherung bei der Bauausführung	619
11.7.1	Allgemeines	619
11.7.2	Qualitätsprüfungen	619
11.8	Literatur	621
12	Böschungen und konstruktive Hangsicherungen, Baugruben	623
12.1	Einführung	623
12.2	Systematik der Böschungs- und Hangsicherungen	623
12.3	Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen	625
12.3.1	Belastungen und Widerstände	625
12.3.2	Nachweisverfahren	635
12.3.3	Berechnungsverfahren	643
12.3.4	Sicherheitskonzepte	646
12.3.5	Normative Berechnungs- und Bemessungsgrundlagen	647
12.4	Freie Böschungen	652
12.4.1	Allgemeines	652
12.4.2	Neigungsempfehlungen für die Vordimensionierung von Böschungen	653
12.4.3	Rechnerische Standsicherheitsnachweise	653
12.5	Ingenieurbioologische Sicherungsmaßnahmen	676
12.5.1	Deckbauweisen	676
12.5.2	Stabilbauweisen	677
12.5.3	Kombinierte Bauweisen	679

12.6	Konstruktive Böschungssicherungen	680
12.6.1	Bewehrte Erde Konstruktionen	680
12.6.2	Geokunststoffbewehrte Stützkonstruktionen	684
12.6.3	Bodenvernagelung	687
12.7	Stützbauwerke	690
12.7.1	Flach gegründete Stützbauwerke	690
12.7.2	Tief gegründete Stützbauwerke	721
12.7.3	Verankerungen	755
12.8	Sonstige Stützkonstruktionen	757
12.8.1	Fangedämme	757
12.8.2	Aufgelöste Stützkonstruktionen	761
12.8.3	Galerien	762
12.8.4	Schalentragwerke	763
12.9	Entwässerungsmaßnahmen	764
12.9.1	Hangstabilisierung durch Entwässerung	764
12.9.2	Entwässerungseinrichtungen bei Stützkonstruktionen	766
12.10	Baugrubensicherungen	768
12.11	Erdwärmennutzung durch Stützkonstruktionen	772
12.12	Literatur	775
13	Tunnelbau und unterirdischer Hohlraumbau	781
13.1	Einführung	781
13.1.1	Geschichte und Bedeutung	781
13.1.2	Statistik	787
13.2	Begriffe und Bezeichnungen	790
13.3	Offene Bauweisen	792
13.3.1	Einführung und geschichtlicher Hintergrund	792
13.3.2	Baugruben	793
13.3.3	Stahlbetonkonstruktionen	798
13.3.4	Rahmenkonstruktionen aus Spundwänden mit Stahlbetonwänden und -decken	802
13.3.5	Deckelbauweise	806
13.3.6	Rahmenvorschub	811
13.4	Geschlossene Bauweisen	812
13.4.1	Einführung	812
13.4.2	Einfluss des Gebirges	813
13.4.3	Vortrieb	822
13.4.4	Konventionelle Vortriebsmethoden	823
13.4.5	Tunnelvortriebsmaschinen	827
13.4.6	Schildmaschinen	828
13.4.7	Tunnelbohrmaschinen	837
13.4.8	Sicherungsmittel	841
13.4.9	Ausbau	851
13.5	Abdichtung	853
13.6	Der Vortrieb kleiner Querschnitte	861
13.6.1	Allgemeines	861
13.6.2	Verfahrensübersicht	862

13.6.3	Verfahrenswahl und Vorerkundung	862
13.6.4	Rohrvortrieb	863
13.6.5	Mikrotunnelbau	867
13.6.6	Das HDD-Verfahren	868
13.7	Literatur	871
14	Geotechnik im Hochwasserschutz	875
14.1	Geotechnische Fragestellungen	875
14.2	Grundlagen geotechnischer Planungen	877
14.2.1	Baugrund und Grundwasser	877
14.2.2	Bestandsbauwerke	878
14.2.3	Maßgebende Auswirkungen	879
14.3	Systeme	880
14.3.1	Deiche	880
14.3.2	HWS-Mauern und HWS-Wände	882
14.3.3	Mobile Systeme	884
14.3.4	Rückhaltebecken und Flutpolder	886
14.3.5	Entlastungstollen und Flutmulden	888
14.4	Bemessungswasserstand	888
14.4.1	Freibord	889
14.5	Deiche	891
14.5.1	Aufbau und Baustoffe	891
14.5.2	Dichtungssysteme	894
14.5.3	Oberflächendichtungen	894
14.5.4	Innendichtungen	896
14.6	Sanierung bestehender Deiche	902
14.7	Überströmbare Deiche	904
14.8	Standsicherheitsnachweise	905
14.8.1	Geotechnische Untersuchungen	905
14.8.2	Maßgebende Lastfälle	907
14.8.3	Nachweise	908
14.8.4	Geotechnische Nachweise	911
14.9	Leitungen und Bauwerke in Deichen	917
14.9.1	Leitungen	917
14.9.2	Bauwerke	918
14.10	Gehölze an Deichen	918
14.11	Qualitätskontrollen im Deichbau	920
14.11.1	Während der Baumaßnahme	920
14.11.2	Nach der Fertigstellung	922
14.12	Deichverteidigung	923
14.13	Literatur	924
15	Geotechnische Messverfahren	925
15.1	Einleitung	925
15.2	Geotechnische Messungen	926
15.2.1	Ziel geotechnischer Messungen	926
15.2.2	Gemessene bzw. abgeleitete Größen	929
15.2.3	Messmethoden	935

15.2.4	Messinstrumente	937
15.2.5	Auslegung und Planung von Mess- und Überwachungs- programmen	949
15.2.6	Aufzeichnung von Messergebnissen	950
15.2.7	Auswertung von Messergebnissen	951
15.2.8	Anwendung geotechnischer Messverfahren	952
15.3	Geographische Informationssysteme (GIS)	957
15.3.1	Welche Informationen können abgefragt werden?	957
15.3.2	Einsatz der GIS-Informationen in der Praxis	959
15.3.3	Informationsquellen – Beispiele	962
15.4	Literatur	963
16	Baugrund- und Tiefbaurecht	965
16.1	Ausschreibungsvorgaben zum Baugrund und die richtige Baugrundausschreibung	965
16.1.1	„Ohne Grund und Boden geht das Bauen nicht.“	965
16.1.2	Was ist „Baugrund“?	966
16.1.3	DIN EN 1997-2, ergänzt durch DIN 4020 als „Baugrund-Bibel“	967
16.1.4	Der Baugrund ist Baustoff	971
16.1.5	Rechtsfolgen aus der Gleichsetzung von Baugrund und Baustoff	972
16.1.6	Zwischenergebnis	974
16.1.7	Ausschreibungsvorgaben des § 7 VOB/A	974
16.2	Die Beweisführung bei Tiefbauarbeiten	977
16.2.1	Beweislastregeln für die Vergütung	978
16.2.2	Beweislastregeln für Schadensersatzansprüche	978
16.2.3	Beweisgrundsätze für §§ 906 und 909 BGB	980
16.2.4	Beweisgrundsätze für die Mangelfreiheit	980
16.2.5	Besonderheiten der Beweisführung bei Tiefbauleistungen	981
16.2.6	Beweismöglichkeiten im Tiefbau	989
16.2.7	Anwendung der „5-M-Methode“ bei Tiefbauleistungen	991
16.3	Checkliste für Tiefbauarbeiten	993
16.4	Sonderprobleme beim Tiefbau	994
16.4.1	„Bauhilfen“ – ein Überblick	994
16.4.2	Definitionen: „Baubehelf“, „Bauhilfsgewerk“ und „Hilfsbauwerk“	995
16.4.3	Die baurechtliche Relevanz der Begriffe	998
16.4.4	Abnahme, Vergütung, Sicherheiten und Mängelhaftung bei Hilfskonstruktionen bzw. Bauhilfsgewerken	1000
16.5	Der Bundesgerichtshof und die Baugrundprobleme	1003
16.6	Schlussbemerkung	1004
	Sachwortverzeichnis	1005

1 Grundlagen der Geologie

Conrad Boley

1.1 Begriffsdefinitionen und Spektrum

Die Geologie ist eine Naturwissenschaft, die sich mit dem Bau und der Geschichte des Erdkörpers sowie seiner Entwicklung beschäftigt. Dabei stehen vor allem die Prozesse im Vordergrund, welche die Erde formen und sie einer ständigen Veränderung und Entwicklung aussetzen. Die **endogenen Prozesse**, deren Ursprung im Erdinneren liegt, sind Motor der Plattentektonik. Diese wiederum ist Auslöser der Orogenese (Gebirgsbildung) und der Bildung neuer Kruste. Zudem verursacht sie Naturkatastrophen wie Erdbeben und Tsunamis. Geologische Vorgänge an der Erdoberfläche, die durch Faktoren bestimmt werden, die von außen auf die Erde einwirken, werden als **exogen** bezeichnet. Physikalische und chemische Vorgänge lassen das Gestein verwittern und Böden entstehen. Lockermassen werden abgetragen (**Erosion**) und an anderer Stelle abgelagert (**Sedimentation**).

1.2 Der Kreislauf der Gesteine

Aus den Wechselwirkungen zwischen exogenen und endogenen Prozessen lässt sich der **Kreislauf der Gesteine** ableiten. Dabei werden die drei beteiligten Gesteinsgruppen – **Magmatite, Metamorphite und Sedimentgesteine** – durch die zwei Systeme Plattentektonik und Klima im Erdinneren bzw. auf der Erdkruste gebildet (Bild 1-1).

Magmatische Gesteine (auch als **Magmatite** bzw. **Erstarrungsgesteine** bezeichnet) entstehen durch Aufstieg und Kristallisation heißer Gesteinsschmelzen (**Magmen**), die durch das Aufschmelzen von Gesteinen der Unterkruste oder des oberen Mantels im Erdinneren gebildet werden. Bleibt das Magma beim Aufstieg in der Erdkruste stecken, kommt es durch langsames Abkühlen zur Bildung großer Kristalle. Es entstehen grobkörnige **Intrusivgesteine** oder **Plutonite**. Ein typisches Plutonisches Gestein ist der **Granit**, mit der klassischen Mineralzusammensetzung Feldspat, Quarz und Glimmer. Treten die Schmelzen in Form von Vulkanausbrüchen an die Oberfläche, kommt es zur schnellen Abkühlung. Das Resultat daraus sind feinkörnige bis glasige **Effusivgesteine** oder **Vulkanite**, wie z. B. **Basalt**.

Sämtliche Gesteine an der Erdoberfläche kommen unter den Einfluss der **Verwitterung**. Durch die Einwirkung von Luft, Eis (Gletscher), Temperatur, Schwerkraft und der Lebewelt werden die **kompakten Festgesteine** bruchstückartig in lockeres Sedimentmaterial zerlegt bzw. vom Wasser aufgelöst und gegebenenfalls anschließend durch Wasser (**fluvial**) und Wind (**äolisch**) verfrachtet, was in der Geologie als **Erosion** bezeichnet wird [1]. Schließlich werden die Sedimentmassen an den Rand der Kontinente transportiert und im Meer abgelagert. Der Prozess, der die lockeren Sedimente in feste und kompakte Sedimentgesteine überführt, wird als **Diagenese** bezeichnet. Die Überlagerung jüngerer Gesteinsmassen führt zur **Kompaktion**. Durch zusätzlich eindringende Fluide kann es zur Ausfällung von Mineralen kommen, was zum Prozess der Sedimentverfestigung (**Lithifizierung**) beiträgt. Ein typisches Sedimentgestein ist der **Sandstein**, der in Flüssen und Meeren entsteht.

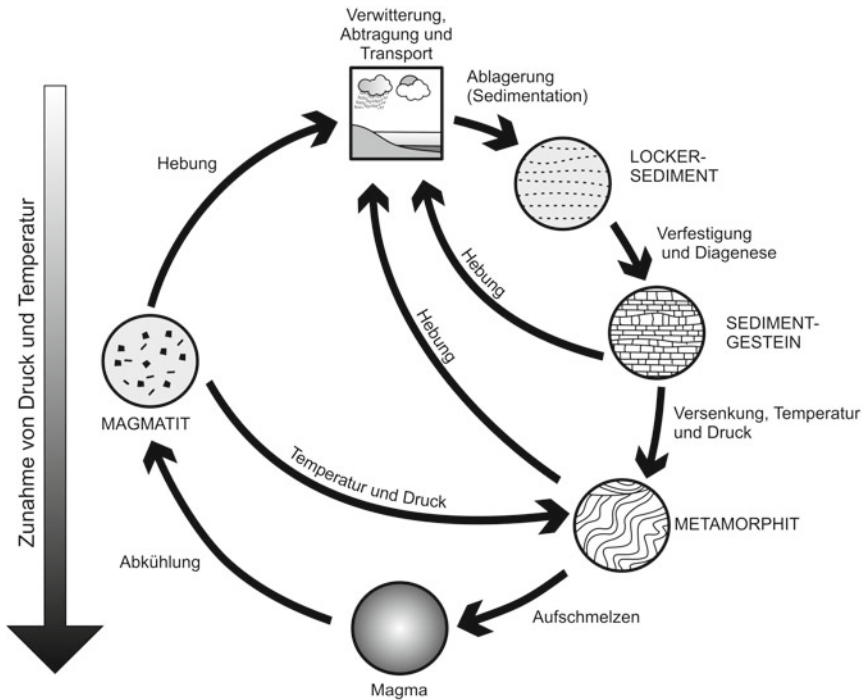


Bild 1-1 Kreislauf der Gesteine

Werden Sedimentgesteine und Magmatite durch plattentektonische Prozesse in tiefere Bereiche der Erde versenkt, kommt es durch Erhöhung von **Druck und Temperatur** zur Änderung des Mineralbestands, der chemischen Zusammensetzung und zur Änderung des Gefüges in festem Zustand [12]. Es entstehen **Metamorphite**, die oft ein parallel gerichtetes, engständiges Flächengefüge, die sogenannte Schieferung, aufweisen [10]. Ein häufig vorkommendes metamorphes Gestein ist der **Gneis**, dessen Ausgangsgestein der Granit ist.

Bei fortdauernder Absenkung wird das Gestein wieder aufgeschmolzen (**Anatexis**) und der Kreislauf beginnt von Neuem.

Die Zunahme der Gesteinstemperatur mit der Tiefe wird als **geothermischer Gradient** bezeichnet, der in der oberen Kruste ca. 3 K („Kelvin“) pro 100 m beträgt [1]. Der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdinneren sorgt für eine ständige Produktion von Wärme, die durch die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine Richtung Erdoberfläche transportiert wird.

1.3 Glossar ausgewählter Fest- und Lockergesteine

1.3.1 Festgesteine

Konglomerat

Konglomerate sind diagenetisch verfestigte Schotter, deren Komponenten angerundet sind. Sie entstehen in Flüssen und Flussdeltas, wenn es in den Poren zwischen den Komponenten

zur Ausfällung von calcitischem bzw. silikatischem Bindemittel kommt. Ein bekanntes Konglomerat ist der **Nagelfluh** (Bild 1-2). Diese calcitisch verfestigten Schotter, die in den letzten Eiszeiten abgelagert wurden, sind vor allem im Alpenvorland weit verbreitet.

Breccie (Brekzie)

Breccien sind verfestigte Trümmergesteine, deren grobkörnige Komponenten im Gegensatz zum Konglomerat auf Grund der kürzeren Transportweite eckig bis kantig ausgebildet sind. Sie entstehen zum Beispiel aus Schuttmaterial an Bergflanken und Schutthängen ebenfalls durch die Zementation der Komponenten (**diagenetische Breccie**). In Trockengebieten kann es durch Muren bzw. Schichtfluten an Gebirgsrändern zur Ablagerung von **Fanglomeraten** kommen. Des Weiteren werden durch tektonische Bewegungen an Störungszonen sogenannte **Störungsbreccien** gebildet (Bild 1-3).

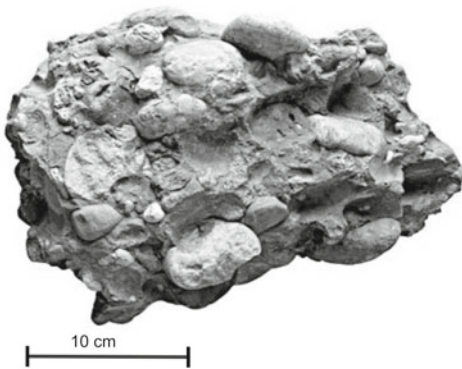


Bild 1-2 Konglomerat (Nagelfluh) [13]



Bild 1-3 Störungsbreccie (hellgraue Dolomitbruchstücke in weißer Dolomitmatrix) [12]

Sandstein

Er enthält je nach Transportweite und Reifegrad Quarzminerale sowie Feldspäte und andere Gesteinsbruchstücke. Bei einem Feldspatanteil von mehr als 25 % wird er als **Arkose**, bei mehr als 25 % Gesteinsbruchstücken wird er als **lithischer Sandstein** bezeichnet [8]. Die Verfestigung der Komponenten erfolgt durch das Ausfällen mineralischer Zemente (**Bindemittel**). Sandsteine können kieselig, calcitisch, tonig sowie ferritisch gebunden sein. Je nach Art des Bindemittels reicht die Festigkeit von gering fest (tonig gebunden) bis hochfest (silikatisch gebunden).

Tonstein, Mergel, Kalkstein

Tonsteine bestehen aus einem Korngemisch von Tonmineralen und Quarzfragmenten. Sie sind meist gering- bis mittelfest, nicht verwitterungsbeständig und zum Teil quellfähig bei Wasserzutritt [6]. Enthalten Tonsteine zwischen 25 % und 75 % Kalk, werden sie als **Mergel** bezeichnet (Bild 1-4). Im Gegensatz zum reinen **Kalkstein** brausen Mergel beim Beträufeln mit verdünnter Salzsäure etwas schwächer und mit deutlich erkennbarer brauner Farbe auf. Die spröde reagierenden Kalksteine weisen zudem höhere Druckfestigkeiten auf und neigen in humiden Gebieten zur **Verkarstung**.

	95	85	75	65	% Kalk (CaCO ₃)		35	25	15	5	
Hochprozentiger Kalkstein	Mergeliger Kalk	Mergel-Kalk	Kalk-mergel	Mergel			Ton-mergel	Mergel-ton	Mergeliger Ton	Hochprozentiger Tonstein (Kaolin)	
	5	15	25	35	% Ton (=Nicht-Karbonat)		65	75	85	95	

Bild 1-4 Nomenklatur der natürlichen Kalk-Ton-Mischungen

Darunter versteht man die durch **Lösungsverwitterung** hervorgerufene Abtragung von Karbonaten und Evaporiten. Geschieht dies an der Oberfläche, entstehen mit der Zeit **Karstlandschaften** (Bild 1-5). Zudem weisen die angelösten Gesteine wechselnd tiefe Rillen und Rinnen auf, die als **Karren** (Bild 1-6) bezeichnet werden. Sickert das Regenwasser ein, kann es durch die Lösung zur Bildung von weit verzweigten unterirdischen Hohlräumen (**Karsthöhlen**) kommen. Diese Auslaugung (**Subrosion**) führt zu Massendefiziten im Untergrund. Als Folge daraus sackt das darüber liegende Material ab und es entstehen schüsselförmige Eintiefungen (**Einsturzdolinen**).



Bild 1-5 Karstlandschaft



Bild 1-6 Rinnenkarren

Dolomitstein

Dieser ist makroskopisch in vielen Fällen nur schwierig vom Kalkstein zu unterscheiden. Er ist oft zuckerkörnig bis spätig ausgebildet und reagiert nicht beim Salzsäuretest. Durch sein sprödes Bruchverhalten ist er häufig kleinstückig zerklüftet, wobei die Klüfte oft mit Calcit verheilt sind. Ebenso wie Kalkstein kann es durch Lösungsverwitterung zur Verkarstung kommen. Trotz seiner geringeren Löslichkeit ist er verwitterungsanfälliger als Calcit, da die einzelnen Kristalle beim Eindringen von Fluiden ihren Zusammenhalt verlieren.

Evaporite (z. B. Gips, Anhydrit, Steinsalz)

Diese drei Gesteine gehören zu den chemischen Sedimenten und entstehen durch die Anreicherung der im Wasser gelösten Salze bei Verdunstung bzw. totaler Eindampfung und werden daher als **Evaporite** bezeichnet. Sie sind hoch wasserlöslich, was oft zu großräumigen Auslaugungen im Untergrund führt. Bei entsprechendem Überlagerungsdruck sind sie **plastisch** verformbar. Vor allem Steinsalz ist wegen seiner geringen Dichte äußerst mobil und kann in Form von **Salzstöcken** (bzw. **Salzdiapiren**) in die Nähe der Erdoberfläche aufsteigen (**Salztektonik**, **Halokinese**). Eine in geotechnischer Hinsicht besondere Eigenschaft ist die **Quellfähigkeit** von Anhydrit bei Wasserzutritt (Volumenzunahme bis zu 64 % [6]). Dies führt zu gewaltigen Drücken im Sediment, wodurch das primäre Sedimentgefüge in der Regel gestört wird. Es entsteht in diesem Fall **Schlangen-** oder **Gekröse-gips**. An der Oberfläche kann es infolge von Quellvorgängen bei Wasserzutritten zu beträchtlichen Hebungen kommen, wie dies in neuerer Zeit in den anhydrithaltigen Schichten des Gipskeupers in Baden-Württemberg aufgetreten ist [4], [5].

Rauhwacke (Zellenkalk, Zellendolomit)

Wegen ihrer hohen Löslichkeit sind Evaporite in humiden Klimaten an der Oberfläche nicht zu finden. Infolge von Lösungsverwitterung reichern sich dunkle, tonig-siltige Verunreinigungen an, die sogenannte **Residualsedimente** bilden. Die Tone sind häufig oberhalb von Salzdiapiren zu finden und dichten diese auf Grund ihrer wasserstauenden Wirkung ab. Zudem kann es durch das Lösen der Evaporite und dem damit verbundenen Volumenverlust zum Einsturz und zur Brecciation überlagernder Schichten (meist Dolomit) kommen. Die sekundär entstandenen Breccien können durch zirkulierende Kluftwässer calcitisch zementiert werden. Da die Dolomitbruchstücke eine geringere Verwitterungsresistenz als Calcit aufweisen, kommt es häufig zum selektiven Herauswittern der Dolomite. Das Resultat sind zellig-poröse Dolomite und Kalke, die als **Rauhwacken** bzw. **Zellenkalk** oder **Zellendolomit** bezeichnet werden. Residualtone und Rauhwacken sind oft der einzige Hinweis an der Oberfläche für Evaporite in der Tiefe.

Granit

Granite sind helle, mittel- bis grobkörnige, meist massige Gesteine mit richtungslosem Gefüge und dem Mineralbestand Feldspat, Quarz und Glimmer. Bei mechanischer Beanspruchung im Gebirge kommt es zur **Kluftbildung**, wobei die einzelnen Klüfte häufig **orthogonal** ausgerichtet sind. Dadurch kann die Verwitterung an den Rändern von granitischen Kluftkörpern angreifen und sandiges Lockermaterial, sogenannten **Granitgrus**, erzeugen. Das Resultat sind schwach gerundete, kissenartige Böcke [10], die bei lang einwirkender Verwitterung den Kontakt zum Gesteinsverband verlieren und als große Felsblöcke abrutschen können, was vor allem bei Böschungen und im Tunnelbau ein erhebliches Risiko darstellt.

Gneis

Gneise haben zwar eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung wie Granite, weisen jedoch durch die Metamorphose ein ausgeprägtes Lagengefüge auf. Dabei wechseln sich helle Bereiche aus Quarz und Feldspäten mit dunkleren Lagen ab, die, die vorwiegend aus Glimmern oder Amphibolen bestehen [11]. Diese Paralleltextur wird als **Schieferung** bezeichnet. Gneise mit einem sedimentärem Ausgangsgestein (z. B. Sandsteine, Arkosen) wer-

den als **Paragneise**, solche mit magmatischem Ausgangsgestein als **Orthogneise** bezeichnet. Gneise haben bei Belastung parallel zu den Trennflächen andere felsmechanischen Eigenschaften als senkrecht dazu. Bei hangparallelem Einfallen der Schieferungsflächen kann es zum Abrutschen einzelner Gesteinspartien kommen. Im Tunnelbau führen Verscheidungen von Tunnelachse und Trennflächen zu geologisch bedingten Mehrausbrüchen.

1.3.2 Lockergesteine

Voraussetzung für die Bildung von Lockergesteinen, die im geotechnischen Sprachgebrauch auch als Böden im eigentlichen Sinne bezeichnet werden, sind von außen angreifende Kräfte, die die Kornbindung von Festgesteinen lockern und diese zersetzen. Man spricht hier von **Verwitterung**. Die **physikalische Verwitterung** zermürbt das Gestein mechanisch, indem es durch Temperaturunterschiede sowie Frost sein Gefüge lockert (**Frostsprengung**). Pflanzenwurzeln sind ebenso in der Lage, mechanisch auf das Gestein einzuwirken (**Wurzelsprengung**). Bei der **chemischen Verwitterung** werden die Gesteine durch das Regenwasser sowie darin enthaltene Stoffe gelöst bzw. chemisch verändert. Die reine **Lösungsverwitterung** betrifft vor allem leicht lösliche Gesteine wie Evaporite. Zudem können kieselensäurereiche Gesteine verändert werden. So entstehen bei der Verwitterung von im Granit enthaltenen Feldspäten **Tonminerale** wie **Kaolinit**, was zur Reduzierung des Gesteinsverbandes führt.

1.3.2.1 Glazigene Böden

Da es in der Erdgeschichte viele Perioden gab, in der große Teile der Erde von Gletschern bedeckt waren, haben glaziale Ablagerungen sowie ihre Erscheinungsformen wesentlichen Einfluss auf den Aufbau und die Eigenschaften des Baugrundes.

Ein Großteil dieser Ablagerungen stammt aus der geologischen Zeit des **Quartärs**. Dieses ist der jüngste Zeitabschnitt der Erde und umfasst die letzten 1,8 Millionen Jahre [14]. Charakteristisch für diesen Zeitraum sind extreme klimatische Bedingungen, mehrere Vereisungsperioden und ihre Hinterlassenschaften. Der geologische Begriff „Quartär“ wird gelegentlich verwendet, um eiszeitlich gebildete Böden wie Schmelzwasserkiese und Geschiebelehme begrifflich zusammenzufassen.

Das stratigraphisch darunter liegende **Tertiär** beschreibt den Zeitabschnitt vor 1,8 bis 65 Millionen Jahren [14]. Wie beim Quartär steht der Begriff Tertiär auch stellvertretend für die feinkörnigen Gesteine (z. B. **Flinz** bzw. **Flinzlehm**), die in diesem Zeitabschnitt gebildet wurden. Im Gegensatz zu den durchlässigen quartären Kiesen sind die tertiären Schichtfolgen häufig wasserstauend. Die tertiären Schichtenserien können auch als **Molassegesteine** bezeichnet werden. Sie bestehen aus dem Abtragungsmaterial, das durch die alpidische Orogenese in die im Norden angrenzenden Senken transportiert wurde.

Im Folgenden wird für einige häufig vorkommende Böden, die aus den letzten Eiszeiten stammen bzw. durch die Mechanik des Eises gebildet wurden, der geologische Hintergrund erläutert.

Beckenton

Diese geschichteten Sedimente entstehen, wenn sich kleinste Schwebstoffe am Grund von Gletscherrückzugsseen absetzen. Da es in diesem Milieu kein Bodenleben gibt, sind die Sedimente **fein laminiert** und weisen eine jahreszeitlich bedingte Hell-Dunkel-Schichtung,

sogenannte **Warven** (deshalb auch **Warventone**), auf. Darüber hinaus können die Tone bzw. Schluffe Grobmaterial enthalten, das in Form von **Dropstones** von driftenden Eisbergen ausgeschmolzen und in das feine Sediment gefallen ist.

Geschiebelehm, Geschiebemergel

Diese Sedimente werden an der Basis des sich bewegenden Gletschereises abgelagert. Im Eis enthaltene Gerölle werden dabei aufgeschmolzen und in den Untergrund gespachtelt. Es entstehen weit gestufte und ungeschichtete Sedimente, deren Korngrößenbereich sich von Tonpartikeln bis zum Blockwerk erstreckt. Bei höherem Kalkgehalt kommt es zur Bildung von **Geschiebemergeln**. Häufig wurde durch die Auflast des Gletschers das Lockermaterial entwässert und stark verdichtet, was großen Einfluss auf die Baugrundeigenschaften hat. Man spricht in diesem Falle von **Vor-** bzw. **Überkonsolidation**. Geschiebelehme können so fest sein, dass sie als Festgesteine zu klassifizieren sind. In der Praxis werden die Gesteine häufig als **Grundmoräne** bezeichnet. In geowissenschaftlicher Hinsicht treffender ist jedoch der Begriff **Belastungstill**.

Moräne

Moränen entstehen, wenn der Gesteinsschutt, den ein Gletscher mit sich trägt, an der Gletscherstirn ausschmilzt, sich akkumuliert und langgezogene Wälle bildet. Die unsortierten und ungeschichteten Sedimente sind im Gegensatz zu den Geschiebelehmen unverdichtet. Der Feinkornanteil ist oft ausgewaschen, so dass nur grobblockige Komponenten übrig bleiben (**Blockmoräne**).

Findlinge

Oftmals kommt es vor, dass mehrere Meter große Blöcke in die glazialen Ablagerungen eingebettet sind, die beim Gletscherrückzug ausgeschmolzen wurden. Diese sogenannten **Findlinge** sind wegen ihrer Größe bautechnisch von wesentlicher Bedeutung. In Geschiebeböden kommen sie besonders an deren Oberfläche vor.

Schmelzwasserkiese

Die vom Gletscher abfließenden Schmelzwasserflüsse hinterlassen vielfach mächtige Sedimentdecken, geschichtete **glazifluviale Schmelzwasserkiese**, die vor allem im süddeutschen Raum weit verbreitet sind (**Münchner Schotterebene**). Da sich die Ablagerungsbedingungen durch Hoch- bzw. Niedrigwässer und Strömungsverhältnisse oft änderten, können grobsandige Einschaltungen und sogenannte **Rollkieslagen** auftreten. Letztere sind grobkörnige Lockergesteine, die durch den hohen Rundungsgrad der Kieskomponenten und einen geringen Feinkornanteil geprägt sind. Auf Grund ihrer hohen Durchlässigkeit und Kohäsionslosigkeit sind Rollkieslagen von wesentlicher bautechnischer Bedeutung.

Deltasediment

Münden Schmelzwasserflüsse in größere Seen, werden die mitgeführten gröberen Partikel am Boden abgelagert. Es entstehen **Deltasedimente**, die an der steil einfallenden Deltafront grobkörnig (kiesig, sandig) und schräggeschichtet sind und Richtung Beckenmitte hin feinkörnig werden, bis sie schließlich als fein laminierte **Beckentone** absedimentiert werden.

1

Löss

In der Umgebung der großen Inlandseismassen haben Fallwinde das feinkörnige Material aus den Böden ausgeweht, das bei nachlassendem Wind oder im Windschatten von Hügeln als **Löss** wieder abgelagert wurde. Die ursprünglich porösen und kalkhaltigen **äolischen Ablagerungen** sind in humiden Klimaten zu kalkfreiem **Lösslehm** verwittert. Lössböden sind häufig gekennzeichnet durch einen hohen Kalkgehalt und Salzbildungen. Daraus resultiert ihre hohe Wasserempfindlichkeit, die zu kollapsartigen Setzungen und Sackungen führen kann [9].

Permafrostboden

In Gebieten mit Jahresmitteltemperaturen unter 0° C bleibt der Boden während eines Großteils des Jahres gefroren. Man spricht dann von **Permafrost**. Nur im Sommer können die obersten Schichten, die sogenannte **aktive Lage**, auftauen. Auf Grund seiner Instabilität kann das weiche Material schon bei extrem geringen Hangneigungen ins Fließen kommen. Dieser Vorgang, der als **Bodenfließen** oder **Solifluktion** bezeichnet wird, ist in erdstatischer Hinsicht von wesentlicher Bedeutung.

Frostmusterboden

Durch den periodischen Wechsel von Auftauen und Gefrieren sowie Bodenfließen kommt es zur Bildung charakteristischer Strukturböden. Ein häufiges Erscheinungsbild sind Sortierungseffekte, bei denen größere Komponenten im Boden ausfrieren, sich an der Oberfläche anreichern und sogenannte **Steinringe** bzw. **Steinnetze** bilden. Lokale Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit des Bodens lassen gefrorene an nicht gefrorene Bereiche angrenzen. Durch die unterschiedliche Volumenzunahme kommt es zum Phänomen der **Bodenkonvektion**. Dadurch wird feinkörniges Material nach oben gepresst. Es entstehen kleine Erdhügel, sogenannte **Erdbülten**.

Schotterterrasse

Diese für das Quartär typische geomorphologische Form entsteht durch das erneute Einschneiden eines Flusses in seinen vorher aufgeschütteten Schotterkörper [10]. Das Resultat sind sich lang hinziehende subparallele Verebnungsflächen, die treppenartig durch scharfe Erosionskanten voneinander getrennt sind.

1.3.2.2 Grundwasserböden und organische Böden

Diese Böden entwickeln sich unter dem Einfluss von Grundwasser bzw. bei Verlandung von Gewässern und sind zeitweilig sogar überflutet. Durch den hohen Anteil an Feinkorn (Ton, Schluff) und organischem Material erfordern sie in bautechnischer Hinsicht eine sorgfältige Untersuchung und Planung. Kennzeichnend sind in der Regel hohe Frostempfindlichkeit und hohe Setzungsaktivität. Organische Böden sind als unmittelbarer Gründungshorizont ungeeignet. Angetroffen werden sie häufig in Talauen und im Verlandungsbereich von Küsten und Seeufern.

Auelehm bzw. Überflutungslehm

In der direkten Umgebung von Flüssen werden nach periodischen Überflutungsereignissen durch nachlassende Strömung extrem feinkörnige **Auelehme** abgelagert. Diese weichen Böden sind durch ihre hohe biologische Aktivität gekennzeichnet und reich an organischer Substanz [7].

Marsch

Marschen sind vegetationsbedeckte, im Gezeitenbereich von Küstengebieten vorzufindende Flachlandschaften. Sie bestehen aus Schlick und den feinkörnigen Sedimenten der Wattenküsten bzw. Flussmündungen und enthalten häufig hohe Anteile an organischer Substanz [13].

Moor

Moore gehören zu den hydromorphen Bildungen humider Klimazonen. Sie besitzen eine mindestens 0,3 m mächtige Torfschicht mit wenigstens 30 % organischer Substanz [13]. Sie werden durch das Grundwasser (**Niedermoor**) bzw. durch Niederschlag (**Hochmoor**) gespeist.

Organogene Schluffe und Tone (Klei bzw. Gley, Schlick, Seekreide)

Der feinklastische (d. h. mineralische) Anteil überwiegt gegenüber dem organischem Anteil. Sie entstehen in Marschen bzw. in limnischem Milieu und weisen im Falle der Seekreide einen sehr hohen Kalkgehalt auf.

Mudde (Gyttja, Faulschlamm)

Bei diesen in Seen abgelagerten Böden überwiegen die organogenen Anteile. Sie bestehen aus zersetzter Pflanzensubstanz und mineralischen Beimengungen aus Ton, Schluff, Sand oder Kalk [4].

Torf, Kohle, Inkohlung:

Gerät pflanzliches Material unter Sauerstoffabschluss (z. B. in Mooren), können sich durch mikrobiellen Abbau kohlenstoffreiche Zersetzungsprodukte (**Torf**) bilden. Geraten diese organischen Lagen durch geologische Vorgänge in Bereiche höheren Drucks und höherer Temperatur, sinken Wassergehalt und Porosität, während Kohlenstoffgehalt und Dichte steigen. Es entstehen aufeinanderfolgend Braunkohle, Steinkohle, Anthrazit und Graphit.

1.3.2.3 Weitere geologische Begriffe

Tuff

Vulkanische Tuffe entstehen durch die Verfestigung vulkanischer Auswurfprodukte und bestehen aus Glas- und Mineralfragmenten. Trotz häufig erkennbarer Schichten gehören sie zu den Vulkaniten. **Kalktuffe** hingegen werden im Süßwasser durch Kalkfällung unter dem Einfluss von Mikroorganismen gebildet und gehören zu den Sedimentgesteinen. Sie werden auch als **Quelltuff** oder **Quellkalk** bezeichnet. Die biogenen Tuffe sind äußerst porös und weisen eine geringe Dichte auf. Durch die ständige Wasserdurchströmung kommt es zunehmend zur Kalkausfällung (**Zementation**) in den Hohlräumen. Es entstehen dichtere Süßwasserkalke, die auch als **Travertine** bezeichnet werden.

Sinter

Sinterkalke hingegen werden ohne die Beteiligung von Mikroorganismen rein auf chemischem Wege gebildet. Es kommt im Boden zur Bildung von **Kalkknollen (Calicheknollen)** sowie in unterirdischen Hohlräumen zur Bildung von **Tropfsteinen**.

Quicktone

Sind Ton-Schluff-Gemische wasserhaltig, können sie **thixotrope Eigenschaften** aufweisen. Sie erscheinen im Normalzustand fest. Bei mechanischer Einwirkung hingegen kann das Porenwasser rasch entweichen und die Partikel verlieren ihren Zusammenhalt. Es kommt zu verflüssigten Sedimentströmen, die z. B. an Hanglagen große Schäden ausrichten können und folglich als Baugrund ungeeignet sind.

Trennflächen

Trennflächen sind Fugen im Gestein, die den Festkörper durchziehen und über die in der Regel keine Zugkräfte übertragen werden können. Man unterscheidet zwischen

- Klüftung
- Bankung (Schichtung)
- Schieferung
- Störung.

Diese können nach verschiedenen Gesichtspunkten beschrieben werden:

- Art der Trennfläche
- Trennflächenorientierung (Einmessen der Raumlage mit dem Gefügekompas und Darstellung im Lagenkugeldiagramm)
- Trennflächenabstände
- Oberflächenbeschaffenheit/Öffnungsweite und Füllungen: teilweise Füllung mit feinkörnigem Lockergestein, Mineralverheilungen, z. B. aus Calcit
- Rauigkeit und Ebenheit
- Durchtrennungsgrad.

Klüftung

Klüfte entstehen durch das Überschreiten der Bruchfestigkeit des Gesteins. Im Gegensatz zur Störung ist keine erkennbare Verminderung der Gesteinsfestigkeit an den Bruchrändern erkennbar. Klüfte entstehen durch tektonische Prozesse, Entlastungs- und Setzungsvorgänge, Hangbewegungen, Temperatureffekte (z. B. physikalische Verwitterung). Die Größenordnung von Klüften reicht von wenigen Millimetern bis zu mehreren Metern. Treten größere Bewegungen entlang der Klüfte auf, spricht man von **Verwerfungen**.

Bankung

Bankung ist der lagenweise Aufbau bei Sedimentgesteinen. Sie entsteht durch primäre Änderung der Sedimentationsbedingungen, wie z. B. nachlassende Strömung.