

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Einleitung 1

## 2 Überblick über die Historie 5

## 3 Allgemeine Hydrogeologie 7

### 3.1 Theorien und Grundbegriffe 7

- 3.1.1 Definition des Grundwassers 7
- 3.1.2 Theorien und Grundbegriffe der Grundwasserneubildung 8
- 3.1.3 Grundbegriffe der Hydrogeologie 8

### 3.2 Hohlräume im Untergrund 11

- 3.2.1 Poren-Hohlräume 11
  - 3.2.1.1 Porenanteil 11
  - 3.2.1.2 Porenzahl 15
  - 3.2.1.3 Kornform, Kornrauigkeit 15
  - 3.2.1.4 Korngrößenverteilung 15
  - 3.2.1.5 Lagerungs-(Packungs-)dichte 16
- 3.2.2 Trennflächen-(Kluft-)Hohlräume 18
- 3.2.3 Karst-Hohlräume 21
- 3.2.4 Anthropogen erzeugte Hohlräume 22

### 3.3 Geohydraulik 23

- 3.3.1 Geohydraulische Leitfähigkeit von Porengesteinen 24
  - 3.3.1.1 Darcy-Gesetz 24
  - 3.3.1.2 Permeabilität 25
  - 3.3.1.3 Grundbegriffe und Einteilung der Durchlässigkeit 26
  - 3.3.1.4 Geschwindigkeitsbegriffe 28
- 3.3.2 Anisotropie 30
- 3.3.3 Geohydraulische Leitfähigkeit von Kluftgesteinen 31
- 3.3.4 Transmissivität 33
- 3.3.5 Leakage 34
- 3.3.6 Speichervermögen 35

### 3.4 Infiltration des Oberflächenwassers 37

- 3.4.1 Infiltration des Niederschlagswassers 37
- 3.4.2 Uferfiltration 42

### **3.5 Grundwasserdynamik 44**

- 3.5.1 Grundwasserfließsysteme 53
- 3.5.2 Grundwasserabfluss 54
- 3.5.3 Grundwasseraustritte 57
  - 3.5.3.1 Quellen 57
  - 3.5.3.2 Flüsse 64
  - 3.5.3.3 Seen, Grundwasserblänken 65
- 3.5.4 Wasserschwinden 65

### **3.6 Grundwassermorphologie 65**

- 3.6.1 Grundwassergleichenkarte 66
- 3.6.2 Hydrogeologische Schnitte 70
- 3.6.3 Grundwassergleichen-Differenzenkarte 70
- 3.6.4 Grundwasserflurabstandskarte 72
- 3.6.5 Grundwasserhöufigkeitskarte 72
- 3.6.6 Konsequenzkarte 72
- 3.6.7 Hydrogeologische Kartenwerke 73

### **3.7 Hydrologischer Zyklus – Wasserhaushalt 74**

- 3.7.1 Grundwasservorratsänderungen 78
- 3.7.2 Niederschlag 79
  - 3.7.2.1 Definition 79
  - 3.7.2.2 Messung 80
  - 3.7.2.3 Darstellung 80
- 3.7.3 Verdunstung 83
  - 3.7.3.1 Definition 83
  - 3.7.3.2 Messung 85
  - 3.7.3.3 Bestimmungen 89
    - 3.7.3.3.1 Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration nach HAUDE 89
    - 3.7.3.3.2 Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration nach SCHENDEL 90
    - 3.7.3.3.3 Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration nach THORNTHWAITE 91
    - 3.7.3.3.4 Weitere Bestimmungen 91
    - 3.7.3.3.5 Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration aus Klimadaten größerer Zeiträume 92
- 3.7.4 Abfluss 92
  - 3.7.4.1 Definition 92
  - 3.7.4.2 Messung 95
  - 3.7.4.3 Darstellung 96
    - 3.7.4.3.1 Hydrogeologische Auswertung von Abflussmessungen 97
- 3.7.5 Grundwasserbilanz/Grundwasservorrat 106

### **3.8 Numerische Grundwassermodelle 108**

- 3.8.1 Einführung 108
- 3.8.2 Grundlagen 109
- 3.8.3 Erstellung 109
- 3.8.4 Anwendung 111
  - 3.8.4.1 Grundwasserströmungs-Modelle 111
  - 3.8.4.2 Stofftransport-Modelle 111
  - 3.8.4.3 Programm Pakete 112

## 3.9 Grundwasserbeschaffenheit 113

- 3.9.1 Einführung 113
- 3.9.2 Physikalische und chemische Grundlagen 113
  - 3.9.2.1 Isotopische Zusammensetzung des Wassers 113
  - 3.9.2.2 Isotopenhydrologie 114
    - 3.9.2.2.1 Stabile Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotope 115
    - 3.9.2.2.2 Schwefel-Isotope 116
    - 3.9.2.2.3 Natürliche und anthropogene radioaktive Umweltisotope 116
  - 3.9.2.3 Physikalische Eigenschaften des reinen Wassers 119
    - 3.9.2.3.1 Molekulare Struktur 119
    - 3.9.2.3.2 Temperaturabhängige physikalische Eigenschaften 121
    - 3.9.2.3.3 Elektrolytische Dissoziation (pH-Wert) – Elektrischer Leitwert 123
- 3.9.3 Chemische und physikalisch-chemische Grundlagen 124
  - 3.9.3.1 Chemische Konzentrationsangaben 124
    - 3.9.3.1.1 Stoffmenge 124
    - 3.9.3.1.2 Äquivalentteilchen 125
    - 3.9.3.1.3 Molare Masse 126
    - 3.9.3.1.4 Stoffmengenkonzentration 127
    - 3.9.3.1.5 Molalität 127
    - 3.9.3.1.6 Äquivalentkonzentration 127
    - 3.9.3.1.7 Stoffmengenanteile der Äquivalente 128
    - 3.9.3.1.8 Masse 129
    - 3.9.3.1.9 Massenkonzentration 129
    - 3.9.3.1.10 Umrechnung von Konzentrationen 129
    - 3.9.3.1.11 Massenanteil 131
    - 3.9.3.1.12 Angloamerikanische Einheiten 131
    - 3.9.3.1.13 Ältere Einheiten 131
  - 3.9.3.2 Löslichkeit von Feststoffen in Wasser 132
    - 3.9.3.2.1 Elektrolytische Dissoziation 133
    - 3.9.3.2.2 Löslichkeit organischer Stoffe 135
    - 3.9.3.2.3 Löslichkeitsprodukt (Löslichkeitskonstante) 135
  - 3.9.3.3 Löslichkeit von Gasen in Wasser 137
  - 3.9.3.4 Stoffmengenkonzentrationen und Aktivitäten 139
  - 3.9.3.5 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht 142
  - 3.9.3.6 Einfluss des pH-Wertes auf die Löslichkeit 151
  - 3.9.3.7 Einfluss des Redoxpotenzials auf die Löslichkeit 152
  - 3.9.3.8 Elektrische Leitfähigkeit 161
- 3.9.4 Physikalisch-chemische Prozesse beim Grundwasserfließen 163
  - 3.9.4.1 Auflösung und Ausfällung 163
  - 3.9.4.2 Adsorption und Desorption 167
  - 3.9.4.3 Ionen-Austausch 168
  - 3.9.4.4 Diffusion und Ionsiebeneffekt in Tongesteinen 171
  - 3.9.4.5 Oxidation und Reduktion 172
  - 3.9.4.6 Eintrag und Transport organischer Stoffe im Untergrund 174
  - 3.9.4.7 Thermodynamik 176
- 3.9.5 Grundwasserfauna 181
- 3.9.6 Mikrobiologie des Grundwassers 181
  - 3.9.6.1 Geohygiene des Grundwassers 182
  - 3.9.6.2 Mikrobielle Abbauprozesse 185
    - 3.9.6.2.1 Mikrobielle Reduktion von Sulfat 185
    - 3.9.6.2.2 Mikrobielle Reduktion von Nitrat 185
    - 3.9.6.2.3 Mikrobielle Oxidation und Reduktion von Eisen 186

3.9.6.2.4	Mikrobielle Oxidation und Reduktion von organischen Substanzen	187
3.9.7	Geohydrochemische Analyse und ihre Auswertung	188
3.9.7.1	Physikalische und chemische Parameter einer Wasseranalyse	189
3.9.7.1.1	Probennahme	189
3.9.7.1.2	Probenvorbereitung	189
3.9.7.1.3	Übersicht der Analyseverfahren	190
3.9.7.1.4	Qualitätssicherung in der Analytik	190
3.9.7.1.5	Untersuchungen vor Ort	191
3.9.7.1.6	Untersuchungen im Labor	193
3.9.7.1.7	Untersuchungen organischer Inhaltsstoffe	202
3.9.7.1.8	Radioaktivität	204
3.9.7.1.9	Umrechnung von Analysenwerten	204
3.9.7.1.10	Bewertung der Analysenergebnisse	204
3.9.7.2	Berechnungen nicht analysierter Parameter	205
3.9.7.3	Plausibilitätskontrollen	209
3.9.7.3.1	Ionenbilanz	210
3.9.7.3.2	pH-Wert	210
3.9.7.3.3	Elektrische Leitfähigkeit	210
3.9.7.3.4	Spektraler Absorptionskoeffizient (SAK 254 nm)	210
3.9.7.3.5	Grundwassertypen	210
3.9.7.4	Auswertung und Darstellung von Untersuchungsergebnissen	210
3.9.7.4.1	Einzeldiagramme	211
3.9.7.4.2	Sammeldiagramme	214
3.9.7.4.3	Geohydrochemische Karten	222
3.9.7.4.4	Auswertung von Grundwasser-Untersuchungsergebnissen mittels EDV	222
3.9.7.5	Typisierung von Grundwässern	229
3.9.7.5.1	Typisierung nach dem grundwasserleitenden Gestein	230
3.9.7.5.2	Typisierung nach geohydrochemischen Eigenschaften unabhängig vom grundwasserleitenden Gestein	230
3.9.7.5.3	Einteilung nach Nutzungsmöglichkeiten	234

## 4 Angewandte Hydrogeologie 239

### 4.1 Grundwassergewinnung 239

4.1.1	Beratungen, Gutachtenerstellung	240
4.1.2	Voruntersuchungen	240
4.1.3	Bestimmung der Grundwasserneubildung	242
4.1.3.1	Allgemeine Anmerkungen	242
4.1.3.2	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate mit Lysimetern	244
4.1.3.3	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus dem Bodenwasserhaushalt	245
4.1.3.4	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus dem Abfluss in Vorflutern	246
4.1.3.5	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus der Wasserhaushaltsgleichung	246
4.1.3.6	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus Grundwasserganglinien	247
4.1.3.7	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus der Chlorid-Konzentration des Grundwassers und des Niederschlags	247

4.1.3.8	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate mit der Gesamttritium-Methode	248
4.1.3.9	Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus Wasserwerksdaten	248
4.1.3.10	Anwendbarkeit der Bestimmungsmethoden in verschiedenenartigen Untersuchungsgebieten	248
4.1.4	Geophysikalische Methoden	249
4.1.4.1	Geophysikalische Oberflächenmessungen	250
4.1.4.1.1	Geoelektrische Messungen	253
4.1.4.1.2	Seismische Messungen	254
4.1.4.1.3	VLF-Verfahren	255
4.1.4.1.4	GPR-Verfahren	255
4.1.4.1.5	Aero-Verfahren	255
4.1.4.2	Geophysikalische Bohrlochmessungen	255
4.1.4.2.1	Geoelektrische Messungen (RES, EL, FEL, SP)	256
4.1.4.2.2	Salinometer-Log (SAL)	257
4.1.4.2.3	Gamma-Log (GR)	258
4.1.4.2.4	Gamma-Gamma-Log (D, FD, GG)	258
4.1.4.2.5	Neutron-Gamma-Log (NL, N)	258
4.1.4.2.6	Sonic- (oder Akustic-)Log (SV)	258
4.1.4.2.7	Kaliber-Log (CAL)	258
4.1.4.2.8	Temperatur-Log (TEMP)	258
4.1.4.2.9	Deviation-Log (DV)	258
4.1.4.2.10	Dipmeter-Log (DIP)	259
4.1.4.2.11	Flowmeter-Log (FLOW)	259
4.1.4.3	Anwendung und Auswertung geophysikalischer Messungen	259
4.1.5	Hauptuntersuchungen	259
4.1.5.1	Qualitätskriterien für Bohr- und Ausbuarbeiten	259
4.1.5.2	Bau von Brunnen und Grundwassermessstellen	261
4.1.5.3	Ausschreibungen	263
4.1.6	Bohrverfahren	266
4.1.6.1	Trockenbohrverfahren	266
4.1.6.2	Spülbohrverfahren	271
4.1.6.3	Schräg-, Horizontalbohrverfahren	272
4.1.6.4	Bohrlochsprengungen (Torpedieren)	272

## 4.2 Geohydraulische Untersuchungen 272

4.2.1	Grundlagen der geohydraulischen Untersuchungen	273
4.2.2	Laborversuche	273
4.2.2.1	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Lockergesteinen mittels Korngrößenverteilung	275
4.2.2.1.1	Bestimmung nach HAZEN	275
4.2.2.1.2	Bestimmung nach NAHRGANG	276
4.2.2.1.3	Bestimmung nach SEELHEIM	277
4.2.2.1.4	Bestimmung nach BEYER	277
4.2.2.1.5	Bestimmung nach BIALAS et al.	277
4.2.2.1.6	Bestimmung nach NISHIDA	277
4.2.2.2	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Lockergesteinen mittels Durchströmungsversuchen	278
4.2.2.2.1	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Lockergesteinen mittels Laborversuchen mit veränderlicher Druckhöhe	278
4.2.2.2.2	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Lockergesteinen mittels Laborversuchen mit konstanter Druckhöhe	278

4.2.2.3	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Festgesteinen mittels Durchströmungsversuchen	279
4.2.2.4	Generelle Anmerkungen zu den Versuchsergebnissen	280
4.2.3	Geländeversuche	280
4.2.3.1	Pumpversuche	280
4.2.3.1.1	Grundlagen der Pumpversuche	280
4.2.3.1.2	Geohydraulische Auswirkungen von Pumpversuchen	282
4.2.3.1.3	Verfahren zur Bestimmung geohydraulischer Parameter	284
4.2.3.1.4	Generelle Anmerkungen zu den Pumpversuchsergebnissen	297
4.2.3.2	Weitere Geländeversuche	298
4.2.3.2.1	Open-End-Test	298
4.2.3.2.2	Packer-Test	300
4.2.3.2.3	Wasserdruckversuch (WD-Test)	302
4.2.3.2.4	Slug- und Bail-Test	302
4.2.3.2.5	Kurzzeitpumpversuch	302
4.2.3.2.6	Einschwingverfahren	303
4.2.3.2.7	Infiltrationsversuch	303
4.2.3.3	Orientierende Bestimmungsmethoden	304
4.2.3.3.1	Gespanntes Grundwasser	304
4.2.3.3.2	Freies Grundwasser	305
4.2.3.3.3	Orientierende Bestimmung der Transmissivität nach LOGAN	306
4.2.3.3.4	Bestimmung brunnenspezifischer Randbedingungen anhand der Wiederanstiegskurve	306
4.2.3.3.5	Besonderheiten der Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit von Kluftgesteinen	307
4.2.4	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Markierungs- (Tracer-)Versuche	308
4.2.4.1	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Färbungsstoffs als Tracer	308
4.2.4.2	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Salz als Tracer	310
4.2.4.3	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels künstlicher radioaktiver Tracer	310
4.2.4.4	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Sporen als Tracer	310
4.2.4.5	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Bakterien als Tracer	311
4.2.4.6	Bestimmung der geohydraulischen Leitfähigkeit mittels Bor (bzw. Borate) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe als Tracer	311
4.2.4.7	Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes mittels radioaktiver Isotope in Brunnen oder Grundwassermessstellen	311

## 4.3 Wassergewinnung 312

4.3.1	Wassergewinnung in Wassermangelgebieten	314
4.3.2	Wassergewinnung aus Oberflächengewässern und deren Umgebung	315
4.3.3	Wassergewinnung durch Quellenfassungen, Sickeranlagen und Stollen	316
4.3.4	Wassergewinnung durch Brunnen	318
4.3.4.1	Wassergewinnung durch Schachtbrunnen	319
4.3.4.2	Wassergewinnung durch Vertikalbrunnen	319
4.3.4.3	Wassergewinnung durch Horizontalbrunnen	320
4.3.4.4	Brunnenausbau und Bestimmung brunnenspezifischer Daten	323
4.3.4.4.1	Brunnenausbau	323
4.3.4.4.2	Ausbau in Lockergesteinen	324

4.3.4.4.3 Bestimmung der Ergiebigkeit eines unvollkommenen Brunnens	327
4.3.4.4.4 Ausbau in Festgesteinen	328
4.3.4.5 Leistungspumpversuche an Brunnen	328
4.3.5 Wassergewinnung bzw. Abwasserbeseitigung mittels Versickerungsanlagen	331
4.3.6 Regenwasserversickerung	333
4.3.7 Fassung und Erschließung von Mineral-, Heil- und Thermalwässern	336

## **4.4 Bauen im Grundwasser** 336

## **4.5 Grundwasserabsenkung** 337

## **4.6 Grundwasseranstieg** 339

## **4.7 Trinkwasserschutz** 339

4.7.1 Schutzgebiete	339
4.7.1.1 Wasserschutzgebiete	339
4.7.1.1.1 Zone I (Fassungsbereich)	340
4.7.1.1.2 Zone II (Engere Schutzzone)	340
4.7.1.1.3 Zone III (Weitere Schutzzone)	344
4.7.1.2 Perspektiven des Grundwasserschutzes	345
4.7.1.3 Heilquellschutzgebiete	346
4.7.1.4 Quellschutzgebiete	347
4.7.2 Ursachen der Grundwasserbelastung	347
4.7.2.1 Belastungen durch feste Abfallstoffe	350
4.7.2.2 Belastungen durch land- und forstwirtschaftliche Nutzung	355
4.7.2.3 Belastungen durch Arzneimittelgebrauch	360
4.7.2.4 Belastungen über den Luftpfad	361
4.7.2.5 Direkte Belastungen	361
4.7.2.6 Belastungen durch den Straßenverkehr	371
4.7.2.7 Thermische Belastungen	372
4.7.2.8 Belastungen durch Baumaßnahmen	373
4.7.2.9 Belastungen durch Friedhöfe	374
4.7.2.10 Belastungen durch Nanopartikel	375
4.7.2.11 Geogene Grundwasserbelastungen	376
4.7.3 Reduzierung der Grundwasserbelastungen	376
4.7.4 Auswirkungen von Grundwasserentnahmen	381
4.7.4.1 Land- und forstwirtschaftliche Ertragsminderungen durch Grundwasserentnahmen	381
4.7.4.2 Baugrundschäden durch Grundwasserentnahmen	386

## **4.8 Wasserrecht** 387

## **5 Anmerkungen** 391

## **6 Literatur** 393

## **7 Sachregister** 427