

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 Grundwasserhöfigkeitskarte 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 Programmpakete 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 Ionensiebeffekt 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 Gesamtritium-Methode 248
- 4.1.3.9 Bestimmung der Grundwasser-Neubildungsrate aus Wasserwerksdaten 248
- 4.1.3.10 Anwendbarkeit der Bestimmungsmethoden in verschiedenartigen 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 Ausbauarbeiten 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	Heilquellenschutzgebiete	346
4.7.1.4	Quellenschutzgebiete	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	Baugrundschrden durch Grundwasserentnahmen	386

4.8 Wasserrecht 387

5 Anmerkungen 391

6 Literatur 393

7 Sachregister 427