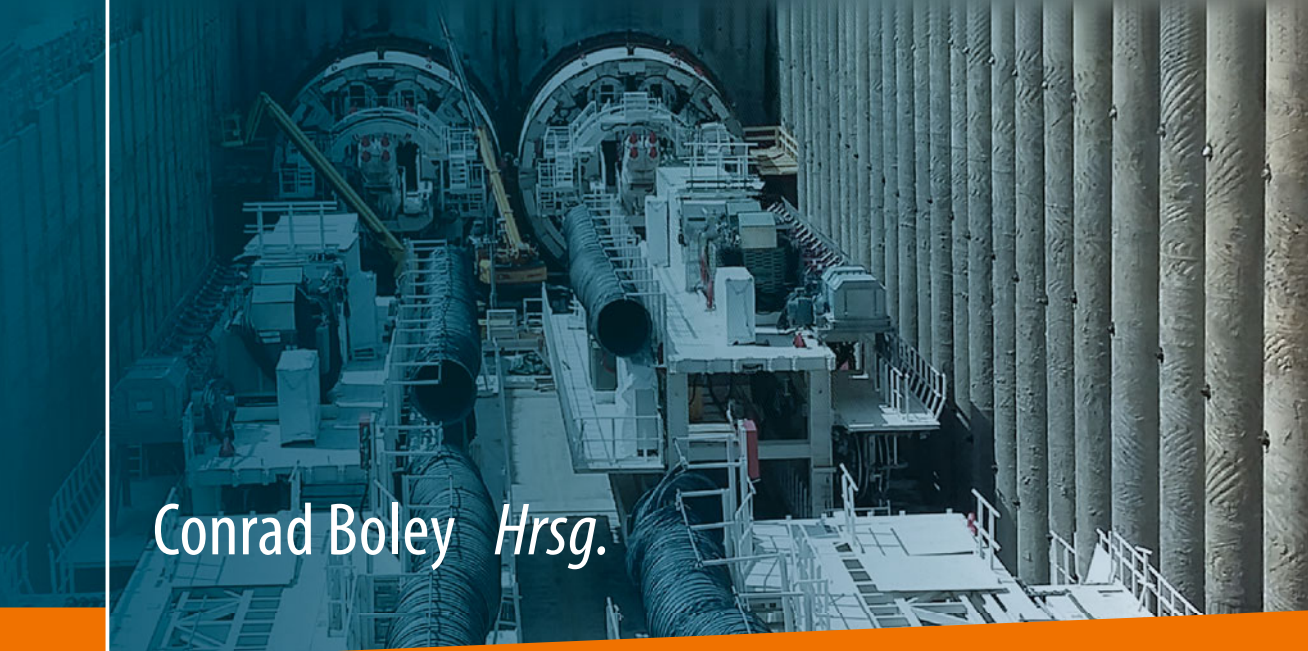




Conrad Boley *Hrsg.*

Handbuch Geotechnik

Grundlagen – Anwendungen –
Praxiserfahrungen

2. Auflage

 Springer Vieweg

Handbuch Geotechnik

Conrad Boley
(Hrsg.)

Handbuch Geotechnik

Grundlagen – Anwendungen –
Praxiserfahrungen

2., vollständig überarbeitete Auflage

Mit 689 Abbildungen

Hrsg.

Conrad Boley

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Universität der Bundeswehr München

München, Deutschland

Mit Beiträgen von

Dietmar Adam, Conrad Boley, Kurt-Michael Borchert, Roland Börger, Gebhard Dausch, Klaus Englert, Winfried Entenmann, Helmut Ferrari, Yashar Forouzandeh, Bastian Fuchs, Johannes Giere, Alfred Haack, Fabian Kirsch, Werner Lienhart, Roman Marte, Claas Meier, Jens Mittag, Karl Morgen, Monika Paulus-Grill, Florian Scharinger, Bernd Schuppener, Sonja Seegert, Philipp Siebert, Siegfried Stelzig, Ulrich Trunk, Edelbert Vees, Paul Waibel, Jimmy Wehr, Lisa Wilfing, Jörg Zimbelmann, Yazhou Zou

ISBN 978-3-658-03054-4

ISBN 978-3-658-03055-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-03055-1>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2012, 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Karina Danulat

Titelbild: Großprojekt Stuttgart 21, Albvorlandtunnel

aufgenommen von: Tilman Sandner, Boley Geotechnik GmbH, München

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Der Erfolg der 1. Auflage war für den Verlag, für mich als Herausgeber und für die beteiligten Autoren eine große Motivation, das Handbuch Geotechnik auf dem eingeschlagenen Weg weiterzuentwickeln. Ich danke zunächst allen Lesern, die uns zur 1. Auflage wertvolle Hinweise zu Verbesserungen und Berichtigungen mitgeteilt haben.

Sämtliche Kapitel wurden aktualisiert, inhaltlich überarbeitet und zum Teil erweitert. Die vorliegende 2. Auflage enthält in diesem Zusammenhang die Anpassung an die mittlerweile aktuelle europäische Normung, insbesondere bezüglich des Eurocode 7, in Deutschland vorliegend als DIN EN 1997-1 und -2.

Inhaltlich bringt das nunmehr vorliegende Kapitel Baugruben eine wesentliche Erweiterung. Die Autoren Prof. Borchert, Dr. Kirsch und Dr. Mittag, die für dieses Kapitel gewonnen werden konnten, geben ihre jahrzehntelange Erfahrung auf diesem Gebiet weiter. Auch das Kapitel Böschungen und konstruktive Hangsicherung hat wichtige inhaltliche Impulse erhalten durch die Erweiterung des Autorentams um Prof. Giere und Prof. Veess. Beim Kapitel geotechnische Messverfahren ist bei der Grazer Autorengruppe Herr Prof. Lienhart und damit weitere Kompetenz auf dem Gebiet der Sensoren und Auswertemethoden hinzugekommen. Nicht zu vergessen sind die für die Geotechnik unverzichtbaren Grundlagen der Geologie. Frau Dr. Wilfing und Herr Siebert bereichern an dieser Stelle mit ihrer Fachkompetenz die vorliegende Auflage.

Allen Autoren gehört mein verbindlicher Dank dafür, dass sie für das Handbuch Geotechnik ihre Zeit zur Verfügung gestellt haben und ihr fundiertes Wissen einer breiten Fachöffentlichkeit zur Verfügung stellen. Meinen Mitarbeitern am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München, ganz besonders Herrn Yashar Forouzandeh, danke ich sehr herzlich für ihre Unterstützung bei der Organisation des Werkes.

Dem Springer-Verlag und hier insbesondere Frau Karina Danulat und Frau Annette Prenzer, die bereits die 1. Auflage begleitet haben, danke ich für die sehr angenehme Zusammenarbeit.

München, Juni 2019

Conrad Boley

Autorenverzeichnis

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Dietmar Adam** leitet den Forschungsbereich 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.

Ministerialdirigent Prof. Dr. **Roland Börger** bearbeitet als Diplom-Geologe unter anderem Verfahren zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Altlasten, kontaminierten Standorten sowie von Boden- und Gewässerverunreinigungen. Schwerpunkt seiner 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 Partner im Büro Boley Geotechnik GmbH, Beratende Ingenieure mit Standorten in München, Stuttgart und Salzburg und als Berater, Planer und Prüfer national und international tätig. Prof. Boley ist Mitglied in zahlreichen Normenausschüssen und Fachgremien. Er leitet die Sachverständigenausschüsse „Tiefbau/Grundbau“ und „Verpressanker/Verpresspfähle“ beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT) sowie den Arbeitskreis „Geotechnik/Tunnelbau“ bei der Bundesvereinigung der Prüfsachverständigen (VPI-EBA). Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Erd-, Grund- und Felsbau und Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau nach PrüfV Bau. Vom Eisenbahnbundesamt (EBA) ist Prof. Boley anerkannt als Gutachter und Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau, Felsbau, Geokunststoffe und Tunnelbau. Er ist Leiter der Fachsektion Felsmechanik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) und Mitglied des Vorstandes.

Prof. Dr.-Ing. **Kurt-M. Borchert** ist Bauingenieur und war geschäftsführender Gesellschafter des Ingenieurbüros GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH. Er war vom Eisenbahnbundesamt (EBA) anerkannter Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau, Spezialtiefbau und ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger. Er ist Mitglied in zahlreichen Normenausschüssen, im Sachverständigenausschuss des Deutschen Institutes für Bautechnik und im Arbeitskreis Baugruben (EAB) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT).

Dipl.-Ing. **Gebhard Dausch** ist Leiter des Geschäftsbereichs Technik und Mitglied der Geschäftsleitung der Bauer Spezialtiefbau GmbH in Schrobenhausen. Zudem ist er als Mitarbeiter in nationalen und internationalen Normenausschüssen im Spezialtiefbau engagiert.

Dipl.-Ing. (FH) **Helmut Ferrari** BEng. (Hons) ist Inhaber der HF consulting engineers in München mit den Schwerpunkten Wasserbau, Wasserkraft, Vergabe- und Vertragsmanagement. Er ist Privater Sachverständiger in der Wasserwirtschaft (PSW) und Mitglied der Fachkommission Wasserwirtschaft der AHO. Darüber hinaus ist er Lehrbeauftragter für Hochwassermanagement an der Universität der Bundeswehr München.

M.Sc. **Yashar Forouzandeh** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München.

Prof. Dr. jur. **Bastian Fuchs**, LL.M. (CWSL) ist Fachanwalt und Honorarprofessor für Deutsches und Internationales Bau- und Architektenrecht an der Universität der Bundeswehr München. Er ist Mitglied in den Normungsgremien DIN EN 1997-2 mit DIN 4020, ATV DIN 18302 (Spezialtiefbauarbeiten zum Ausbau von Bohrungen) sowie Mitglied in verschiedenen Richtlinien-Ausschüssen des VDI. Prof. Fuchs ist Vorstandsmitglied der Deutschen Gesellschaft für Baurecht und Vice Chairman der European Society for Construction Law.

Prof. Dr. jur. **Klaus Englert** ist Fachanwalt und Honorarprofessor für Bau- und Architektenrecht an der THD Technischen Hochschule Deggendorf und Mitglied in den Normungsgremien DIN EN 1997-2 mit DIN 4020, ATV DIN 18301 (Bohrarbeiten), ATV DIN 18302 (Spezialtiefbauarbeiten zum Ausbau von Bohrungen), ATV DIN 18305 (Wasserhaltungsarbeiten) und ATV DIN 18327 (Brunnenbau- und Geothermearbeiten). Weiter ist er in der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. in den Arbeitskreisen „Sachverständige für Geotechnik“ und „Verschleiß und Verklebung“ sowie als wissenschaftlicher Beirat der STUVA und des CBTR tätig.

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

Prof. Dr.-Ing. **Johannes Giere** ist Partner im Baugrundinstitut Prof. Dr.-Ing. E. Veas und Partner GmbH in Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart. Johannes Giere ist Honorarprofessor an der Universität Tübingen. Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Erd- und Grundbau und die Standsicherheit von Böschungen.

Prof. Dr.-Ing. **Alfred Haack** ist Bauingenieur und arbeitet seit über 50 Jahren bei und mit der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) in 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 Honorarprofessor an der TU Braunschweig.

Dr.-Ing. **Fabian Kirsch** promovierte am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig über das Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen. Er ist geschäftsführender Gesellschafter bei der GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH in Berlin und anerkannter Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau. Fabian Kirsch ist Mitglied in mehreren Arbeitskreisen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) und seit 2016 Mitglied im Vorstand. Er ist Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Berlin mit dem Schwerpunkt Baugrundverbesserungen.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Werner Lienhart leitet das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme an der Technischen Universität Graz. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von neuartigen Sensoren und Auswertemethoden zur Überwachung von Infrastrukturanlagen unter der Verwendung von berührungslosen und eingebetteten Sensoren. Vor der Tätigkeit an der Technischen Universität Graz war Prof. Lienhart als Produktmanager-Innovation für die Entwicklung von GNSS Empfängern und Totalstationen bei Leica Geosystems in der Schweiz verantwortlich.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Marte ist seit 2012 Vorstand des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz. Darüber hinaus ist er Partner im Ingenieurbüro GDP ZT GmbH mit Standorten in Graz, Klagenfurt, Oberalm/Salzburg und Wien. Seine Forschungsschwerpunkte und fachlichen Tätigkeitsschwerpunkte liegen unter anderem im Bereich von Massenbewegungen, Bauen auf und in postglacialen, lakustrinen Feinsedimenten sowie der Ist-Zustandsbewertung von Stützkonstruktionen.

Dr.-Ing. **Claas Meier** ist Prokurist und Mitglied der Geschäftsleitung bei der Boley Geotechnik GmbH in München. Er ist aktives Mitglied des Arbeitskreises Rüstungsaltlasten des Ingenieurtechnischen Verbands für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA). Claas Meier promovierte am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München über das Materialverhalten von metastabilen Böden. Er ist Lehrbeauftragter für Bodendynamik an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München.

Dr.-Ing. **Jens Mittag** ist Bauingenieur und promovierte am Grundbauinstitut der Technischen Universität Berlin über das Filtrationsverhalten von Feinstbindemittelsuspensionen. Seit 2004 ist er bei der GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH in Berlin als geschäftsführender Gesellschafter tätig, seit 2018 ist er auch Geschäftsführer der GuD Geotechnik und Umweltgeologie GmbH in Leipzig. Jens Mittag ist anerkannter Prüfsachverständiger für Erd- und Grundbau und Mitglied im Arbeitskreises 2.8 „Stabilisierungssäulen“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT).

Dr.-Ing. **Karl Morgen** ist als Beratender Ingenieur und Prüfeningenieur für das Ingenieurbüro WTM Engineers GmbH tätig. Er arbeitet zudem in zahlreichen Normungsgremien und berufsständischen Verbänden mit.

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. Florian Scharinger ist Ingenieurkonsulent für Bauwesen und geschäftsführender Gesellschafter der GDP ZT GmbH mit Standorten in Graz, Klagenfurt, Oberalm/Salzburg und Wien. Im Rahmen seines Doktoratsstudiums an der Technischen Universität Graz widmete er sich der Weiterentwicklung eines Stoffgesetzes für weiche Böden, während seine aktuellen Tätigkeitsschwerpunkte im Bereich der Planung und Ausführung von geotechnischen Projekten liegen.

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 Lenkungsgremiums Grundbau, Geotechnik des Normenausschusses Bauwesen im DIN und war über viele Jahre Vorsitzender des Ausschusses Sicherheit im Erd- und Grundbau.

Dr.-Ing. **Sonja Seegert** arbeitete nach der Promotion am Institut für Statik der TU Braunschweig als Bauingenieurin bei der WTM Engineers GmbH in Hamburg und ist seitdem beim Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) in Hamburg tätig. Ihre fachlichen Schwerpunkte liegen im konstruktiven Ingenieurbau und der Projektleitung.

M.Sc. **Philipp Siebert** studierte Ingenieurgeologie an der Technischen Universität München und ist Projektleiter bei der Boley Geotechnik GmbH in München.

Dipl.-Ing **Siegfried Stelzig** war Inhaber des Büros IGU GmbH in Mindelheim. Seine Schwerpunkte liegen in der 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. **Paul Waibel** ist Ingenieurkonsulent für Bauingenieurwesen und Geschäftsführer der BGG Consult ZT-GmbH, Wien. Er ist seit vielen Jahren als Fachexperte für Geotechnik, Geologie und Hydrogeologie bei Bauprojekten im In- und Ausland beratend tätig.

Prof. Dr.-Ing. **Edelbert Vees** ist Gründungspartner des Baugrundinstituts Prof. Dr.-Ing. E. Vees und Partner GmbH in Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart. Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baugrund, Gründungen, Bodenmechanik und anerkannter Sachverständiger für Erd- und Grundbau nach Bauordnungsrecht.

Prof. Dr.-Ing. **Wolfgang Wehr** M.Sc. vertritt das Lehrgebiet Geotechnik an der Fachhochschule Erfurt. Zuvor war er viele Jahre für ein international ausgerichtetes Unternehmen im Spezialtiefbau, u.a. als Leiter der Abteilung Corporate Services tätig. Weiterhin ist er in nationalen und internationalen Fachgremien im Spezialtiefbau engagiert.

Dr.-Ing. **Lisa Wilfing** ist Prokuristin und Mitglied der Geschäftsleitung bei der Boley Geotechnik GmbH in München. Sie promovierte am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der Technischen Universität München über die Vortriebsprognose beim maschinellen Tunnelbau im Festgestein. Ihre thematischen Schwerpunkte liegen in der Boden- und Felsmechanik sowie im Tunnelbau.

Dr.-Ing. **Jörg Zimbelmann** ist Bauingenieur und Teamleiter Geotechnik in der Abteilung Bautechnik der Bauer Spezialtiefbau GmbH in Schrobenhausen. Davor war er mehrere Jahre als Projektingenieur im Technischen Büro Tiefbau der Ed. Züblin AG in Stuttgart sowie als Projektleiter im Consulting tätig. Er ist aktives Mitglied in mehreren Normenausschüssen.

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

Wir bauen. Mit Leidenschaft.



Gut geplant und hervorragend umgesetzt – dafür steht die Eiffage Infra-Bau Gruppe.

Als Zusammenschluss von kompetenten und erfolgreich etablierten Baugesellschaften überzeugt die Eiffage Infra-Bau-Gruppe mit einem großen Leistungsangebot und hoher Eigenfertigungstiefe. Zu uns gehören sowohl regional stark verankerte Unternehmen als auch spezialisierte Gesellschaften, die deutschlandweit im Einsatz sind. Für Großprojekte bündeln wir diese Ressourcen und unser Know-how in eigens dafür aufgestellten Geschäftsbereichen in der Düsseldorfer Zentrale.

Von Tiefgründungen über Vortriebstechnik bis hin zu Brücken-, Tunnel- und Gleisbau – wir integrieren alle Gewerke aus einer Hand und realisieren Ihre Projekte bis ins Detail.

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	56
3 Baugrunderkundung, geotechnische Labor- und Feldversuche	59
3.1 Baugrunderkundung	59
3.1.1 Aufgaben der Baugrunderkundung	59
3.1.2 Geologische Grundlagen	60
3.1.3 Grundlagen gemäß EC 7-2	60
3.1.4 Erkundungsverfahren	61
3.1.5 Ausbau von Bohrungen zu Grundwassermessstellen	93
3.1.6 Bohrlochgeophysikalische Verfahren	94
3.2 Laborversuche	95
3.2.1 Versuche zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften	95
3.2.2 Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	108

3.3	Feldversuche	127
3.3.1	Dichtebestimmung im Feld	128
3.3.2	Plattendruckversuche	130
3.3.3	Flügelsondierungen	132
3.3.4	Porenwasserdruckmessungen	132
3.3.5	SPT-Test, Bohrlochrammsondierung	133
3.3.6	Seitendrucksondierung	133
3.3.7	Erddruckmessungen	134
3.4	Literatur	134
4	Bodenmechanik	137
4.1	Grundlagen der Elastizitätstheorie	137
4.1.1	Spannungen auf ein Volumenelement	137
4.1.2	Hauptspannungen	137
4.1.3	Dehnungen	138
4.1.4	Elastizitätsgleichungen für einen isotropen Stoff	139
4.1.5	Ebener Verformungszustand	140
4.1.6	Zusammenstellung der Beziehungen zwischen elastischen Parametern	142
4.2	Spannungsermittlung	142
4.2.1	Spannungen infolge Eigengewicht	142
4.2.2	Spannungen infolge von Lasten	145
4.3	Berechnung von Zeitsetzungen	157
4.3.1	Einleitung	157
4.3.2	Eindimensionale Konsolidationssetzung	157
4.3.3	Konsolidationssetzungen bei Vertikaldrainagen	163
4.3.4	Sekundärsetzungen	165
4.3.5	Bestimmung des Konsolidationsbeiwertes	165
4.4	Erddruck	167
4.4.1	Begriffe und Bezeichnungen	167
4.4.2	Erddrucktheorie nach Coulomb	169
4.4.3	Erddrucktheorie nach Rankine	180
4.4.4	Berechnungsverfahren für praktische Anwendungen	183
4.5	Materialmodelle	198
4.5.1	Einführung	198
4.5.2	Grundbegriffe	199
4.5.3	Grundlagen der Materialmodelle für elastisches Materialverhalten	202
4.5.4	Grundlagen der elastoplastischen Materialmodelle	205
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)	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

5.1.5	Geplante Änderungen des EC7 bei der 2015 begonnenen Überarbeitung der Eurocodes	231
5.2	Das „Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung“	232
5.2.1	Einführung	232
5.2.2	Geotechnische Kategorien	233
5.2.3	Bemessungssituationen	233
5.2.4	Charakteristische Werte	235
5.2.5	Grenzzustände der Tragfähigkeit	239
5.2.6	Versagen des Baugrunds (GEO)	241
5.2.7	Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit (EQU)	251
5.2.8	Grenzzustand des Aufschwimmens (UPL)	252
5.2.9	Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping (HYD)	253
5.2.10	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	254
5.2.11	Beobachtungsmethode	255
5.3	Die Finite-Elemente-Methode	256
5.3.1	Allgemeines	256
5.3.2	Grenzzustände der Tragfähigkeit	257
5.3.3	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	257
5.4	Literatur	258
6	Wasserhaltung	261
6.1	Wozu Wasserhaltung?	261
6.2	Ziel der Wasserhaltung	261
6.3	Arten der Wasserhaltung	262
6.3.1	Offene Wasserhaltung	262
6.3.2	Geschlossene Wasserhaltung	263
6.3.3	Kombination von offener und geschlossener Wasserhaltung	263
6.3.4	Ausführungstechnik Grundwasserentnahme	263
6.4	Berechnung der Grundwasserabsenkung für stationäre Verhältnisse	265
6.4.1	Grundlagen allgemein	265
6.4.2	Grundlagen der Berechnung von Grundwasserabsenkungen	270
6.4.3	Besondere Einflüsse auf die Grundwasserabsenkung	281
6.5	Berechnung der Wasserhaltung	285
6.5.1	Grundwasserabsenkung durch Brunnen	285
6.5.2	Grundwasserentspannung	291
6.5.3	Vakuumbeaufschlagung von Schwerkraftbrunnen	297
6.5.4	Vakuumwasserhaltung Kleinbrunnen	300
6.5.5	Offene Wasserhaltung	301
6.5.6	Restwasserhaltung in dichten Trögen	310
6.5.7	Versickerung	314
6.6	Ausführung der Wasserhaltung	318
6.6.1	Schwerkraftentwässerung mit Brunnen	318
6.6.2	Vakuumentwässerung	321
6.6.3	Offene Wasserhaltung	322
6.7	Fehlerquellen der Wasserhaltung	323
6.7.1	Wahl des Wasserhaltungssystems	323
6.7.2	Dimensionierung der Wasserhaltung	324
6.7.3	Ausführung	325

6.8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Baugrubensystem – Wasserhaltung	327
6.9	Literatur	327
7	Umweltgeotechnik und Kampfmittelräumung	329
7.1	Begriffsdefinitionen	331
7.2	Rechtliche und gesetzliche Grundlagen	336
7.3	Kategorisierung und Klassifizierung von Boden-, Bodenluft- und Gewässerverunreinigungen	338
7.3.1	Chemische Kontaminationen	339
7.4	Branchentypische Kontaminationsprofile	352
7.5	Erkundung kontaminationsverdächtiger Standorte	355
7.5.1	Erfassung und Erstbewertung (Phase I)	357
7.5.2	Orientierende Untersuchungen (Phase II a)	358
7.5.3	Gefährdungsabschätzung (Phase II b)	358
7.5.4	Sanierung, Sicherung und Nachsorge (Phase III)	359
7.6	Sicherungs- und Sanierungsverfahren	360
7.6.1	Allgemein	360
7.6.2	Sicherung	361
7.6.3	Umlagerung von Boden	362
7.6.4	Dekontamination	363
7.6.5	Grundwassersanierung	364
7.7	Kampfmittelräumung	366
7.7.1	Baufachliche Richtlinien – Kampfmittelräumung (BFR KMR)	366
7.7.2	Zuständigkeiten und Kostenverteilung	369
7.8	Literatur	370
8	Geotechnische Bauverfahren	373
8.1	Einleitung	373
8.2	Bohrtechnik	374
8.2.1	Einleitung	374
8.2.2	Bohrverfahren und Bohrwerkzeuge für Kleinlochbohrungen	377
8.2.3	Bohrverfahren und Bohrwerkzeuge für Großlochbohrungen	382
8.3	Pfähle	389
8.3.1	Einleitung	389
8.3.2	Regelwerke	390
8.3.3	Bohrpfähle ($0,3\text{ m} \leq D \leq 3,0\text{ m}$)	390
8.3.4	Verdrängungspfähle	399
8.3.5	Mikropfahl ($\varnothing < 0,3\text{ m}$)	402
8.4	Ankerteknik	404
8.4.1	Einleitung	404
8.4.2	Regelwerke	405
8.4.3	Aufbau von Verpressankern	406
8.4.4	Stahlzugglieder bei Verpressankern	406
8.4.5	Korrosionsschutz bei Verpressankern	408
8.4.6	Herstellung von Verpressankern	410
8.4.7	Spannverfahren	411
8.4.8	Sonderanker	412

8.5	Schlitzwandtechnik	412
8.5.1	Einleitung	412
8.5.2	Regelwerke	413
8.5.3	Ausrüstung	413
8.5.4	Herstellungsverfahren	416
8.5.5	Ausführungsschritte	418
8.6	Spundwandbauweise	424
8.6.1	Allgemeines	424
8.6.2	Baustoffe und Spundwandprofile	424
8.6.3	Einbringtechniken	429
8.6.4	Einbringhilfen	437
8.6.5	Lagegenauigkeit	439
8.6.6	Ziehen von Spundbohlen	441
8.6.7	Dichtigkeit – Probleme und Maßnahmen zur Ertüchtigung	441
8.6.8	Hinweise zu Entwurf und Ausführung	442
8.7	Literatur	443
9	Baugrundverbesserung	447
9.1	Einleitung	447
9.2	Vertikaldrains	447
9.2.1	Einleitung	447
9.2.2	Verfahren und Geräte	448
9.2.3	Entwurf und Bemessung	452
9.2.4	Überwachung und Prüfung	454
9.2.5	Zusammenfassung	455
9.3	Tiefenrüttelverfahren	456
9.3.1	Einleitung	456
9.3.2	Verfahren und Geräte	456
9.3.3	Entwurf und Bemessung	459
9.3.4	Überwachung und Prüfung	465
9.3.5	Zusammenfassung	467
9.4	Fallplattenverdichtung	467
9.4.1	Einleitung	467
9.4.2	Verfahren und Geräte	467
9.4.3	Entwurf und Bemessung	470
9.4.4	Überwachung und Prüfung	472
9.4.5	Zusammenfassung	473
9.5	Düsenstrahlverfahren	473
9.5.1	Einleitung	473
9.5.2	Verfahren und Geräte	474
9.5.3	Entwurf und Bemessung	477
9.5.4	Überwachung und Prüfung	481
9.5.5	Zusammenfassung	483
9.6	Verdichtungsinjektion	483
9.6.1	Einleitung	483
9.6.2	Verfahren und Geräte	484
9.6.3	Entwurf und Bemessung	487
9.6.4	Überwachung und Prüfung	490

9.6.5	Zusammenfassung	490
9.7	Hebungsinjektion	491
9.7.1	Einleitung	491
9.7.2	Verfahren und Geräte	491
9.7.3	Entwurf und Bemessung	495
9.7.4	Überwachung und Prüfung	498
9.7.5	Zusammenfassung	499
9.8	Injektionen ohne Baugrundverdrängung	500
9.8.1	Einleitung	500
9.8.2	Verfahren und Geräte	501
9.8.3	Entwurf und Bemessung	511
	Überwachung und Prüfung	518
9.8.4	Zusammenfassung	520
9.9	Tiefe Bodenvermörtelung	521
9.9.1	Einleitung	521
9.9.2	Verfahren und Geräte	522
9.9.3	Entwurf und Bemessung	528
9.9.4	Überwachung und Prüfung	532
9.9.5	Zusammenfassung	533
9.10	Stabilisierungssäulen (Rigid inclusions)	533
9.10.1	Einleitung	533
9.10.2	Verfahren und Geräte	534
9.10.3	Entwurf und Bemessung	535
9.10.4	Überwachung und Prüfung	537
9.10.5	Zusammenfassung	537
9.11	Zusammenfassung	538
9.12	Literatur	538
10	Flachgründungen	545
10.1	Einführung	545
10.2	Bemessung von Flachgründungen	546
10.2.1	Beschreibung der Boden-Bauwerk-Interaktion zur Ermittlung von Sohldruckverteilung und Setzungen	547
10.2.2	Geotechnische Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	562
10.2.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	568
10.2.4	Nachweisführung mit Hilfe der aufnehmbaren Bodenpressung	569
10.3	Praxis-Hinweise zu Bemessung und Ausführung	569
10.4	Literatur	570
11	Pfahlgründungen	573
11.1	Einleitung	573
11.1.1	Anwendungsbereich	573
11.1.2	Maßgebliche nationale technische Vorschriften für Pfähle	573
11.1.3	Pfahlgründungssysteme – Einzelpfahllösungen, Pfahlroste, Pfahlgruppen, Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP)	574
11.1.4	Baugrunduntersuchungen für Pfahlgründungen	574
11.2	Einzelpfähle – Tragverhalten und Widerstände	577
11.2.1	Allgemeines	577

11.2.2	Axiales Tragverhalten	578
11.2.3	Ermittlung der Pfahlwiderstände für axiale Belastung – Allgemeines	580
11.2.4	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus statischen Probelastungen ...	581
11.2.5	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus dynamischen Probelastungen	583
11.2.6	Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten	584
11.2.7	Axiale Pfahlwiderstände aus empirischen und erdstatistischen Verfahren	596
11.2.8	Pfahlwiderstände bei Mantel- und Fußverpressung	598
11.3	Einzelpfähle – Tragverhalten und Widerstände	599
11.3.1	Biegeweiße Pfähle – Bettungsmodulverfahren	599
11.3.2	Kurze starre Pfähle – Dalbentheorie nach Blum	601
11.4	Bemessung	602
11.4.1	Sicherheitskonzept	602
11.4.2	Einwirkungen aus dem Baugrund	603
11.4.3	Nachweis der Tragfähigkeit	611
11.4.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	614
11.5	Pfahlgruppen	614
11.5.1	Axial beanspruchte Pfahlgruppen	614
11.5.2	Tragverhalten und Nachweise von horizontal beanspruchten Pfahlgruppen	616
11.6	Probelastungen	618
11.6.1	Statische axiale Pfahlprobelastungen	618
11.6.2	Statische Probelastungen quer zur Pfahlachse	620
11.6.3	Dynamische Pfahlprobelastungen	621
11.7	Qualitätssicherung bei der Bauausführung	624
11.7.1	Allgemeines	624
11.7.2	Qualitätsprüfungen	624
11.8	Literatur	625
12	Baugruben	629
12.1	Einführung	629
12.2	Grundlagen für die Planung und Ausführung	630
12.2.1	Baugrunduntersuchungen	630
12.2.2	Einwirkungen	639
12.2.3	Nachbarbauwerke	648
12.3	Baugrubensysteme	650
12.3.1	Gesamtsysteme	650
12.3.2	Wandsysteme	650
12.3.3	Unterfangungen	663
12.3.4	Wandstützungen	668
12.3.5	Dichtsohlen	675
12.4	Tragfähigkeitsnachweise	683
12.4.1	Allgemeine Angaben	683
12.4.2	Ermittlung der Einbindetiefe	686
12.4.3	Ermittlung der Schnittkräfte	687
12.4.4	Nachweis der Vertikalkräfte	687
12.4.5	Besondere Bauzustände bei Schlitzwänden	688

12.4.6	Dicht- und Stützsohlen	694
12.4.7	Unterfangungen	698
12.5	Verformungen	703
12.5.1	Berechnungsgrundlagen	703
12.5.2	Wandverformungen aus Stabwerksberechnungen	705
12.5.3	Abschätzungen von Setzungen aus Wandverformungen	706
12.5.4	Verformungen aus FE-Berechnungen	707
12.6	Baugrubenberechnungen mit der FE-Methode	707
12.6.1	Grundlagen	707
12.6.2	Berechnungen	709
12.6.3	Tragfähigkeitsnachweise	709
12.6.4	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	711
12.7	Kontrollen	711
12.7.1	Übersicht	711
12.7.2	Überwachung von Dichtsohlen	713
12.7.3	Bodenverfestigungen	718
12.8	Literatur	719
13	Böschungen, konstruktive Hangsicherungen und Stützkonstruktionen	721
13.1	Einführung	721
13.2	Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen	723
13.2.1	Einwirkungen und Widerstände	723
13.2.2	Nachweisverfahren	729
13.2.3	Berechnungsverfahren	739
13.2.4	Sicherheitskonzepte	742
13.2.5	Normative Berechnungs- und Bemessungsgrundlagen	743
13.3	Freie Böschungen	749
13.3.1	Allgemeines	749
13.3.2	Neigungsempfehlungen für die Vordimensionierung von Böschungen	749
13.3.3	Rechnerische Standsicherheitsnachweise	750
13.4	Maßnahmen zum Schutz der Böschungsoberflächen	775
13.4.1	Ingenieurbologische Sicherungsmaßnahmen	775
13.4.2	Auflastfilter	780
13.4.3	Futtermauern	780
13.4.4	Sonstige Verfahren zur Oberflächensicherung	781
13.5	Konstruktive Hangsicherungen und Stützbauwerke	782
13.5.1	Bewehrte-Erde-Konstruktionen	782
13.5.2	Geokunststoffbewehrte Stützkonstruktionen	786
13.5.3	Bodenvernagelung	790
13.5.4	Gewichtsmauern	794
13.5.5	Winkelstützmauern	797
13.5.6	Nagelwände	800
13.5.7	Raumgitter-Stützkonstruktionen	810
13.5.8	Rippenwände	823
13.5.9	Ankerwände (Elementwände)	825
13.5.10	Tief gegründete Stützbauwerke	827

13.5.11 Verankerungen	839
13.5.12 Entwässerungseinrichtungen bei Stützkonstruktionen	842
13.6 Sonstige Stützkonstruktionen	843
13.6.1 Fangedämme	843
13.6.2 Aufgelöste Stützkonstruktionen	847
13.6.3 Galerien	848
13.6.4 Schalentragwerke	849
13.7 Hangstabilisierung durch Entwässerungsmaßnahmen	850
13.7.1 Oberflächennahe Entwässerung	850
13.7.2 Tiefenentwässerung, Tiefdrainschlitz	851
13.8 Erdwärmenutzung durch Stützkonstruktionen	853
13.9 Literatur	856
14 Tunnelbau und unterirdischer Hohlraumbau	861
14.1 Einführung	861
14.1.1 Geschichte und Bedeutung	861
14.1.2 Statistik	867
14.2 Begriffe und Bezeichnungen	871
14.3 Offene Bauweisen	873
14.3.1 Einführung und geschichtlicher Hintergrund	873
14.3.2 Baugruben	875
14.3.3 Stahlbetonkonstruktionen	880
14.3.4 Rahmenkonstruktionen aus Spundwänden mit Stahlbetonwänden und -decken	883
14.3.5 Deckelbauweise	888
14.3.6 Rahmenvorschub	893
14.4 Geschlossene Bauweisen	894
14.4.1 Einführung	894
14.4.2 Einfluss des Gebirges	895
14.4.3 Vortrieb	904
14.4.4 Konventionelle Vortriebsmethoden	905
14.4.5 Tunnelvortriebsmaschinen	909
14.4.6 Schildmaschinen	910
14.4.7 Tunnelbohrmaschinen	919
14.4.8 Sicherungsmittel	923
14.4.9 Ausbau	933
14.5 Bewetterung	935
14.6 Abdichtung	936
14.7 Belastungen	944
14.8 Der Vortrieb kleiner Querschnitte	948
14.8.1 Allgemeines	948
14.8.2 Verfahrensübersicht	949
14.8.3 Verfahrenswahl und Vorerkundung	949
14.8.4 Rohrvortrieb	950
14.8.5 Mikrotunnelbau	954
14.8.6 Das HDD-Verfahren	955
14.9 Literatur	958

15	Geotechnik im Hochwasserschutz	961
15.1	Geotechnische Fragestellungen	961
15.2	Grundlagen geotechnischer Planungen	963
15.2.1	Baugrund und Grundwasser	963
15.2.2	Bestandsbauwerke	964
15.2.3	Maßgebende Einwirkungen	965
15.3	Systeme	966
15.3.1	Deiche	966
15.3.2	HWS-Mauern und HWS-Wände	968
15.3.3	Mobile Systeme	970
15.3.4	Rückhaltebecken und Flutpolder	972
15.3.5	Flutmulden und Entlastungstollen	974
15.4	Hydrologische und hydraulische Bemessungsgrundlagen	974
15.4.1	Bemessungswasserstand	974
15.4.2	Freibord	975
15.5	Deiche	977
15.5.1	Aufbau und Baustoffe	977
15.5.2	Dichtungssysteme	980
15.5.3	Oberflächendichtungen	980
15.5.4	Innendichtungen	982
15.6	Sanierung bestehender Deiche	989
15.7	Überströmbare Deiche	991
15.8	Stand sicherheitsnachweise	992
15.8.1	Geotechnische Untersuchungen	992
15.8.2	Maßgebende Bemessungssituationen (Lastfälle)	994
15.8.3	Nachweise	996
15.8.4	Geotechnische Nachweise	998
15.9	Leitungen und Bauwerke in Deichen	1005
15.9.1	Leitungen	1005
15.9.2	Bauwerke	1006
15.10	Gehölze an Deichen	1006
15.11	Qualitätskontrollen im Deichbau	1008
15.11.1	Während der Baumaßnahme	1008
15.11.2	Nach der Fertigstellung	1011
15.12	Deichverteidigung	1011
15.13	Literatur	1012
16	Geotechnische Messverfahren	1015
16.1	Einleitung	1015
16.2	Geotechnische Messungen	1016
16.2.1	Ziel geotechnischer Messungen	1016
16.2.2	Gemessene bzw. abgeleitete Größen	1019
16.2.3	Messmethoden	1025
16.2.4	Messinstrumente	1027
16.2.5	Auslegung und Planung von Mess- und Überwachungsprogrammen	1043
16.2.6	Aufzeichnung von Messergebnissen	1044
16.2.7	Auswertung von Messergebnissen	1045
16.2.8	Anwendung geotechnischer Messverfahren	1045

16.3	Geographische Informationssysteme (GIS)	1051
16.3.1	Welche Informationen können abgefragt werden?	1051
16.3.2	Einsatz der GIS-Informationen in der Praxis	1053
16.3.3	Informationsquellen – Beispiele	1055
16.4	Literatur	1056
17	Baugrund- und Tiefbaurecht	1059
17.1	Ausschreibungsvorgaben zum Baugrund und die richtige Baugrundausschreibung	1059
17.1.1	„Ohne Grund und Boden geht das Bauen nicht.“	1059
17.1.2	Was ist „Baugrund“?	1060
17.1.3	DIN EN 1997-2, ergänzt durch DIN 4020 als „Baugrund-Bibel“	1062
17.1.4	Der Baugrund ist Baustoff	1065
17.1.5	Rechtsfolgen aus der Gleichsetzung von Baugrund und Baustoff	1067
17.1.6	Zwischenergebnis	1069
17.1.7	Ausschreibungsvorgaben des § 7 VOB/A	1069
17.2	Die Beweisführung bei Tiefbauarbeiten	1072
17.2.1	Beweislastregeln für die Vergütung	1073
17.2.2	Beweislastregeln für Schadensersatzansprüche	1073
17.2.3	Beweisgrundsätze für §§ 906 und 909 BGB	1075
17.2.4	Beweisgrundsätze für die Mangelfreiheit	1075
17.2.5	Besonderheiten der Beweisführung bei Tiefbauleistungen	1076
17.2.6	Beweismöglichkeiten im Tiefbau	1083
17.2.7	Anwendung der „5-M-Methode“ bei Tiefbauleistungen	1086
17.3	Checkliste für Tiefbauarbeiten	1087
17.4	Sonderprobleme beim Tiefbau: Die eingeführten Homogenbereiche	1089
17.4.1	Definition „Homogenbereich“ entsprechend der VOB Teil C	1089
17.4.2	Juristische Beurteilung	1091
17.4.3	Hinweise auf Sonderregelungen zum Oberboden	1095
17.5	Der Bundesgerichtshof und die Baugrundprobleme	1095
17.6	Schlussbemerkung	1099
	Sachwortverzeichnis	1101

Alles aus einer Hand.

Von der Ingenieurleistung über die Produkte bis zur Verlegung. NAUE ist Ihr kompetenter Partner für alle Teilbereiche ihres Geotechnik-Projektes.





1 Grundlagen der Geologie

Conrad Boley, Lisa Wilfing, Philipp Siebert

1.1 Begriffsdefinitionen und Spektrum

Die Geologie ist eine Naturwissenschaft, die sich mit dem Bau und der Geschichte des Erdkörpers sowie seiner Genese 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. Die durch exogene Prozesse hervorgerufenen Abtragung des Gesteins (**Erosion**) führt zur Bildung von Lockergestein, welches transportiert und an anderer Stelle abgelagert wird (**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, auf der Erde auftretenden, Gesteinsgruppen – **Magmatite, Metamorphite und Sedimentgesteine** – durch geodynamische Prozesse 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 erfahren den Einfluss der **Verwitterung**. Durch die Einwirkung von Wasser, 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 (**fluviatil**) und Wind (**äolisch**) verfrachtet. Die Abtragung des Gesteins wird in der Geologie als **Erosion** bezeichnet [1]. Schließlich werden die Sedimentmassen an den Rand der Kontinente transportiert und im Meer abgelagert (**Sedimentation**). 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.

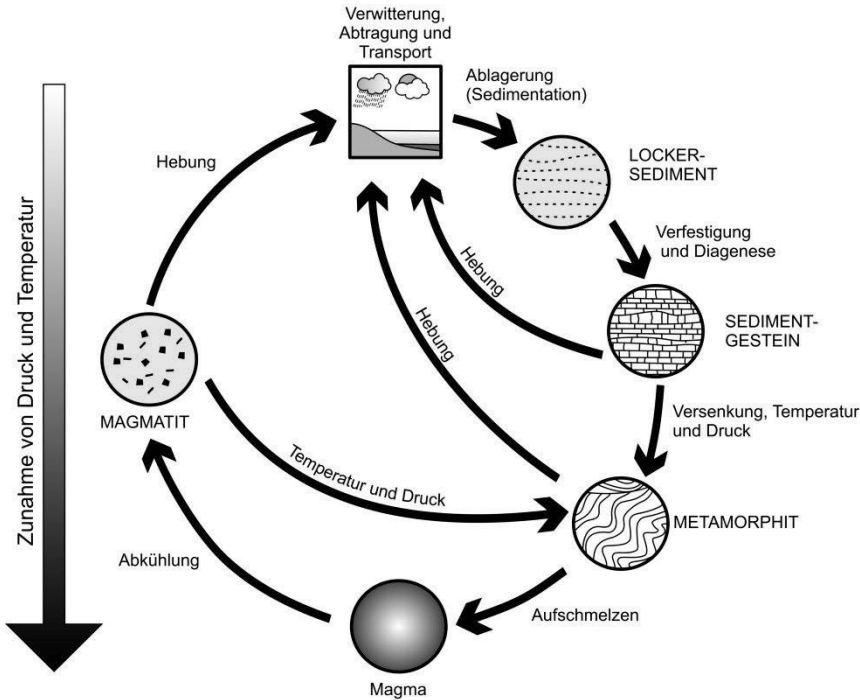


Bild 1-1 Kreislauf der Gesteine

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, welche sowohl gerundete als auch kantige Komponenten enthalten. 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 (silicatisch gebunden).

Tonstein, Mergelstein

Tonsteine bestehen aus einem Korngemisch von Tonmineralen und Quarz- / Feldspatfragmenten. 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.

	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

Kalkstein

Kalksteine können in Abhängigkeit ihrer Entstehungsgeschichte gebankt oder massig vorkommen. Die spröde reagierenden Gesteine weisen hohe bis sehr hohe Druckfestigkeiten auf und können in humiden Gebieten zur **Verkarstung** neigen. 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 des Calciumcarbonates 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 bzw. nur äußerst schwach beim Salzsäuretest. Durch sein sprödes Bruchverhalten ist er häufig kleinstückig zerklüftet, wobei

die Klüfte oft mit Calcit verheilt sind. Ähnlich wie bei Kalksteinen 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 Brecciiierung überlagernder Schichten (meist Dolomit) kommen. Die sekundär entstandenen Breccien können durch zirkulierende Kluftwässer calcitisch zementiert werden. Durch Auslaugung werden die enthaltenen Evaporite gelöst. Zudem haben die Dolomitbruchstücke aufgrund der Oberflächenrauigkeit eine geringere Verwitterungsresistenz als Calcit, so dass es häufig zum selektiven Herauswittern der Dolomite kommt. Das Resultat sind zellig-poröse Dolomite und Kalke, die als **Rauhwacken** bzw. **Zellenkalk** oder **Zellendolomit** bezeichnet werden. Diese Gesteine können vor allem auf die Standsicherheit bei Bauwerken eine große Auswirkung haben, da sie beispielsweise zu Instabilitäten in der Ortsbrust führen können. 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 Blöcke (Wollsackverwitterung) [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 vorwiegend aus Glimmern oder Amphibolen bestehen [11]. Diese Paralleltexur wird als **Schieferung** bezeichnet. Gneise mit einem sedimentärem Ausgangsgestein (z. B. Sandsteine, Arkosen) werden 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 ungünstige Verschneidungen 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 (**Frostsprennung**). 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 kieselsäurereiche 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 dem geologischen Zeitalter des **Quartärs**. Dieses ist der jüngste Zeitabschnitt der Erde und umfasst ursprünglich die letzten 1,8 Millionen Jahre bis heute [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** beschrieb ursprünglich den Zeitabschnitt vor 1,8 bis 66 Millionen Jahren [14]. Zwischen 2004 und 2009 fand eine Änderung der Nomenklatur der geologischen Zeitskala statt und der Begriff Tertiär wurde durch die Zeitalter Paläogen und Neogen ersetzt. Zudem wurde die Grenze zum Quartären Zeitalter auf 2,6 Millionen Jahre verschoben. Im allgemeinen Sprachgebrauch lässt sich der Begriff Tertiär jedoch schwer verdrängen, so dass er folgend weiter verwendet wird. 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, bindigen Schichten häufig wasserstauend. Neben dem feinkörnigen Tertiär können jedoch auch tertiäre Sande auftreten, die wiederum wasserführend

sind. 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 welches zu Bioturbation führt, 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 durch das Gletschereis transportiert und 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, stark verzweigten Schmelzwasserflüsse (Zopfstromsysteme) hinterlassen vielfach mächtige, 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 feinkörniger werden, bis sie schließlich als fein laminierte **Beckentone** absedimentiert werden.

Löss

In der Umgebung der großen Inlandeismassen 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 (Gley) 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