

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Größen und Einheiten in der Hydrogeologie</b> .....	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Basisgrößen und Basiseinheiten des SI .....	3
1.3 Abgeleitete, in der Hydrogeologie wichtige SI-Einheiten .....	4
1.4 Spezielle Einheiten in der Hydrogeologie.....	8
1.4.1 Eigenschaften des Wassers.....	8
1.4.2 Eigenschaften des Aquifers .....	15
1.5 Umrechnung von einer Einheit in eine andere .....	19
1.5.1 Wechsel der Einheit.....	20
1.5.2 Verhältnis der Einheiten einer Größe in unterschiedlichen Einheitensystemen.....	22
1.6 Weitere Berechnungsbeispiele.....	25
1.6.1 Ermittlung der kapillaren Steighöhe.....	25
1.6.2 Volumenänderung des Wassers bei Druckänderung .....	26
1.7 Konzentrationseinheiten von Wasserinhaltsstoffen .....	28
<b>2 Durchlässigkeit und Transmissivität</b> .....	<b>31</b>
2.1 Grundwasserströmung im porösen Medium .....	31
2.1.1 Gesetz von Darcy .....	32
2.1.2 Potential der Grundwasserströmung.....	34
2.1.3 Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy .....	37
2.2 Grundwasserfließgeschwindigkeit .....	39
2.3 Durchlässigkeit .....	41
2.3.1 Permeameteruntersuchungen.....	43
2.3.2 Auffüll- und Schöpfversuche (Slug and Bail Tests).....	48
2.3.3 Resultierende Durchlässigkeit .....	70
2.3.4 Spezifische Permeabilität .....	74
2.3.5 Auswertung von Korngrößenanalysen .....	80
2.4 Durchlässigkeit von Kluffgesteinen.....	94
2.4.1 Einleitende Bemerkungen .....	94
2.4.2 Packer (WD) Test (Wasserdruckprüfung).....	95
2.4.3 WD-Versuche und Gebirgsdurchlässigkeit .....	100
2.4.4 Regionalwerte der Gebirgsdurchlässigkeit .....	103
2.5 Transmissivität.....	106

---

2.5.1 Konzept .....	106
2.5.2 Transmissivität und Schwankungen des Grundwasserspiegels .....	107
2.5.3 Transmissivität und spezifische Ergiebigkeit von Förderbrunnen ...	116
2.5.4 Brunnenwasserspiegel in Multiaquifer-Systemen .....	120
<b>3 Speicherkoeffizient und Porenraum .....</b>	<b>123</b>
3.1 Definitionen .....	123
3.2 Elastizität und Kompressibilität gespannter Grundwasserleiter .....	125
3.2.1 Variationen der Auflast .....	125
3.2.2 Innere Kräfte .....	127
3.2.3 Mathematisches Konzept des Speicherkoeffizienten .....	128
3.2.4 Barometrischer und Tidenkoeffizient .....	133
3.2.5 Abschätzung des Speicherkoeffizienten .....	142
3.3 Nutzbarer Porenraum und Haftwasseranteil .....	143
3.3.1 Mathematisches Konzept .....	143
3.3.2 Nutzbarer Porenraum als „Variable“ der Zeit .....	146
3.3.3 Haftwasser und Saugspannung .....	148
3.3.4 Nutzbarer Porenraum und Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone	157
3.3.5 Kornverteilung und nutzbarer Porenraum .....	160
3.3.6 Poren- und Klufthohlraum fester Gesteine .....	171
3.4 Bodensenkung (Subsidenz) infolge Grundwasserentnahme .....	172
3.4.1 Definitionen .....	172
3.4.2 Primäre Konsolidierung grobkörniger Schichten .....	174
3.4.3 Sekundäre Konsolidierung feinkörniger Schichten .....	176
<b>4 Pumpversuche .....</b>	<b>199</b>
4.1 Allgemeines .....	199
4.2 Strömungszustände und Aquifertypen .....	200
4.2.1 Gespannter Aquifer .....	203
4.2.2 Halbgespannter Aquifer .....	203
4.2.3 Aquifer mit freier Oberfläche .....	204
4.3 Allgemeines zur Ausführung von Pumpversuchen .....	205
4.3.1 Zahl, Anordnung und Filterlage von Grundwassermessstellen .....	206
4.3.2 Messung und Ableitung des gehobenen Wassers .....	208
4.3.3 Zeitliche Aufeinanderfolge der Messungen .....	210
4.3.4 Korrigierte Messungen .....	211
4.4 Leistungspumpversuche .....	212
4.4.1 Theoretische Grundlagen .....	212
4.4.2 Brunnenwirkungsgrad .....	214
4.4.3 Auswertung von stufenweisen Pumpversuchen .....	215
4.4.4 Bestimmung der Transmissivität aus dem Wiederanstieg .....	225
4.5 Aquifertest: Gespannter Grundwasserleiter .....	229
4.5.1 Theoretische Grundlagen .....	229
4.5.2 Verfahren von Theis .....	232

4.5.3 Geradlinienverfahren von Cooper u. Jacob .....	240
4.5.4 Auswertung des Wiederanstiegs.....	248
4.5.5 Verfahren von Thiem .....	256
4.6 Aquifertest: Halbgespannter (leaky) Grundwasserleiter .....	258
4.6.1 Theoretische Grundlagen.....	258
4.6.2 Verfahren von Hantush .....	259
4.7 Aquifertest: Grundwasserleiter mit freier Oberfläche.....	265
4.7.1 Theoretische Grundlagen.....	265
4.7.2 Verfahren von Neuman .....	267
4.7.4 Korrigierte Absenkung nach Jacob.....	279
4.8 Aquifertest: Kluftgrundwasserleiter.....	285
4.8.1 Einführung.....	285
4.8.2 Brunnenstöreffekte .....	286
4.8.3 Kurvendeckungsverfahren nach Agarwal et al. (1970) .....	289
4.8.4 Aquifertest: Andere Verfahren .....	301
4.9 Zusammenfassung .....	302
<b>5 Hydrogeochemie für die Praxis .....</b>	<b>307</b>
5.1 Grundwasseranalysen .....	307
5.1.1 Konzentrationen und Einheiten .....	307
5.1.2 Parameterauswahl, Analyseformen und Normen .....	311
5.1.3 Beprobung und Vor-Ort-Messungen.....	311
5.1.4 Lagerung und Konservierung von Wasserproben .....	316
5.1.5 Messungen im Labor.....	316
5.1.6 Qualitätskontrolle: Ionenbilanz und Plausibilität .....	319
5.2 Analyseparameter und ihre Interpretation.....	322
5.2.1 Einleitung .....	322
5.2.2 Spezifische elektrische Leitfähigkeit.....	323
5.2.3 pH-Wert.....	325
5.2.4 Redoxsensitive Reaktionen .....	328
5.2.5 Ionenaustausch .....	335
5.2.6 Komplexbildung.....	341
5.2.7 Mineralsättigung.....	342
5.2.8 Löslichkeit von Gasen .....	344
5.2.9 Partikel und Kolloide.....	345
5.2.10 Mikrobiologie.....	347
5.3 Kalk-Kohlensäure-System .....	350
5.3.1 Einleitung .....	350
5.3.2 Löslichkeit und Speziesverteilung.....	351
5.3.3 Bestimmung der gelösten Karbonatspezies .....	356
5.3.4 Härte .....	359
5.3.5 Sättigungsberechnungen.....	361
5.4 Grafische Darstellung von Wasserbeschaffenhheitsdaten .....	365
5.4.1 Einleitung .....	365
5.4.2 Einzeldarstellungen .....	365
5.4.3 Sammeldiagramme .....	367

5.4.4 Hydrogeochemische Karten .....	370
5.4.5 Räumliche und zeitliche Variationen der Wasserbeschaffenheit .....	372
5.5 Hydrogeochemische Modellierung .....	374
5.5.1 Einführung .....	374
5.5.2 Kinetische Modelle .....	374
5.5.3 Thermodynamische Modelle .....	377
5.5.4 Massenbilanzierung und inverse Modellierung .....	385
5.5.5 Reaktiver Stofftransport .....	389
5.5.6 Gängige Programm-Software .....	390
<b>6 Transport von Wasserinhaltsstoffen .....</b>	<b>395</b>
6.1 Einleitende Bemerkungen .....	395
6.2 Advektion und Konvektion .....	396
6.2.1 Ungesättigte Zone .....	396
6.2.2 Gesättigte Zone .....	397
6.3 Hydrodynamische Dispersion .....	401
6.3.1 Diffusion und Dispersion .....	401
6.3.2 Bestimmung des Dispersionskoeffizienten .....	408
6.3.4 Skalenabhängigkeit der Dispersion .....	410
6.4 Stofftransport und geochemische Reaktionen .....	412
6.4.1 Einleitende Bemerkungen .....	412
6.4.2 Sorption und Retardierung .....	412
6.4.3 Abbaureaktionen .....	415
6.5 Die Transportgleichung .....	416
6.5.1 Herleitung der Transportgleichung .....	416
6.5.2 Analytische Lösungen .....	421
6.5.3 Numerische Lösungen .....	424
6.6 Gängige Software .....	428
<b>7 Kontamination des Grundwassers .....</b>	<b>431</b>
7.1 Begriff „Grundwasserkontamination“ .....	431
7.2 Reinigungsvorgänge im Untergrund .....	434
7.2.1 Lösung, Fixierung und Remobilisierung .....	435
7.2.2 Adsorption und Ionenaustausch .....	437
7.2.3 Filterwirkung .....	438
7.2.4 Oxidation und Reduktion .....	438
7.2.5 Gasaustausch .....	439
7.2.6 Biologische Aktivität .....	440
7.3 Verschmutzungsempfindlichkeit des Untergrundes .....	441
7.3.1 Einfluss der Verweildauer des Sickerwassers .....	444
7.3.2 Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung .....	446
7.4 Kontaminationsquellen und Schadstoffe .....	450
7.4.1 Art und zeitliche Dauer von Schadstoffeinträgen .....	451
7.4.2 Typische Schadstoffgruppen und Belastungsszenarien .....	456

7.4.3 Mittelbare Einflüsse auf die Grundwasserbeschaffenheit .....	479
7.5 Exkurs: Kontamination durch LHKW .....	483
7.5.1 Eigenschaften und Umweltproblematik .....	483
7.5.2 Verhalten im Untergrund.....	486
7.5.3 Ausbreitung der flüssigen Phase .....	492
7.5.4 Ausbreitung der Gasphase.....	495
7.5.5 Ausbreitung in gelöster Form.....	499
7.5.6 Sanierung eines großen Schadensfalls in Hessen .....	503
7.6 Grundwasserschutz in Deutschland .....	507
7.6.1 Anlagenbezogener Grundwasserschutz.....	508
7.6.2 Flächendeckender Grundwasserschutz.....	510
7.6.3 Nitrateintrag .....	511
7.6.4 Pflanzenschutz- und -behandlungsmittel.....	514
<b>8 Sanierung von Grundwasserschäden.....</b>	<b>517</b>
8.1 Vorbereitende Schritte einer Sanierung .....	521
8.1.1 Gesetzliche Grundlagen .....	521
8.1.2 Sanierungsziele und Sanierungsgrenzen .....	523
8.1.3 Sanierungsuntersuchung und -planung.....	528
8.2 Sanierungs- und Sicherungs-Technologien.....	532
8.3 Bodensanierung .....	537
8.3.1 Thermische Bodenbehandlung .....	539
8.3.2 Physikalisch-chemische Bodenbehandlung.....	543
8.3.3 Biologische Bodenbehandlung.....	561
8.4 Grundwassersanierung.....	576
8.4.1 Entfernung freier organischer Phasen aus dem Grundwasserleiter ..	579
8.4.2 Grundzüge der passiven und aktiven hydraulischen Maßnahmen....	584
8.4.3 Wasseraufbereitung .....	600
8.4.4 Kombinierte Verfahren und Techniken.....	613
8.4.5 Reaktive Wände .....	627
8.5 Sicherung eines Schadstoffherds durch Einkapselung.....	635
8.5.1 Oberflächenabdichtung .....	636
8.5.2 Vertikale Abdichtung .....	637
8.5.3 Nachträgliche Basisabdichtung .....	641
8.6 Monitored Natural Attenuation (MNA).....	644
8.6.1 Natürlicher Abbau von MKW und LCKW .....	646
8.6.2 Akzeptanz in der Altlastensanierungspraxis.....	656
8.6.3 Vor- und Nachteile .....	664
<b>9 Überwachung von Grundwasserleitern – Grundwassermonitoring .....</b>	<b>667</b>
9.1 Grundwasser-Monitoring in Deutschland.....	669
9.1.1 Staatliches Grundmessnetz.....	670
9.1.2 Sondermessnetze .....	671
9.1.3 Rohwassermessstellen .....	673
9.1.4 Aufgaben der staatlichen Grundwasserüberwachung.....	673
9.2 Monitoring-Zyklus.....	676

---

9.3 Messnetzplanung .....	681
9.3.1 Messnetzkonfiguration und Messstellendichte.....	683
9.3.2 Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie an Grundwassermessnetze .....	694
9.3.3 Quantitatives Grundwassermessnetz.....	695
9.3.4 Qualitatives Grundwassermessnetz gemäß EU- Wasserrahmenrichtlinie.....	698
9.4 Funktionsprüfung, Sanierung und Rückbau.....	701
9.4.1 Technische Funktionsprüfung von Grundwassermessstellen .....	705
9.4.2 Reparatur und Sanierung von Grundwassermessstellen.....	712
9.4.3 Rückbau von Grundwassermessstellen .....	715
9.5 Neubau von Grundwassermessstellen.....	718
9.5.1 Notwendige Überlegungen vor der Einrichtung von neuen Grundwassermessstellen .....	719
9.5.2 Anforderungen an die Messstellenbohrung.....	722
9.5.3 Generelles zum Ausbau einer Grundwassermessstelle.....	730
9.5.4 Ausbaudurchmesser .....	732
9.5.5 Filter- und Aufsatzrohre .....	734
9.5.6 Position und Länge der Filterrohrstrecke .....	735
9.5.7 Verfüllung des Ringraums .....	739
9.5.8 Klarpumpen der Messstelle und Abschlussbauwerk .....	742
9.5.9 Qualitätssicherung und Messstellen-Dokumentation .....	743
9.6 Betrieb von Grundwassermessnetzen .....	745
9.6.1 Gewinnung von quantitativen Messwerten .....	747
9.6.2 Grundwasserbeprobung; Auswahl hydrochemischer Parameter .....	753
9.6.3 Qualitätssicherung bei der Grundwasserbeprobung als integraler Bestandteil der Analytik.....	755
9.6.4 Beprobungsturnus .....	756
9.6.5 Entscheidung zwischen geschöpften und gepumpten Grundwasserproben.....	760
9.6.6 Hydraulische Einflussfaktoren auf die Grundwasserprobe .....	764
9.6.7 Geohydraulischer Informationsgehalt einer gepumpten Grundwasserprobe.....	766
9.6.8 Elimination des Standwassers und Zeitpunkt der Probennahme .....	767
9.6.9 Gewinnung der eigentlichen Grundwasserprobe.....	770
9.6.10 Einfluss der Entnahmetiefe auf die Inhaltsstoffe einer Grundwasserprobe.....	771
9.6.11 Einsatz von Packern bei der Probennahme .....	772
9.6.12 Auswahl hydrochemischer Parameter .....	774
<b>10 Brunnenbau .....</b>	<b>779</b>
10.1 Einleitung.....	779
10.2 Bohrverfahren – ein Überblick .....	781
10.2.1 Vorbemerkungen.....	781

---

10.2.2 Schlagbohrverfahren .....	782
10.2.3 Drehbohrverfahren .....	783
10.2.4 Drehschlagbohrverfahren .....	792
10.2.5 Schräg- und Horizontalbohrungen in der Wassererschließung .....	794
10.3 Brunnenausbau.....	797
10.3.1 Vorbemerkungen.....	797
10.3.2 Probenuntersuchung.....	799
10.3.3 Anforderungen an Brunnenfilterrohre .....	804
10.4 Brunnenhydraulik .....	807
10.4.1 Vorbemerkungen.....	807
10.4.2 Sickerstrecke .....	808
10.4.3 Bemessung von Filterrohren und Filterkies.....	813
10.4.4 Methoden zur Bestimmung des geeigneten Filterkieses.....	821
10.5 Andere hydraulische Bemessungskriterien .....	833
10.5.1 Einflussgrößen.....	833
10.5.2 Grenzgeschwindigkeit und Fassungsvermögen.....	833
10.5.3 Reynolds-Zahl .....	837
10.5.4 Filtereintrittsgeschwindigkeit .....	840
10.6 Variable Filteranströmgeschwindigkeit und Saugstromsteuerung.....	843
10.6.1 Theorie .....	843
10.6.2 Schlussfolgerungen für die Praxis .....	848
10.6.3 Gestaltung von Saugstromsteuerungen .....	850
10.6.4 Folgerungen für den Brunnenbau .....	855
10.7 Fertigstellung des Brunnens.....	857
10.7.1 Entsandung und Entwicklung.....	857
10.7.2 Klarpumpen und Bestimmung des Restsandgehalts.....	859

<b>11 Pumpen und Rohrleitungen.....</b>	<b>863</b>
11.1 Pumpentypen .....	863
11.2 Wirkungsweise von Kreiselpumpen .....	864
11.2.1 Theoretische Grundlagen.....	864
11.2.2 Wirkungsgrad und Leistungsbedarf.....	869
11.3 Unterwassermotorpumpen .....	871
11.4 Pumpenauswahl .....	872
11.5 Wirtschaftlicher Einsatz von Unterwassermotorpumpen.....	880
11.5.1 Vorbemerkungen .....	880
11.5.2 Kapitalkosten.....	881
11.5.3 Betriebskosten .....	883
11.5.4 Pumpenwirkungsgrad.....	884
11.5.5 Spezifische Drehzahl.....	884
11.5.6 Vergleich von Energie- und Kapitaldienstkosten .....	885
11.5.7 Ermittlung der Amortisationszeit .....	889
11.6 Kurze Einführung in die Rohrleitungshydraulik.....	892
11.7 Laminare Rohrströmung .....	894
11.8 Turbulente Rohrströmung .....	896
11.9 Einfluss von Armaturen auf die Rohrströmung .....	903

<b>12 Brunnenalterung und Brunnenregenerierung.....</b>	<b>909</b>
12.1 Einleitung.....	909
12.2 Prozesse der Brunnenalterung .....	909
12.2.1 Versandung .....	909
12.2.2 Korrosion.....	910
12.2.3 Inkrustation .....	910
12.3 Brunnenregenerierung .....	913
12.3.1 Mechanische und hydromechanische Regenerierung.....	913
12.3.2 Chemische Regenerierung.....	915
12.5 Nachweis von Regeneriererfolgen.....	918
12.6 Prophylaktische Methoden zur Minimierung der Brunnenalterung.....	919
<b>13 Wasserbilanz.....</b>	<b>921</b>
13.1 Allgemeines.....	921
13.2 Niederschlag .....	922
13.3 Evapotranspiration.....	924
13.4 Verfahren zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration.....	925
13.4.1 Penman.....	925
13.4.2 Haude .....	926
13.4.3 Turc-Wendling .....	926
13.5 Abfluss.....	927
13.5.1 Abflussbildung .....	928
13.5.2 Abflusskonzentration .....	930
13.5.3 Fließprozess im offenen Gerinne .....	931
13.6 Grundwasserneubildung .....	932
13.6.1 Verfahren nach Proksch .....	933
13.6.2 Verfahren nach Renger u. Wessolek .....	934
13.6.3 Verfahren nach Bagrov u. Glugla.....	936
13.7 Berechnung von Beispielen .....	937
13.7.1 Verfahren nach Renger u. Wessolek .....	937
13.7.2 Verfahren nach Bagrov u. Glugla.....	939
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>945</b>
Allgemeine Literatur.....	945
Literatur zu Kapitel 7.....	969
Literatur zu Kapitel 8.....	982
Literatur zu Kapitel 9.....	989
Literatur zu Kapitel 12.....	995
<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>997</b>