

Lehrbuch der Hydrologie, Band 1

Albert BAUMGARTNER

und

Hans-Jürgen LIEBSCHER

Allgemeine
Hydrologie
Quantitative Hydrologie

Gebrüder Borntraeger · Berlin · Stuttgart

Allgemeine Hydrologie

Quantitative Hydrologie

von

Albert BAUMGARTNER

Lehrstuhl für Bioklimatologie und angewandte Meteorologie
der Universität München

und

Hans-Jürgen LIEBSCHER

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

mit Beiträgen von Paul BENECKE, Horst BRECHTEL,
Gerhard EINSELE, Bruno FEDERER†, Günther GARBRECHT,
Michael HANTEL, Andreas HERRMANN, Michael KUHN,
Günther MICHELER, Hans ROHDE und Hans SCHIRMER

mit 336 Abbildungen und 127 Tabellen



281/3490 INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHAUSER STR. 2 • 3000 HANNOVER 51

Gebrüder Borntraeger · Berlin · Stuttgart 1990

Inhaltsverzeichnis

1	Was ist Hydrologie? (H. LIEBSCHER)	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Stellung der Hydrologie in den Naturwissenschaften	2
1.3	Stellung der Hydrologie in den Ingenieurwissenschaften	4
1.4	Gliederung der Hydrologie	6
2	Geschichte der Hydrologie (G. GARBRECHT)	11
2.1	Allgemeines	11
2.2	Die vorgeschichtliche Zeit	12
2.3	Hydrologische Arbeiten im Zeitalter der Naturmythologie	13
2.3.1	Allgemeines	13
2.3.2	Mesopotamien	14
2.3.3	Ägypten	17
2.3.4	Indus-Tal	20
2.3.5	Kulturen in den Hochländern	21
2.3.6	China	22
2.4	Hydrologie in der Aera der griechischen Naturphilosophen	23
2.4.1	Allgemeines	23
2.4.2	Theorie des Wasseraufstiegs	24
2.4.3	Meteore Theorie	24
2.4.4	Erosion und Geschiebe	25
2.4.5	ARISTOTELES	26
2.4.6	Nacharistotelische Schule	27
2.4.7	Hypothesen über den Nil	27
2.4.8	HERON von Alexandria	28
2.5	Beiträge zur Hydrologie aus römischer Zeit	29
2.5.1	Allgemeines	29
2.5.2	MARCUS VITRUVIUS POLLIO	30
2.5.3	STRABON, PLINIUS SECUNDUS	30
2.5.4	LUCIUS ANNAEUS SENECA	30
2.5.5	Regenmessungen	31
2.6	Das dunkle Jahrtausend	31
2.6.1	Das Mittelalter	31

2.6.2	Der Beginn der Renaissance	32
2.7	Beobachtung und Messung	32
2.7.1	LEONARDO DA VINCI (1452–1519)	32
2.7.2	BERNARD PALISSY (etwa 1510–1590)	34
2.7.3	PIERRE PERRAULT (1611–1680)	34
2.7.4	EDMÉ MARIOTTE (1620–1684)	36
2.7.5	EDMUND HALLEY (1656–1742)	36
2.7.6	Das 18. Jahrhundert	37
2.8	Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen im 19. Jahrhundert	38
2.8.1	Meteorologie	38
2.8.2	Oberflächenhydrologie	39
2.8.3	Grundwasserhydrologie	40
2.9	Die Entwicklung der modernen Hydrologie im 20. Jahrhundert	40
2.9.1	Der Übergang von der empirischen zur rationalen Hydrologie	40
2.9.2	Die Entwicklung der theoretischen Hydrologie	41
3	Wasser als Stoff (A. BAUMGARTNER)	43
3.1	Vorkommen, Name, Bedeutung und Herkunft von Wasser	43
3.1.1	Vorkommen	43
3.1.2	Name des Wassers	44
3.1.3	Bedeutung des Wassers	44
3.1.4	Herkunft des Wassers auf der Erde	45
3.2	Chemische Eigenschaften	46
3.2.1	Das Molekül Wasser	46
3.2.2	Das Kontinuum Wasser	47
3.2.3	Struktur von Eis	48
3.2.4	Dissoziation, Reaktionsstufen	49
3.2.5	Wasserinhaltsstoffe	49
	3.2.5.1 Lösungen	50
	Salze im Wasser 50 – Gase im Wasser 51	
	3.2.5.2 Suspensionen, Emulsionen	53
3.2.6	Schweres Wasser	53
3.3	Physikalische Eigenschaften	53
3.3.1	Phasenänderungen	55
	3.3.1.1 Kondensation	55
	3.3.1.2 Verdampfung	55
	3.3.1.3 Gefrieren	55
	3.3.1.4 Unterkühltes Wasser	56
	3.3.1.5 Schmelzen	56
	3.3.1.6 Sublimation (= Eisverdampfung)	56
	3.3.1.7 Resublimation (= Eisdeposition)	57
	3.3.1.8 Sieden	57
3.3.2	Mechanische Eigenschaften	58
	3.3.2.1 Spezifisches Volumen, Dichte	58
	3.3.2.2 Oberflächenspannung, Kohäsion, Adhäsion, Kapillarität	60
	3.3.2.3 Innere Reibung, Viskosität, Schubspannung	61
	3.3.2.4 Kompressibilität, Relaxationszeit	62

3.3.2.5	Schallgeschwindigkeit	62
3.3.3	Thermodynamische Eigenschaften	63
3.3.3.1	Spezifische Wärme	63
3.3.3.2	Wärmekapazität, Enthalpie	63
3.3.3.3	Wärmeleitfähigkeit und Wärmeleitzahl	63
3.3.3.4	Thermische Eigenschaften von Eis und Schnee	63
3.3.3.5	Thermodynamische Eigenschaften von Wasserdampf	64
3.3.3.6	Dampfdruck über Wasser und Eis	64
3.3.4	Elektrische Eigenschaften	67
3.3.4.1	Elektrischer Widerstand, Leitfähigkeit	67
3.3.4.2	Dielektrizitätskonstante	67
3.3.4.3	Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen	68
3.3.5	Optische Eigenschaften	68
3.3.5.1	Strahlungsreflexion an Wasseroberflächen	68
3.3.5.2	Refraktionsindex	69
3.3.5.3	Strahlungsabsorption, -extinktion und Transmission im Wasser	69
3.3.5.4	Lichtstreuung im Wasser, Trübungsfaktor	71
4	Wasserkreislauf (H. LIEBSCHER)	72
4.1	Der Wasserkreislauf der Erde	72
4.2	Der Prozeß des Wasserkreislaufs	72
4.3	Den Wasserkreislauf beeinflussende Maßnahmen des Menschen	76
4.3.1	Bauliche Veränderungen im Gewässerbett	76
4.3.2	Konsequenzen der Landnutzung im Einzugsgebiet	78
4.3.3	Wasserwirtschaftliche Folgen der Urbanisierung	79
4.3.4	Indirekte Wirkungen menschlichen Handelns	80
5	Die Hydrosphäre der Erde: Wasservorkommen und Wasserumsätze (A. BAUM- GARTNER)	82
5.1	Allgemeine Probleme	82
5.2	Wasservorkommen der Erde	83
5.2.1	Globale Wassermassen und -höhen	83
5.2.2	Die Wasserreservoirs der Erde	84
5.2.2.1	Das Wasser des Weltmeeres	84
5.2.2.2	Eis und Schnee	85
5.2.2.3	Grundwasser	86
5.2.2.4	Oberflächengewässer	86
5.2.2.5	Bodenwasser	86
5.2.2.6	Wasser in der Atmosphäre	87
5.2.2.7	Wasser der Biosphäre	87
5.2.3	Süß- oder Frischwasser	87
5.2.3.1	Süßwasser als Eis und Schnee	88
5.2.3.2	Unterirdisches Süßwasser, Grundwasser	89
5.2.3.3	Bodenwasser	89
5.2.3.4	Süßwasser an der Erdoberfläche, Oberflächengewässer	89
5.2.3.5	Süßwasser in Organismen und Atmosphäre	89
5.2.3.6	Das Süßwasser der Atmosphäre	90

5.3	Hydrologisches Zirkulationssystem der Erde	90
5.4	Wasserumsätze der Erde	93
5.4.1	Der Wasserumsatz durch die Niederschläge	93
5.4.1.1	Globale Verteilung der Niederschlagshöhen	94
5.4.1.2	Gebietsmittel für das Niederschlagsdargebot	95
5.4.2	Wasserumsätze durch Verdunstung	96
5.4.2.1	Globale Verteilung der Verdunstungshöhen	96
5.4.2.2	Gebietsmittel für die Verdunstungshöhen	97
5.4.3	Wasserumsätze durch Abfluß	98
5.4.3.1	Globale Verteilung der Abflußhöhen	98
5.4.3.2	Gebietsmittel der Abflußhöhen	99
5.4.3.3	Die großen Ströme der Erde	101
5.4.3.4	Verfügbarkeit der erneuerten Wasservolumen in den Kontinenten .	102
5.4.3.5	Bodenabtrag, Erosion, Sedimente	103
5.5	Wasserbilanzen	103
5.5.1	Bilanzgleichungen	103
5.5.2	Die Wasserbilanz der gesamten Erde	106
5.5.3	Wasserbilanz der Hemisphären	107
5.5.4	Wasserbilanz der Landflächen der Erde	109
5.5.5	Wasserbilanz der Meere	111
5.5.6	Regionale Wasserbilanzen	113
5.5.6.1	Europa	114
5.5.6.2	Alpen	115
5.5.6.3	Bundesrepublik Deutschland	118
5.5.7	Lokale Wasserbilanzen	123
5.6	Veränderung der Wasservorkommen durch Nutzung	125
5.7	Bedeutende Seen und Stauseen der Erde	127
6	Energiehaushalt der Erde (A. BAUMGARTNER)	129
6.1	Energiearten und deren hydrologische Bedeutung	129
6.1.1	Energiearten	129
6.1.2	Hydrologische Bedeutung der Energiearten	129
6.2	Energieübertragung durch Strahlung	131
6.2.1	Elektromagnetische Strahlung	131
6.2.2	Strahlungsemission	133
6.3	Strahlungshaushalt	136
6.3.1	Direkte Sonnenstrahlung	137
6.3.2	Einfluß der Atmosphäre auf die direkte Sonnenstrahlung und diffuse Him- melsstrahlung	138
6.3.3	Die Globalstrahlung an der Erdoberfläche	140
6.3.4	Strahlungsgeometrie, Bestrahlung	142
6.3.5	Absorption und Reflexion der Globalstrahlung	146
6.3.6	Wärmestrahlung von Erdoberfläche und Atmosphäre	150
6.3.6.1	Die Ausstrahlung der Erdoberfläche	150
6.3.6.2	Die Gegenstrahlung der Atmosphäre	151
6.3.6.3	Reflexion der Gegenstrahlung, langwelliger Strahlungssaldo, ef- fektive Ausstrahlung	152

6.3.6.4	Langwellige Strahlungsumsätze in der Atmosphäre	153
6.3.7	Nettostrahlung, Strahlungsbilanz	154
6.4	Wärmehaushalt	157
6.4.1	Wärmeströme, Wärmeumsatz	157
6.4.2	Energiebilanz	158
6.4.3	Molekulare Wärmeleitung	160
6.4.4	Wärme-, Stoff- und Temperatúraustausch an der Grenzschicht Erdoberfläche/Luft	163
6.4.4.1	Wärmeübergang an der Grenzschicht	164
6.4.4.2	Wasserdampfübergang und Strom latenter Wärme an der Grenzschicht	164
6.4.4.3	Impulsübertragung in der Grenzschicht, Wasserwellen	166
6.4.5	Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch in der Luft über der Grenzschicht	166
6.4.6	Wärmehaushalt hydrologischer Systeme	172
6.4.6.1	Globale Energiebilanz	172
6.4.6.2	Wärmetransporte durch die Meeresströme	173
6.4.6.3	Wärmehaushalt von Binnengewässern	175
6.4.6.4	Energiehaushalt von Wassereinzugsgebieten, Gletschern und Wäldern	178
6.5	Zusammenhang von Energie- und Wasserbilanz	178
6.6	Hydroklimatologische Klassifikation der Landflächen der Erde	181
6.6.1	Klassifikation nach Wasserbilanzgliedern	181
6.6.2	Hygrothermale Klassifikationen	185
6.6.3	Klimatische Wasserbilanz	188
6.6.4	Energetisch begründete Klassifikationen	190
7	Atmosphärischer Wasserdampftransport (M. HANTEL)	192
7.1	Einführung	192
7.1.1	Wasser als Spurenstoff in der Atmosphäre	192
7.1.2	Wassertransport als Teil der planetarischen Zirkulation	193
7.1.3	Wasser als Energieträger	194
7.2	Die allgemeine Erhaltungsgleichung für den Wasserdampftransport	195
7.2.1	Meßgrößen für den atmosphärischen Wassergehalt	195
7.2.2	Die Erhaltungsgleichung für die Substanz Wasser	197
7.2.3	Speicherung, Advektion und Erzeugung	200
7.2.4	Flußform und Divergenz	202
7.2.5	Transformation auf Druckkoordinaten	203
7.2.6	Einfluß der Meridiankonvergenz	204
7.3	Die Erhaltungsgleichung des turbulenten Wasserdampftransportes	205
7.3.1	Die gemittelte Erhaltungsgleichung	205
7.3.2	Fluß und Transport	207
7.3.3	Turbulenter Feuchtefluß	208
7.3.4	Das Skalenproblem	210
7.3.5	Die Rolle der Eddies	212
7.3.6	Feuchtefluß und Niederschlagsfluß	213
7.4	Der beobachtete atmosphärische Wasserhaushalt	215
7.4.1	Der atmosphärische Zweig des hydrologischen Kreislaufs	215

7.4.2	Das Niederschlagswasser in der Atmosphäre	217
7.4.3	Horizontaler Feuchtetransport	220
7.4.4	Vertikaler Feuchtetransport	222
7.4.5	Der beobachtete Wasserhaushalt	224
7.4.6	Wassertransport als Stromfunktion	228
7.4.7	Regionale Studien	228
7.5	Offene Fragen	231
8	Niederschlag (B. FEDERER & H. SCHIRMER)	233
8.1	Niederschlagsbildung	233
8.1.1	Allgemeines	233
8.1.2	Abkühlung von Luftmassen	234
8.1.3	Phasenübergänge	236
8.1.3.1	Homogene Keimbildung	237
8.1.3.2	Atmosphärische Aerosole	239
8.1.3.3	Wolkenkondensationskerne (cloud condensation nuclei, CCN) und Eisbildungskerne (ice nuclei, IN)	240
8.1.4	Wachstum von Tröpfchen und Eiskristallen	241
8.2	Anthropogene Niederschlagsbeeinflussung	244
8.2.1	Regenvermehrung	245
8.2.2	Hagelabwehr	246
8.2.3	Einfluß der Urbanisierung	247
8.3	Radarreflektivität des Niederschlages	248
8.4	Niederschlagsarten und -formen	250
8.4.1	Fallender Niederschlag	250
8.4.2	Abgesetzter Niederschlag	250
8.4.3	Abgefangener Niederschlag	251
8.5	Weitere Begriffe	251
8.5.1	Punktniederschlag, Gebietsniederschlag	251
8.5.1.1	Punktniederschlag	252
8.5.1.2	Gebietsniederschlag	253
8.5.1.3	Niederschlagsgebiet	253
8.5.2	Landregen, Schauer, Starkregen	253
8.5.3	Niederschlagsintensität	254
8.5.4	Niederschlagsdauer	255
8.5.5	Mittlere jährliche Dauer- und Höhenlinie	257
8.5.6	Niederschlagshäufigkeit, -wahrscheinlichkeit	257
8.5.7	Naß- und Trockenperioden	258
8.6	Zeitliche Variabilität des Niederschlages	258
8.6.1	Tägliche Niederschlagshöhen	259
8.6.2	Monatliche Niederschlagswerte	260
8.6.3	Jährliche Niederschlagswerte	266
8.7	Räumliche Variabilität des Niederschlages	267
9	Schnee und Eis (A. HERRMANN & M. KUHN)	271
9.1	Einführung	271
9.2	Schneehydrologische Begriffe	275

9.3	Thermische und hydraulische Eigenschaften der Schneedecke	276
9.4	Die Verdichtung des Schnees zu Gletschereis (Metamorphose)	278
9.4.1	Die Wirkung des Windes	279
9.4.2	Abbauende (isotherme) Metamorphose	279
9.4.3	Aufbauende Metamorphose bei Temperaturgefälle	280
9.4.4	Schneearten	281
9.4.5	Verfirnung: Druck- und Regelationsmetamorphose	282
9.4.6	Übergang von Firn zu Eis	286
9.5	Schneedeckenabbau und Schneeschmelzabflüsse	286
9.5.1	Schneeverdunstung	286
9.5.2	Schneeschmelze und Schmelzabflüsse	287
9.6	Strahlungs- und Wärmehaushalt von Schnee- und Eisdecken	290
9.6.1	Strahlungsbilanz	290
9.6.2	Wärmehaushalt	291
9.6.3	Der Gradtagfaktor	293
9.7	Massenhaushalt	293
9.7.1	Grundbegriffe	293
9.7.2	Die Massenbilanz aus der Wasserbilanz	295
9.7.3	Der Massenhaushalt aus topographischen Aufnahmen	295
9.7.4	Der Massenhaushalt aus glaziologischen Aufnahmen	296
9.8	Deformation und Eisbewegung	300
9.8.1	Das Fließgesetz des Eises	300
9.8.2	Die Bewegungsgleichungen	302
9.8.3	Geschwindigkeit der Eisbewegung	303
9.9	Der stationäre Gletscher	304
9.9.1	Die Kinematik des stationären Falls	305
9.9.2	Der Aktivitätsindex des stationären Gletschers	307
9.9.3	Moränen, Verschiebungsflächen und Schichtung (Trajektorien und Isochronen)	307
9.10	Inlandeis und Eisschelfe	309
9.10.1	Morphologie der polaren Eiskörper	309
9.10.2	Das Eis als Klimaarchiv	309
10	Interzeption (H. BRECHTEL)	313
10.1	Einleitung	313
10.2	Allgemeine Definition	313
10.3	Niederschlagsbilanz von Vegetationsdecken	314
10.4	Einflüsse des Standortes und der Bestockung	317
10.5	Ergebnisse von Interzeptionsuntersuchungen	320
10.5.1	Interzeptionsspeicherung	320
10.5.2	Interzeptionsverdunstung	322
10.6	Anwendung von Ergebnissen der Interzeptionsforschung bei hydrologischen Analysen	324
11	Verdunstung (A. BAUMGARTNER)	327
11.1	Definition, Bedeutung	327
11.2	Physik der Verdunstung	328

11.2.1	Energetik	328
11.2.2	Saugkräfte und Widerstände	329
11.2.2.1	Luft	329
11.2.2.2	Boden	330
11.2.2.3	Pflanzen	331
11.3	Begriffe, Terminologie	332
11.4	Methoden zur Bestimmung der Verdunstung	335
11.4.1	Meßgeräte	335
11.4.1.1	Probekörper (Atmometer und Evaporimeter)	336
11.4.1.2	Evaporimeter mit offenen Wasserflächen	336
11.4.1.3	Lysimeter, natürliche, feste Erdoberflächen	337
11.4.2	Verdunstung aus der Wasserbilanz	339
11.4.2.1	Verdunstung als Teil der Bodenwasserbilanz	340
11.4.2.2	Verdunstung in Einzugsgebieten, Gebietsverdunstung	341
11.4.2.3	Verdunstungskartierung zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate	344
11.4.3	Verdunstung aus dem Wasserdampftransport	346
11.4.3.1	Gradientenverfahren	346
11.4.3.2	Luftkörperaustausch	349
11.4.4	Berechnung der potentiellen Verdunstung aus der Energiebilanz	350
11.4.4.1	Vollständige Lösung	350
11.4.4.2	Näherungslösungen, Parametrisierung	353
11.4.5	Empirische Formeln	355
11.4.5.1	Strahlung und Temperatur als Bestimmungsgrößen	356
11.4.5.2	Windgeschwindigkeit und Sättigungsdefizit als Bestimmungsgrößen	358
11.5	Verdunstung spezifischer Oberflächen	361
11.5.1	Freie Wasserflächen	361
11.5.2	Verdunstung von vegetativen Bodendecken	362
11.5.2.1	Evaporation vom Erdboden	362
11.5.2.2	Transpiration der Pflanzenorgane	362
11.5.2.3	Interzeptionsverdunstung	364
11.5.2.4	Bestandsverdunstung und Wasserhaushalt von Wäldern	365
11.5.3	Verdunstung im Gebirge, Schnee- und Eisverdunstung	367
11.5.3.1	Höhengradient der Verdunstung	367
11.5.3.2	Schnee- und Eisverdunstung	368
11.6	Beeinflussung der Verdunstung	369
11.6.1	Einfluß direkter Maßnahmen	369
11.6.2	Einfluß indirekter Maßnahmen	370
11.7	Richtwerte und Quellenwerke für Verdunstungshöhen	371
12	Versickerung und Bodenfeuchte (P. BENECKE)	373
12.1	Die Rolle des Bodens als hydrologischer Speicher, Regler und Verteiler	373
12.2	Bodenmatrix, Bodengefüge, Bodenprofil	374
12.2.1	Bodenart	374
12.2.2	Bodengefüge	376
12.2.3	Bodenprofil	377
12.3	Infiltration	377

12.4	Bodenwasserpotentiale, Bodenwassercharakteristik	378
12.4.1	Potentiale	379
12.4.2	Bodenwassercharakteristik (pF-Kurve)	380
12.5	Leitfähigkeit (für Wasser)	383
12.6	Sickerströmungsfälle im Gleichgewicht	388
12.7	Sickerströmungsfälle im Ungleichgewicht	390
12.8	Grundlagen für die Berechnung von Sickerwasserströmen	392
12.9	Bodenwasserhaushalt	396
12.10	Zusammenfassende Schlußdiskussion	402
13	Grundwasser (G. EINSELE)	404
13.1	Arten des Grundwassers	404
13.1.1	Wasser im gesättigten und ungesättigten Bereich	404
13.1.2	Oberflächennahes Grundwasser und tiefes Grundwasser	405
13.1.3	Freies und gespanntes Grundwasser	406
13.1.4	Fossiles Grundwasser und Formationswasser	408
13.2	Verschiedene Aquifertypen	409
13.3	Grundwasserneubildung und -anreicherung	411
13.3.1	Allgemeines, Begriffe	411
13.3.2	Räumliche und zeitliche Änderungen der Grundwasserneubildungsrate	412
13.3.3	Lokale Grundwasserneubildung	413
13.3.4	Grundwasseranreicherung	414
13.4	Speicherung von Grundwasser	414
13.4.1	Gesamter und speichernutzbarer Hohlraumanteil	414
13.4.2	Zur Materialabhängigkeit des speichernutzbaren Hohlraumanteils	415
13.4.3	Speicherkoeffizient	417
13.5	Grundwasserströmung	419
13.5.1	Theoretische Grundlagen und das DARCY'sche Gesetz	419
13.5.2	Filtergeschwindigkeit und Abstandsgeschwindigkeit, Gültigkeit des DARCY'schen Gesetzes	422
13.5.3	Permeabilität und hydraulische Leitfähigkeit von Lockergesteinen	424
13.5.4	Hydraulische Leitfähigkeit von Festgesteinen	426
13.5.5	Transmissivität und Refraktion der Grundwasserströmung	428
	13.5.5.1 Transmissivität	428
	13.5.5.2 Refraktion der Grundwasserströmung	429
13.5.6	Das hydraulische Potential	430
13.5.7	Folgerungen aus dem DARCY'schen Gesetz für die Grundwasserströmung und die Grundwasseroberfläche	434
	13.5.7.1 Idealfälle mit Kenntnis des Potential- und Fließliniennetzes einer stationären zweidimensionalen Strömung	434
	13.5.7.2 Zweidimensionale Strömung in freien Aquiferen ohne Grundwasserneubildung	436
	13.5.7.3 Stationäre Grabenanströmung mit freier Oberfläche ohne Grundwasserneubildung	437
	13.5.7.4 Stationäre Grabenanströmung mit freier Oberfläche, Grundwasserneubildung und Grundwasserstands-Schwankungen	437

13.5.8	Qualitative Betrachtungen zu den Beziehungen zwischen freier Grundwasser- oberfläche, Vorflutern und anderen Einflußfaktoren	440
13.5.9	Verweilzeit des Grundwassers im Untergrund, Mischmodelle und hydro- dynamische Dispersion	443
13.6	Spezielle Einflüsse der Gesteinsbildung und Verwitterung auf die Gebirgs- durchlässigkeit und Speicherung in verschiedenen Grundwasser-Landschaf- ten	446
13.6.1	Vorbemerkungen	446
13.6.2	Inhomogenität, Diskontinuität und Anisotropie der Aquifere (ohne Verwit- terungserscheinungen)	446
13.6.3	Oberflächennahe Verwitterung und Auflockerung	450
13.6.3.1	Grundwasser in Granit- und Gneisgebieten	450
13.6.3.2	Stark verfestigte, schlecht verwitterbare Sedimentgesteine	450
13.6.3.3	Leicht verwitterbare Ton und- Mergelsteine	451
13.6.3.4	Hanggrundwasser zerfallener und aufgelockerter Sandsteine	451
13.6.4	Karstaquifere	451
13.7	Grundwasserabfluß	454
13.7.1	Allgemeines zu verschiedenen Abflußarten	454
13.7.2	Trockenwetterabfluß und Leerlaufverhalten homogener Aquifere	455
13.7.3	Leerlaufverhalten inhomogener und mehrschichtiger Aquifere	457
13.8	Grundwasserhaushalt	459
13.9	Literaturhinweise	461
14	Abfluß (H. LIEBSCHER)	462
14.1	Allgemeine Definitionen	462
14.2	Flußsystem	464
14.2.1	Entstehung von Flußsystemen	464
14.2.2	Flußgebiet	464
14.2.3	Gewässernetz	467
14.2.4	Flußlauf	472
14.3	Abflußprozeß	475
14.3.1	Allgemein	475
14.3.2	Abflußbildung	476
14.3.3	Abflußkonzentration	478
14.3.4	Fließvorgang im offenen Gerinne	484
14.3.4.1	Allgemein	484
14.3.4.2	Uferspeicherung	486
14.3.4.3	Kontinuitätsgleichung	489
14.3.4.4	Kraftwirkungen in Flüssigkeiten	490
14.3.4.5	Energie-Gleichung	491
14.3.4.6	Arten der Gerinneströmung	494
14.3.4.7	Allgemeines Fließgesetz	496
14.3.4.8	Fließgeschwindigkeit	500
14.3.4.9	Wasserstands-Abfluß-Beziehungen	501
14.4	Der Einfluß geographischer und klimatologischer Verhältnisse auf den Ab- flußvorgang	503
14.4.1	Allgemein	503

14.4.2	Einfluß der geomorphologischen Verhältnisse	504
14.4.2.1	Größe des Einzugsgebietes	504
14.4.2.2	Form des Einzugsgebietes	507
14.4.2.3	Flußdichte	508
14.4.2.4	Topographische Höhe	508
14.4.2.5	Gefällsverhältnisse	509
14.4.2.6	Landschaftsform	509
14.4.3	Geologie	510
14.4.4	Bodenarten	511
14.4.5	Einfluß der Vegetation	512
14.4.6	Einfluß des Niederschlages	513
14.4.6.1	Allgemein	513
14.4.6.2	Niederschlagshöhe	513
14.4.6.3	Einfluß der jahreszeitlichen Verteilung des Niederschlages	514
14.4.6.4	Niederschlagshäufigkeit	514
14.4.6.5	Niederschlagsintensität	515
14.4.6.6	Niederschlagsdauer	515
14.4.6.7	Zeitliche und flächenhafte Verteilung des Niederschlages	516
14.4.7	Einfluß von Schnee und Eis	518
14.4.8	Einfluß sonstiger Klimaelemente	519
14.5	Einfluß von Seen	522
14.6	Einfluß anthropogener Maßnahmen	523
14.6.1	Allgemein	523
14.6.2	Stauwerke, Flußbegradigungen und Eindeichungen	523
14.6.3	Speicher	525
14.6.4	Wasserüberleitungen, Wasserentnahmen und Wassereinleitungen	526
14.6.5	Wasserentnahmen aus dem Grundwasser	527
14.6.6	Urbanisierung	528
14.6.7	Landwirtschaftliche Maßnahmen	528
14.6.8	Forstliche Maßnahmen	529
14.7	Räumliche und zeitliche Variabilität des Abflusses	530
14.8	Wärmehaushalt von Fließgewässern	534
14.8.1	Allgemein	534
14.8.2	Bildung von Eis auf Fließgewässern	534
15	Seen (M. MICHLER)	538
15.1	Definitionen und Begriffe	538
15.2	Entstehung von Seen	539
15.2.1	Seebeckenbildung durch endogene Vorgänge	540
15.2.2	Seebeckenbildung durch exogene Vorgänge	541
15.3	Verbreitung von Seen	543
15.4	Form der Seebecken	544
15.5	Morphometrische Parameter	545
15.5.1	Längenmaße	545
15.5.2	Flächenmaße	547
15.5.3	Volumenmaße	549
15.6	Wasserhaushalt von Seen	549

15.7	Strahlungsverhältnisse in Seen	552
15.8	Wärmehaushalt und Temperaturverhalten von Seen	554
15.8.1	Wärmehaushalt	555
15.8.2	Temperaturverhältnisse in Seen	558
15.9	Dynamik des Seewassers	561
15.9.1	Fortschreitende Oberflächenwellen	562
15.9.2	Strömungen	563
15.9.3	Stehende Wellen ("Seiches")	565
15.9.4	Stabilität eines Sees	568
16	Küstenhydrologie (H. ROHDE)	570
16.1	Allgemeines	570
16.1.1	Allgemeine Definitionen, Abgrenzungen	570
16.1.2	Gezeiten, Wind, Oberwasser und Salzgehalt	571
16.2	Die Gewässer	575
16.2.1	Das Küstenmeer	575
16.2.2	Die Ästuar- und Tideflüsse	576
16.3	Wasserstände	578
16.3.1	Allgemeines	578
16.3.2	Gezeitenbedingte Wasserstände	578
16.3.3	Wasserstände unter Einfluß des Oberwasserzuflusses	581
16.3.4	Wasserstände unter Windeinfluß	583
	16.3.4.1 Allgemeines	583
	16.3.4.2 Sturmfluten	584
	16.3.4.3 Wellen- und Seegang	588
16.3.5	Einfluß des Eises	593
16.3.6	Langzeitige Wasserstandsänderungen	595
16.4	Fließgeschwindigkeiten und Durchflüsse	596
16.4.1	Allgemeines	596
16.4.2	Gezeitenbedingte Strömungen und Durchflüsse	597
16.4.3	Dichteströmungen, Einflüsse von Wind und Eis	604
16.5	Anthropogene Beeinflussungen	606
	Literaturverzeichnis	611
	Sachwortverzeichnis	650