

Inhaltsverzeichnis

1 Größen und Einheiten in der Hydrogeologie	1
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
2 Durchlässigkeit und Transmissivität	31
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 Kluftgesteinen	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
3 Speicherkoeffizient und Porenraum	123
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
4 Pumpversuche.....	199
4.1 Allgemeines	199
4.2 Strömungszustände und Aquifertypen	200
4.2.1 Gespannter Aquifer	203
4.2.2 Halbg gespannter 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 Thiern	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: Klutgrundwasserleiter	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
5 Hydrogeochemie für die Praxis	307
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
6 Transport von Wasserinhaltsstoffen.....	395
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
7 Kontamination des Grundwassers.....	431
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
8 Sanierung von Grundwasserschäden.....	517
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
9 Überwachung von Grundwasserleitern – Grundwassermonitoring	667
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
10 Brunnenbau	779
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
11 Pumpen und Rohrleitungen.....	863
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

12 Brunnenalterung und Brunnenregenerierung.....	909
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
13 Wasserbilanz.....	921
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
Literaturverzeichnis.....	945
Allgemeine Literatur.....	945
Literatur zu Kapitel 7.....	969
Literatur zu Kapitel 8.....	982
Literatur zu Kapitel 9.....	989
Literatur zu Kapitel 12.....	995
Sachverzeichnis.....	997