

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>Autoren-Kurzbiografien</b> .....	XIX
<b>Verzeichnis der Autoren</b> .....	XXV
<b>1.1 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau</b> <i>Martin Ziegler</i>	
1 Einführung .....	1
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Historischer Rückblick .....	4
2 Sicherheitskonzepte .....	9
2.1 Allgemeines .....	9
2.2 Globales Sicherheitskonzept .....	9
2.3 Teilsicherheitskonzept .....	10
3 Aufbau und Inhalte des Normenhandbuchs .....	11
3.1 Allgemeines .....	11
3.2 Inhaltsübersicht .....	11
3.3 Anwendungsbereich .....	13
3.4 Geotechnische Planung .....	13
3.5 Wichtige Begriffe der neuen Sicherheitsnorm .....	15
4 Grenzzustände und Nachweise .....	28
4.1 Allgemeines .....	28
4.2 Grenzzustände der Tragfähigkeit ULS .....	28
4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS .....	34
4.4 Teilsicherheitsbeiwerte nach Normenhandbuch .....	35
5 Zukünftige Normung im Umfeld des EC 7 .....	38
5.1 Entwicklung in Deutschland .....	38
5.2 Entwicklung in Europa .....	40
6 Zitierte Normen und Empfehlungen .....	42
7 Literatur .....	44
<b>1.2 Baugrunduntersuchungen im Feld</b> <i>Klaus-Jürgen Melzer, Edwin Fecker und Tilman Westhaus</i>	
1 Grundlagen .....	45
1.1 Normen und Richtlinien .....	45
1.2 Voruntersuchung .....	48

1.3	Hauptuntersuchung .....	48
1.4	Berichterstattung .....	52
2	Baugrundaufschluss durch Schürfe, Bohrungen und Probenentnahmen ..	53
2.1	Allgemeines .....	53
2.2	Bohrgeräte und Ausrüstung .....	54
2.3	Anforderungen .....	54
2.4	Aufschluss im Boden .....	55
2.5	Aufschluss im Fels .....	60
2.6	Aufschluss der Grundwasserverhältnisse .....	63
2.7	Behandlung, Transport und Aufbewahrung der Proben .....	66
2.8	Berichterstattung .....	66
3	Baugrundaufschluss durch Sondierungen .....	67
3.1	Allgemeines .....	67
3.2	Rammsondierungen .....	69
3.3	Standard Penetration Test und Bohrlochrammsondierung .....	75
3.4	Drucksondierungen .....	81
3.5	Flügelscherversuche .....	91
3.6	Gewichtssondierungen .....	94
4	Bohrlochaufweitungsversuche .....	98
4.1	Geräte und Versuchsdurchführung .....	98
4.2	Auswertung .....	104
5	Bestimmung der Dichte .....	110
5.1	Gravimetrische Verfahren .....	110
5.2	Radiometrische Verfahren .....	111
6	Geophysikalische Verfahren .....	113
6.1	Allgemeines .....	113
6.2	Beschreibungen der wichtigsten Verfahren .....	118
7	Literatur .....	121
8	Normen und Richtlinien .....	135

### **1.3 Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor**

*Paul von Soos und Jens Engel*

1	Boden und Fels – Begriffe und Entstehung .....	139
2	Eigenschaften der Böden .....	140
2.1	Bodenschichten .....	140
2.2	Bodenproben .....	140
2.3	Durchführen und Auswerten von Laborversuchen .....	141
2.4	Bodeneigenschaften und Laborversuche .....	144
3	Eigenschaften von Fels .....	144
4	Kennwerte und Eigenschaften der festen Bodenkörper .....	145
4.1	Korngrößenverteilung .....	145
4.2	Korndichte .....	148
4.3	Mineralaufbau .....	149
4.4	Kornform und Kornrauigkeit .....	151

4.5	Spezifische Kornoberfläche .....	151
4.6	Gehalt an organischen Bestandteilen .....	152
4.7	Kalkgehalt .....	153
5	Kennwerte und Eigenschaften des Kornhaufens .....	153
5.1	Gefüge des Boden .....	153
5.2	Porenanteil und Porenzahl .....	154
5.3	Ermittlung der Dichte des Bodens .....	158
5.4	Grenzen der Lagerungsdichte .....	158
5.5	Wassergehalt .....	160
5.6	Konsistenzgrenzen .....	160
5.7	Wasseraufnahmevermögen nach <i>Enslin</i> .....	163
5.8	Verdichtungsverhalten in Abhängigkeit vom Wassergehalt .....	164
5.9	Absolute Porengröße und Filterwirkung .....	166
5.10	Kapillarität .....	167
5.11	Wasserdurchlässigkeit .....	170
5.12	Luftdurchlässigkeit .....	174
6	Versuche zur Ermittlung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens .....	175
6.1	Allgemeines .....	175
6.2	Kompressionsversuch (Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung) ..	178
6.3	Dreiaxialer Druckversuch .....	188
6.4	Einaxialer Druckversuch .....	192
6.5	Dreiaxialer Druckversuch mit $\sigma_2 \geq \sigma_3$ und zweiaxialer Druckversuch ....	192
6.6	Hohlzylinderversuch .....	193
6.7	Messen von Kriechverformungen .....	193
7	Scherfestigkeit; Ermittlung der Scherparameter .....	195
7.1	Allgemeines .....	195
7.2	Dreiaxialer Druckversuch .....	202
7.3	Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit .....	205
7.4	Rahmenscherversuch .....	206
7.5	Kreisringscherversuch .....	206
7.6	Versuch mit dem „Einfachschergerät“ (simple shear) .....	207
8	Ermittlung der Zugfestigkeit .....	208
9	Eigenschaften von Festgestein – felsmechanische Laborversuche .....	208
9.1	Vorbemerkung .....	208
9.2	Einaxialer Druckversuch an Gesteinsproben .....	209
9.3	Punktlastversuche an Gesteinsproben .....	209
9.4	Dreiaxialer Druckversuch an Gesteinsproben .....	210
9.5	Scherwiderstand in Felstrennflächen .....	213
9.6	Festigkeit des geklüfteten Fels .....	214
9.7	Zugversuche an Gesteinsproben .....	215
9.8	Kriechversuche an Gesteinsproben .....	215
9.9	Einaxiale Relaxationsversuche an Gesteinsproben .....	216
9.10	Quellversuche an Gesteinsproben .....	216
9.11	Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit von Gesteinen – Siebtrommelversuch .....	217
10	Benennen, Beschreiben und Klassifikation von Boden und Fels .....	218

10.1	Benennen und Beschreiben von Boden .....	218
10.2	Benennen und Beschreiben von Fels .....	220
10.3	Bodenklassifikation .....	223
10.4	Felsklassifikation .....	226
11	Literatur .....	232

#### **1.4 Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung**

*Maximilian Huber und Karl-Josef Witt*

1	Einleitung .....	243
2	Sicherheit und Zuverlässigkeit in der geotechnischen Bemessung .....	244
2.1	Begriffe und Überblick .....	244
2.2	Teilsicherheitsbeiwerte und probabilistische Bemessung .....	247
2.3	Grundlagen der Statistik .....	249
2.4	Grundlagen der Geostatistik .....	252
3	Grundlagen der probabilistischen Methoden .....	256
3.1	Bewertung der Unsicherheit von Systemen .....	256
3.2	Monte-Carlo-Simulation .....	259
3.3	First Order Reliability Method .....	259
3.4	Antwortflächenverfahren .....	259
3.5	Sensitivitätsanalyse .....	260
4	Komplexe Fragestellungen der probabilistischen Bemessung .....	260
5	Berücksichtigung von Messungen in einer probabilistischen Analyse im Rahmen der Beobachtungsmethode .....	261
5.1	Datenassimilation und inverse Analyse .....	261
5.2	Probabilistische Analyse von Bestandsbauwerken .....	261
6	Anwendung von probabilistischen Methoden in der Geotechnik .....	262
6.1	Teilsicherheitskonzept in der DIN EN 1997-1 (EC 7, Teil 1) .....	262
6.2	Regelungen in den nationalen Anhängen des EC 7 .....	264
6.3	Literaturüberblick zur probabilistischen Bemessung .....	265
7	Zusammenfassung .....	269
8	Literatur .....	271
	Normen, Empfehlungen und Richtlinien .....	277
9	Anhang .....	278
9.1	Statistische Momente .....	278
9.2	Maximum-Likelihood-Methode .....	278
9.3	Zusammenhang zwischen Normalverteilung und Log-Normalverteilung .....	280
9.4	Bayes'sches Updaten .....	281
9.5	Variogramm .....	282
9.6	FORM .....	284

**1.5 Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser***Andreas Claussen*

1	Grundlagen .....	287
2	Anorganische Matrix des Untergrunds .....	288
3	Organische Matrix des Untergrunds .....	289
4	Schadstoff .....	292
5	Anorganische Schadstoffe .....	294
6	Organische Schadstoffe .....	296
6.1	Allgemeines .....	296
6.2	Mineralölartige Kohlenwasserstoffe (KW-Index) .....	296
6.3	Einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe .....	299
6.4	Mehrkernige aromatische Kohlenwasserstoffe .....	302
6.5	Halogenierte Kohlenwasserstoffe .....	302
7	Bewertungsmatrix .....	304
8	Untersuchungserfordernisse .....	306
9	Untersuchungsplanung .....	307
10	Grundlagen der Bewertung .....	308
10.1	Allgemeines .....	308
10.2	Bewertung von Verdachtsflächen .....	308
10.3	Arbeits- und Gesundheitsschutz .....	310
10.4	Gefährdungen über Bodenluft .....	311
10.5	Verwertungsmöglichkeiten oder Entsorgungserfordernisse .....	311
11	Literatur .....	314

**1.6 Erddruck***Achim Hettler*

1	Einführung .....	317
2	Begriffe, Formelzeichen und Indizes .....	318
2.1	Begriffe .....	318
2.2	Formelzeichen .....	319
2.3	Indizes .....	320
3	Methoden zur Ermittlung des Erddrucks .....	321
3.1	Übersicht .....	321
3.2	Kinematische Methoden beim aktiven Erddruck .....	322
3.3	Kinematische Methoden beim passiven Erddruck .....	325
3.4	Statische Methoden .....	329
3.5	Versuche und Messungen .....	335
3.6	Finite-Elemente-Methode .....	348
4	Ebener aktiver Erddruck .....	363
4.1	Grundsätzliche Überlegungen .....	363
4.2	Bodeneigengewicht, großflächige Auflasten und Kohäsion .....	365
4.3	Kohäsion, rechnerische Zugspannungen und Mindesterdruk .....	367
4.4	Vertikale Linien- und Streifenlasten .....	371

4.5	Horizontale Linien- und Streifenlasten .....	377
4.6	Geschichteter Boden .....	377
4.7	Geknickter Geländeverlauf .....	379
4.8	Geknickte Wandflächen .....	380
4.9	Verteilung des aktiven Erddrucks .....	381
5	Erdruehdruck .....	381
5.1	Bodeneigengewicht und großflächige Auflasten .....	381
5.2	Punkt-, Linien- und Streifenlasten .....	386
6	Ebener passiver Erddruck .....	390
6.1	Grundsätzliche Überlegungen .....	390
6.2	Eigengewicht, großflächige Auflasten und Kohäsion bei Parallelbewegung .....	391
6.3	Drehung um den Kopf- oder den Fußpunkt .....	395
6.4	Verteilung des passiven Erddrucks .....	397
7	Räumlicher aktiver Erddruck .....	398
7.1	Grundsätzliche Überlegungen .....	398
7.2	Kreiszyindrische Flächen .....	400
7.3	Stützwände quer zur Böschung .....	403
8	Räumlicher passiver Erddruck .....	405
8.1	Übersicht .....	405
8.2	Fußwiderstand vor Bohlträgern nach <i>Weißbach</i> .....	406
8.3	Verfahren nach DIN 4085 für begrenzte Wandabschnitte .....	408
9	Sonderfälle .....	409
9.1	Verdichtungsdruck .....	409
9.2	Silodruck .....	411
9.3	Wiederholte quasistatische Beanspruchungen .....	413
9.4	Dynamische Beanspruchungen .....	415
9.5	Einfluss des Grundwassers auf den Erddruck .....	415
9.6	Winkelstützwände .....	418
9.7	Weitere Hinweise .....	421
10	Mobilisierung des Erddrucks .....	424
10.1	Übersicht .....	424
10.2	Grenzwerte der Verschiebung bei Erreichen des aktiven Erddrucks .....	425
10.3	Grenzwerte der Verschiebung bei Erreichen des passiven Erddrucks .....	426
10.4	Mobilisierungsfunktionen .....	428
11	Anwendungshinweise .....	433
11.1	Erddruckneigung und Wandreibungswinkel .....	433
11.2	Ansatz des Erddrucks in Abhängigkeit der Verschiebung .....	436
11.3	Erddruckumlagerung .....	439
11.4	Erddruck als günstige Einwirkung .....	440
12	Literatur .....	441
Anhang	.....	448

**1.7 Stoffgesetze für Böden***Dimitrios Kolymbas und Ivo Herle*

1	Einführung .....	458
2	Frequently asked questions .....	459
3	Bedeutung von Stoffgesetzen für die Geotechnik .....	461
4	Merkmale des Bodenverhaltens .....	462
4.1	Elementversuche .....	462
4.2	Kompressionsverhalten .....	463
4.3	Scherverhalten .....	465
4.4	Druck- und Dichteabhängigkeit .....	468
4.5	Verhalten undrärierter Proben .....	469
4.6	Kritische Zustände .....	470
4.7	Einfluss der Deformationsgeschichte .....	472
4.8	Zyklisches Verhalten .....	473
4.9	Realität .....	473
5	Mathematische Struktur von Stoffgesetzen .....	474
5.1	Grundbegriffe, Tensoren .....	474
5.2	Elastische Stoffe im Allgemeinen .....	475
5.3	Einfluss der Geschichte .....	476
5.4	Homogenität .....	477
5.5	Invarianz, Isotropie, Objektivität .....	478
5.6	Eindeutigkeit .....	479
5.7	Maßstabeffekt .....	480
5.8	Kontinuumsmechanische und diskrete Betrachtungen .....	480
6	Hierarchie und Bestandteile von Stoffgesetzen .....	481
6.1	Lineare Elastizität .....	481
6.2	Elastoplastische Stoffgesetze .....	483
6.3	Hypoplastische Stoffgesetze .....	493
6.4	Antwortumhüllende .....	494
7	Besondere Fragestellungen .....	495
7.1	Wassergesättigter Boden .....	495
7.2	Stoffgesetze für teilgesättigten Boden .....	497
7.3	Stoffgesetze für schnelle Verformungen .....	497
7.4	Zeitabhängigkeit .....	498
7.5	Zementierung .....	498
7.6	Kornbruch .....	499
7.7	Thermische, chemische und biologische Effekte .....	499
8	Ergänzende Aspekte von Stoffgesetzen .....	499
8.1	Allgemeinheit .....	499
8.2	Kalibrierung .....	499
8.3	Stoffkonstanten und Zustandsgrößen .....	500
8.4	Thermodynamische Konsistenz .....	501
8.5	Große Verformungen .....	501
8.6	Entfestigung .....	502
8.7	Höhere Continua .....	502

9	Stoffgesetze in der Praxis .....	503
10	Literatur .....	504

## **1.8 Stoffgesetze und Bemessungsansätze für Festgestein**

*Erich Pimentel*

1	Einführung .....	511
2	Allgemeine Eigenschaften .....	511
2.1	Fels und Boden .....	511
2.2	Diskontinuitäten .....	514
2.3	Genität, Tropie und Betrachtungsbereich .....	519
2.4	Bruch- und Verformungsverhalten .....	522
3	Stoffgesetze .....	525
3.1	Allgemeines .....	525
3.2	Elastisches Materialverhalten .....	525
3.3	Elastoplastisches Materialverhalten .....	527
3.4	Viskoplastisches Materialverhalten .....	534
3.5	Trennflächen .....	535
3.6	Homogenisierung .....	544
3.7	Schädigungsmodelle .....	546
4	Durchströmung des Gebirges .....	547
4.1	Allgemeines .....	547
4.2	Durchströmung von Gestein und einer Trennfläche .....	548
4.3	Homogenisierung .....	550
4.4	Nicht homogenisierbare Fälle und Sonderfälle .....	551
5	Bemessungsansätze .....	552
5.1	Allgemeines .....	552
5.2	Gleiten – ebener Fall .....	555
5.3	Gleiten – räumlicher Fall .....	557
5.4	Kippen .....	560
5.5	Knicken .....	565
5.6	Steinfall .....	566
6	Literatur .....	569

## **1.9 Bodendynamik**

*Christos Vrettos*

1	Einleitung .....	573
2	Schwingungen einfacher Systeme .....	574
2.1	Allgemeines .....	574
2.2	Freie Schwingungen .....	575
2.3	Erzwungene, gedämpfte Schwingungen .....	577
2.4	Viskose Dämpfung .....	579
3	Wellenausbreitung im Boden .....	581

3.1	Allgemeines .....	581
3.2	Eindimensionale Wellenausbreitung .....	582
3.3	Verhalten von Wellen an Trennflächen .....	583
3.4	Ausbreitung von vertikal propagierenden Wellen in einer Bodenschicht .....	584
3.5	Oberflächenwellen .....	585
4	Bodenverhalten bei zyklischer Belastung .....	587
4.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten .....	587
4.2	Aquivalent-lineares Modell .....	590
4.3	Nichtlineare Modelle .....	601
4.4	Zyklische Setzungen .....	606
5	Messung von dynamischen Bodenkenngrößen .....	608
5.1	Feldversuche .....	608
5.2	Laborversuche .....	613
6	Dynamisch belastete Fundamente .....	616
6.1	Steifigkeitsfunktionen .....	616
6.2	Boden-Bauwerk-Interaktion .....	621
6.3	Pfahlgründungen .....	622
7	Literatur .....	623

### 1.10 Numerische Verfahren in der Geotechnik

*Peter-Andreas von Wolffersdorff und Helmut F. Schweiger*

1	Einleitung .....	633
2	Besonderheiten der Geotechnik .....	634
3	Bedeutung der Stoffmodelle für den Baugrund .....	637
4	Die verschiedenen numerischen Verfahren .....	640
4.1	Übersicht über numerische Verfahren .....	640
4.2	Kurzbeschreibung mathematischer und mechanischer Grundlagen .....	649
5	Verformungsberechnungen typischer geotechnischer Aufgaben .....	672
5.1	Vorbemerkungen .....	672
5.2	Gründungen .....	672
5.3	Dämme .....	682
5.4	Gesicherte Böschungen und Verbaukonstruktionen .....	687
6	Standsicherheitsberechnungen typischer geotechnischer Aufgaben .....	697
6.1	Vorbemerkungen .....	697
6.2	Verkehrsbauliche Dämme .....	697
6.3	Wasserbauliche Dämme .....	698
6.4	Böschungen .....	702
6.5	Baugrubenwände .....	707
7	Weitere Anwendungen numerischer Verfahren .....	708
7.1	Vorbemerkungen .....	708
7.2	Verformungsberechnungen beim Einsatz von Geokunststoffen .....	708
7.3	Dynamische Verformungsberechnungen bei Erdbebenbeanspruchungen .....	711
8	Schlussbemerkungen .....	713
9	Literatur .....	714

**1.11 Massenbewegungen***Dieter D. Genske*

1	Einleitung .....	721
2	Mechanismen .....	732
2.1	Gleiten .....	733
2.2	Kippen, Knicken, Abscheren .....	742
2.3	Fallen .....	746
2.4	Fließen .....	748
2.5	Kriechen und Driften .....	754
3	Auslöser .....	758
3.1	Veränderung der Hanggeometrie .....	758
3.2	Veränderung der Bergwasserverhältnisse .....	759
3.3	Veränderung der Lasten .....	762
3.4	Veränderung der Festigkeit .....	763
4	Erkennen von Bewegungspotenzialen .....	764
4.1	Erkundung .....	764
4.2	Geomorphologische Ansprache .....	765
4.3	Bodenansprache .....	766
4.4	Gebirgsansprache .....	769
4.5	Hydrogeologische Ansprache .....	775
4.6	Biologische Ansprache .....	776
4.7	Anthropogene Ansprache .....	777
4.8	Synthesekarte .....	777
5	Gefahrenabwehr .....	778
5.1	Gefährdungskarten .....	778
5.2	Monitoring .....	780
5.3	Schutzmaßnahmen .....	782
5.4	Stabilisierungsmaßnahmen .....	785
5.5	Geokompatible Böschungsbildung .....	786
6	Klimawandel .....	788
6.1	Trigger im Klimawandel .....	788
6.2	Driver des Klimawandels .....	788
6.3	Anpassung an den Klimawandel .....	790
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	791
8	Literatur .....	792

**1.12 Ingenieurgeodäsie – Zustandsdokumentation und Überwachungsmessung***Otto Heunecke*

1	Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie .....	815
2	Inhalte ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen .....	816
3	Rekapitulation geodätischer Grundlagen .....	818
3.1	Allgemeines .....	818

3.2	Geodätische Bezugssysteme .....	819
3.3	Korrekturen und Reduktionen geodätischer Observablen .....	822
3.4	Koordinatentransformationen .....	825
3.5	Geodätische Netzausgleichung .....	827
4	Ingenieurgeodätische Messverfahren .....	831
4.1	Allgemeines .....	831
4.2	Bestimmung einzelner Messgrößen .....	832
4.3	Linienweise Messungen .....	840
4.4	3-D-Koordinatenbestimmungen .....	844
4.5	Geosensornetze .....	853
5	Auswertemethoden .....	855
5.1	Allgemeines .....	855
5.2	Deskriptive Verformungsanalyse .....	855
5.3	Zeitreihenauswertung .....	858
5.4	Integrierte Auswertemodelle .....	862
6	Literatur .....	864

### 1.13 Instrumentierung und Monitoring in der Geotechnik

*Hans Jakob Becker, Marcel Hubrig, Markus Stolz, Arno Thut und  
Holger Wörsching*

1	Einleitung .....	867
2	Ziel geotechnischer Messungen .....	868
2.1	Instrumentierung und Feldversuche in der Sondierphase .....	869
2.2	Sicherheit und Beweissicherung .....	869
2.3	Qualitätskontrolle .....	869
2.4	Instrumentierungen bei der Beobachtungsmethode .....	869
3	Messgrößen .....	870
3.1	Messgrößen im Baugrund .....	870
3.2	Messgrößen während der Bauausführung .....	871
3.3	Messgrößen in Tragteilen .....	872
3.4	Messgrößen bei angrenzenden Objekten .....	872
3.5	Messgrößen bei permanenten Bauwerken .....	873
3.6	Messgrößen bei Sanierungen von Bauwerken .....	873
4	Messkonzept .....	874
4.1	Begriffe der Messtechnik .....	874
4.2	Sensoren und Sensorsysteme .....	875
4.3	Instrumentierung .....	877
4.4	Monitoring .....	878
4.5	Datenerfassungsarten .....	879
4.6	Datenmanagement .....	880
5	Messinstrumente in der Geotechnik .....	885
5.1	Verschiebungsmessungen .....	885
5.2	Messungen des Porenwasserzustands .....	910
5.3	Dehnungs-, Kraft- und Spannungsmessungen .....	919

---

5.4	Temperaturmessungen .....	921
5.5	Prüfungen .....	924
5.6	Immissionsmessungen / Erschütterungsmessungen .....	926
6	Fallbeispiele .....	928
6.1	Tiefe Baugruben, angrenzende Gebäude .....	928
6.2	Probeschüttungen, Barcelona und Venedig .....	939
6.3	Kavernen und Staumauerbau: Pumpspeicherwerk Limmern .....	941
6.4	Überwachung instabiler Hänge .....	952
6.5	Probelastungen an Tragteilen und Pfählen .....	957
6.6	Sanierung eines Bauwerks: Adlertunnel .....	960
6.7	Anwendung von linienweisen Messungen .....	964
7	Literatur .....	966
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>969</b>
	<b>Inserentenverzeichnis</b> .....	<b>987</b>