

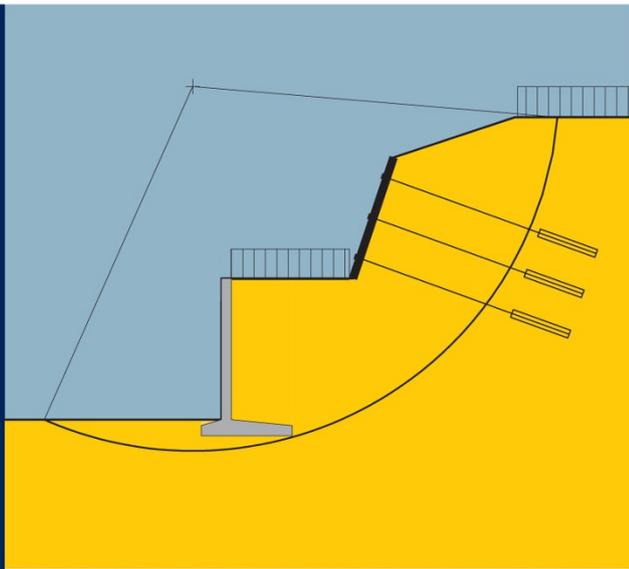


Geotechnik

Bodenmechanik

Gerd Möller

Bauingenieur-Praxis



Gerd Möller

Geotechnik
Bodenmechanik

3. Auflage

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

BiP

3. Auflage

Geotechnik

Bodenmechanik

Gerd Möller

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

Professor Dr.-Ing. Gerd Möller
Fregestr. 37
12161 Berlin

Titelbilder:

Verschiedene Bohrkerne, Geopartner, Dr. Volker Eitner
Grafische Darstellung eines Geländebruchs der Fa. GGU, Prof. Dr.-Ing. Johann Buß
Effektive Vertikalspannungen infolge Fundamentbelastung,
Ergebnis der FEM-Software Plaxis 2D, M. Eng. Dipl. -Ing. Dennis Morauf
Zwei Triaxialprüfstände der Fa. Stenzel, Prof. Dr.-Ing. Möller

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.

© 2016 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: stilvoll, Waldulm
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Druck und Verarbeitung: Strauss GmbH, Mörlenbach

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

3. Auflage

Print ISBN: 978-3-433-03155-1
ePDF ISBN: 978-3-433-60800-5
oBook ISBN: 978-3-433-60797-8

*In Erinnerung an
Professor Helmut Neumeuer*

Vorwort

Seit dem Jahr 2007 gilt in den Bauordnungen der Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich das Konzept der globalen Sicherheiten, mit dem das der Teilsicherheiten abgelöst wurde. Bezüglich der „Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen“ ging dieser Schritt einher mit der Ablösung rein Deutscher Normen durch Europäische Normen. Die derzeit (2016) aktuelle Liste enthält für den Grundbau elf Normen, von denen fünf Europäische Normen sind. Fünf Deutsche Normen ergänzen diese Europäischen Normen, und nur eine Norm (DIN 4123) ist eine rein Deutsche Norm.

Für die in der Praxis tätigen Ingenieurinnen und Ingenieure ist dies verbunden mit dem Umstand, dass zur gleichen Thematik oftmals mehrere Normen gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Da das als wenig anwenderfreundlich zu bewerten ist, wurden 2011 auf dem Gebiet der Geotechnik zwei Normen-Handbücher veröffentlicht, mit denen das Arbeiten mit den wichtigsten Normen erleichtert werden soll. Beide Bände beinhalten jeweils drei Normen. In Band 1 (Allgemeine Regeln) sind das DIN EN 1997-1, DIN EN 1997-1/NA sowie DIN 1054 als ergänzende Norm und in Band 2 (Erkundung und Untersuchung) DIN EN 1997-2, DIN EN 1997-2/NA sowie DIN 4020 als ergänzende Norm. Insgesamt ist festzustellen, dass der Seitenumfang der im jeweiligen Anwendungsfall zu berücksichtigenden Normen enorm zugenommen hat und dass die bestehenden Normen immer wieder erneuert bzw. ergänzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Neuauflage von Band 1 im Dezember 2015. Sie wurde erforderlich, da DIN 1054 inzwischen ergänzt wurde. Die seit März 2014 in überarbeiteter Form vorliegende DIN EN 1997-1 wurde in der Neuauflage allerdings nicht berücksichtigt.

Wie mit dem in diesem Jahr ebenfalls erscheinenden Teil „Geotechnik Grundbau“ wird mit dem vorliegenden Buch nicht zuletzt das Ziel verfolgt, den Umgang mit dem aktuellen Regelwerk zu erleichtern. Neben einer Vielzahl von Formeln, Tabellen, Grafiken, Bildern und Verweisen auf zu beachtende Textstellen in Normen findet sich zusätzlich eine Reihe von Anwendungsbeispielen, da auch im Berufsleben stehende Ingenieure Neues gern anhand von Fallbeispielen erarbeiten.

Trotz des nicht unerheblichen Umfangs des Buches waren, auch aus Kostengründen, Einschränkungen bezüglich der Auswahl und der Behandlung der einzelnen Themengebiete erforderlich. Wegen des damit verbundenen teilweisen Verzichts auf Vollständigkeit bzw. Ausführlichkeit wird an vielen Stellen auf weitergehende Literatur verwiesen.

Anregungen und kritische Stellungnahmen meiner Leser begrüße ich sehr, denn erst durch das Infragestellen und neue Überdenken eröffnen sich Wege zur Verbesserung des Erreichten.

Berlin im Februar 2016

Gerd Möller

Inhaltsverzeichnis

1	Einteilung und Benennung von Böden	1
1.1	Bodenmechanische und geologische Begriffe	1
1.1.1	Bezeichnungen	1
1.1.2	Erdaufbau, Erdzeitalter und Gesteinsbildungen	2
1.1.3	Nutzung von Boden oder Fels	4
1.2	Normen und Kriterien zur Einteilung	4
1.3	Einteilung nach Korngrößen und organischen Bestandteilen	7
1.3.1	Kornstrukturen grob- und feinkörniger Böden	7
1.3.2	Einteilung reiner Bodenarten	10
1.3.3	Einteilung zusammengesetzter Böden	11
1.3.4	Einteilung von Böden mit organischen Bestandteilen	15
1.4	Einstufung in Boden- und Felsklassen	16
1.5	Kennzeichnungen nach DIN 4023	17
1.6	Erkennung von Bodenarten mit Hilfe einfacher Verfahren	20
1.6.1	Reibeversuch	21
1.6.2	Schneideversuch	21
1.6.3	Trockenfestigkeitsversuch	21
1.6.4	Konsistenzbestimmung bindiger Böden	22
1.6.5	Plastizität bindiger Böden (Knetversuch)	22
1.6.6	Ausquetschversuch	22
1.6.7	Schüttelversuch	23
2	Wasser im Baugrund	25
2.1	Allgemeines	25
2.2	Regelwerke	26
2.3	Begriffe	26
2.4	Kapillarwasser	28
2.5	Porenwinkelwasser	30
2.6	Hygroskopisches Wasser	31
2.7	Betonangreifende Grundwässer und Böden	31
2.8	Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse	33
2.9	Grundwassermessstellen	35
2.10	Wasserdurchlässigkeit von Böden	39
3	Geotechnische Untersuchungen	41
3.1	Untersuchungsziel	41
3.2	Regelwerke	42
3.3	Verantwortung für die Untersuchungen	42
3.4	Planung der Untersuchungen	42
3.5	Untersuchungsverfahren	43
3.6	Untersuchungen von Baugrund und Grundwasser	45
3.6.1	Voruntersuchungen	46
3.6.2	Hauptuntersuchungen	47
3.6.3	Baubegleitende Untersuchungen	48

3.6.4	Baugrund- und Bauwerksüberwachung nach der Bauausführung	49
3.7	Untersuchungen von Boden und Fels als Baustoff	49
3.7.1	Voruntersuchungen	50
3.7.2	Hauptuntersuchungen	50
3.7.3	Baubegleitende Untersuchungen	51
3.8	Geotechnische Kategorien (GK)	51
3.8.1	Geotechnische Kategorie GK 1	51
3.8.2	Geotechnische Kategorie GK 2	52
3.8.3	Geotechnische Kategorie GK 3	54
3.9	Erforderliche Maßnahmen	57
3.9.1	Geotechnische Kategorie GK 1	57
3.9.2	Geotechnische Kategorie GK 2	57
3.9.3	Geotechnische Kategorie GK 3	58
3.10	Geotechnischer Bericht	58
3.10.1	Geotechnischer Untersuchungsbericht	59
3.10.2	Aus- und Bewertung der geotechnischen Untersuchungsergebnisse	59
3.10.3	Folgerungen, Empfehlungen und Hinweise	60
3.11	Geotechnischer Entwurfsbericht	60
4	Bodenuntersuchungen im Feld	61
4.1	Allgemeines	61
4.2	Direkte Aufschlüsse	61
4.2.1	Untersuchungszweck	61
4.2.2	Untersuchungsverfahren	61
4.2.3	Regelwerke	63
4.2.4	Richtwerte für Aufschlussabstände	63
4.2.5	Mindestwerte für Aufschlusstiefen	65
4.2.6	Schurf	70
4.2.7	Untersuchungsschacht	71
4.2.8	Untersuchungsstollen	71
4.2.9	Bohrung	72
4.2.10	Verfahren zur Probenentnahme im Boden	74
4.2.11	Probenentnahme mit Entnahmegerten aus Schürfen und Bohrlöchern	78
4.2.12	Darstellung von Aufschlussergebnissen	81
4.3	Sondierungen (indirekte Aufschlussverfahren)	83
4.3.1	Allgemeines	83
4.3.2	DIN-Normen	84
4.3.3	Rammsondierungen nach DIN EN ISO 22476-2	84
4.3.4	Drucksondierungen nach DIN EN ISO 22476-1 und -12	86
4.3.5	Bohrlochrammsondierungen nach DIN 4094-2 und DIN EN ISO 22476-3	89
4.3.6	Korrelationen zwischen Sondierergebnissen und Bodenkenngößen	91
4.3.7	Wahl des Sondiergeräts	96
4.3.8	Flügelscherversuch (Felduntersuchung)	98
4.4	Plattendruckversuch	100
4.4.1	Untersuchungszweck und Versuchsbedingungen	100
4.4.2	DIN-Norm	101
4.4.3	Begriffe	101
4.4.4	Geräte für den Plattendruckversuch	101
4.4.5	Verformungsmodul E_V	102
4.4.6	Bettungsmodul k_S	104
4.5	Aussagekraft von Bodenuntersuchungen	105
4.6	Beobachtungsmethode	106

5	Untersuchungen im Labor	109
5.1	Mehrphasensysteme des Bodens	109
5.2	Korngrößenverteilung	112
5.2.1	DIN-Normen	113
5.2.2	Siebanalyse	113
5.2.3	Schlämmanalyse (Sedimentationsanalyse)	116
5.2.4	Siebung und Sedimentation	118
5.2.5	Kenngrößen der Körnungslinie	119
5.2.6	Filterregel von <i>Terzaghi</i>	120
5.2.7	Bodenklassifikation nach DIN 18196 und DIN EN ISO 14688-2	121
5.3	Wassergehalt	128
5.3.1	DIN-Normen	128
5.3.2	Definition des Wassergehalts	128
5.3.3	Mit w in Beziehung stehende Kenngrößen feuchter Böden	129
5.3.4	Mit w in Beziehung stehende Kenngrößen gesättigter Böden	130
5.3.5	Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung	130
5.3.6	Bestimmung des Wassergehalts durch Schnellverfahren	131
5.4	Dichte	132
5.4.1	DIN-Normen	132
5.4.2	Definitionen	132
5.4.3	Mit ρ und ρ_d in Beziehung stehende Kenngrößen	132
5.4.4	Feldversuche nach DIN 18125-2	133
5.4.5	Laborversuche nach DIN EN ISO 17892-2	137
5.5	Korndichte	137
5.5.1	DIN-Normen	137
5.5.2	Definition der Korndichte	137
5.5.3	Bestimmung mit dem Kapillarpyknometer	138
5.6	Organische Bestandteile	140
5.6.1	DIN-Norm	140
5.6.2	Definition des Glühverlustes	140
5.6.3	Versuchsdurchführung und -auswertung	140
5.6.4	Bodenklassifikation nach DIN 18196	141
5.7	Kalkgehalt	142
5.7.1	DIN-Normen	142
5.7.2	Qualitative Bestimmung des Kalkgehalts	143
5.7.3	Bestimmung des Kalkgehalts nach DIN 18129	143
5.8	Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen)	144
5.8.1	DIN-Normen	144
5.8.2	Qualitative Bestimmung der Konsistenzgrenzen	145
5.8.3	Definitionen	145
5.8.4	Bestimmung der Fließgrenze	146
5.8.5	Bestimmung der Ausrollgrenze	148
5.8.6	Bestimmung der Schrumpfgrenze	149
5.8.7	Bodenklassifikation nach DIN 18196	150
5.8.8	Plastische Bereiche und ansetzbarer Sohlwiderstand nach DIN 1054	152
5.9	Proctordichte (Proctorversuch)	153
5.9.1	DIN-Norm	153
5.9.2	Definitionen	154
5.9.3	Geräte für den Proctorversuch	154
5.9.4	Durchführung und Auswertung des Proctorversuchs	155
5.9.5	Anforderungen aus Regelwerken an den Verdichtungsgrad D_{Pr}	159
5.10	Dichte nichtbindiger Böden (lockerste u. dichteste Lagerung)	162

5.10.1	Regelwerke	162
5.10.2	Definitionen und Einstufungen von Lagerungsdichten	162
5.10.3	Dichte bei dichtester Lagerung (Rütteltischversuch)	166
5.10.4	Dichte bei lockerster Lagerung (Einfüllung mit Trichter)	166
5.11	Wasserdurchlässigkeit	169
5.11.1	Allgemeines	169
5.11.2	DIN-Normen	169
5.11.3	Definitionen	169
5.11.4	Beziehungen der Filtergeschwindigkeit zum hydraulischen Gefälle	171
5.11.5	Temperatureinfluss	172
5.11.6	Versuch im Versuchszylinder mit Standrohren	173
5.11.7	Untersuchung in der Triaxialzelle (isotrope statische Belastung)	175
5.12	Einaxiale Zusammendrückbarkeit	176
5.12.1	Allgemeines	176
5.12.2	DIN-Normen	178
5.12.3	Begriffe (nach DIN 18135)	178
5.12.4	Kompressionsversuch (Oedometerversuch)	179
5.12.5	Steifemodul	184
5.12.6	Modellgesetz für Setzungszeiten	188
5.12.7	Kompressionsbeiwert	189
5.13	Scherfestigkeit	190
5.13.1	Allgemeines	190
5.13.2	DIN-Normen	191
5.13.3	Begriffe nach DIN 18137-1	191
5.13.4	Rahmenscherversuch	195
5.13.5	Triaxialversuch nach DIN 18137-2	198
5.13.6	Auswertung des Triaxialversuchs	201
5.14	Einaxiale Druckfestigkeit	206
5.14.1	DIN-Norm	206
5.14.2	Definitionen	206
5.14.3	Druck-Stauchungs-Diagramm	207
5.15	Charakteristische Werte von Bodenkenngrößen	208
5.15.1	Forderungen von DIN EN 1997-1 und DIN 1054	208
5.15.2	Werte gemäß DIN 1055-2	209
6	Spannungen und Verzerrungen	215
6.1	Darstellungen	215
6.1.1	Koordinatensysteme	215
6.1.2	Spannungs- und Deformationszustände	217
6.1.3	Spannungstransformation in kartesischen Koordinatensystemen	218
6.2	Sonderfälle	219
6.2.1	Hauptspannungen	220
6.2.2	Ebene Spannungs- und Deformationszustände	221
6.2.3	Symmetrie- und Antimetrieebenen	222
6.3	Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen	223
6.3.1	Stoffgesetze bei <i>Hooke</i> 'schem Material	223
6.3.2	Steifemodul, Elastizitätsmodul und Schubmodul	225
6.3.3	Bilinear-elastische und nichtlineare Stoffgesetze	226
6.4	Rechnerische Druckspannungen im Baugrund	226
6.4.1	Eigenlast aus trockenem oder erdfeuchtem Boden	226
6.4.2	Totale und effektive Druckspannungen	227
6.5	Vereinfachungen zur Lastausbreitung	229

6.6	Halbraum unter vertikaler Punktlast F	230
6.6.1	Spannungen und Deformationen nach <i>Boussinesq</i>	231
6.6.2	Spannungen nach <i>Fröhlich</i>	233
6.7	Halbraum unter horizontaler Punktlast F	235
6.8	Halbraumspannungen infolge vertikaler Linienlast f	237
6.8.1	Spannungen nach <i>Boussinesq</i>	237
6.8.2	Spannungen nach <i>Fröhlich</i>	238
6.9	Halbraumspannungen infolge horizontaler Linienlast f	238
6.10	Halbraumspannungen infolge vertikaler Streifenlast q	239
6.11	Halbraumspannungen unter schlaffen Rechtecklasten	240
6.12	Spannungen σ_z unter Eckpunkten schlaffer Rechtecklasten	241
6.13	Beiwerte für vertikale Normalspannungen des Halbraums	246
6.14	Spannungen σ_z infolge beliebiger Lasten	249
7	Berechnungsgrundlagen der aktuellen Normen	253
7.1	Allgemeines	253
7.2	Einwirkungen, geotechnische Kenngrößen, Widerstände	254
7.2.1	Begriffe	254
7.2.2	Einwirkungen	255
7.2.3	Geotechnische Kenngrößen	256
7.2.4	Widerstände	256
7.3	Charakteristische und repräsentative Werte	256
7.3.1	Charakteristische Werte	256
7.3.2	Repräsentative Werte	257
7.4	Grenzzustände	258
7.5	Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte	260
7.5.1	Allgemeines	260
7.5.2	Bemessungssituationen	260
7.5.3	Teilsicherheitsbeiwerte	261
7.6	Bemessungswerte	264
7.6.1	Allgemeines	264
7.6.2	Bemessungswerte von Einwirkungen	265
7.6.3	Bemessungswerte von geotechnischen Kenngrößen	266
7.6.4	Bemessungswerte von Bauwerkseigenschaften	266
7.7	Rechnerische Nachweisführung der Tragsicherheit	266
7.7.1	Verlust der Lagesicherheit (EQU)	267
7.7.2	Versagen im Tragwerk und im Baugrund (STR und GEO)	267
7.7.3	Versagen durch Aufschwimmen (UPL)	269
7.7.4	Versagen durch hydraulischen Grundbruch (HYD)	269
7.8	Beobachtungsmethode	270
8	Sohldruckverteilung	273
8.1	Allgemeines	273
8.2	Kennzeichnende Punkte und Linien	275
8.3	Bodenpressungen in der Sohlfuge nach DIN-Normen	275
8.3.1	Regelwerke	275
8.3.2	Gleichmäßige Verteilung und ansetzbare Sohlwiderstände nach DIN 1054	276
8.3.3	Geradlinige Verteilung	281

8.4	Sohldruckverteilung unter Flächengründungen	289
9	Setzungen	291
9.1	Allgemeines	291
9.2	Regelwerke	291
9.3	Begriffe	292
9.4	Kennzeichnende Punkte und Linien	294
9.5	Elastisch-isotroper Halbraum mit Einzellast	294
9.6	Elastisch-isotroper Halbraum mit konstanter Rechtecklast σ_0	296
9.7	Grenztiefe für Setzungsberechnungen	296
9.8	Halbraum mit konstanter Kreislast σ_0	299
9.9	Grundlagen für Setzungsberechnungen nach DIN 4019	299
9.9.1	Erforderliche Berechnungsunterlagen	299
9.9.2	Sohl- und Baugrundspannungen	300
9.10	Zusammendrückungsmodul (Rechenmodul) E^*	300
9.10.1	Module des linear-elastischen Halbraums	300
9.10.2	Ermittlung von E^* aus Labor- und Feldversuchen	301
9.10.3	Ermittlung von E^* aus Setzungsbeobachtungen	302
9.10.4	Wahl von E^* für Setzungsberechnungen	302
9.11	Setzungsgleichungen nach DIN 4019	303
9.11.1	Allgemeines	303
9.11.2	Setzung der Eckpunkte schlaffer, konstanter Rechtecklasten	304
9.11.3	Setzung starrer Rechteckfundamente bei zentrischer Belastung	305
9.11.4	Setzungen unter konstanter kreisförmiger Last	311
9.12	Gleichungen für Verdrehungen nach DIN 4019	312
9.12.1	Allgemeines	312
9.12.2	Setzungen bzw. Verdrehungen rechteckiger Fundamente	314
9.12.3	Verdrehung starrer Streifenfundamente	317
9.13	Indirekte Setzungsberechnung nach DIN 4019	318
9.13.1	Ablauf der Setzungsermittlung	318
9.13.2	Anwendungsbeispiel mit schlaffer, konstanter Rechtecklast (nach [33])	319
9.13.3	Setzungen und Verdrehungen infolge lotrechter Baugrundspannungen	321
9.14	Setzungen infolge horizontaler Belastungskomponenten	322
9.14.1	Ansatz waagerechter Lasten und Sohlspannungen	322
9.14.2	Anwendungsbeispiel	323
9.15	Setzungen infolge von Grundwasserabsenkung	324
9.16	Berechnung des Zeitverlaufs von Setzungen	326
9.16.1	Konsolidationssetzung	326
9.16.2	Kriechsetzung	327
9.17	Setzungsproblematik bei Hochbauten	327
9.17.1	Gegenseitige Beeinflussung	328
9.17.2	Mulden- und Sattellage	330
9.17.3	Setzungen bei inhomogenem Baugrund	330
9.18	Beanspruchungsveränderungen infolge von Setzungen	330
9.19	Zulässige Setzungsgrößen	331
10	Erddruck	337
10.1	Allgemeines	337

10.2	Regelwerke	337
10.3	Angaben nach DIN 4085	337
10.3.1	Begriffe	337
10.3.2	Erforderliche Unterlagen	340
10.3.3	Allgemeines zur Erddruckermittlung	340
10.4	Erdruchedruck	342
10.4.1	Unbelastetes horizontales Gelände	342
10.4.2	Unbelastetes geneigtes Gelände	343
10.4.3	Erdruchedruck nach DIN 4085	344
10.5	Wirkungen der Stützwandbewegung	347
10.5.1	Erddruckkräfte	348
10.5.2	Bruchfiguren	349
10.6	Zonenbruch nach <i>Rankine</i>	350
10.7	Linienbruch nach <i>Coulomb</i>	355
10.7.1	Aktiver Erddruck	355
10.7.2	Passiver Erddruck	356
10.8	Verallgemeinerung der Erddrucktheorie von <i>Coulomb</i>	357
10.8.1	Aktiver Erddruck nach <i>Müller-Breslau</i>	358
10.8.2	Passiver Erddruck nach <i>Müller-Breslau</i>	359
10.8.3	Aktiver Erddruck bei Böden mit Kohäsion	360
10.8.4	Passiver Erddruck bei Böden mit Kohäsion	360
10.9	Aktiver Erddruck gemäß DIN 4085	361
10.9.1	Voraussetzungen der Berechnungsformeln	364
10.9.2	Formeln für Erddrücke und Erddruckkräfte aus Bodeneigenlast	366
10.9.3	Verteilung des Erddrucks aus Bodeneigenlast	369
10.9.4	Gleichmäßig verteilte vertikale Last auf ebener Geländeoberfläche	372
10.9.5	Vertikale Linien- und Streifenlasten auf ebener Geländeoberfläche	378
10.9.6	Horizontale Linien- oder schmale Streifenlasten	380
10.9.7	Erddruckanteil aus Kohäsion	381
10.9.8	Mindesterddruck	383
10.10	Passiver Erddruck gemäß DIN 4085	384
10.10.1	Formeln für Erddrücke und Erddruckkräfte infolge Bodeneigenlast	387
10.10.2	Vertikale Flächenlasten auf ebener Geländeoberfläche	392
10.10.3	Erddruckanteil aus Kohäsion	395
10.10.4	Mobilisierbare Erddruckkraft	398
10.11	Grafische Bestimmung des Erddrucks nach <i>Culmann</i>	399
10.12	Sonderfälle gemäß DIN 4085	401
10.12.1	Verdichtungserddruck	401
10.12.2	Silodruck	402
10.12.3	Erddruck bei dynamischen Anregungen des Bodens	403
10.12.4	Erddruck bei vertikaler Durchströmung des Bodens	403
10.13	Zwischenwerte des Erddrucks	404
10.13.1	Erddruck zwischen aktivem Erddruck und Erdruchedruck	404
10.13.2	Erddruck zwischen Erdruchedruck und passivem Erddruck	404
11	Grundbruch	405
11.1	Allgemeines	405
11.2	DIN-Normen	405
11.3	Begriffe	406
11.4	Einflussgrößen und Modelle des Versagenszustands	406

11.5	Theorie von <i>Prandtl</i>	406
11.5.1	Voraussetzungen	406
11.5.2	Spannungs- und Winkelbeziehungen in den <i>Rankine</i> -Zonen	407
11.5.3	Bedingungen in der Übergangszone, <i>Prandtl</i> -Zone	408
11.5.4	Grundbruchformel nach <i>Prandtl</i> , Lösung für die Übergangszone	408
11.6	Verfahren von <i>Buisman</i>	410
11.7	Grundbruchsicherheit nach DIN 1054 und DIN 4017	411
11.7.1	Allgemeines	411
11.7.2	Anwendungserfordernisse	413
11.7.3	Kenngößen des Baugrunds	413
11.7.4	Nachweis der Grundbruchsicherheit gemäß DIN 1054 und DIN EN 1997-1	414
11.7.5	Einwirkungen	414
11.7.6	Grundbruchwiderstände	416
11.7.7	Grundwerte der Tragfähigkeitsbeiwerte und Formbeiwerte	417
11.7.8	Lastneigungsbeiwerte	421
11.7.9	Geländeneigungsbeiwerte	425
11.7.10	Sohlneigungsbeiwerte	426
11.7.11	Berücksichtigung von Bermenbreiten	427
11.7.12	Durchstanzen	428
11.7.13	Abmessungen von Gleitkörpern unter Streifenfundamenten	429
12	Gleiten und Kippen	433
12.1	Gleiten	433
12.1.1	Allgemeines	433
12.1.2	DIN-Normen	433
12.1.3	Gleitsicherheit von Flach- und Flächengründungen nach DIN 1054	434
12.1.4	Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1054	437
12.1.5	Maßnahmen bei nicht erfüllter Gleitsicherheit	438
12.2	Kippen	438
12.2.1	Allgemeines	438
12.2.2	DIN-Normen	440
12.2.3	Kipsicherheit von Flach- und Flächengründungen nach DIN 1054	440
12.2.4	Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1054	441
12.2.5	Ungleichmäßige Setzungen bei hohen Bauwerken	444
13	Geländebruch	445
13.1	Allgemeines	445
13.2	DIN-Normen	445
13.3	Begriffe nach DIN 4084	445
13.4	Erforderliche Unterlagen für Berechnungen gemäß DIN 4084	446
13.5	Sonderfall der ebenen Gleitfläche	447
13.6	Lamellenverfahren (schwedische Methode)	449
13.7	Berechnungen nach Normen	451
13.7.1	Anwendungsbereich	451
13.7.2	Grenzzustand, Einwirkungen und Widerstände	452
13.7.3	Grenzzustandsbedingung	454
13.7.4	Arten der Bruchmechanismen und besondere Bedingungen	455
13.7.5	Bruchmechanismen mit einem Gleitkörper oder zusammengesetzt	456
13.7.6	Lamellenverfahren mit kreisförmig gekrümmten Gleitlinien	457
13.7.7	Lamellenfreie Verfahren mit kreisförmigen und geraden Gleitlinien	459
13.7.8	Zusammengesetzte Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien	461
13.7.9	Anwendungsbeispiele (mit Programm berechnet)	463

13.7.10	Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1054 und DIN 4084	466
14	Aufschwimmen	467
14.1	Maßnahmen bei zu geringer Sicherheit gegen Aufschwimmen	468
14.2	Regelwerke	469
14.3	Grenzzustand des Aufschwimmens nach DIN 1054	469
14.3.1	Allgemeines	469
14.3.2	Nichtverankerte Konstruktionen	469
14.3.3	Verankerte Konstruktionen	471
14.3.4	Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen nach EAB	474
15	Methode der Finiten Elemente (FEM)	483
15.1	Allgemeines	483
15.2	Weggrößenverfahren	484
15.2.1	Vektoren des Gesamtmodells	485
15.2.2	Einheitsknotenbewegungen am Gesamtsystem	486
15.2.3	Biegestabelement	487
15.2.4	Steifigkeitsmatrix des Gesamtsystems	495
15.3	Stoffgesetze	499
15.3.1	Ebener Deformationszustand	501
15.3.2	Ebener Spannungszustand	502
15.4	Scheibenelemente	503
15.4.1	Einheitsbewegungen der Elementknoten	503
15.4.2	Ansatzfunktionen für Elementverschiebungen	504
15.4.3	Verzerrungs- und Spannungsvektor des Elements	506
15.5	Symmetrische und antimetrische Systeme	507
15.6	Anwendungsbeispiel	508
15.6.1	Aufgabenstellung und Modellierung	508
15.6.2	Berechnungsergebnisse am Gesamtmodell	509
15.6.3	Berechnungsergebnisse am halben Modell	513
15.6.4	Antimetrie und Superposition	515
16	Europäische Normung in der Geotechnik	517
16.1	Allgemeines	517
16.2	Deutsche und europäische Normung	517
16.3	Eurocode 7	519
16.3.1	Nationaler Anhang (NA)	520
16.3.2	Deutsche Normen und Empfehlungen, die DIN EN 1997-1 ergänzen	520
16.4	Europäische geotechnische Ausführungsnormen	521
16.5	Weitere europäische geotechnische Normen	521
16.6	Bauaufsichtliche Einführung	522
	Literaturverzeichnis	525
	Firmenverzeichnis	541
	Stichwortverzeichnis	543

1 Einteilung und Benennung von Böden

1.1 Bodenmechanische und geologische Begriffe

1.1.1 Bezeichnungen

Die nachstehenden Bezeichnungen sind zum Teil DIN EN ISO 14688-1 [119] und DIN EN ISO 14689-1 [121] entnommen.

Magma glutflüssige, gashaltige Gesteinsschmelze unterhalb der festen Erdkruste (Erstarrungskruste); magmatische Strömungen können tektonische Bewegungen der Erstarrungskruste (Faltungen, Überschiebungen, Horizontalverschiebungen, Klüfte, Spalten usw.) auslösen.

Sedimentation (Ablagerung) Absetzung von Gesteinsmaterial in „sekundären Lagerstätten“, das durch Verwitterung zerstört (Frostsprengung, Temperaturschwankungen, chemische Einflüsse wie die von Salzen, Säuren, Laugen usw., biologische Einflüsse wie die von Kleinstlebewesen oder Pflanzenwurzeln) und durch Abtragungskräfte (Schwerkraft, Wasser, Wind, Eis und Schnee) aus seiner „primären Lagerstätte“ (ursprünglichen Lagerstätte) fortbewegt wurde.

Metamorphose Gesteinsumwandlung infolge gebirgsbildender Vorgänge (Änderung hoher Drücke und hoher Temperaturen, aber keine Einschmelzung).

Fels (Festgestein) natürlich entstandene Ansammlung konsolidierter, verkitteter oder in anderer Form verbundener Mineralien, die ein Gestein von größerer Druckfestigkeit oder Steifigkeit bilden als Boden.

Trennflächen Schicht-, Kluft-, Schieferungs-, Störungs-, Scherflächen.

Gebirge Fels einschließlich Trennflächen und Verwitterungsprofilen.

Gestein vom Trennflächengefüge begrenzter Fels. Zu unterscheiden sind als Gesteinsarten

- *magmatische Gesteine*
 - *Plutonite (Tiefengesteine)* innerhalb der Erdkruste erstarrtes und kristallisiertes Magma (z. B. Granit, Diorit, Gabbro),
 - *Vulkanite (Ergussgesteine)* z. B. durch Vulkanausbrüche an die Erdoberfläche gelangtes und dort erstarrtes Magma (z. B. Basalt (Bild 1-1), Diabas, Porphyrit, vulkanisches Glas),
- *Sedimentgesteine* Trümmergesteine, Ausscheidungssedimente, organische oder organogene Ablagerungen wie z. B. Braunkohle, Dolomitstein, Kalkstein, Kreidestein, Mergelstein, Salzgestein, Sandstein, Steinkohle usw.,
- *metamorphe Gesteine* mechanisch und thermisch umgewandelte Gesteine wie Glimmerschiefer, Gneis, Granulit, Marmor usw.

Boden (Lockergestein) Gemisch mineralischer Bestandteile in Form einer natürlich entstandenen Ablagerung, aber fallweise organischen Ursprungs, das sich mit geringem Aufwand separieren lässt und unterschiedliche Anteile von Wasser und Luft (fallweise anderen Gasen) enthält. Der Begriff wird auch für Auffüllungen, umgelagerten Boden oder anthropogenes Material verwendet, die ähnliches Verhalten aufweisen (z. B. zerkleinertes Gestein, Hochofenschlacken und Flugaschen). Zu Ursprung und Bildung von Lockergesteinen vgl. auch [156].

Anmerkung: Böden weisen teilweise auch felsartiges Gefüge auf, besitzen aber normalerweise eine geringere Festigkeit als Fels.

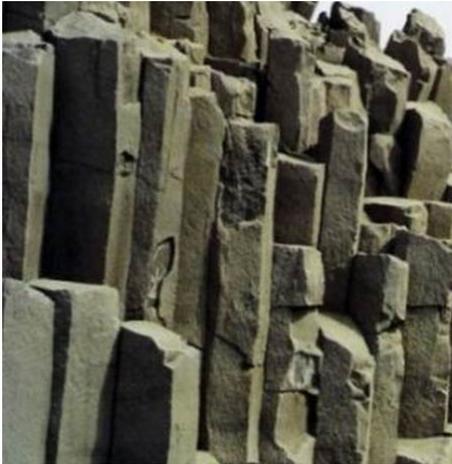


Bild 1-1 Basaltsäulen in Island
(Foto: Silke Burkhardt)

1.1.2 Erdaufbau, Erdzeitalter und Gesteinsbildungen

In der Geotechnik zu behandelnde Problemstellungen betreffen durchweg Maßnahmen im oberflächennahen Bereich der Erdkruste (Bild 1-2). Neben der Einbindung der Baukonstruktionen in den Baugrund (vgl. Abschnitt 1.1.3) ist dabei auch die Tiefe zu berücksichtigen, bis zu der der Boden durch das Bauwerk bzw. die Baumaßnahme noch nennenswert beeinflusst wird. Im Regelfall liegt die entsprechende Gesamttiefe deutlich unter 100 m. Aus Bild 1-2 geht hervor, in welchem Verhältnis solche Tiefen zur Mächtigkeit der verschiedenen Erdzonen stehen.

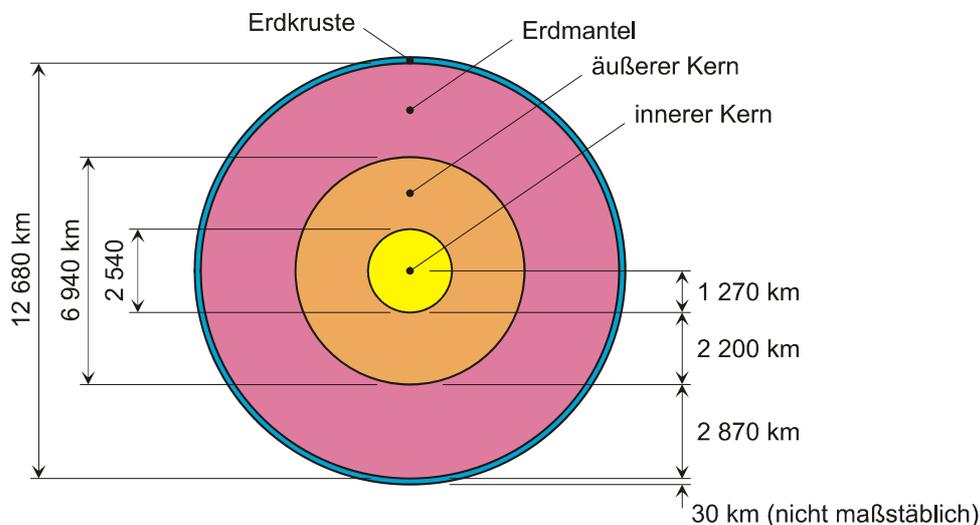


Bild 1-2 Erdaufbau in stark vereinfachter Form; in der Literatur zu findende Abmessungen weisen geringfügige Abweichungen zu den angegebenen Zahlenwerten auf

Im Laufe der Erdgeschichte haben sich die Bedingungen für die Bildung von Gesteinen immer wieder verändert. Tabelle 1-1 gibt entsprechende zeitliche Zuordnungen für den süddeutschen Raum an (die in Mill. Jahren angegebenen Zahlen sind leicht gerundet). Für andere Räume geltende Gegebenheiten lassen sich z. B. bei den jeweiligen Geologischen Landesämtern abfragen.

Tabelle 1-1 Erdzeitalter und hauptsächliche Gesteinsbildungen im süddeutschen Raum (stark generalisiert); nach [153]

System (Formation)	Beginn (Mill. Jahre)	Serie (Abteilung)	Stufe	Hauptsächliche Gesteinsbildungen
Quartär	2,6	Holozän		Lockerböden, Faulschlamm, Moore, Torf
		Pleistozän		Löss, Moränen, Schotter, Bändertone, Torf
Tertiär	65,5	Miozän Oligozän		Mergel, Sande, Tone, Konglomerate, Basalte, Quarzite, Flysch
Kreide	145,5	Oberkreide		Mergelstein, Sandstein
Jura	199,6	Malm (Weißer Jura)		Kalksteine, Mergelsteine
		Dogger (Brauner Jura)		Tonsteine, Eisenoolithe, Kalksteine, Sandsteine
		Lias (Schwarzer Jura)		Wechselfolge aus Ton-, Mergel- und Sandsteinen, Kalksteinen und Schiefer-tonen
Trias	251	Keuper	Oberer Keuper (Rhät)	Tonstein, Sandstein
			Mittlerer Keuper (Gipskeuper)	Tonstein, Gips, Anhydrit, Sandstein, Steinmergel, Dolomitstein
			Unterer Keuper (Lettenkeuper)	Sandstein, Mergelstein, Dolomitstein
		Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	Kalk- und Mergelsteine, Dolomitstein
			Mittlerer Muschelkalk	Dolomitstein, Tonstein, Salzgesteine, Gips
			Unterer Muschelkalk (Wellengebirge)	Kalkstein, Dolomitstein, Mergelstein
		Buntsandstein	Oberer Buntsandstein (Röt)	Tonsteine, Gips
			Mittlerer Buntsandstein (Hauptbuntsandstein)	Sandsteine, Tonsteine
			Unterer Buntsandstein (Bröckelschiefer)	Sandsteine, Tonsteine
Perm	299	Zechstein Rotliegendes		Schiefertone, Arkosesandsteine, Konglomerate, Tonsteine, Mergelsteine, Dolomitsteine, Porphyre (Süddeutschland ohne Salzlager)
Karbon	359			Grauwacken, Arkosesandsteine, Porphyre, Konglomerate, Schiefertone
Devon	416			Schiefer
Altpaläozoikum	542			Granite, Gneise

1.1.3 Nutzung von Boden oder Fels

Baugrund Boden oder Fels (einschließlich aller Inhaltsstoffe wie z. B. Grundwasser, Luft und Kontaminationen), in dem Bauwerke gegründet oder eingebettet werden sollen bzw. gegründet oder eingebettet sind oder der durch Baumaßnahmen beeinflusst wird (Bild 1-3).

Baustoff Boden oder Fels, der bei der Errichtung von Bauwerken oder Bauteilen Verwendung findet (Bild 1-3).

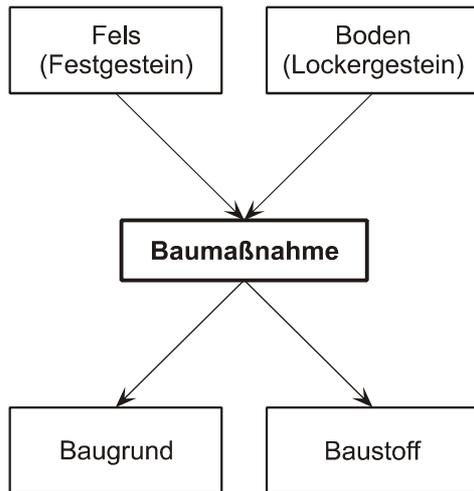


Bild 1-3 Bezeichnungsveränderungen infolge von Baumaßnahmen

Hinweis: Zur Unterscheidung zwischen Boden (Lockergestein) und Fels (Festgestein) vgl. auch Tabelle 5-32.

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass in DIN EN 1997-1, 1.5.2.3 [100] „Baugrund“ definiert wird als Boden, Fels und Auffüllung, die vor Beginn der Baumaßnahme vor Ort vorhanden sind.

1.2 Normen und Kriterien zur Einteilung

Die Klassifikation und Benennung von Böden erfolgt nach sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten. Dies lässt sich u. a. schon daran erkennen, dass zu diesem Thema entsprechende Ausführungen in so verschiedenen DIN-Normen wie

- DIN 1054 [20], DIN 4023 [42], DIN 18196 [83], DIN 18300 [84], DIN 19682-1 [87], DIN 19682-2 [88], DIN 19682-12 [91], DIN EN 1997-1 [100], DIN EN ISO 14688-1 [119], DIN EN ISO 14688-2 [120], DIN EN ISO 14689-1 [121] und DIN EN ISO 22475-1 [128]

zu finden sind. Als Einteilungskriterien für die Böden dienen dabei z. B.

- ihre Entstehung
 - Verwitterung (Zerstörung der Gesteine durch physikalische, chemische und biologische Vorgänge; vgl. Abschnitt 1.1.1),
 - Erosion (Abtragung),
 - Frachtung (Transport) durch Wind (äolische Böden), Eis (glaziale Böden) oder Wasser (Geröll- und Schwebfrachtung),
 - Sedimentation (vgl. Abschnitt 1.1.1),
- die Menge und der Zustand ihrer organischen Bestandteile (brennbar, schwelbar),
- die Größe und der Anteil ihrer Körner
 - Siebkorn (Korngröße > 0,063 mm),

- Schlämmkorn (Korngröße $\leq 0,063$ mm),
- Korngrößenverteilung;
- ihre bodenmechanischen Eigenschaften, wie
 - Dichte,
 - Lagerungsdichte,
 - Korngrößenverteilung,
 - Wasserdurchlässigkeit,
 - Kohäsion,
 - Scherfestigkeit,
 - Zusammendrückbarkeit,
- ihre Bearbeitbarkeit
 - Lösen und Laden,
 - Fördern,
 - Einbauen und Verdichten,
- ihr unterschiedliches Verhalten bei Belastung
 - Fels,
 - gewachsener Boden (Lockergestein),
 - geschütteter (aufgeschütteter oder aufgespülter) Boden,
- ihre Verwendbarkeit für bautechnische Zwecke (Aufteilung in Gruppen mit annähernd gleichem stofflichem Aufbau und ähnlichen bautechnischen Eigenschaften, wie z. B. Scherfestigkeit, Verdichtungsfähigkeit, Frostempfindlichkeit),
- ihre Erkennbarkeit bei Feldversuchen (auf der Baustelle), wie z. B.
 - Bodenfarbe (Farbensprache mit oder ohne Farbtafeln; Näheres siehe auch DIN 19682-1),
 - Plastizität (Trockenfestigkeitsversuch, Knetversuch; siehe Abschnitte 1.6.3 und 1.6.5),
 - Kalkgehalt (Auftropfen von verdünnter Salzsäure; siehe Abschnitt 5.7.2),
 - Konsistenz (Verformbarkeit des Bodens mit der Hand; siehe Abschnitt 1.6.4).

Mit dem Bild 1-4 wird gezeigt, wie eiszeitliche Frachtvorgänge die Landschaft formen können und dabei die Beschaffenheit des Bodens verändern (glaziale Böden). Mit den nachstehenden Definitionen werden in Bild 1-4 verwendete Begriffe erläutert.

Drumlin (Plural: *Drumlins*) zur Grundmoränenlandschaft gehörender länglicher Hügel mit tropfenförmigem Grundriss und einer Längsachse, die in Richtung der Eisbewegungslinie verläuft.

Wallberg wallförmig sedimentiertes Material, das vom Eis bewegt wurde.

Kame (Plural: *Kames*) Erhebung in einer glazialen Aufschüttungslandschaft, die am Eisrand durch Ablagerung des vom Eis bewegten Materials gegen ein Widerlager (z. B. Toteisblock) entstanden ist.

Soll (Plural: *Sölle*) kleines „Wasserloch“, dessen Entstehung auf das Abschmelzen eines verbliebenen Toteisblocks zurückzuführen ist (von Moränenmaterial überdeckt, war dieser für lange Zeit thermisch isoliert) und das vor allem in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg zu finden ist (Bild 1-5).

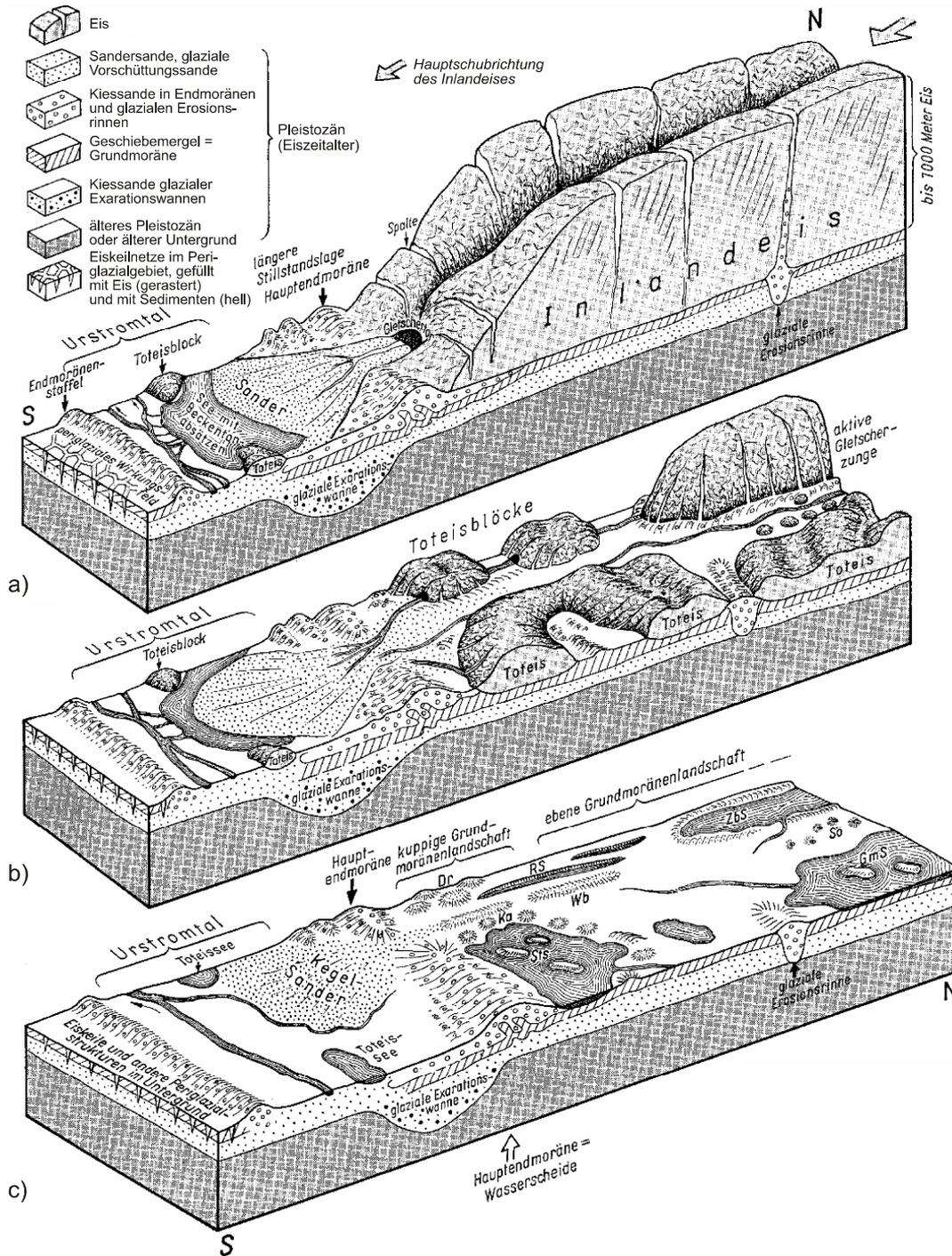


Bild 1-4 Formung der Landschaft des Norddeutschen Tieflands durch das eiszeitliche Inlandeis (aus [262])

a) geschlossene Eisdecke und ihr Vorland

b) Zerfall der Eisdecke in der Abschmelzphase

c) gegenwärtige Landschaft (GmS = Grundmoränensee, ZbS = Zungenbeckensee, RS = Rinnensee, StS = Endmoränenstausee, Dr = Drumlin, Wb = Wallberg, Ka = Kames, Sö = Sölle)

In Tabelle 1-2 sind die drei letzten großen Eiszeiten (geologisch: „Kaltzeiten“) im norddeutschen Raum hinsichtlich ihrer zeitlichen Abfolge zusammengestellt.

Tabelle 1-2 Die drei letzten großen Eiszeiten im norddeutschen Raum (nach Angaben des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Bundeslandes Brandenburg; Stand 2005)

	Zeiten (in 10 ³ Jahren vor der Gegenwart)		
	Beginn	Ende	Dauer
Weichsel-Kaltzeit	115	10,2	104,8
Saale-Kaltzeit	347	128	219
Elster-Kaltzeit	475	370	105



Bild 1-5 Soll in Mecklenburg-Vorpommern (durch Abschmelzen eines Toteisblocks entstanden)

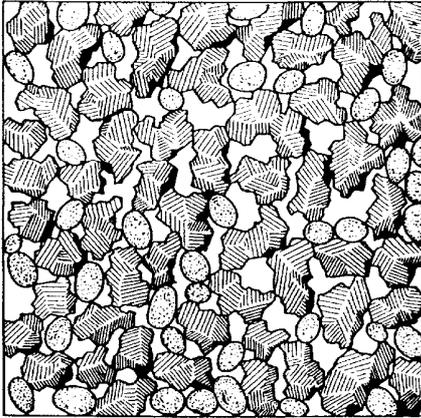
1.3 Einteilung nach Korngrößen und organischen Bestandteilen

1.3.1 Kornstrukturen grob- und feinkörniger Böden

Die mineralischen Partikel von Böden, und insbesondere von natürlich entstandenen (gewachsenen) Böden, sind „Körner“ mit unterschiedlichen Größen, Formen und Materialbeschaffenheiten.

Böden, deren einzelne Körner mit bloßem Auge erkennbar sind (Sande, Kiese, Schotter usw.), werden „grobkörnig“ und vereinfachend „nichtbindig“ oder „rollig“ genannt (Bild 1-6). Neben unterschiedlichen Formen, mit Bezeichnungen wie z. B. „kugelig“, „plattig“ und „stäbchenförmig“ (Bild 1-7), weisen diese Körner auch sehr verschiedene Oberflächenstrukturen auf (Bild 1-7).

Böden, die dadurch gekennzeichnet sind, dass sich ihre einzelnen Körner nicht mehr mit bloßem Auge erkennen lassen (Tone, Schluffe usw.), werden als „feinkörnig“ und, bei Korngrößen der Böden von unter $\approx 0,02$ mm, vereinfachend als „bindig“ oder „kohäsiv“ bezeichnet.



 eckig-kantige Körnung
  abgerundete Körnung

Bild 1-6 Einzelkornstruktur eines grobkörnigen Bodens (nach [244])

Im Gegensatz zu den grobkörnigen (nichtbindigen) Böden weisen Tone, Schluffe (Fein- und Mittelschluffe) und bindige Mischböden (z. B. Mergel, Lehm) plastische Eigenschaften auf.



Bild 1-7 Bezeichnungen für Kornform (oben) und Kornrauigkeit (unten) (nach [172], Kapitel 1.3)

Nach DIN EN ISO 14688-1 sind zur Bezeichnung der Kornform die in Tabelle 1-3 zusammengestellten Begriffe zu verwenden, die in der Regel nur für Kies oder gröberes Material benutzt werden.

Tabelle 1-3 Begriffe für die Bezeichnung der Kornform (nach DIN EN ISO 14688-1, Tabelle 4)

Rundung	Kornform Form	Oberflächenstruktur
scharfkantig	kubisch	rau
kantig	flach (plattig)	glatt
kantengerundet	länglich (stängelig)	
angerundet		
gerundet		
gut gerundet		

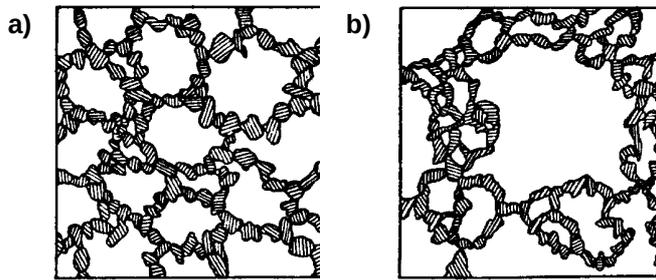
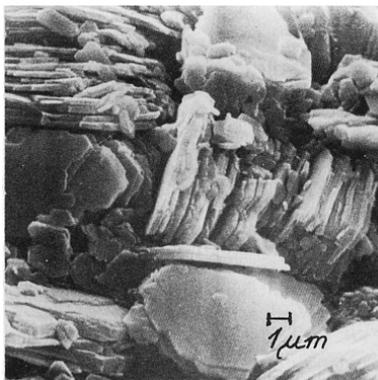
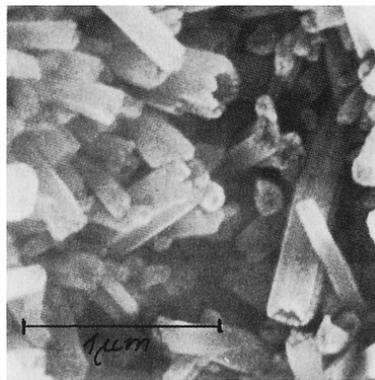


Bild 1-8 Waben- (a) und Flockenstruktur (b) von Tonen, nach Terzaghi (aus [261])

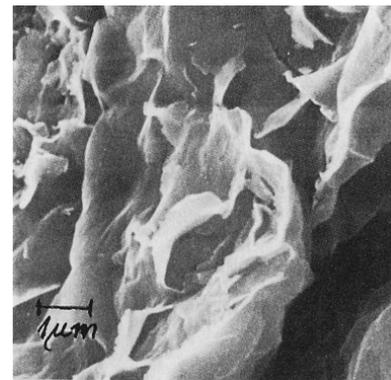
Nach [172], Kapitel 1.3 neigen insbesondere in Wasser aufgeschlämmte Tone beim Absinken dazu, sich mit ihren Einzelementen im Süßwasser in kartenhausartigen (wabenhöflichen) und im Salzwasser in bandartigen (flockenförmigen) Strukturen abzulagern (Bild 1-8). Das durch weitere Materialauflagerungen entstehende Sediment weist im Bereich solcher Aggregationsformen sehr viel Hohlraum auf. Insgesamt entstehen bei der Sedimentation mehr oder weniger dichte Gefügestrukturen, wie sie in Bild 1-9 anhand einiger Beispiele gezeigt sind. Hinsichtlich der Vorgänge, die die chemische Zusammensetzung des Wassers beeinflussen, sowie der an den Teilchenoberflächen auftretenden elektrischen Ladungskräfte und der auf die Teilchen wirkenden elektrostatischen und molekularen Anziehungskräfte sei z. B. auf [17] und besonders auf [192] verwiesen.



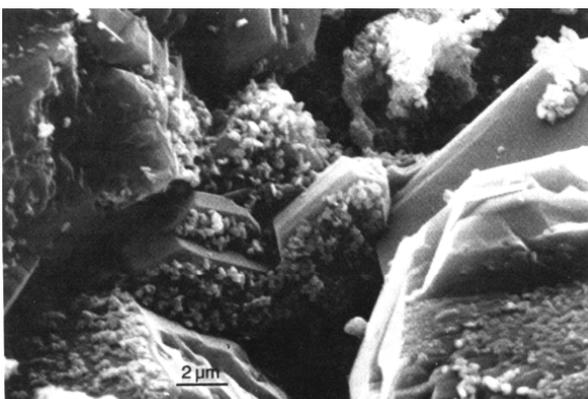
a) Kaolin



b) Halloysit



c) Montmorillonit



d) tafeliges Gibbsite bedeckt mit Hämatit

Bild 1-9 Rasterelektronische Aufnahmen von Tonmineralien (Bilder a, b und c aus [170], Kapitel 1.5 und Bild d aus [192])

1.3.2 Einteilung reiner Bodenarten

In Tabelle 1-4 wird die Einteilung und Benennung gemäß DIN EN ISO 14688-1, 4.2 von Böden mit Korngrößen bis zu 630 mm und mehr gezeigt. Die Einteilung definiert „reine“ Bodenarten, die aus nur einem der aufgeführten Korngrößenbereiche bestehen und nach diesem benannt werden (z. B. Kies (Gr), Grobsand (CSa), Feinschluff (FSi), Ton (Cl)).

Tabelle 1-4 Einteilung und Benennung von Böden nach Korngrößen (nach DIN EN ISO 14688-1, Tabelle 1; Bemerkungen nach [41])

Bereich	Benennung (Kurzzeichen)	Korngröße (in mm)	Bemerkungen
sehr grobkörniger Boden	großer Block (LBo)	> 630	–
	Block (Bo)	> 200 bis 630	> Kopfgröße
	Stein (Co)	> 63 bis 200	< Kopfgröße > Hühnereier
grobkörniger Boden	Kies (Gr)	> 2 bis 63	< Hühnereier > Streichholzköpfe
	Grobkies (CGr)	> 20 bis 63	< Hühnereier > Haselnüsse
	Mittelkies (MGr)	> 6,3 bis 20	< Haselnüsse > Erbsen
	Feinkies (FGr)	> 2 bis 6,3	< Erbsen > Streichholzköpfe
	Sand (Sa)	> 0,063 bis 2	< Streichholzköpfe, aber Einzelkorn noch erkennbar
	Grobsand (CSa)	> 0,63 bis 2	< Streichholzköpfe > Gries
	Mittelsand (MSa) Feinsand (FSa) *	> 0,2 bis 0,63 > 0,063 bis 0,2	etwa Gries < Gries, aber Einzelkorn noch erkennbar
feinkörniger Boden	Schluff (Si)	> 0,002 bis 0,063	Einzelkörner mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar
	Grobschluff (CSi) *	> 0,02 bis 0,063	
	Mittelschluff (MSi)	> 0,0063 bis 0,02	
	Feinschluff (FSi)	> 0,002 bis 0,0063	
	Ton (Cl)	≤ 0,002	

*) Sand mit Korngrößen $\leq 0,1$ mm und Grobschluff werden auch als „Mehlsand“ bezeichnet.

In Ergänzung zu den Einteilungen in Tabelle 1-4 ist zu bemerken, dass zwar alle Bodenteilchen mit Korngrößen $< 0,002$ mm (< 2 μ m) in die Kategorie „Ton“ eingeordnet werden, Tone aber erhebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Teilchengröße aufweisen können. Nach [192] liegen mittlere „Korngrößen“ von

- Kaoliniten zwischen 0,5 und 4 μ m,
- Illiten, Glaukoniten und Seladoniten $< 0,6$ μ m und
- Montmorilloniten $< 0,2$ μ m.

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die nach DIN EN ISO 14688-1 zu verwendenden Kurzzeichen zur Benennung der Böden nicht mit den Kurzformen übereinstimmen, die in DIN 4023 für die zeichnerische Darstellung angegeben werden (bezüglich der entsprechenden Begründung siehe DIN 4023, Anhang B). Gemäß dem Nationalen Anhang von DIN EN ISO 14688-1 ist sowohl die Verwendung der Kurzzeichen nach DIN EN ISO 14688-1 als auch die der Kurzformen nach

DIN 4023 zulässig. Tabelle 1-5 zeigt eine entsprechende Gegenüberstellung dieser Kurzbezeichnungen.

Tabelle 1-5 Gegenüberstellung der zur Benennung von Böden zu verwendenden Kurzformen nach DIN 4023 und Kurzzeichen nach DIN EN ISO 14688-1 (nach DIN 4023, Tabelle B.1)

Benennung des Bodens	Kurzform, DIN 4023	Kurzzeichen, DIN EN ISO 14688-1
große Blöcke	–	LBo
Blöcke	Y	Bo
Steine	X	Co
Kies (Gr)	G	Gr
Grobkies	gG	CGr
Mittelkies	mG	MGr
Feinkies	fG	FGr
Sand	S	Sa
Grobsand	gS	CSa
Mittelsand	mS	MSa
Feinsand	fS	FSa
Schluff	U	Si
Grobschluff	–	CSi
Mittelschluff	–	MSi
Feinschluff	–	FSi
Ton	T	Cl

1.3.3 Einteilung zusammengesetzter Böden

Zusammengesetzte Böden sind Gemische aus reinen Bodenarten. Da die zum jeweiligen Gemisch gehörenden Bodenarten unterschiedlich große Anteile an der Mischung aufweisen können, wird in DIN EN ISO 14688-1, 4.3.1 unterschieden zwischen

– Haupt- und Nebenanteilen.

Eine Bodenart stellt den Hauptanteil des zusammengesetzten Bodens dar, wenn sie nach den Massenanteilen am stärksten vertreten ist bzw. die bestimmenden Eigenschaften des Bodens prägt (vgl. auch Tabelle 1-6).

Bei grobkörnigen (Sand und Kies) und sehr grobkörnigen Böden (Steine und Blöcke) entspricht der Hauptanteil der Kornfraktion, die den Massenanteil am stärksten bestimmt. Dies gilt auch für gemischtkörnige Böden, wenn deren Verhalten durch ihren Feinkorn-Massenanteil nicht bestimmt wird. Bei feinkörnigen Böden ist die Kornfraktion der Hauptanteil, die das Verhalten des Bodens bestimmt. Zur Unterscheidung in „sehr grobkörnig“, „grobkörnig“ und „feinkörnig“ können die Definitionen von Tabelle 1-4 und Tabelle 1-7 verwendet werden.

Nach den Erläuterungen (zu 4.2) des Nationalen Anhangs (NA) von DIN EN ISO 14688-2 definieren sich die Hauptanteile von zusammengesetzten Bodenarten in zweierlei Form. Im ersten Fall ist der Hauptanteil die nach Massenanteilen am stärksten vertretene Bodenart bei

– grobkörnigen Böden mit einem Massenanteil an Feinkorn (Schluff und/oder Ton) von < 5 %,

- gemischtkörnigen Böden mit einem zwischen 5 % und 40 % liegenden Massenanteil an Feinkorn (Schluff und/oder Ton), welche das Verhalten des gemischtkörnigen Bodens nicht bestimmt.

Im zweiten Fall ist der Hauptanteil die Bodenart, welche die bestimmenden Eigenschaften des Bodens prägt. Dies gilt bei

- feinkörnigen Böden (Böden mit einem Massenanteil an Feinkorn von > 40 %; vgl. Tabelle 1-6),
- gemischtkörnigen Böden, deren Feinkorn-Massenanteil das Verhalten des Bodens bestimmt.

Gemäß DIN EN ISO 14688-1, 4.3.2 bestimmt das Feinkorn dann nicht das Verhalten eines gemischtkörnigen Bodens, wenn der Boden im Trockenfestigkeitsversuch (vgl. Abschnitt 1.6.3) keine oder nur eine niedrige Trockenfestigkeit aufweist bzw. wenn er beim Knetversuch (vgl. Abschnitt 1.6.5) keine Knetfähigkeit zeigt. Hingegen ist von dem Bestimmen des Verhaltens eines gemischtkörnigen Bodens durch das Feinkorn auszugehen, wenn dieser mindestens eine mittlere Trockenfestigkeit aufweist und/oder knetbar ist).

Eine Bodenart repräsentiert nach DIN EN ISO 14688-1, 4.3.3 einen Nebenanteil, wenn sie die bestimmenden Eigenschaften des Bodens nicht prägt (siehe vorigen Absatz), ggf. aber beeinflusst.

Richtwerte zur Unterscheidung nach Haupt- und Nebenanteilen gemäß DIN EN ISO 14688-2 lassen sich Tabelle 1-6 entnehmen.

Tabelle 1-6 Richtwerte für die Einteilung mineralischer Böden anhand von Korngrößenbereichen (nach DIN EN ISO 14688-2, Tabelle B.1)

Korngrößenbereich	Anteil der Korngrößenbereiche ≤ 63 mm Massen-%	Anteil der Korngrößenbereiche ≤ 0,063 mm Massen-%	Bodenart	
			Nebenbestandteil	Hauptbestandteil
Kies	20 bis 40 > 40		kiesig	Kies
Sand	20 bis 40 > 40		sandig	Sand
Schluff + Ton (feinkörnige Böden)	5 bis 15	< 20	schwach schluffig	Schluff Schluff Ton Ton
	15 bis 40	≥ 20	schwach tonig	
		< 20	schluffig	
	> 40	≥ 20	tonig	
		< 10	tonig	
		10 bis 20	tonig	
		20 bis 40	schluffig	
		> 40		

Zur Bezeichnung zusammengesetzter Böden und vor allem zur Hervorhebung ihrer Anteile an reinen Bodenarten sind nach DIN EN ISO 14688-1 und DIN EN ISO 14688-2 die nachstehenden Kennzeichnungen zu verwenden (zu beachten sind die Erläuterungen der Nationalen Anhänge dieser Normen). Zusätzlich werden hier auch die entsprechenden Angaben von DIN 4023 aufgeführt, da deren Verwendung gemäß dem Nationalen Anhang von DIN EN ISO 14688-1 ebenfalls zulässig ist.

- Bezeichnung von Hauptanteilen mit
 - Substantiven (z. B. Kies, Sand, Grobsand, Feinsand, Schluff, Feinschluff, Ton) bzw.

- Großbuchstaben am Anfang des Kurzzeichens der Korngruppe und zur Erfassung der Stufen „grob“, „mittel“ und „fein“ (z. B. Gr, Sa, CSa, FSa, Si, Cl oder gemäß DIN 4023: G, S, gS, fS, U, T),
- Bezeichnung von Nebenanteilen mit
 - Adjektiven (z. B. kiesig, sandig, grobsandig, feinsandig, schluffig, tonig), die in der Reihenfolge ihres Massenanteils den Substantiven der Hauptanteile beigefügt werden (z. B. Kies, sandig oder Feinkies, grobsandig oder Schluff, mittelsandig) bzw.
 - Kleinbuchstaben (z. B. gr, sa, csa, fsa, si, cl oder gemäß DIN 4023: g, s, gs, fs, u, t), die in der Reihenfolge ihres Massenanteils den Kurzzeichen der Hauptanteile beigefügt werden (z. B. saGr für Kies, sandig oder csaFGr für Feinkies, grobsandig oder msaSi für Schluff, mittelsandig; gemäß DIN 4023 ist die Schreibweise G, s für Kies, sandig oder fG, gs für Feinkies, grobsandig oder U, ms für Schluff, mittelsandig) bzw.
 - den Adjektiven vorgesetztem „schwach“, wenn z. B. grobkörnige Nebenanteile mit < 15 % Massenanteil in dem Gemisch vertreten sind oder feinkörnige Nebenanteile in grobkörnigem Boden gemäß Tabelle 1-7 das Verhalten des Bodens in besonders geringem Maße beeinflussen (z. B.: schwach kiesig, schwach sandig, schwach grobsandig, schwach feinsandig, schwach schluffig, schwach tonig),
 - den Kleinbuchstaben folgendem Apostroph bei schwachen Nebenanteilen (z. B. g', s', gs', fs', u', t'),
 - den Adjektiven vorgesetztem „stark“, wenn z. B. grobkörnige Nebenanteile mit > 30 % Massenanteil in dem Gemisch vertreten sind oder feinkörnige Nebenanteile in grobkörnigem Boden gemäß Tabelle 1-7 das Verhalten des Bodens in besonders starkem Maße beeinflussen (z. B.: stark kiesig, stark feinkiesig, stark sandig, stark schluffig, stark tonig),
 - einem Strich über dem Kleinbuchstaben bei starken Nebenanteilen (z. B. \bar{g} , \bar{s} , \bar{gs} , \bar{fs} , \bar{u} , \bar{t}) bzw. einem dem Kleinbuchstaben nachgestellten *-Symbol (z. B. g*, s*, gs*, fs*, u*, t*).

Tabelle 1-7 Einteilung zusammengesetzter Böden (ohne sehr grobkörnige Anteile)

Gemischtkörnige Böden			
grobkörnige Böden		feinkörnige Böden	
Sande und Kiese mit Beimengungen aus Ton und Schluff	Gemische aus Grob- und Feinkorn (Kies + Sand + Schluff + Ton)		Tone und Schluffe mit Beimengungen aus Sand und Kies
Massenanteil des Feinkorns (Schluff und/oder Ton) < 5 %	Massenanteil des das Bodenverhalten nicht bestimmenden Feinkorns ≥ 5 % bis ≤ 40 %	Massenanteil des das Bodenverhalten bestimmenden Feinkorns ≥ 5 % bis ≤ 40 %	Massenanteil des Feinkorns (Schluff und/oder Ton) > 40 %

Mit den genannten Kennzeichen ergeben sich Bodenbezeichnungen wie z. B. (Hinweis: in DIN EN ISO 14688-1 werden starke und schwache Nebenanteile nicht näher definiert)

- | | | |
|--|------|---------------------------------------|
| Grobsand, mittelsandig, feinkiesig | bzw. | msafgrCSa (nach DIN 4023: gS, ms, fg) |
| Grobsand, mittelsandig, schwach kiesig | bzw. | gS, ms, g' |
| Grobsand, stark kiesig, mittelsandig | bzw. | gS, \bar{g} , ms bzw. gS, g*, ms |
| Sand, stark kiesig, schwach schluffig | bzw. | S, \bar{g} , u' bzw. S, g*, u' |

Enthält ein grobkörniger Boden zwei reine Bodenarten (z. B. Mittelsand und Kies) mit etwa gleichen Massenanteilen zwischen > 40 % und < 60 %, ist er nach DIN 4023 mit

- | | | |
|---------------------|------|------|
| Mittelsand und Kies | bzw. | mS/G |
|---------------------|------|------|

und nach DIN EN ISO 14688-1 mit Mittelsand/Kies bzw. MSa/Gr zu bezeichnen.

Etwas andere Bezeichnungen als die bisherigen ergeben sich, wenn das in Bild 1-10 gezeigte Dreiecknetz auf zusammengesetzte Böden ohne Kiesanteile angewendet wird. Dies ist u. a. auf die Verwendung des Begriffs „Lehm“ zurückzuführen.

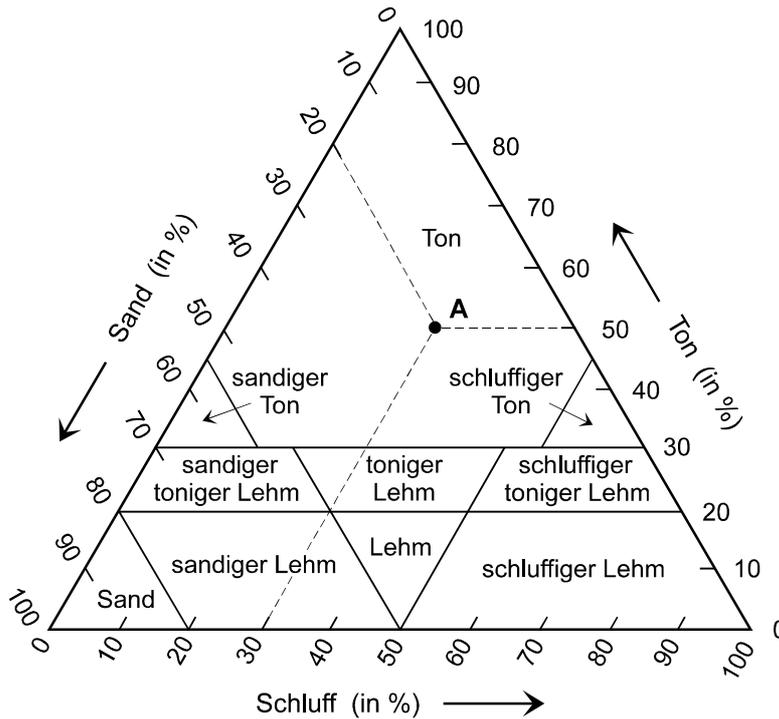


Bild 1-10 Dreiecknetz der Public Roads Administration zur Bodenklassifizierung (nach Terzaghi [261])

Anwendungsbeispiel

Mit Hilfe des Dreiecknetzes aus Bild 1-10 ist ein Boden zu klassifizieren, dessen Kornmasse zu 20 % aus Sand, zu 30 % aus Schluff und zu 50 % aus Ton besteht.

Lösung

Die Benutzung des Dreiecknetzes zeigt, dass es sich bei dem zu klassifizierenden Boden um Ton handelt (Punkt A in Bild 1-10).

Neben den bisher angegebenen Begriffen zur Benennung von Böden sind in der Literatur und in der Praxis noch eine große Anzahl weiterer Bezeichnungen zu finden. Zu diesen gehören z. B.

Geschiebemergel (Mg) in Eiszeiten durch Ablagerung entstandener kalkhaltiger bindiger Boden, aus Geröll, Kies, Sand, Schluff und Ton bestehende Mischung mit regelloser Struktur.

Geschiebelehm (Lg) entspricht Geschiebemergel, bei dem der Kalk durch Sicker- und Grundwasser ausgewaschen wurde.

Lehm (L) bindiger Boden als Mischung aus Kies, Sand, Schluff und Ton (z. B. *Verwitterungslehm*, *Auelehm* und *Hanglehm*).

Löss (Lö) vom Wind angewehtes, gleichkörniges, zumeist hellbraunes Sediment mit hohem Anteil der Teilchengrößen von 0,01 bis 0,05 mm und mit ≈ 10 bis 20 % Kalkanteil.

Letten (Lö) Ton mit ≈ 10 bis 40 % Kalkanteil, etwas lockerer als Ton, praktisch undurchlässig.

Bänderton (Bt) in regelmäßiger Folge abgelagertes Sediment im Schmelzwasserbecken des Gletschervorlandes. Bänderton weist, in mm- bis cm-Dicke, Jahresablagerungen auf, die aus hellen Feinsand-/Schlufflagen (Ablagerung im Sommer) und dunklen Ton-/Schlufflagen (Ablagerung im Winter) bestehen.

1.3.4 Einteilung von Böden mit organischen Bestandteilen

Böden können vollkommen aus organischen Substanzen bestehen oder organische Stoffe als Beimengungen besitzen. Organische Substanzen sind Überreste pflanzlichen und/oder tierischen Lebens, die im Boden verblieben sind und im Laufe der Zeit physikalischen und chemischen Umwandlungsprozessen unterworfen wurden. Humus, Torf und Faulschlamm sind Beispiele für das Ergebnis dieser Prozesse.

DIN 18196 unterscheidet anhand des Massenanteils an organischen Bestandteilen zwischen (siehe Tabelle 5-9)

- organischen Böden (im getrockneten Zustand an der Luft brenn- oder schwelbar) und
- organogenen Böden (im getrockneten Zustand an der Luft weder brenn- noch schwelbar).

Zu weiteren Unterscheidungen siehe Abschnitt 5.6.4 und DIN 18196.

Wie bei den zusammengesetzten Bodenarten findet sich in der Praxis auch für Böden mit organischen Bestandteilen eine Vielzahl weiterer Bodenartnamen. In diese Gruppe gehören Begriffe wie (siehe auch Tabelle 1-8)

Mutterboden oder auch *Oberboden* (Mu) aus Kies-, Sand-, Schluff- und Tongemischen bestehende oberste Bodenschicht, die auch Humus und Lebewesen enthält.

Mudde oder auch *Faulschlamm* (F) in Verlandungsgebieten von Gewässern vorkommender organischer Boden mit mineralischen Beimengungen.

Schlick (Kl) am küstennahen Meeresboden abgelagerter Tonschlamm (gemischt mit organischen Stoffen, Schluff und Feinsand).

Klei (Kl) ältere, verfestigte Schlickablagerung und typischer Boden für die Marsch (Schwemmland an Küsten und Flüssen).

Tabelle 1-8 Benennung und Beschreibung organischer Böden (nach DIN EN ISO 14688-1, Tabelle 2)

Benennung	Beschreibung
faseriger Torf	faserige Struktur, leicht erkennbare Pflanzenstruktur; besitzt gewisse Festigkeit
schwach faseriger Torf	erkennbare Pflanzenstruktur; keine Festigkeit des erkennbaren Pflanzmaterials
amorpher Torf	keine erkennbare Pflanzenstruktur; breiige Konsistenz
Mudde (Gyttja)	pflanzliche und tierische Reste; mit anorganischen Bestandteilen durchsetzt
Humus	pflanzliche Reste, lebende Organismen und deren Ausscheidungen; bilden mit anorganischen Bestandteilen den Oberboden (Mutterboden)

1.4 Einstufung in Boden- und Felsklassen

Gemäß ihrem Zustand beim Lösen werden Boden und Fels nach [85] in die nachstehenden Klassen eingeteilt (in der aktuellen DIN 18300 wird auf diese Einteilung verzichtet). Die Einteilung gilt für die Klassen 2 bis 7, Klasse 1 wird als eigene Klasse geführt. Zusätzlich angegebene Gruppenbezeichnungen (z. B. OH) sind DIN 18196 entnommen.

Klasse 1: *Oberboden*

Oberste Bodenschicht, die nicht nur Kies-, Sand-, Schluff- und Tongemische, sondern auch Humus und Bodenlebewesen enthält (OH).

Klasse 2: *Fließende Bodenarten*

Bodenarten von flüssiger bis breiiger Beschaffenheit (Konsistenzzahl $I_C < 0,5$, nach DIN 18122-1 [65]), die das Wasser schwer abgeben (Hinweis: nach DIN EN ISO 14688-2 wäre dieser Boden von breiiger bis sehr weicher Beschaffenheit).

Nach den ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270] gehören hierzu

– organische Böden der Gruppen HN, HZ und F

sowie beim Lösen ausfließende und eine Konsistenzzahl von $I_C < 0,5$ aufweisende

– feinkörnige Böden der Gruppen UL, UM, UA, TL, TM, TA sowie organogene Böden und Böden mit organischen Beimengungen der Gruppen OU, OT, OH und OK, sofern diese Böden beim Lösen ausfließen,

– gemischtkörnige Böden der Gruppen SU*, ST*, GU* und GT* mit breiiger oder flüssiger Konsistenz, sofern diese Böden beim Lösen ausfließen.

Klasse 3: *Leicht lösbare Bodenarten*

Nicht- bis schwachbindige Sande, Kiese und Sand-Kies-Gemische mit $\leq 15\%$ Masseanteil an Schluff und Ton (Korngrößen $< 0,063$ mm) und mit einem Masseanteil von $\leq 30\%$ an Steinen der Korngröße > 63 mm und ≤ 200 mm.

Organische Bodenarten, die nicht von flüssiger bis breiiger Konsistenz sind, und Torfe.

Gemäß den ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270] gehören in diese Klasse

– grobkörnige Böden der Gruppen SW, SI, SE, GW, GI und GE,

– gemischtkörnige Böden der Gruppen SU, ST, GU und GT,

– beim Ausheben standfest bleibende Torfe der Gruppe HN mit geringem Wassergehalt.

Klasse 4: Mittelschwer lösbare Bodenarten

Gemische aus Sand, Kies, Schluff und Ton mit einem Masseanteil von $> 15\%$ an Korn mit Korngrößen $< 0,063\text{ mm}$.

Weiche bis halbfeste bindige Bodenarten mit leichter bis mittlerer Plastizität und einem Masseanteil von $\leq 30\%$ an Steinen.

Die ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270] zählen hierzu

- feinkörnige Böden der Gruppen UL, UM, UA, TL und TM,
- gemischtkörnige Böden der Gruppen SU*, ST*, GU* und GT*,
- organogene Böden sowie Böden mit organischen Beimengungen der Gruppen OU, OH und OK.

Klasse 5: Schwer lösbare Bodenarten

Bodenarten gemäß der Klassen 3 und 4, die jedoch einen Masseanteil von $> 30\%$ Steinen enthalten sowie Bodenarten mit einem Masseanteil von $\leq 30\%$ an Blöcken mit Korngrößen $> 200\text{ mm}$ und $\leq 630\text{ mm}$.

Ausgeprägt plastische Tone mit weicher bis halbfester Konsistenz (nach den ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270] gehören in diese Klasse weiche bis halbfeste feinkörnige Böden der Gruppen TA und OT).

Klasse 6: Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten

Felsarten, die einen mineralisch gebundenen Zusammenhalt aufweisen, gleichzeitig aber stark klüftig, brüchig, bröckelig, schiefrig oder verwittert sind, sowie vergleichbare feste oder verfestigte Bodenarten, deren Zustand z. B. auf Austrocknung, Gefrieren oder chemische Bindungen zurückzuführen ist.

Bodenarten mit einem Masseanteil von $> 30\%$ an Blöcken.

In diese Klasse gehören nach den ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270]

- Fels, der nicht in die Klasse 7 gehört,
- Bodenarten der Klassen 4 und 5 mit fester Konsistenz.

Klasse 7: Schwer lösbarer Fels

Felsarten mit einem mineralisch gebundenen Zusammenhalt und hoher Festigkeit, die nur wenig klüftig oder verwittert sind, sowie unverwitterter Tonschiefer, Nagelfluhschichten, verfestigte Schlacken und dergleichen. Weiterhin gehören hierzu Haufwerke aus großen Blöcken mit Korngrößen $> 630\text{ mm}$.

Hierzu gehören nach den ZTV E-StB 09, 3.1.2 [270]

- angewitterter und unverwitterter Fels mit Gesteinskörpern, die durch Trennflächen begrenzt sind und Rauminhalte $> 0,1\text{ m}^3$ besitzen,
- Halden mit verfestigter Schlacke.

Hinweis: In E DIN EN 16907-2 [118] wird für Erdarbeiten eine Basis zur Beschreibung und Klassifizierung von Boden und Fels als Erdbaumaterialien definiert, die für die Bemessung, Planung und Ausführung verwendet werden kann.

1.5 Kennzeichnungen nach DIN 4023

Die nachstehenden Tabellen sind DIN 4023 entnommen. Als zwei von insgesamt vier Tabellen zeigen sie Vereinbarungen für die einheitliche Kennzeichnung wichtiger Boden- und Felsarten (auch zusammengesetzte, Tabelle 1-10), wie sie in zeichnerischen Darstellungen (z. B. von Bohrergergebnissen) und im Schrifttum verwendet werden können.

Tabelle 1-9 Beispiele für Kurzformen, Zeichen und Farbkennzeichnungen für Boden- bzw. Felsarten nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. DIN EN ISO 14689-1 (nach DIN 4023)

Benennung		Kurzformen		Zeichen	Farbkennzeichnung ^a	
Hauptanteil	Nebenanteil	Hauptanteil	Nebenanteil		Farbname	Farbmaßzahlen nach DIN 6164-1
Blöcke	mit Blöcken	Y	y		gelb	2 : 6 : 1
Steine	steinig	X	x		gelb	2 : 6 : 1
Kies	kiesig	G	g		gelb	2 : 6 : 1
Grobkies	grobkiesig	gG	gg			
Mittelkies	mittelkiesig	mG	mg			
Feinkies	feinkiesig	fG	fg			
Sand	sandig	S	s		orange	6 : 6 : 2
Grobsand	grobsandig	gS	gs			
Mittelsand	mittelsandig	mS	ms			
Feinsand	feinsandig	fS	fs			
Schluff	schluffig	U	u		oliv	1 : 4 : 5
Ton	tonig	T	t		violett	14 : 5 : 4
Torf, Humus	torfig, humos	H	h		dunkelbraun	5 : 2 : 6
Braunkohle	–	Bk	–		dunkelbraun	5 : 2 : 6
Sandstein	–	Sst	–		orange	6 : 6 : 2
Kalkstein	–	Kst	–		dunkelblau	17 : 5 : 4
Mergelstein	–	Mst	–		violettblau	15 : 6 : 4

^a Handelsbezeichnungen nach DIN 4023, Anhang A.

Tabelle 1-10 Beispiele von Kurzformen, Zeichen und Farbkennzeichnungen für zusammengesetzte Bodenarten und Sedimentgesteine sowie für nicht-petrographische Bezeichnungen von Boden (nach DIN 4023)

Benennung	Kurzformen	Zeichen	Farbkennzeichnung ^a	
			Farbname	Farbmaßzahlen nach DIN 6164-1
Grobkies, steinig	gG, x		gelb	2 : 6 : 1
Feinkies und Sand	fG/S		orange	6 : 6 : 2
Grobsand, mittelkiesig	gS, mg		orange	6 : 6 : 2
Mittelsand, schluffig, humos	mS, u, h		orange	6 : 6 : 2
Schluff, stark feinsandig	U, fs*		oliv	1 : 4 : 5
Auffüllung	A		–	–
Mutterboden	Mu		gelblichbraun	4 : 5 : 3
Verwitterungslehm, Hanglehm	L		grau	N : 0 : 5,5
Lößlehm	Löl		oliv	1 : 4 : 5
Geschiebelehm	Lg		grau	15 : 6 : 4
Geschiebemergel	Mg		violettblau	N : 0 : 5,5
Klei, Schlick	Kl		lila	11 : 4 : 4
Klei, feinsandig	Kl, fs		lila	11 : 4 : 4
Torf, feinsandig, schwach schluffig	H, fs, u'		dunkelbraun	5 : 2 : 6
Mudde (Faulschlamm)	F		lila	11 : 4 : 4
Seekreide mit organischen Beimengungen	Wk, o		hellblau	17 : 5 : 2
Sandstein, schluffig	Sst, u		orange	6 : 6 : 2
Kalkstein, schwach sandig	Kst, s*		dunkelblau	17 : 5 : 4
Salzgstein, tonig	Sast, t		gelbgrün	23 : 6 : 3

^a Handelsbezeichnungen nach DIN 4023, Anhang A.

Ein Anwendungsbeispiel für die Vereinbarungen aus Tabelle 1-9 und Tabelle 1-10 ist in Bild 1-11 gezeigt.

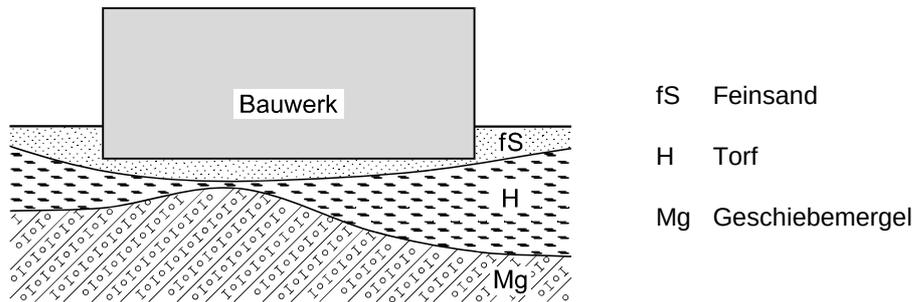


Bild 1-11 Baugrund unter einem geplanten Bauwerk

1.6 Erkennung von Bodenarten mit Hilfe einfacher Verfahren

In DIN EN ISO 14688-1, 5 werden mehrere Verfahren angegeben, die auch im Feld durchführbar sind und mit denen in einfacher Form sowie mit geringem Zeit- und Kostenaufwand Erkenntnisse zur Bestimmung der jeweils untersuchten Bodenart gewonnen werden können. Die angegebenen Verfahren dienen zur Bestimmung des Bodens bezüglich

- seiner Korngröße,
- seiner Kornform,
- seiner mineralischen Zusammensetzung,
- seines Feinanteils (Auswaschversuch),
- seiner Farbe,
- seiner Trockenfestigkeit (Trockenfestigkeitsversuch),
- seiner Art als bindiger Boden (Schüttelversuch),
- seiner Plastizität (Knetversuch),
- seines Sand-, Schluff- und Tongehalts (Reibe- und Schneideversuch),
- seines Kalkgehalts,
- seiner Konsistenz.

Darüber hinaus werden Verfahren zur

- Benennung und Beschreibung von organischen Böden (Riechversuch; anorganische oder organische Natur eines Bodens),
- Bestimmung des Zersetzungsgrads von Torf (Ausquetschversuch),
- Benennung und Beschreibung vulkanischer Böden angegeben.

Zusätzlich erwähnt sei noch die Bestimmung der Bodenart mit der „Fingerprobe nach dem Feldverfahren“ gemäß der vom Normenausschuss Wasserwesen erarbeiteten DIN 19682-2.

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass in DIN EN ISO 14689-1 und dem zugehörigen Nationalen Anhang Verfahren zum Beschreiben von Gesteinsarten zu finden sind. Sie dienen z. B. zur

- Erfassung der Veränderlichkeit von Gestein infolge von geänderten Wasserverhältnissen oder atmosphärischen Verhältnissen,
- Unterscheidung von Gesteinsgruppen anhand der Korngröße (durchschnittliche Größe der vorherrschenden Mineral- oder Gesteinsbruchstücke),
- Bestimmung des Kalkgehalts (Betroffen der Felsprobe mit verdünnter Salzsäure),
- Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit in MPa (durch Anritzen mit Fingernagel oder Messer bzw. durch Anschlagen mit Geologenhammer; beachte DIN EN ISO 14689-1, Tabelle 5),

- Bestimmung der Körnigkeit (Unterscheidung von „vollkörnig“, „teilkörnig“ und „nichtkörnig“),
 - Bestimmung der Mineralkornhärte (zur Ermittlung der Härtegrade 1 bis > 6 werden möglichst große Einzelkörner mit Fingernagel, Messer oder Feile angeritzt bzw. mit Stahl angeschlagen).
- Bituminöse und tonige Gesteine, Faulschlammkalke und manche vulkanischen Gesteine können mit Hilfe des Riechversuchs durch den für sie typischen Geruch erkannt werden.

1.6.1 Reibeversuch

Zur Abschätzung der Sand-, Schluff- und Tonanteile eines Bodens wird eine kleine Probemenge zwischen den Fingern zerrieben (evtl. unter Wasser). Um dabei die interessierenden Bodenanteile erkennen zu können, ist von den nachstehenden Kriterien auszugehen.

- Toniger Boden* fühlt sich seifig an, bleibt an den Fingern kleben und lässt sich auch im trockenen Zustand nicht ohne Abwaschen entfernen.
- Schluffiger Boden* fühlt sich weich und mehlig an. An den Fingern haftende Bodenteile sind in trockenem Zustand durch Fortblasen oder in die Hände Klatschen problemlos entfernbar.
- Sandkornanteil* ist erfassbar über das Rauigkeitsgefühl bzw. das Knirschen und Kratzen (im Zweifelsfall: Versuchsdurchführung zwischen den Zähnen) sowie über die mit bloßem Auge erkennbaren Einzelkörner.

1.6.2 Schneideversuch

Der Schneideversuch dient zur schnellen und einfachen Erkennung eines Bodens als Schluff oder Ton. Dazu wird eine erdfeuchte Probe des Bodens mit einem Messer durchgeschnitten und anhand des Aussehens der frischen Schnittfläche seine Einordnung vorgenommen. Eine

- glänzende Schnittfläche ist charakteristisch für Ton,
- stumpfe Schnittfläche entsteht bei Schluff bzw. tonig, sandigem Schluff mit geringer Plastizität.

Zur noch rascheren Feststellung darf die Probenoberfläche nach DIN EN ISO 14689-1, 5.9 auch mit dem Fingernagel eingeritzt oder geglättet werden.

1.6.3 Trockenfestigkeitsversuch

Mit diesem Versuch lässt sich die Zusammensetzung des Bodens nach Art und Menge des Feinkornanteils am Widerstand erkennen, den eine getrocknete Bodenprobe gegen ihre Zerstörung zwischen den Fingern entwickelt. Dabei lassen sich relativ problemlos die in der folgenden Tabelle 1-11 aufgeführten Fälle unterscheiden.

Tabelle 1-11 Ergebnisse von Trockenfestigkeitsversuchen (Bodenbeispiele nach [41])

Verhalten der Bodenprobe beim Versuch	untersuchte Böden (Beispiele)
zerfällt ohne oder bei geringster Berührung (keine Trockenfestigkeit)	G, S, Gs
zerfällt bei leichtem bis mäßigem Fingerdruck (geringe Trockenfestigkeit)	U, Ufs, fSü, Gū
zerbricht erst bei erheblichem Fingerdruck, und es verbleiben noch zusammenhängende Bruchstücke (mittlere Trockenfestigkeit)	Gĭ, Sĭ, Uĭ
ist durch Fingerdruck nicht zerstörbar (hohe Trockenfestigkeit)	T, Tu, Ts, Gġs

1.6.4 Konsistenzbestimmung bindiger Böden

Als „bindige Böden“ werden nach DIN EN ISO 14688-1, 4.4 Böden bezeichnet, die plastische Eigenschaften aufweisen. Da solche Böden in sehr unterschiedlichen Zustandsformen vorzufinden sind, ist eine entsprechende Unterscheidung erforderlich. Der hierfür geeignete Versuch sieht die Bearbeitung einer Probe bindigen Bodens mit der Hand vor. Das jeweilige Versuchsergebnis ermöglicht die Unterscheidung der Zustandsformen

<i>breiig</i>	beim Pressen des Bodens in der Faust quillt dieser durch die Finger,
<i>weich</i>	Boden lässt sich leicht kneten,
<i>steif</i>	Boden ist schwer knetbar, aber in der Hand in 3 mm dicke Walzen ausrollbar, ohne dabei zu reißen oder zu zerbröckeln,
<i>halbfest</i>	Boden bröckelt und reißt beim Ausrollen in 3 mm dicke Walzen, lässt sich aber erneut zum Klumpen formen,
<i>fest (hart)</i>	ausgetrockneter Boden, der meist hell aussieht und sich nicht mehr kneten, sondern nur noch zerbrechen lässt.

Bei gering plastischen Böden lässt sich die Unterteilung nur annähernd verwenden (vgl. DIN EN ISO 14688-1, 5.14).

Ergänzend sei auf die vom Normenausschuss Wasserwesen erarbeitete DIN 19682-5, 4.1 [89] hingewiesen, wonach bindige Böden, die nachweislich im Grundwasserbereich liegen und einen trockeneren Zustand als breiig aufweisen, verdichtet und wenig wasserdurchlässig sind.

1.6.5 Plastizität bindiger Böden (Knetversuch)

Die Plastizität bindiger Böden ist ein Maß für die Bearbeitbarkeit des Bodens. Sie lässt sich mit dem Knetversuch bestimmen.

Hierzu wird eine feuchte Bodenprobe auf einer glatten Oberfläche zu Walzen von ≈ 3 mm Durchmesser ausgerollt. Aus diesen werden Klumpen geformt, die erneut ausgerollt werden. Diese Vorgehensweise ist so lange zu wiederholen, bis sich die Probe, wegen des Wasserverlustes, nicht mehr ausrollen, sondern höchstens kneten lässt. Mit diesem Zustand ist die Ausrollgrenze erreicht (siehe auch Abschnitt 5.8.5).

Nach DIN EN ISO 14688-1, 5.8 sind bei diesem Versuch unterscheidbar:

<i>geringe Plastizität</i>	die Bodenprobe kann nicht zu Walzen von ≈ 3 mm Durchmesser ausgerollt werden,
<i>ausgeprägte Plastizität</i>	die Bodenprobe lässt sich zu dünnen Walzen ausrollen.

1.6.6 Ausquetschversuch

Zur Feststellung des Zersetzungsgrads von Torf wird ein nasses Torfstück in der Faust kräftig gequetscht. In DIN EN ISO 14688-1, 5.12 wird der Zersetzungsgrad des Torfs gemäß Tabelle 1-12 unterschieden.

Bei zu trockenem Torf ist der Ausquetschversuch nicht mehr durchführbar; der Torf muss dann nach dem Aussehen beurteilt werden. Bei nicht bis mäßig zersetztem Torf zeigt die Probe erhebliche Anteile von gut erhaltenen und erkennbaren Pflanzenresten. Proben mit stark bis völlig zersetztem Torf bestehen überwiegend aus nicht mehr erkennbaren Pflanzenresten.

Hinsichtlich der Unterscheidung von Torfen nach Zersetzungsgraden bzw. Zersetzungsstufen sei auch auf die vom Normenausschuss Wasserwesen erarbeitete DIN 19682-12 hingewiesen.

Tabelle 1-12 Bestimmung des Zersetzungsgrads von nassem Torf durch Ausquetschen (nach DIN EN ISO 14688-1, Tabelle 5)

Begriff	Zersetzungsgrad	Quetsch-Rückstände	Abgepresstes
faserig	kein	deutlich erkennbar	nur Wasser keine Feststoffe
leicht faserig	mäßig	erkennbar	trübes Wasser < 50 % Feststoffe
nicht faserig	völlig	nicht erkennbar	wässriger Brei > 50 % Feststoffe

1.6.7 Schüttelversuch

Für schluffige Böden ist ihre Empfindlichkeit gegen Schütteln charakteristisch.

Bei einem diesbezüglichen Versuch wird eine feuchte, nussgroße Probe (zu trockene Proben sind vorher mit Wasser durchzukneten) auf der flachen Hand hin- und hergeschüttelt. Tritt dabei an der Probenoberfläche Wasser aus, nimmt diese ein glänzendes Aussehen an. Durch Fingerdruck lässt sich das Wasser wieder zum Verschwinden bringen. Bei zunehmendem Fingerdruck zerkrümelt die Probe zwar, die einzelnen Krümel fließen bei erneutem Schütteln aber wieder zusammen, so dass der Versuch wiederholt werden kann.

Anhand der Reaktionsgeschwindigkeit, mit der das Wasser beim Schütteln bzw. beim Drücken erscheint bzw. verschwindet, kann unterschieden werden in

schnelle Reaktion rasches Ablaufen der beschriebenen Vorgänge (Beispiele: fS, fSu, Ufs, Gu),
langsame Reaktion Wasserhaut bildet bzw. verändert sich nur langsam (Beispiele: Ut, U, St),
keine Reaktion kein Ansprechen des Schüttelversuchs (Beispiele: Tu, T).

Anwendungsbeispiel

Mit einer Bodenprobe wird gemäß DIN EN ISO 14688-1 sowohl der Reibeversuch als auch der Schneide- und der Schüttelversuch durchgeführt.

Beim Reibeversuch fühlt sich das Material der Probe seifig, aber auch etwas rau an, bleibt an den Fingern kleben und muss auch im trockenen Zustand von den Händen abgewaschen werden.

Beim Schneideversuch zeigt das Bodenmaterial eine glänzende Schnittfläche und beim Schüttelversuch keine Reaktion.

Welcher Bodenart kann dieses Probenmaterial z. B. zugeordnet werden?

Lösung

Der Reibeversuch weist auf tonigen Boden mit eher geringen Sandanteilen und die glänzende Schnittfläche beim Schneideversuch auf einen hohen Tonanteil hin. Durch den Schüttelversuch wird diese Einschätzung bestätigt.

Bei dem untersuchten Bodenmaterial kann es sich z. B. um sandigen Ton (Ts) handeln.

2 Wasser im Baugrund

2.1 Allgemeines

Das während des Jahres in unterschiedlicher Menge anfallende Niederschlagswasser dringt nur zum Teil in den Boden ein. Der Rest verdunstet bzw. fließt als Oberflächenwasser ab.

Den Boden infiltrierendes Wasser sickert entweder bis zu einem Grundwasserreservoir, oder es verbleibt in den Bodenporen der über dem Grundwasser liegenden Zone (Bild 2-1).

Generell kann zwischen zwei Zonen unterschieden werden. In der unteren Zone sind alle Bodenporen vollständig gefüllt durch Grundwasser, das einem hydrostatischen Druck unterliegt. In der darüber liegenden Zone (Kapillarzone) sind die Poren vollständig (geschlossene Kapillarzone) oder teilweise (offene Kapillarzone) mit Kapillarwasser gefüllt (Bild 2-1). Während oberhalb der geschlossenen Kapillarzone einzelne Bodenteilchen von Haftwasser (gegen die Schwerkraft adhäsiv gehaltenes Wasser) umgeben sind, werden die Bodenteilchen im gesamten Bodenbereich von hygrokopischem Wasser umhüllt, sofern ihre Oberflächen elektrisch geladen sind (vgl. Abschnitt 2.6).

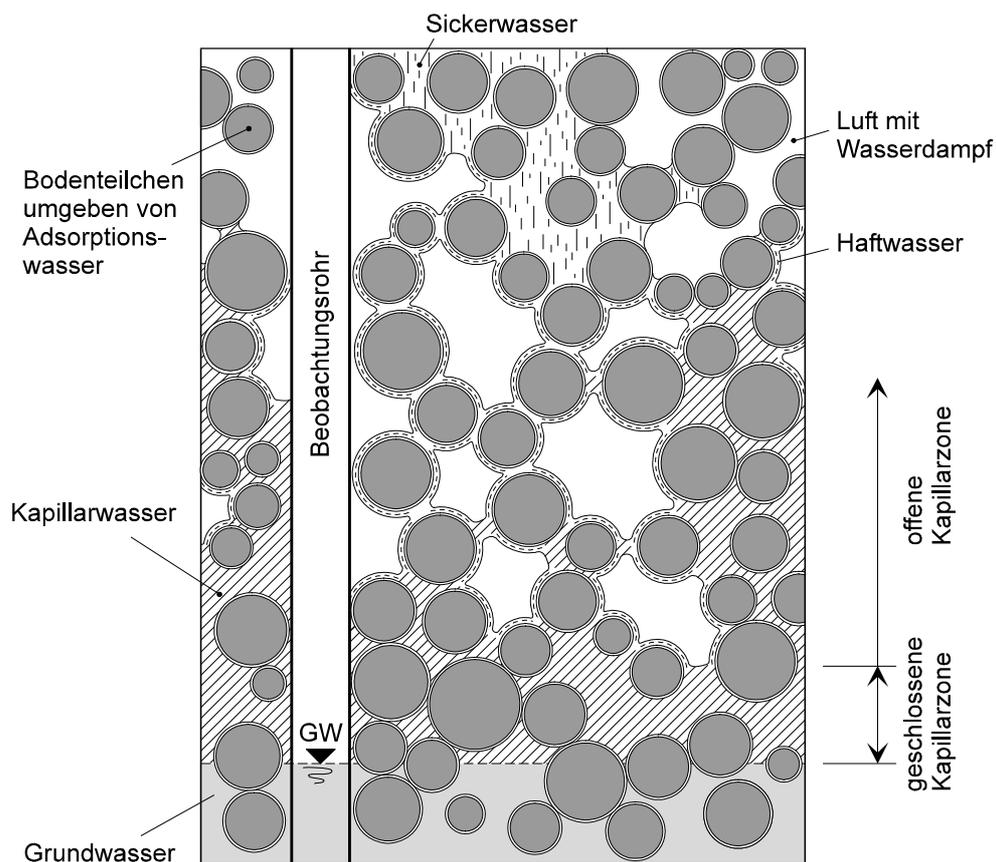


Bild 2-1 Erscheinungsformen des Wassers im Boden (nach [229])

2.2 Regelwerke

Bestimmungen zu Untersuchungen der Grundwassergegebenheiten und seiner Eigenschaften sowie zu den Auswirkungen von stehendem oder fließendem Grundwasser auf Baumaterial und Baukonstruktionen finden sich z. B. in

- DIN 1054 [20], DIN 4020 [38], DIN 4030-1 [43], DIN 4030-2 [44], DIN 18130-2 [76], DIN 19682-8 [90], DIN EN 1992-1-1 [98], DIN EN 1992-1-1/NA [99], DIN EN 1997-2 [103], DIN EN 1997-2/NA [104] und DIN EN ISO 22475-1 [128],
- den EAB [145],
- den EAU 2012 [149],
- den GDA-Empfehlungen [163],
- dem Merkblatt über geotechnische Untersuchungen und Berechnungen im Straßenbau [210].

2.3 Begriffe

Aus DIN EN ISO 22475-1 und [40] wurden die nachstehenden Begriffe entnommen.

Sickerwasser Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft abwärts bewegt, soweit es kein Grundwasser ist.

Grundwasser unterirdisches Wasser, das die Hohlräume des Baugrunds zusammenhängend ausfüllt.

Grundwasserspiegel ausgeglichene Grenzfläche des Grundwassers gegen die Atmosphäre (z. B. in Brunnen, Grundwassermessstellen, Höhlen oder Gewässern).

Grundwasserkörper Grundwasservorkommen oder Teil eines solchen, das eindeutig abgegrenzt oder abgrenzbar ist.

Grundwasseroberfläche obere Grenzfläche eines Grundwassers.

Grundwasserdruckfläche geometrischer Ort der Endpunkte aller Standrohrspiegelhöhen an einer Grundwasseroberfläche.

Freie Grundwasseroberfläche (freies Grundwasser) Grundwasserdruckfläche, die mit der Grundwasseroberfläche identisch ist (Bild 2-2).

Gespanntes Grundwasser bei diesem Grundwassertyp liegt die Grundwasserdruckfläche über der Grundwasseroberfläche (Bild 2-2).

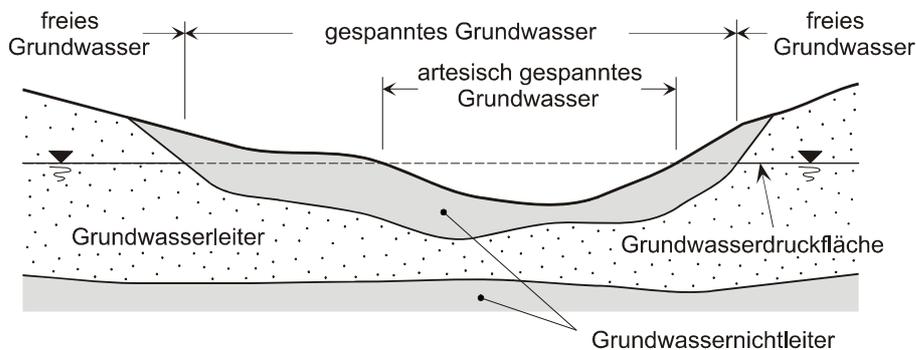


Bild 2-2 Freies und gespanntes Grundwasser

Artesisch gespanntes Grundwasser bei ihm liegt die Grundwasserdruckfläche über der Grundwasseroberfläche und über der Erdoberfläche (Bild 2-2).

Porendruck Druck der Flüssigkeit, mit der die Poren im Boden oder Fels gefüllt sind.

Grundwasserschwankungen Schwankungen der Grundwasseroberfläche und/oder des Porendrucks.

Grundwasserleiter wasserdurchlässiger Boden oder Fels, der geeignet ist, Grundwasser aufzunehmen oder zu leiten.

Grundwasserhemmer Grenzschicht aus Fels oder Boden, die die Strömung von Wasser in einen benachbarten Grundwasserleiter bzw. daraus behindert, jedoch nicht verhindert.

Grundwassernichtleiter Fels oder Boden mit sehr geringer Transmissivität (auch Profildurchlässigkeit genannt; Integral der Wasserdurchlässigkeit über die Mächtigkeit des Nichtleiters), wodurch die Wasserströmung durch den Boden oder Fels praktisch verhindert wird.

Grundwassersole untere Grenzfläche eines Grundwasserleiters.

Grundwasserstockwerk Grundwasserleiter einschließlich seiner oberen und unteren Begrenzung als Betrachtungseinheit innerhalb der senkrechten Gliederung der Erdrinde. Die Grundwasserstockwerke werden von oben nach unten gezählt (Bild 2-3).

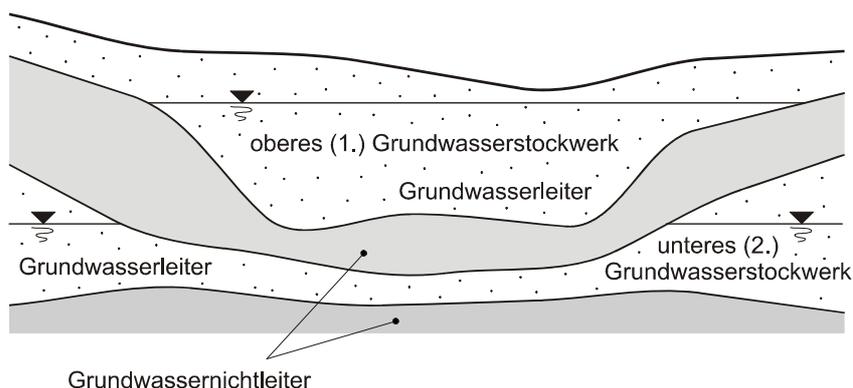


Bild 2-3 Grundwasserstockwerke

Grundwassermessung Messung der Grundwasseroberfläche oder des Porendrucks.

Grundwasserdruck Druck, der an einem bestimmten Ort im Baugrund (in Poren, Hohlräumen oder Klüften) und zu einer bestimmten Zeit herrscht.

Grundwassermessstelle Ort, an dem die Geräte für Grundwassermessungen installiert sind oder Grundwassermessungen durchgeführt werden.

Piezometer Einrichtung für die messtechnische Bestimmung der Grundwasseroberfläche oder der Grundwasserdruckhöhe in offenen und geschlossenen Systemen (Weiteres siehe DIN EN ISO 22 475-1).

2.4 Kapillarwasser

In Bodenporen, die nicht vollständig mit Grundwasser gefüllt sind, treten Oberflächenspannungen zwischen dem Boden und dem Wasser auf. Sie bewirken Kapillarkräfte, die mit abnehmender Porengröße zunehmen. Die Kapillarkräfte heben das Grundwasser in Form von Kapillarwasser um

$$h_k = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot \cos \alpha}{d \cdot \gamma_w} \quad \text{Gl. 2-1}$$

über den Grundwasserspiegel (Bild 2-4). Mit der Wasserwichte $\gamma_w \approx 0,01 \text{ N/cm}^3$, der für feuchte und 10°C warme Luft geltenden Oberflächenspannung $\sigma_0 \approx 0,00075 \text{ N/cm}$ (vgl. [17]) und dem für Böden verwendbaren Benetzungswinkel $\alpha \approx 0^\circ$ (vgl. [172], Kapitel 1.3) ergibt sich für die kapillare Steighöhe die nicht dimensionsreine Beziehung

$$h_k (\text{in cm}) \approx \frac{0,3}{d (\text{in cm})} \quad \text{Gl. 2-2}$$

(z. B. bei der Kapillarbrechung in Dränschichten unter Bodenplatten zu berücksichtigen).

In Abhängigkeit vom Bodenmaterial und seiner Lagerungsdichte D (bei nichtbindigen Böden) differieren die passiven kapillaren Steighöhen in den Porenkanälen erheblich. Während sie z. B. bei Kies Werte im cm-Bereich annehmen, können sie in Feinschluff bis $\approx 50 \text{ m}$ (vgl. [180]) erreichen.

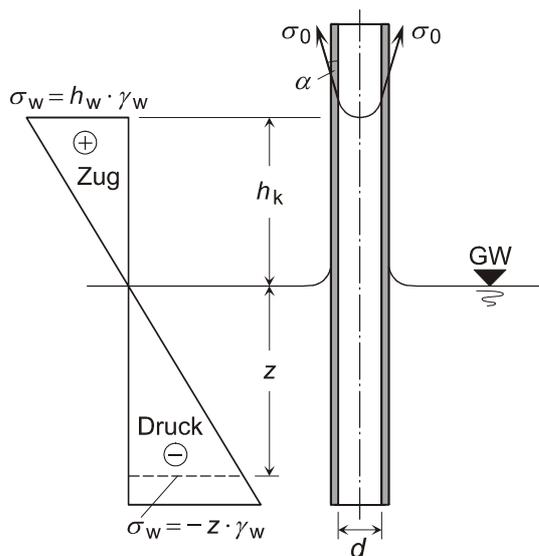


Bild 2-4 Zug- und Druckspannungsverlauf in einem Kapillarrohr

Da die Porenkanäle veränderliche Dicken aufweisen, entsprechen sie eher einem *Jamin*-Rohr als einem Kapillarrohr mit konstantem Durchmesser. Wird ein *Jamin*-Rohr in Wasser getaucht, steigt dieses im Rohr bis zur „aktiven“ kapillaren Steighöhe h_{ka} . Wird der Wasserspiegel danach abgesenkt, stellt sich eine größere und als „passiv“ bezeichnete kapillare Steighöhe h_{kp} (auch „kapillare Rückhaltehöhe“ genannt) ein (Bild 2-5).

Die unregelmäßigen Querschnittsformen der im Bodengefüge vorhandenen Porenkanäle sowie die Schwankungen des Grundwasserspiegels, die z. B. durch Niederschläge und durch Wasserabfluss bewirkt werden, führen zu einer sich unterschiedlich einstellenden kapillaren Steighöhe im Bodenmaterial. Das kapillar angehobene Grundwasser im Baugrund ist deshalb zu finden in der

- geschlossenen Kapillarzone (alle Poren dieses Bereichs sind mit Kapillarwasser gefüllt, vgl. Bild 2-1) und
- der offenen Kapillarzone (nur ein Teil der Poren dieses Bereichs ist mit Kapillarwasser gefüllt, vgl. Bild 2-1).

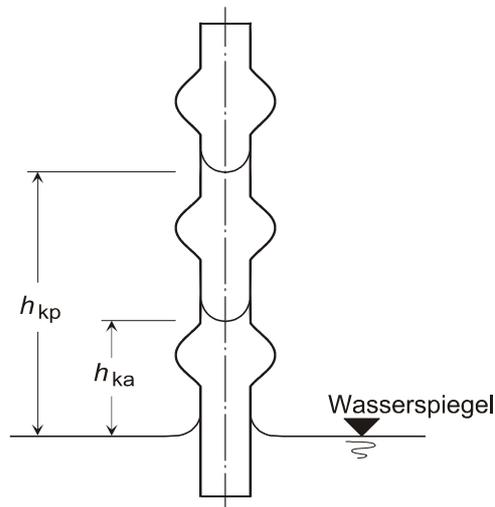


Bild 2-5 Jamin-Rohr mit aktiver (h_{ka}) und passiver (h_{kp}) kapillarer Steighöhe

Nach [172], Kapitel 1.3 kann die Höhe der geschlossenen Kapillarzone durch die Größe der kapillaren Rückhaltehöhe h_{kp} (auch „passive kapillare Steighöhe“ genannt) erfasst werden. Entsprechende Erfahrungswerte lassen sich Tabelle 2-1 entnehmen.

Tabelle 2-1 Erfahrungswerte für die kapillare Rückhaltehöhe einiger Bodenarten
(nach [170], Kapitel 1.5 und [172], Kapitel 1.3)

Bodenart	Kapillare Rückhaltehöhe h_{kp} (in m)
Mittel- bis Grobkies	0,05
sandiger Kies	0,08
Mittel- und Grobsand	0,20
Fein- und Mittelsand	0,50
schluffiger Feinsand	1,0
Schluff	5,0
Ton	50,0

Anwendungsbeispiel

Nachdem ein nach unten offener, mit trockenem nichtbindigem Boden gefüllter Behälter in 10 °C warmes Wasser gestellt wurde, stellte sich in dem Boden als größte aktive kapillare Steighöhe $\max h_{ka} = 36$ cm (Grenze der offenen Kapillarzone) und als kleinste Steighöhe $\min h_{ka} = 17$ cm (Grenze der geschlossenen Kapillarzone) ein.

Näherungsweise zu ermitteln sind die Durchmessergrößen (Angabe in mm) von Kapillarrohren, in denen sich kapillare Steighöhen einstellen, die den oben angegebenen Werten der geschlossenen und der offenen Kapillarzone entsprechen.

Lösung

Für 10 °C warmes Wasser kann die aktive kapillare Steighöhe näherungsweise durch die Gleichung Gl. 2-2

$$h_k \text{ (in cm)} \approx \frac{0,3}{d \text{ (in cm)}}$$

ermittelt werden. Durch Auflösung nach d ergeben sich somit die beiden Werte

$$d_{\text{offen}} \approx \frac{0,3}{36} = 0,0083 \text{ cm} = 0,083 \text{ mm} \quad \text{und} \quad d_{\text{geschlossen}} \approx \frac{0,3}{17} = 0,0176 \text{ cm} = 0,176 \text{ mm}$$

für die Durchmesser von Kapillarrohren, in denen sich kapillare Steighöhen einstellen, welche denen der offenen (d_{offen}) und der geschlossenen ($d_{\text{geschlossen}}$) Kapillarzone entsprechen.

2.5 Porenwinkelwasser

Als Porenwinkelwasser wird das Wasser im Bereich der Kontaktflächen (Porenwinkel) von Körnern feuchter nichtbindiger Böden bezeichnet (Bild 2-6).

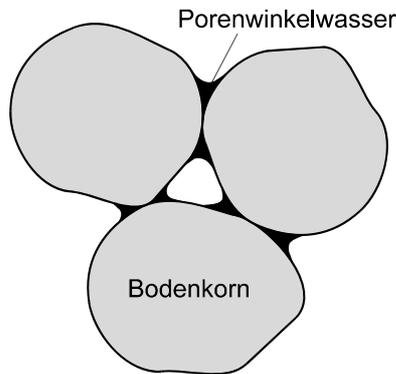


Bild 2-6 Bodenkörner mit Porenwinkelwasser

Durch die Kapillarkräfte des Porenwinkelwassers werden die Bodenkörner aneinandergedrückt. Dies führt zu einem „Aneinanderhaften“ der Körner, das als „Kapillarkohäsion“ (oder auch „scheinbare Kohäsion“) bezeichnet wird und sich insbesondere bei feinkörnigeren nichtbindigen Böden auswirkt. Wird der Wassergehalt eines nichtbindigen Bodens, zu dem die maximale Wirkung der Kapillarkohäsion gehört, verändert, reduziert sich die Kohäsion mit zunehmender Veränderung immer weiter. So verringern sich die Kapillarkräfte mit fortschreitender Austrocknung des Bodens bis hin zu ihrem endgültigen Wegfall bei vollständig trockenem Boden. Analog dazu reduziert sich die Kapillarkohäsion bei Wasserzugabe, da dadurch die Bodenporen mit Wasser aufgefüllt werden; endgültig verschwunden ist sie, wenn alle Bodenporen mit Wasser gefüllt sind. Tabelle 2-2 gibt Anhaltswerte für durch Kapillarkohäsion bewirkte Scherfestigkeiten von Böden.

Tabelle 2-2 Erfahrungswerte der Scherfestigkeit nichtbindiger Böden infolge Kapillarkohäsion (nach EAB, Tabelle 3.2)

Bodenart	Bezeichnungen nach DIN 4022-1 [41]	Kapillarkohäsion $c_{c,k}$ (in kN/m ²)
sandiger Kies	G, s	0–2
Grobsand	gS	1–4
Mittelsand	mS	3–6
Feinsand	fS	5–8

2.6 Hygroskopisches Wasser

Hygroskopisches Wasser (Adsorptionswasser) wird wegen der Dipoleigenschaften von Wassermolekülen (auf den sich gegenüberliegenden Molekülseiten liegen die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladung) von elektrisch negativ geladenen mineralischen Oberflächen der Bodenteilchen angezogen und an den Teilchenoberflächen angelagert (adsorbiert). Die Größe und der Verlauf (Bild 2-7) der Anziehungskraft ergeben sich nach *Busch/Luckner* [17] aus der Kombination von elektrostatischen und molekularen (*van der Waals'sche* Kräfte) Wirkungen.

Hygroskopisches Wasser umgibt die Bodenteilchen mit einer Schicht verdichteten Wassers, die als „diffuse Hülle“ oder auch „diffuse Schicht“ bezeichnet wird. In Abhängigkeit vom Elektrolytgehalt des Wassers nimmt ihre Dicke sehr unterschiedliche Größen an, womit entsprechende Reichweitenunterschiede der elektrostatischen Kraftwirkung verbunden sind (vgl. hierzu [192]). Das angelagerte Wasser hat die Konsistenz einer hochviskosen Flüssigkeit, wird zur Teilchenoberfläche hin zäh wie Eis und unmittelbar an der Oberfläche praktisch zum Bestandteil des Bodenteilchens.

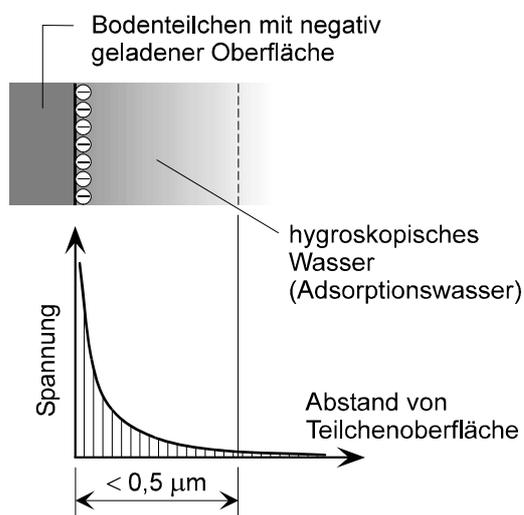


Bild 2-7 Verlauf der Anziehungsspannungen in der diffusen Hülle

2.7 Betonangreifende Grundwässer und Böden

Hinsichtlich der Beurteilung des Angriffsvermögens von Wässern und Böden auf erhärteten Beton können DIN 4030-1 und DIN 4030-2 herangezogen werden. Danach

- soll junger Beton im Allgemeinen mit betonangreifendem Wasser nicht in Berührung kommen (bei Bauteilen wie z. B. Ortbetonpfählen lässt sich der Kontakt allerdings nicht vermeiden),
- können Wässer und Böden betonangreifend sein, wenn sie z. B.
 - freie Säuren (erkennbar an pH-Werten < 7 ; betonangreifend ab pH-Werten $< 6,5$; wirken lösend auf Zementstein und carbonhaltige Gesteinskörnungen),
 - Sulfide (bei Zutritt von Sauerstoff und Feuchte ist u. a. ihre Oxidation zu Sulfaten und Schwefelsäure möglich),
 - Sulfate (Umsetzung mit einigen Calcium- und Aluminiumverbindungen des Zementsteins zu Calciumaluminatsulfathydraten oder Gips, wirkt ggf. treibend),
 - Magnesiumsalze (lösen Calciumhydroxid aus dem Zementstein),
 - Ammoniumsalze (lösen vorwiegend Calciumhydroxid aus dem Zementstein; davon ausgenommen sind Ammoniumcarbonat, -oxalat und -fluorid),

- pflanzliche und tierische Fette und Öle (mit dem Calciumhydroxid des Zementsteins bilden sie als Ester der Fettsäuren fettsaure Calciumsalze (Kalkseifen))
enthalten,
- können weiche Wässer (mit Härten < 30 mg Calciumoxid (CaO) je Liter) betonangreifend sein,
- enthält Grundwasser oft kalklösende Kohlensäure, Sulfate und Magnesiumverbindungen (Abwässer oder entsprechende Ablagerungen können höhere Konzentrationen von Schwefelwasserstoffen, Ammonium und betonangreifenden organischen Verbindungen bewirken).

Allgemeine Merkmale, die auf betonangreifende Bestandteile des Grundwassers hinweisen können, sind z. B. dunkle Färbung des Wassers, Salzausscheidungen, fauliger Geruch, Aufsteigen von Gasblasen oder saure Reaktionen. Die sichere Feststellung vorhandener betonangreifender Bestandteile des Grundwassers verlangt allerdings eine chemische Analyse gemäß DIN 4030-2. Bezüglich der Entnahme entsprechender Grundwasserproben mittels Pumpe, Wasserproben-Entnahmegesetz oder Vakuumflaschen sind die Ausführungen von DIN EN ISO 22475-1 zu beachten.

Tabelle 2-3 Grenzwerte zur Beurteilung des Angriffsgrades von natürlichen Wässern und Böden (nach DIN 4030-1, Tabelle 4 und DIN EN 1992-1-1, Tabelle 4.1)

Chemisches Merkmal	Expositionsklasse		
	XA1 (schwach angreifend)	XA2 (mäßig angreifend)	XA3 (stark angreifend)
Grundwasser			
1 Sulfat (SO_4^{2-}), in mg/Liter	≥ 200 und ≤ 600	> 200 und ≤ 3000	> 3000 und ≤ 6000
2 pH-Wert	$\leq 6,5$ und $\geq 5,5$	< 5,5 und $\geq 4,5$	< 4,5 und $\geq 4,0$
3 kalklösende Kohlensäure (CO_2), in mg/Liter	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100 bis Sättigung
4 Ammonium (NH_4^+), in mg/Liter	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
5 Magnesium (Mg^{2+}), in mg/Liter	≥ 300 und ≤ 1000	> 1000 und ≤ 3000	> 3000 bis Sättigung
Boden			
6 Sulfat ^{a)} (SO_4^{2-}), in mg/kg	≥ 200 und ≤ 600	> 200 und ≤ 3000 ^{b)}	> 3000 ^{b)} und ≤ 6000
7 Säuregrad (nach <i>Bauman-Gully</i>)	> 200	In der Praxis nicht anzutreffen	

a) Tonböden mit einer Durchlässigkeit von $< 10^{-5}$ m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingeteilt werden.

b) Besteht die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Beton (zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen), ist der Grenzwert von 3000 mg/kg auf 2000 mg/kg zu vermindern.

Zur Beurteilung des Angriffsgrades von natürlichen Wässern und Böden kann Tabelle 2-3 herangezogen werden. Die darin angegebenen Grenzwerte gelten für stehendes oder schwach fließendes, in großen Mengen vorhandenes Wasser, das unmittelbar auf den Beton einwirkt und bei dem die angreifende Reaktion mit dem Boden nicht vermindert wird. Temperatur- und Druckerhöhungen sowie starkes Fließen des Grundwassers oder zusätzlicher mechanischer Abrieb des Betons

durch schnell fließendes Wasser führen zur Verstärkung des Angriffsgrads. Der Angriffsgrad reduziert sich mit abnehmender Durchlässigkeit des Bodens sowie bei Temperaturabnahme bzw. bei nur in geringen Mengen anstehendem Wasser. Dies gilt auch für sich nahezu nicht bewegendes Wasser, das nur eine langsame Erneuerung der betonangreifenden Bestandteile zulässt (z. B. wenig durchlässige Böden mit Durchlässigkeitsbeiwerten $k < 10^{-5}$ m/s).

Zur Beurteilung des Angriffsgrads des Wassers oder Bodens ist der höchste Angriffsgrad gemäß Tabelle 2-3 maßgebend. Der Angriffsgrad erhöht sich um eine Stufe, wenn zwei oder mehr Werte im oberen Viertel eines Bereichs liegen (bei pH-Werten im unteren Viertel).

Nach [220] sollten für Beton, der chemischen Angriffen unterliegt, im Allgemeinen Gesteinskörnungen (Betonzuschlag) verwendet werden, die gegenüber den angreifenden Stoffen beständig sind. Schwachen Angriffen widersteht ein Beton bei einer Expositionsklasse XA1 (Tabelle 2-3), wenn er einen Wasserzementwert $w/z \leq 0,6$ aufweist. Bei der Expositionsklasse XA2 ist ein Wasserzementwert von $w/z \leq 0,55$ und bei der Expositionsklasse XA3 ein dauerhafter Schutz (dichte Kunststoffbeschichtungen, Dichtungsbahnen, Plattenverkleidungen oder auch eine Vergrößerung des Betonquerschnitts) erforderlich. Bei Stahlbeton ist auch die Betondeckung auf den jeweiligen Angriffsgrad abzustimmen. Bei Sulfatgehalten ab 600 mg SO_4 je Liter Grundwasser bzw. ab 3 000 mg SO_4 je kg Boden ist, unabhängig vom jeweils vorliegenden Angriffsgrad, außer einem entsprechend dichten Beton ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand zu verwenden.

2.8 Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse

Im Zuge von Baugrunduntersuchungen sind in der Regel auch die Grundwasserverhältnisse zu erfassen, da von ihnen ggf. erforderliche Maßnahmen wie Grundwasserhaltungen, Abdichtungen, Dränungen usw. abhängig sind.

Nach Abschnitt 2.1.4 von DIN EN 1997-2 und DIN 4020 sowie nach [210] müssen Grundwasseruntersuchungen all die Informationen liefern, die für die geotechnische Bemessung und das Bauen erforderlich sind. Abhängig von der Aufgabenstellung sind mit Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse ggf. Informationen zu gewinnen über

- die Tiefenlage, Mächtigkeit, Ausdehnung und Durchlässigkeit wasserführender Schichten im Baugrund und der Kluftsysteme in Fels,
- die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers,
- die Tiefenlage und Ausdehnung wasserstauer Bodenschichten,
- die Höhenlage der Grundwasseroberfläche oder -druckfläche der Grundwasserstockwerke (frei oder gespannt) und deren zeitabhängige Veränderungen (aktuelle Grundwasserstände mit den möglichen Extremwerten und ihren jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten),
- die chemische Beschaffenheit und ggf. die Temperatur des Wassers,
- Porenwasserdruckverteilungen.

Der Untersuchungsumfang sollte, in Verbindung mit Vorinformationen (z. B. aus vorhandenen Unterlagen) und in Hinblick auf die geplanten Baumaßnahmen, die Bewertung von Aspekten ermöglichen, wie etwa

- der Möglichkeit einer Grundwasserhaltungsmaßnahme (Art, Umfang, Ausführung und ihre Auswirkungen auf die Umgebung),
- der Möglichkeit, das Grundwasser als Brauchwasser für bautechnische Zwecke zu nutzen,
- der Beurteilung der gefährdenden Wirkung des Grundwassers bei Abgrabungen oder Böschungen (z. B. Gefahr eines hydraulischen Grundbruchs, Größe des Strömungsdrucks, Gefahr der Erosion),

- der Beurteilung von Maßnahmen zum Schutz des Bauwerks (Abdichtung gegen Grundwasser, Entwässerung, Maßnahmen gegen aggressives Wasser sowie hydrostatischen Druck usw.),
- der Ermittlung der Fähigkeit des Untergrunds, während der Bauarbeiten zugeführtes Wasser aufzunehmen,
- der Beurteilung der chemischen Zusammensetzung des örtlich anstehenden Grundwassers bezüglich seiner Verwendbarkeit für bautechnische Zwecke,
- der Beurteilung der Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen, Trockenlegungen, Wasseranstau usw. auf die Umgebung.

Der Untersuchungsumfang ist in Abhängigkeit von den jeweiligen Fragestellungen des Einzelfalls gesondert festzulegen (ggf. unter Hinzuziehung eines Sachverständigen für Geotechnik, siehe auch Abschnitt 3.3).

In [39], Tabelle 1 sind Angaben zur Eignung von Bohrungen, Feldversuchen und Laborversuchen bezüglich der Ermittlung einzelner Parameter der Grundwasserverhältnisse in Boden bzw. Fels zu finden. Aus Tabelle 2 geht u. a. hervor, wo ggf. Informationen zu langjährigen Grundwasserverhältnissen eingeholt werden können.

Tabelle 2-4 Informationsstellen für vorhandene Unterlagen (nach [39], Tabelle 2)

Unterlagen	Übliche Informationsstellen
geologische Verhältnisse	Geologische Landesämter
Bohrprofile	Geologische Landesämter, Bauämter bzw. Dienste, Umweltämter
langjährige Grundwasserverhältnisse	Wasserwirtschaftsverwaltungen, Bauverwaltungen bzw. Dienste, Geologische Landesämter, Versorgungsunternehmen
Veränderungen durch Flussbau und Landesbaukultur	Vermessungsämter, Wasserwirtschaftsverwaltungen, Flurbereinigungsämter
Bergbau, Bergsenkung	Bergämter, Geologische Landesämter, Bergwerksgesellschaften
Erdbeben	Erdbebenwarten, Geophysikalische Institute, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
örtliche Besonderheiten von Boden und Fels	Geotechnische Institute bzw. Dienste, Geologische Landesämter, Geologische Karten, Baugrundkarten 1 : 25 000 mit Erklärungen
Setzungsbeobachtungen	Bauverwaltungen, Bauherren, Geotechnische Institute
jüngere Bauvorgänge in der Nachbarschaft	örtliche Bauämter
Baumaßnahmen in historischer Zeit	Landesdenkmalämter, örtliche und regionale Archive
Altlasten	Umweltämter, Bauämter, Wasserwirtschaft, Geologische Landesämter, Verwaltungsämter
Kampfmittel	Kampfmitteldienste

Bezüglich der Auswahl und des Einsatzes von Messgeräten, die bei der Ermittlung physikalischer und physikochemischer Parameter von Grundwasser zum Einsatz kommen können, sei z. B. auf [144] verwiesen. Es sind dort u. a. Ausführungen zu Temperatur-, Leitfähigkeits- und pH-Messgeräten sowie zu Datensammlern für die Grundwassermessungen und zu Messverfahren zur Wasserstandsmessung zu finden. Hinsichtlich der Entnahme von Grundwasserproben mittels

Pumpe, Wasserproben-Entnahmegesät oder Vakuumflaschen sind die entsprechenden Ausföhrungen von DIN EN ISO 22475-1 zu beachten.

2.9 Grundwassermessstellen

Bei der Festlegung der Abmessungen und der konstruktiven Ausgestaltung von Bauwerken, die im Grundwasser stehen oder durch Grundwasserbereiche föhren, ist es, sowohl in technischer Hinsicht als auch in Hinblick auf die Baukosten, von großer Bedeutung, die Höhenlage des Grundwasserspiegels bzw. der Grundwasserdruckflähe zu kennen. Da Niederschläge, Wasserentnahmen usw. diese Höhenlage beeinflussen, stellen sowohl die zeitliche Entwicklung dieser Lage als auch deren Höchst-, Mittel- und Tiefstwerte wichtige Informationen dar. Insbesondere bei der Wasserentnahme zum Zwecke der Trockenlegung von Baugruben gilt dies nicht nur für die zu errichtenden Bauwerke selbst, sondern auch für Gebäude und Vegetation (z. B. Bäume in Parkanlagen), die durch diese Entnahme betroffen sind (siehe z. B. [12]).

Die Ermittlung der zeitveränderlichen Grundwasserstände erfolgt durch Messungen, für die in der Regel spezielle Messstellen eingerichtet werden. Gegebenenfalls können auch Bohrungen, die im Rahmen von Baugrundaufschlüssen niedergebracht wurden, zu Grundwassermessstellen ausgebaut werden. In Bild 2-8 ist eine Möglichkeit für den Ausbau einer Grundwassermessstelle gezeigt.

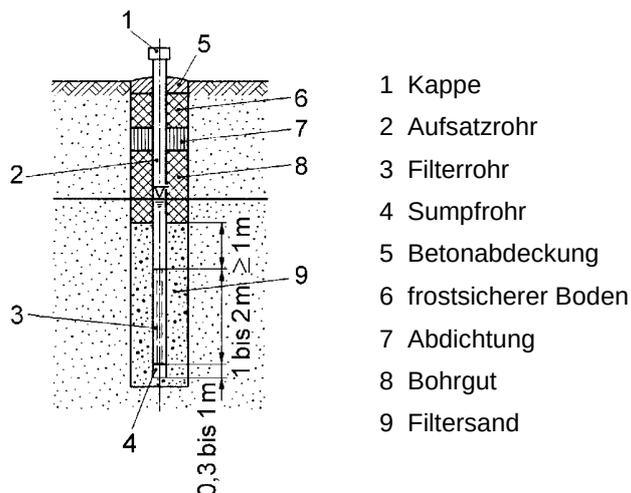


Bild 2-8 Ausbauplan für eine Grundwassermessstelle bei freiem Grundwasser im obersten Grundwasserstockwerk (nach [40])

Zur Wasserstandsermittlung mit Hilfe von Einzelmessungen stehen Kabellichtlote (Bild 2-9 a) zur Verfügung, bei denen ein an einem Messkabel hängendes Lot in die Messstelle abgesenkt wird. Sobald eine in das Lot eingebaute Elektrode mit dem Wasser in Beröhrung kommt, wird ein optisches und ggf. akustisches Signal ausgelöst; die Messtiefe kann dann an der Skala des Messkabels abgelesen werden. Sind Wasserstände kontinuierlich und über längere Zeit zu ermitteln, lassen sich die entsprechenden Messungen unter Verwendung von dauerhaft installierbaren

– Schwimmern und Drucksonden

durchföhren (Bild 2-9). Der einfachere und billigere Schwimmer ist bei nicht gespanntem Wasserspiegel einsetzbar. Das gilt auch für die mit größerer Genauigkeit arbeitende Drucksonde, die außerdem auch bei artesisch gespanntem Wasser bzw. in Messstellen mit besonders starken Schwankungen des Wasserpegels eingesetzt werden kann. Die Sonde wird dabei unter den zu erwartenden

minimalen Wasserstand in die Messstelle eingehängt, um so sicherzustellen, dass die Wasserstandsänderungen ausschließlich Änderungen des Wasserdrucks hervorrufen, der von der Sonde gemessen und durch die Messeinrichtung auf den jeweiligen Wasserstand zurückgerechnet wird. Temperatur- und Luftdruckschwankungen werden dabei über die Messeinrichtung kompensiert.

Die Messwerte können z. B. kontinuierlich auf Papiertrommeln aufgezeichnet (preisgünstige Version bei Langzeitbeobachtungen in weiter abgelegenen Messstellen, bei denen keine Grenzwertüberwachung erfolgt) oder in beliebigen Zeitabständen als digitalisierte Werte von unterbrechungslos anfallenden analogen Messsignalen festgehalten werden. Digitalgrößen lassen sich vor Ort speichern, mittels entsprechender Handgeräte „auslesen“ und so einer Auswertestelle zur Verfügung stellen; sie können aber auch per geeigneter Datenfernübertragung (Telefonleitung, Standleitung, Funkverbindung, direkt über Satellit usw.) an einen Auswerterechner übergeben werden (vgl. z. B. [194]).

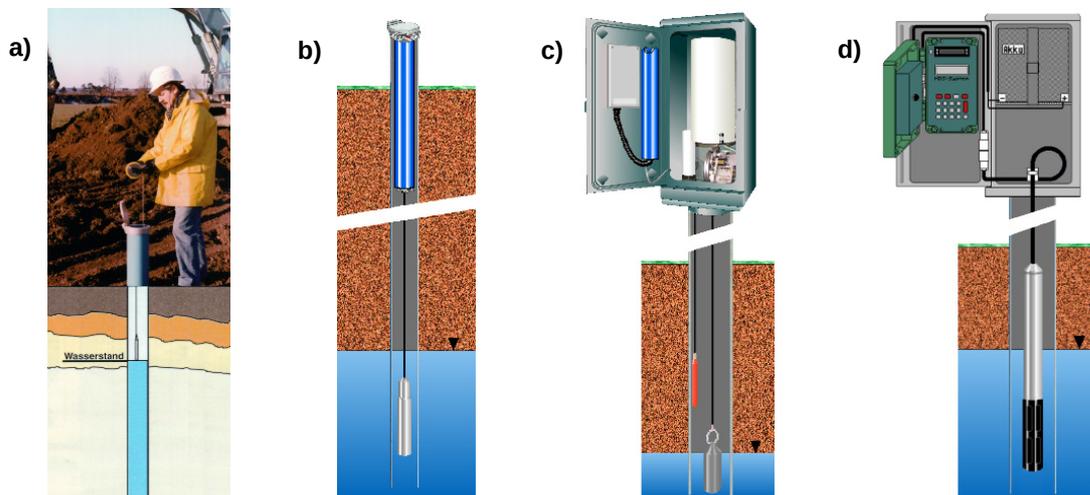


Bild 2-9 Geräte und Einrichtungen zur diskreten (a) und kontinuierlichen (b, c und d) Messung von Wasserständen (aus Prospekt der Fa. SEBA [F 9])
a) Kabellichtlot zur Einzelmessung von Wasserständen
b) Drucksonde, kombiniert mit auslesbarem digitalem Datensammler
c) Schwimmer und Gegengewicht mit Potentiometer und Vertikal-Registrierpegel
d) Station zur Messung von Wasserstand und Wasserqualität (Temperatur, pH-Wert, Redoxpotenzial, Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff)

Von dem Auswerterechner können digitalisierte Messergebnisse sowohl in Form von Zahlenwerten als auch grafisch aufbereitet zur Verfügung gestellt werden. Der Vorteil der Ergebnisgrafik liegt in der schnellen Erkennbarkeit der Messergebnisse und davon abgeleiteter Beziehungen, wie sich das anhand von Bild 2-10 und von Bild 2-11 zeigen lässt. Bild 2-10 zeigt vier Gangliniendiagramme eines Messnetzes mit bis zu 120 Messstellen und Bild 2-11 einen aus der Gesamtheit der Ganglinien ermittelten Grundwassergleichenplan. Dieser Grundwassergleichenplan basiert auf den gemessenen Grundwasserständen aller Messstellen zu einem festgelegten Zeitpunkt, wobei die in den Plan eingezeichneten Isohypsen die Punkte mit gleichen Grundwasserspiegelhöhen verbinden (Isohypsen sind mit Höhenlinien von Wanderkarten vergleichbar, ihre Genauigkeit hängt im Wesentlichen von der Zahl (Dichte) der Messstellen ab). Die Bilder wurden dem Beweissicherungsbericht [177] für die Baumaßnahmen zu den Verkehrsanlagen im zentralen Bereich Berlin (VZB) und den Neubauten im Parlaments- und Regierungsviertel entnommen, der bei der „Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie“ von Berlin öffentlich zugänglich be-

reithalten wird. Auswertungen dieser Art sind unverzichtbar, wenn es z. B. um die Kontrolle, Beweissicherung und Beeinflussung (z. B. durch Reinfiltrierung) stark zeitveränderlicher Grundwasserverhältnisse geht (siehe auch [194] und [209]).

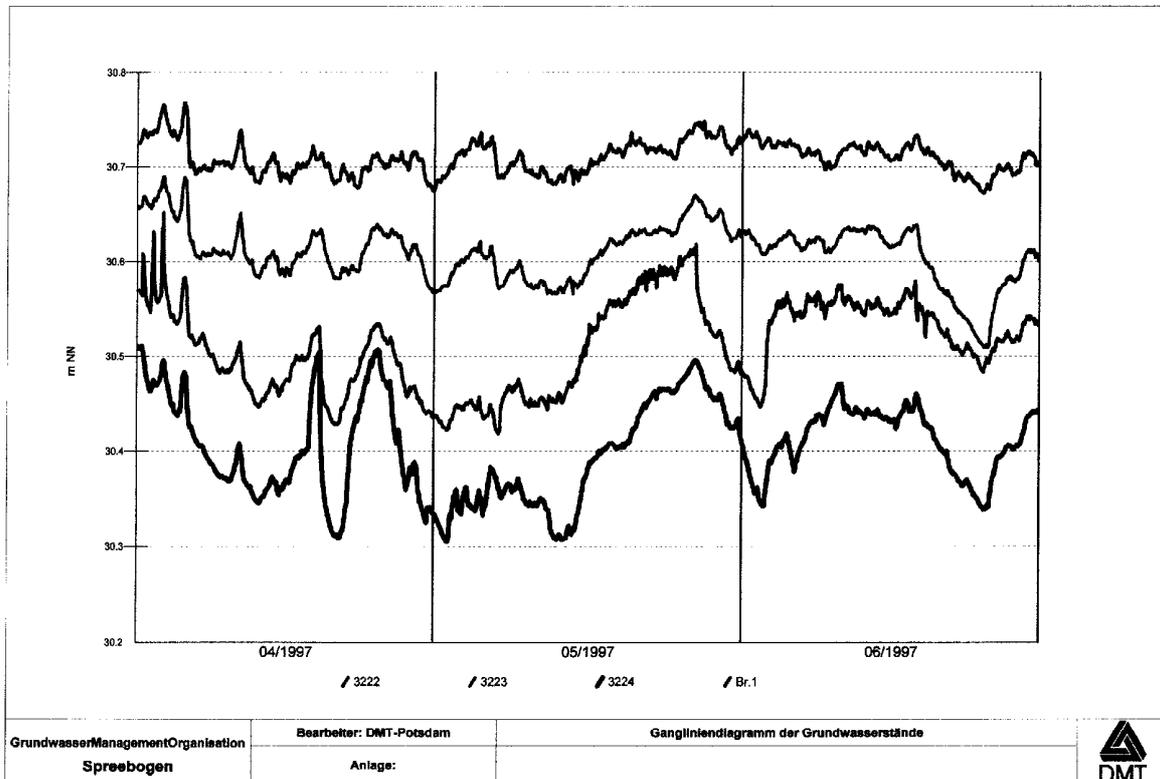


Bild 2-10 Gangliniendiagramme der Grundwasserstände von 4 Messstellen (aus [177], zur Verfügung gestellt von der Firma DMT-Potsdam [F 3])

Zu erwähnen ist, dass Betreiber von Grundwassermessnetzen seit einigen Jahren die von ihnen ermittelten Daten im Internet zur Verfügung stellen. So können z. B. vom Bayerischen Landesamt für Umwelt bzw. vom Niedrigwasser-Informationsdienst, vom Gewässerkundlichen Dienst und vom Hochwassernachrichtendienst zur Verfügung gestellte Daten von Grundwassermessstellen in Bayern derzeit über die Internetadresse

<http://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserstand/messdaten/index.htm>

eingesehen werden. Durch entsprechende Mouseclicks lassen sich Karten mit Messstellen öffnen, die von den Diensten betrieben werden. Das Anklicken einer entsprechenden Markierung führt zur Seite der ausgewählten Messstelle, auf der u. a. Angaben zur Messstelle und Messwerte des vergangenen Jahres bzw. des gesamten Zeitraums, in dem die Messstelle betrieben wurde zu finden sind. Bezüglich der Messstellenangaben sei als Beispiel die im Landkreis Freising belegene Grundwassermessstelle „Freising 275C“ herangezogen, deren Geländehöhe bzw. Ausbautiefe unter Gelände mit 448,48 m über NN bzw. 9,30 m angegeben wird. An ihr werden seit dem Jahr 1938 Messungen durchgeführt. Neben Ganglinien und tabellarisch zusammengestellten Messwerten finden sich z. B. auch Angaben zu Extremalwerten, wie den in der Zeit seit 1938 aufgetretenen höchsten bzw. niedrigsten Wasserstand von 444,25 bzw. 441,51 m ü. NN.

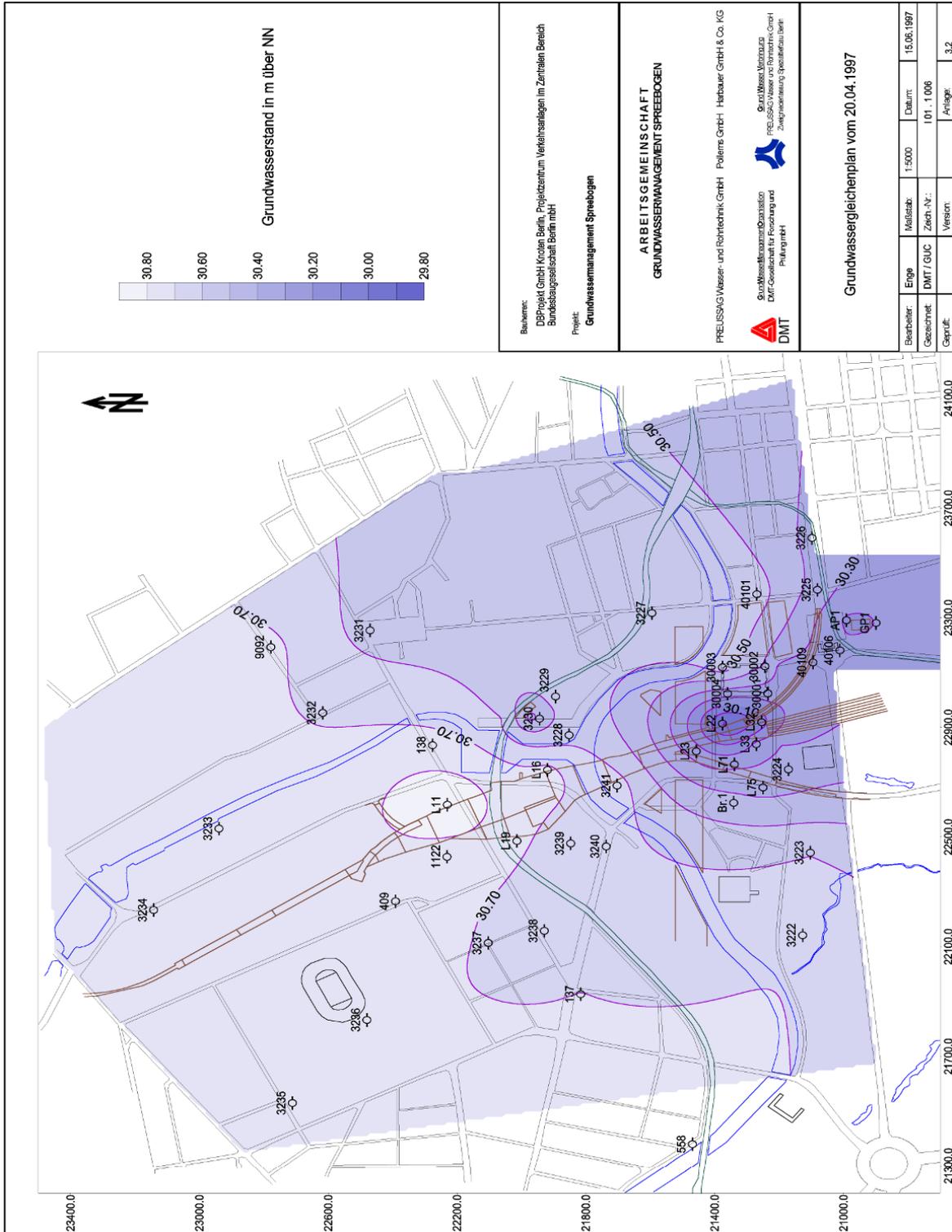


Bild 2-11 Grundwassergleichenplan (aus [177], zur Verfügung gestellt von der Firma DMT-Potsdam [F 3])