

# Der Ingenieurbau

- **Hydrotechnik**
- **Geotechnik**



# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

## Verzeichnis der Verfasser

### Ingenieurhydrologie

1	Begriffe, Wasserbilanz . . . . .	1
2	Wasserhaushaltsgrößen . . . . .	4
2.1	Niederschlag . . . . .	4
2.2	Verdunstung . . . . .	8
2.3	Abfluß . . . . .	16
3	Statistische Auswertung hydrologischer Beobachtungsreihen . . . . .	21
3.1	Gewässerkundliche Hauptwerte . . . . .	21
3.2	Summenlinienverfahren . . . . .	22
3.3	Dauerlinien . . . . .	27
3.4	Häufigkeitsuntersuchungen . . . . .	28
3.4.1	Datenkollektive und Häufigkeiten . . . . .	28
3.4.2	Statistische Maßzahlen und Verteilungsfunktionen . . . . .	31
3.5	Einführung in die Zeitreihenanalyse und stochastische Modelle . . . . .	36
3.5.1	Überblick über mathematische Modelle und Zeitreihenmodelle . . . . .	36
3.5.2	Selbsterklärende Zeitreihenmodelle . . . . .	41
3.5.3	Autoregressionsmodell zur Simulation von Abflüssen . . . . .	42
4	Oberirdische Gewässer . . . . .	45
4.1	Flußeinzugsgebiet und charakteristische Fließzeiten . . . . .	45
4.2	Modellkonzepte für die Niederschlag-Abfluß-Beziehung . . . . .	46
4.3	Hochwasser . . . . .	54
4.3.1	Konzeptionelle Modelle . . . . .	54
4.3.2	Blockmodelle . . . . .	60
4.3.3	Anwendungsbeispiele für Niederschlag-Abflußmodelle . . . . .	62
4.3.4	Hochwasserhäufigkeit . . . . .	66
4.3.4.1	Hochwasserrisiko . . . . .	66
4.3.4.2	Bildung von Hochwasserkollektiven . . . . .	67
4.3.4.3	Verteilungsfunktionen für Hochwasser . . . . .	69
4.3.5	Anpassung von Verteilungsfunktionen . . . . .	76
4.3.5.1	Chi-Quadrat-Test . . . . .	76
4.3.5.2	Konfidenzintervalle für Verteilungsfunktionen . . . . .	80
4.3.5.3	Ausreißertest für Extremwerte . . . . .	81
4.3.6	Regionale Hochwasserabflußspenden . . . . .	81
4.4	Niedrigwasser . . . . .	85
4.4.1	Kennzeichnende Größen und Datenkollektive . . . . .	85
4.4.2	Häufigkeit von Niedrigwasser . . . . .	86
4.4.3	Vergleich von Verteilungen für Niedrigwasser . . . . .	89
4.5	Abfluß infolge Schneeschmelze . . . . .	92

4.5.1	Schneebeobachtung . . . . .	92
4.5.2	Wärmebilanz für die Schneeschmelze . . . . .	93
4.5.3	Ermittlung des Abflusses aus Schneeschmelze . . . . .	95
5	Unterirdisches Wasser . . . . .	98
5.1	Bodenwasser . . . . .	98
5.2	Grundwasser . . . . .	100
5.2.1	Grundwassermeßprogramm und -erkundung . . . . .	100
5.2.2	Grundwassermodelle . . . . .	102
5.2.2.1	Geohydraulische Grundlagen . . . . .	102
5.2.2.2	Modelle für Grundwasserströmungen . . . . .	105
5.2.2.3	Finite Differenzen und Finite Elemente Modelle . . . . .	107
5.2.2.4	Grundzüge der Modellierung des Stofftransports . . . . .	111
5.2.3	Grundwasserschutz . . . . .	115
6	Literatur . . . . .	120

### Technische Hydraulik

1	Grundlagen . . . . .	123
1.1	Begriffe der Technischen Hydraulik . . . . .	123
1.1.1	Klassifizierung der Flüssigkeiten . . . . .	124
1.1.2	Unterscheidung der Bewegungsform . . . . .	124
1.2	Hydromechanische Bedingungen . . . . .	126
1.2.1	Kontinuitätsbedingung . . . . .	126
1.2.2	Bewegungsgleichung . . . . .	126
1.3	Grundgleichungen der Hydraulik . . . . .	127
1.3.1	Kontinuitätsgleichung . . . . .	127
1.3.2	Impulssatz . . . . .	128
1.3.3	Bernoullische Gleichung . . . . .	129
1.4	Hilfsmittel Potentialströmung . . . . .	131
1.4.1	Geschwindigkeitspotential . . . . .	131
1.4.2	Laplace-Gleichung . . . . .	132
1.4.3	Analytische Lösungen . . . . .	132
1.4.4	Potentialnetzauswertung . . . . .	133
2	Wirkung ruhenden Wassers . . . . .	135
2.1	Druckverteilung und Druckkraft . . . . .	135
2.2	Systemzerlegung als Berechnungshilfe . . . . .	137
3	Berechnung von Wehröffnungen und Entlastungsanlagen . . . . .	138
3.1	Frontal angeströmte gerade Überfälle . . . . .	138
3.2	Radial angeströmte Kelchüberfälle . . . . .	139
3.3	Parallel angeströmte Überfälle . . . . .	141
3.4	Heberüberfälle . . . . .	142
3.5	Ausfluß unter Schützen . . . . .	143
3.6	Ausfluß aus Öffnungen begrenzter Breite . . . . .	144
4	Berechnung von Druckrohrleitungen . . . . .	146
4.1	Rohrwiderstand . . . . .	146
4.1.1	Rohre mit Kreisquerschnitt . . . . .	147
4.1.2	Rohre mit Rechteckquerschnitt . . . . .	151
4.2	Örtliche Energiehöhenverluste . . . . .	151
4.2.1	Einläufe . . . . .	152

4.2.2	Querschnittsänderungen . . . . .	152
4.2.3	Rohrverzweigungen . . . . .	153
4.2.4	Umlenkungen . . . . .	154
4.2.5	Betriebseinrichtungen . . . . .	155
4.3	Berechnung stationärer Rohrströmungen . . . . .	156
4.3.1	Transportleitung . . . . .	156
4.3.2	Entleerungsleitung . . . . .	157
4.4	Berechnung instationärer Rohrströmungen . . . . .	158
4.4.1	Ausgangsgleichungen . . . . .	159
4.4.2	Druckstoßberechnung . . . . .	160
4.4.3	Schwallenschachtbemessung . . . . .	163
5	Berechnung von Freispiegelströmungen . . . . .	165
5.1	Berechnung des Normalabflusses . . . . .	165
5.1.1	Dimensionslose Normalabflußformel . . . . .	166
5.1.2	Manning-Strickler-Formel . . . . .	167
5.1.3	Gegliederte Querschnitte . . . . .	168
5.1.4	Teilgefüllte Rohrleitungen . . . . .	169
5.2	Mindestenergiehöhe und Maximalabfluß . . . . .	170
5.2.1	Wassertiefen bei konstantem Durchfluß . . . . .	171
5.2.2	Wassertiefen bei konstanter Energiehöhe . . . . .	172
5.3	Aufstauberechnung . . . . .	173
5.3.1	Aufstau bei strömendem Zufluß ohne Fließwechsel . . . . .	174
5.3.2	Aufstau bei strömendem Zufluß mit Fließwechsel . . . . .	175
5.4	Örtliche Energiehöhenverluste . . . . .	176
5.4.1	Querschnittsänderungen . . . . .	177
5.4.2	Wechselsprung . . . . .	177
5.5	Stationäre Spiegellinienberechnung . . . . .	179
5.5.1	Qualitativer Spiegellinienverlauf . . . . .	180
5.5.2	Iterative Spiegellinienberechnung . . . . .	182
5.6	Sammelrinnen . . . . .	183
5.7	Schußrinnen . . . . .	185
5.8	Quasi-stationäre Gerinneströmung . . . . .	188
5.9	Instationäre Freispiegelströmungen . . . . .	190
5.9.1	Wellenablauf in Gerinnen . . . . .	190
5.9.2	Fortschreitende Oberflächenwellen . . . . .	191
5.9.3	Uferbeeinflusste Wellenbewegung . . . . .	192
5.9.4	Bauwerksbelastung durch Wellen . . . . .	193
6	Grundwasserströmung . . . . .	195
6.1	Filtergeschwindigkeit und Sickerwiderstand . . . . .	195
6.2	Potentialströmung als Analogie . . . . .	196
6.3	Vertikal-ebene Strömungsfelder mit freiem Spiegel . . . . .	197
6.3.1	Kontinuitätsbedingung . . . . .	198
6.3.2	Dupuit-Annahme . . . . .	198
6.3.3	Dupuit-Forchheimer-Gleichung . . . . .	199
6.4	Horizontal-ebene Strömungsfelder mit freiem Spiegel . . . . .	199
6.4.1	Verallgemeinerte Dupuit-Forchheimer-Gleichung . . . . .	199
6.4.2	Numerische Auswertung . . . . .	199
7	Gerinne mit beweglicher Sohle . . . . .	200
7.1	Sedimenttransport . . . . .	200
7.2	Sohlenbeanspruchung . . . . .	201

7.2.1	Sohlenschubspannung . . . . .	202
7.2.2	Transportwirksame Sohlenschubspannung . . . . .	203
7.2.3	Kritische Sohlenschubspannung . . . . .	204
7.3	Geschiebetransport . . . . .	205
7.3.1	Meyer-Peter-Formel . . . . .	206
7.3.2	Einstein-Formel . . . . .	206
7.3.3	Engelund-Fredsoe-Formel . . . . .	206
7.3.4	Weitere Geschiebeformeln . . . . .	207
7.4	Schwebstofftransport . . . . .	207
7.4.1	Schwebstoffverteilung . . . . .	207
7.4.2	Referenzkonzentration . . . . .	208
7.4.3	Transportierte Schwebstoffmasse . . . . .	209
7.5	Gesamttransport . . . . .	210
7.6	Sohlenlagenberechnung . . . . .	210
8	Entwicklungstendenzen der Technischen Hydraulik . . . . .	212
9	Literatur . . . . .	213

## **Bodenmechanik**

1	Einleitung . . . . .	215
1.1	Zweck und Abgrenzung . . . . .	215
1.2	Darstellung und Arbeitshinweise . . . . .	215
1.3	Zur Sicherheit . . . . .	216
2	Aufbau und Zusammensetzung . . . . .	217
2.1	Erdstoffe . . . . .	217
2.1.1	Bestandteile . . . . .	217
2.1.2	Mengenverhältnisse . . . . .	218
2.1.3	Struktur . . . . .	223
2.2	Erdkörper . . . . .	228
2.2.1	Geländearbeiten . . . . .	228
2.2.2	Darstellung und Interpretation . . . . .	234
3	Grundwasserströmung . . . . .	235
3.1	Durchlässigkeit . . . . .	235
3.1.1	Durchlässigkeitsgrenze . . . . .	235
3.1.2	Durchlässigkeitsversuche . . . . .	237
3.2	Strömungsvorgänge . . . . .	239
3.2.1	Potentialströmung . . . . .	239
3.2.2	Andere Strömungsvorgänge . . . . .	242
4	Vertikale Zusammendrückung . . . . .	254
4.1	Zusammendrückbarkeit . . . . .	254
4.1.1	Definition und Ermittlung . . . . .	254
4.1.2	Verhalten . . . . .	256
4.2	Setzungen infolge Zusammendrückung . . . . .	259
4.2.1	Vertikale Spannungen . . . . .	259
4.2.2	Setzungsberechnung . . . . .	262
4.3	Verzögerte Zusammendrückung . . . . .	271
4.3.1	Verzögerung durch Porenwasserströmung . . . . .	271
4.3.2	Anwendungen . . . . .	273
4.3.3	Konsolidierverhältnis und Sekundärsetzung . . . . .	275

5	Grenzzustände der Tragfähigkeit . . . . .	279
5.1	Scherfestigkeit . . . . .	279
5.1.1	Schergesetze und Scherversuche . . . . .	279
5.1.2	Verhalten unvorbelasteter unzementierter Erdstoffe . . . . .	283
5.1.3	Verhalten vorbelasteter und zementierter Erdstoffe . . . . .	287
5.2	Aktiver und passiver Erddruck . . . . .	291
5.2.1	Aktive Erddruckkraft . . . . .	291
5.2.2	Passive Erddruckkraft . . . . .	295
5.2.3	Erddruckspannung . . . . .	298
5.3	Geländebruch . . . . .	306
5.3.1	Translation . . . . .	306
5.3.2	Rotation . . . . .	310
5.3.3	Andere Mechanismen . . . . .	316
5.4	Grundbruch und andere Bruchvorgänge . . . . .	326
5.4.1	Grundbruch . . . . .	326
5.4.2	Andere Bruchvorgänge . . . . .	330
6	Gebrauchszustände . . . . .	338
6.1	Materialverhalten . . . . .	338
6.1.1	Erstbelastung . . . . .	338
6.1.2	Ent- und Wiederbelastung . . . . .	342
6.2	Kraft-Verschiebungs-Verhalten . . . . .	347
6.2.1	Baukörper auf dem oder am Boden . . . . .	347
6.2.2	Bodenzugabe oder -entzug und Baukörper im Boden . . . . .	352
6.3	Wechselwirkung von Boden und Baukörpern . . . . .	362
6.3.1	Mit Bettungsansätzen erfaßbare Fälle . . . . .	362
6.3.2	Nicht mit Bettungsansätzen erfaßbare Fälle . . . . .	368
6.4	Bodendynamik . . . . .	377
6.4.1	Elastodynamik . . . . .	377
6.4.2	Plastodynamik . . . . .	381
7	Nachbargebiete der Bodenmechanik . . . . .	386
7.1	Mechanische Verfahrenstechnik . . . . .	386
7.2	Geomechanik . . . . .	387
7.3	Bodenkunde . . . . .	388
7.3.1	Kapillarität, Schwellen und Schrumpfen . . . . .	388
7.3.2	Elektrische, thermische und chemische Effekte . . . . .	392
8	Literatur . . . . .	396

**Bemessung im Grundbau**

1	Einleitung . . . . .	399
1.1	Zweck und Abgrenzung . . . . .	399
1.2	Darstellung und Arbeitshinweise . . . . .	399
1.3	Zur Sicherheit . . . . .	400
2	Bodenbehandlung . . . . .	401
2.1	Erdbau . . . . .	401
2.1.1	Entfernen und Einbringen . . . . .	401
2.1.2	Verdichten und Verdrängen . . . . .	402
2.2	Hydraulische Maßnahmen . . . . .	406
2.2.1	Absenkung und Drainage . . . . .	406

2.2.2	Abdichtung und Einspeisung . . . . .	410
2.3	Bodenverbesserung . . . . .	414
2.3.1	Zusätze . . . . .	414
2.3.2	Umwandeln . . . . .	418
3	Flachgründungen . . . . .	420
3.1	Einzel- und Streifenfundamente . . . . .	420
3.1.1	Bauweisen . . . . .	420
3.1.2	Bemessung . . . . .	421
3.2	Fundamentgruppen . . . . .	428
3.2.1	Bauweisen . . . . .	428
3.2.2	Tragverhalten . . . . .	431
3.3	Flächengründungen . . . . .	436
3.3.1	Bauweisen . . . . .	436
3.3.2	Tragverhalten . . . . .	439
4	Tiefgründungen . . . . .	446
4.1	Einzelpfähle und Anker . . . . .	446
4.1.1	Bauweisen . . . . .	446
4.1.2	Tragverhalten . . . . .	450
4.2	Pfahl- und Ankergruppen . . . . .	457
4.2.1	Bauweisen . . . . .	457
4.2.2	Tragverhalten und Entwurf . . . . .	459
4.3	Pfeilerartige Gründungskörper . . . . .	467
4.3.1	Bauweisen . . . . .	467
4.3.2	Tragverhalten . . . . .	469
5	Stützbauwerke . . . . .	474
5.1	Flache Stützbauwerke . . . . .	474
5.1.1	Bauweisen . . . . .	474
5.1.2	Tragverhalten . . . . .	478
5.2	Tiefe Stützbauwerke . . . . .	488
5.2.1	Bauweisen . . . . .	488
5.2.2	Tragverhalten . . . . .	492
6	Unterirdische Bauwerke . . . . .	500
6.1	Offene Bauweisen . . . . .	500
6.1.1	Bauverfahren . . . . .	500
6.1.2	Tragverhalten . . . . .	503
6.2	Geschlossene Bauweisen . . . . .	509
6.2.1	Bauverfahren . . . . .	509
6.2.2	Tragverhalten . . . . .	512
7	Literatur . . . . .	518

## Felsmechanik

1	Definition . . . . .	521
2	Historische Entwicklung . . . . .	521
3	Lockergebirge – Festgebirge . . . . .	522
4	Gestein – Gebirge . . . . .	523
5	Genität und Tropie . . . . .	526
6	Formänderungsverhalten . . . . .	529
6.1	Elastizitätsmodul . . . . .	531

6.2	Scheinbarer Elastizitätsmodul . . . . .	531
6.3	Entlastungsmodul . . . . .	532
6.4	Verformungsmodul . . . . .	532
6.5	Elastizitätsgrad . . . . .	532
6.6	Poissonzahl . . . . .	533
6.7	Feldynamische Parameter . . . . .	533
6.8	Zeitabhängiges Verformungsverhalten . . . . .	533
6.8.1	Kriechen und Relaxieren . . . . .	534
6.8.2	Quellen und Schwellen . . . . .	536
7	Festigkeit . . . . .	536
7.1	Darstellung von Spannungszuständen . . . . .	537
7.2	Spannungshypothesen . . . . .	539
7.3	Festigkeitskriterien für das Gestein . . . . .	540
7.4	Festigkeitskriterien für Felstrennflächen . . . . .	543
7.5	Festigkeitskriterium für geklüftetes Gebirge . . . . .	544
8	Der Spannungszustand im Gebirge . . . . .	546
8.1	Der primäre Spannungszustand . . . . .	546
8.2	Der sekundäre Spannungszustand . . . . .	548
9	Hinweise zur experimentellen Bestimmung felsmechanischer Kenngrößen . . . . .	557
10	Literatur . . . . .	561

<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>565</b>
---------------------------------------	------------