
Angewandte Hydrologie

Teil 2:

Der Wasserhaushalt der Flußgebiete

2., überarbeitete Auflage

Mit 226 Bildern und 74 Tafeln

Autorenkollektiv unter Leitung von

Prof. Dr.-Ing. habil. S. Dyck

o. Prof. für Hydrologie an der Technischen Universität
Dresden

Beiträge von

Dr. sc. techn. A. Becker

Dr. rer. nat. habil. G. Flemming

Dr. rer. nat. G. Glugla

Dr.-Ing. W. Golf

Doz. Dr. sc. nat. U. Grünewald

Dr. rer. nat. J. Gurtz

Dr. rer. nat. Ch. Kluge

Doz. Dr. rer. nat. G. Peschke



VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN
BERLIN · MÜNCHEN

Inhaltsverzeichnis

1.	Gegenstand und Ziel von Wasserhaushaltsberechnungen	15
1.1.	Wasser-, Energie- und Stoffhaushalt	15
1.2.	Wassermengen und Wasserkreislauf der Erde	18
1.3.	Gebietswasserkreislauf und seine Komponenten	24
1.4.	Wasserhaushaltsberechnungen im Dienste der Volkswirtschaft	29
2.	Allgemeine Grundlagen für Wasserhaushaltsberechnungen	36
2.1.	Hydrologische Systeme (Prozeß, Element, System)	36
2.2.	Modellierung hydrologischer Systeme und Simulation hydrologischer Prozesse	38
2.2.1.	Übersicht	38
2.2.2.	Zur Modellierung hydrologischer Systeme	39
2.2.2.1.	Physikalische Modelle	42
2.2.2.2.	Analogiemodelle	43
2.2.2.3.	Mathematische Modelle	44
2.2.3.	Zur Simulation hydrologischer Prozesse	45
2.3.	Maßstabsfragen	47
2.4.	Wärmehaushalt als Einflußfaktor für den Wasserhaushalt	50
2.4.1.	Wärmehaushaltsgleichung und Wärmetransport (physikalische Grundlagen) ...	50
2.4.1.1.	Wärmehaushaltsgleichung der Erdoberfläche	50
2.4.1.2.	Arten des Wärmetransports	51
2.4.2.	Strahlung	52
2.4.2.1.	Kurzwellige Strahlung	52
2.4.2.2.	Langwellige Strahlung	53
2.4.2.3.	Strahlungssaldo	54
2.4.2.4.	Strahlungshaushalt der Erde	55
2.4.3.	Fühlbare Wärmeströme	56
2.4.3.1.	Konvektionswärmestrom	56
2.4.3.2.	Bodenwärmestrom	56
2.4.4.	Verdunstung	57
2.4.4.1.	Verdunstung als turbulenter Massen- und Wärmetransport	57
2.4.4.2.	Komponenten der Verdunstung	60
2.4.4.3.	Reale und potentielle Verdunstung	60
2.4.5.	Hydroklimatologische Klassifikation der Landflächen	63
3.	Hydrodynamische Grundlagen	65
3.1.	Theorie der Strömung im ungesättigten und wassergesättigten Boden	65
3.1.1.	Potentiale des Bodenwassers	66
3.1.2.	Das mathematische Modell	68
3.1.2.1.	Kontinuitätsgleichung	68
3.1.2.2.	Energiegleichung	71

3.1.2.3.	Differentialgleichungen der Bodenwasserbewegung	73
3.1.2.4.	Rand- und Anfangsbedingungen	77
3.1.3.	Lösungsmöglichkeiten	78
3.2.	Hydrodynamische Grundlagen der Strömung des Oberflächenwassers	83
3.2.1.	Kontinuitätsgleichung	84
3.2.2.	Dynamische Grundgleichung	86
3.2.3.	Lösungsmöglichkeiten	88
4.	Grundlagen und wichtigste Methoden der Systemhydrologie	90
4.1.	Charakterisierung der hydrologischen Systeme und ihrer Haupteigenschaften ..	90
4.1.1.	Hydrologische Systeme und ihre Eingangs- und Ausgangsgrößen	90
4.1.2.	Verhältnis der Systemhydrologie zur Hydrodynamik	90
4.1.3.	Charakterisierung linearer und nichtlinearer Systemmodelle	91
4.2.	Lineare Systemmodelle	92
4.2.1.	Standardeingangssignale und Antwortfunktionen	92
4.2.2.	Faltungsintegral	94
4.2.3.	Ausflußberechnung mit Hilfe von Δt -Impulsantworten	95
4.2.4.	Ausflußberechnung bei punktwaiser Eingabe der Zuflußfunktion	96
4.2.5.	Hauptmethodiken zur Bestimmung von Impulsantworten	99
4.2.6.	Ableitung von Impulsantworten für beliebige Δt aus einer bestimmten Δt -Impulsantwort	100
4.3.	Modellkonzepte linearer zeitinvarianter Systeme	102
4.3.1.	Speicherung und Translation	102
4.3.2.	Einzellinearspeicher	102
4.3.3.	Lineare Speicherkaskade	104
4.3.4.	Lineares Translationsglied	106
4.3.5.	Aus linearen Speichern und Translationsgliedern zusammengesetzte Modelle von Flußgebieten	108
4.3.6.	Isochronenmethode	109
4.4.	Zeitvariante und nichtlineare Systemmodelle	112
4.4.1.	Lineare zeitvariante Systemmodelle	112
4.4.2.	Nichtlineare Systemmodelle	113
4.4.3.	Nichtlineare Einzelspeicher	113
5.	Methoden der Parameterbestimmung bei hydrologischen Modellen	115
5.1.	Allgemeines Problem der Parameterbestimmung und ein Überblick über ge- eignete Bestimmungsmethoden	115
5.2.	Der Statistik entlehnte Parameterschätzverfahren für spezielle deterministi- sche Modelle	118
5.2.1.	Parameterschätzung nach dem Maximum-Likelihood-Verfahren und der Methode der kleinsten Quadrate	118
5.2.2.	Parameterschätzung nach der Momentenmethode	120
5.3.	Anwendung von Optimierungsverfahren zur Parameterbestimmung	124
5.3.1.	Optimierungsaufgabe	124
5.3.2.	Zu einigen bei der Lösung der Optimierungsaufgabe auftretenden Problemen ..	125
5.4.	Bestimmung des Verhaltens eines linearen zeitinvarianten Systems über Black-Box-Verfahren	130
5.4.1.	Allgemeines	130
5.4.2.	Bestimmung der Impulsantwort eines linearen zeitinvarianten Systems nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Verwendung des "verketteten Gaußschen Algorithmus"	130

5.4.2.1.	Aufgabenstellung und Lösungsweg	130
5.4.2.2.	Mathematische Formulierung	131
5.5.	Verknüpfung von Modell- und Systemparametern zur Bestimmung der Parameter von Modellen für nicht oder ungenügend beobachtete hydrologische Systeme	136
6.	Struktur und Eigenschaften von Flußgebieten	138
6.1.	Übersicht	138
6.2.	Struktur der Flußgebiete	141
6.2.1.	Topologisch-strukturelle Analyse und Beschreibung der Flußnetze	141
6.2.1.1.	Die wichtigsten Begriffe zu den Flußnetzen	141
6.2.1.2.	Flußordnungskonzepte	142
6.2.1.3.	"Gesetz der Flußzahlen"	144
6.2.1.4.	Flußnetze als Graphen	146
6.2.2.	Flußlängen	148
6.2.3.	Einzugsgebietsflächen (areale Analyse der Flußgebiete)	149
6.2.4.	Gefällewerte	152
6.2.4.1.	Wasserlaufgefälle	152
6.2.4.2.	Geländegefälle	154
6.2.4.3.	Höhenverhältnis im Raum (hypsometrische Analyse)	154
6.2.5.	Einige weitere geomorphologische Kenngrößen	156
6.2.6.	Dimensionsanalyse	158
6.3.	Gliederung der Flußgebiete nach hydrologischen Flächeneinheiten	164
6.3.1.	Allgemeines zur flächenmäßigen Gliederung der Flußgebiete	164
6.3.2.	Gliederungsprinzipien	165
6.3.2.1.	Übersicht	165
6.3.2.2.	Hydrogeologische Erschließung von Einzugsgebieten	166
6.3.2.3.	Kartierung der Hauptnutzungsformen	167
6.3.2.4.	Kartierung der Durchlässigkeit der Böden	168
6.3.2.5.	Kartierung der mittleren Grundwasserflurabstände	172
6.3.2.6.	Karte und Reliefs	172
6.3.3.	Kartierung der hydrologischen Flächeneinheiten	173
6.3.4.	Variation der Abflußbildungsflächen	176
7.	Grundsätze der Modellierung von Einzugsgebieten	181
7.1.	Prinzipien der mathematischen Modellierung von Einzugsgebieten	181
7.1.1.	Allgemeines	181
7.1.2.	Arbeitsgang bei der mathematischen Modellierung hydrologischer Prozesse	182
7.1.3.	Symbole in Rechenprogrammen von hydrologischen Einzugsgebieten	183
7.2.	Auflösungsvermögen von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen	185
7.2.1.	Zeitliches Auflösungsvermögen	185
7.2.2.	Räumliches Auflösungsvermögen	185
7.2.2.1.	Horizontale Gliederung von Einzugsgebieten	185
7.2.2.2.	Vertikale Untergliederung von Einzugsgebieten	186
7.3.	Aufbau von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen	188
7.3.1.	Übersicht	188
7.3.2.	Modellaufbau in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung	189
7.3.3.	Modellaufbau in Abhängigkeit von den Gebietseigenschaften	190
8.	Hydrometeorologische Ein- und Ausgangsgrößen des Wasserhaushalts von hydrologischen Systemen	192

8.1.	Allgemeine Übersicht	192
8.2.	Niederschlag	193
8.2.1.	Darstellung und Entstehung des Niederschlags	193
8.2.1.1.	Haupteigenschaften und Grundgrößen	193
8.2.1.2.	Bildung des Niederschlags	194
8.2.2.	Messung des Niederschlags	196
8.2.2.1.	Meßgeräte für die punktuelle Niederschlags Erfassung	196
8.2.2.2.	Fehler der Niederschlagsmessung	197
8.2.2.3.	Messung des Gebietsniederschlags	198
8.2.3.	Punktniederschläge	199
8.2.4.	Gebietsniederschläge	202
8.2.4.1.	Räumliche Verteilung des Niederschlags	202
8.2.4.2.	Methoden der Bildung von Gebietsmittelwerten	204
8.2.4.3.	Dichte und Fehler von Meßnetzen	211
8.2.5.	Stark- und Bemessungsniederschläge	211
8.2.6.	Stochastische Analyse und Simulation des Niederschlagsprozesses	214
8.2.6.1.	Formulierung und Besonderheiten der Wahrscheinlichkeitsaussagen	214
8.2.6.2.	Kontinuierliche Verteilungen	216
8.2.6.3.	Gemischte diskret-kontinuierliche Verteilungen	216
8.2.6.4.	Gestützte Verteilungen	220
8.2.6.5.	Ereignis-Struktur	224
8.2.6.6.	Schlußbemerkungen zur Simulation	225
8.3.	Wasserabgabe aus der Schneedecke	226
8.3.1.	Grundbegriffe	226
8.3.2.	Massenhaushalt der Schneedecke	228
8.3.3.	Wärmehaushalt der Schneedecke	229
8.3.4.	Anwendung vereinfachter Verfahren zur Bestimmung der Schneeschmelze ...	231
8.3.4.1.	Vereinfachungen des Wärmehaushaltsverfahrens	231
8.3.4.2.	Tagesgradmethode	234
8.4.	Verdunstung	237
8.4.1.	Methoden zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration	237
8.4.1.1.	Messung und Meßwerte	239
8.4.1.2.	Berechnung der potentiellen Evapotranspiration	241
8.4.1.3.	Verdunstung freier Wasserflächen	248
8.4.2.	Methoden zur Ermittlung der realen Evapotranspiration	251
8.4.2.1.	Messung und Meßwerte	251
8.4.2.2.	Berechnung der realen Verdunstung	254
8.4.3.	Stochastische Analyse und Simulation des Verdunstungsprozesses	261
8.4.3.1.	Allgemeines zur Methodik	261
8.4.3.2.	Potentielle Evapotranspiration	262
8.4.3.3.	Zur Verdunstungsberechnung verwendete Klimagrößen	262
9.	Abflußbildungsprozeß und seine Erfassung	265
9.1.	Übersicht	265
9.2.	Komponenten des Abflußbildungsprozesses	266
9.3.	Phasen der Abflußbildung	270
9.4.	Vereinfachte Verfahren zur Erfassung der Abflußbildung	271
9.4.1.	Einführung	271
9.4.2.	Abflußbeiwert	271
9.4.3.	Scheitelabflußbeiwert	275

9.4.4.	ϕ - Index	277
9.4.5.	Koaxial-graphische Niederschlags-Abfluß-Beziehungen	278
9.4.5.1.	Bestimmung der Eingangsgrößen	278
9.4.5.2.	Aufstellung des Koaxialdiagramms	281
9.4.5.3.	Arbeit mit dem Koaxialdiagramm	283
9.4.6.	Empirische Bestimmung der Rückhaltintensität	284
9.5.	Interzeption	287
9.5.1.	Begriffserklärung und Prozeßbeschreibung	287
9.5.2.	Einflußfaktoren und Berechnung der Interzeption	289
9.5.3.	Hydrologische Bedeutung der Interzeption	291
9.6.	Infiltration	293
9.6.1.	Übersicht	293
9.6.2.	Qualitative Beschreibung des Prozeßverlaufes	294
9.6.3.	Infiltrationsmodelle	298
9.6.3.1.	Zweistufenmodell für homogene Böden	298
9.6.3.2.	Zweistufenmodell für geschichtete Böden	300
9.6.3.3.	Modell von PHILIP	308
9.6.3.4.	Modell von HORTON	309
9.6.3.5.	HOLTAN-Modell	311
9.6.3.6.	Weitere Infiltrationsmodelle	313
9.7.	Sättigungsflächenmodelle	315
9.8.	Grundwasserneubildung	318
9.8.1.	Langjährige Mittelwerte der Grundwasserneubildung	319
9.8.1.1.	Methodik zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung	321
9.8.2.	Aktueller innerjähriger Gang der Grundwasserneubildung	326
9.8.2.1.	Berechnung der potentiellen Verdunstung im Modell JAGA 75	329
9.8.2.2.	Berechnung der realen Verdunstung im Modell JAGA 75	329
9.8.2.3.	Berechnung der Grundwasserneubildung im Modell JAGA 75	332
9.8.2.4.	Ein- und Ausgangsdaten des Programms JAGA 75	336
10.	Abflußkonzentrationsprozeß und seine Erfassung	343
10.1.	Übersicht	343
10.2.	Ganglinienseparation	347
10.2.1.	Allgemeines	347
10.2.2.	Ermittlung der Durchflußrückgangskurven für eine Pegelstelle	348
10.2.3.	Durchflußrückgangsgesetze	351
10.2.4.	Festlegung des Beginns des direkten Abflusses	356
10.2.5.	Festlegung des Endes des direkten Abflusses	357
10.2.6.	Festlegung der zeitlichen Verteilung des Basisabflusses während des Auftretens von direktem Abfluß	358
10.3.	Abflußkonzentrationsmodelle	361
10.3.1.	Übersicht	361
10.3.2.	Mathematisch-physikalische Ansätze	362
10.3.3.	Impulsantworten für Einzugsgebiete nach der Black-Box-Methode	363
10.3.3.1.	Δt -Impulsantworten	363
10.3.3.2.	Impulsantwort von Einzugsgebieten	372
10.3.4.	Impulsantworten nach Modellkonzeptionen	372
10.3.4.1.	Landoberflächenabflußsystem als Translationssystem	373
10.3.4.2.	Speichermodelle	381
10.3.4.3.	Landoberflächenabflußsystem als Translations- und Speichersystem	383

10.3.4.4.	Zweischichtige Abflußkonzentrationsmodelle für den direkten Abfluß	390
10.4.	Grundwasserabfluß und seine Erfassung	391
10.4.1.	Einfache Grundwasserspeichermodelle	392
10.4.2.	Simulation regionaler Grundwasserbewegungen	393
10.4.3.	Erfassung regionaler Grundwasserressourcen	394
11.	Durchflußprozeß und seine modellmäßige Behandlung	397
11.1.	Übersicht über die wichtigsten Modellierungsmöglichkeiten	397
11.2.	Lineare Modelle von Flußabschnitten	398
11.3.	Lineares Translations-Diffusions-Modell zur Durchflußberechnung	400
11.4.	Nichtlineares Stufenmodell	403
11.5.	Parameternachführung bei Vorhersagemodellen mit Hilfe sich selbst anpassender Systemmodelle	408
12.	Gemeinsame Modellierung des Durchflusses und der Wasserbeschaffenheit in Fließgewässern	411
12.1.	Flußwasserbeschaffenheit und ihre Modellierung	411
12.2.	Berechnung der Wassertemperatur in Fließgewässern - Temperaturmodelle ..	413
12.2.1.	Statistische Modelle der Wassertemperatur	413
12.2.2.	Deterministische Modelle der Wassertemperatur	413
12.3.	Vermischungsprozesse in Fließgewässern - Transportmodelle	418
12.3.1.	Theoretisch-physikalische Grundlagen	419
12.3.1.1.	Statistische Theorie der Turbulenz	419
12.3.1.2.	Halbempirische Gleichung der turbulenten Diffusion	419
12.3.1.3.	Theorie der Dispersion	420
12.3.2.	Charakteristische Phasen der Ausbreitung von Tracerimpulsen	421
12.3.3.	Vertikale Vermischung	422
12.3.4.	Transversale Vermischung	422
12.3.5.	Longitudinale Vermischung	423
12.4.	Modelle für Sauerstoffgehalt und biochemisch abbaubare Substanzen	424
12.4.1.	Klassisches Modell nach STREETER und PHELPS - der Substratabbau durch Bakterien	424
12.4.2.	Sauerstoffverbrauch durch Nitrifikation	427
12.4.3.	Sauerstoffproduktion und Verbrauch durch Unterwasserpflanzen und Algen (Photosynthese und Respiration)	428
12.4.4.	Sedimentation und Aufwirbelung, Erosion	428
12.4.5.	Sauerstoffverbrauch durch das Sediment	430
12.4.6.	Weitere Sauerstoffquellen	430
12.4.7.	Grundmodell (Bilanzgleichungen) für die Modellierung der Wasserbeschaffenheit in kleinen Flüssen	430
12.4.8.	Vereinfachungen der Bilanzgleichungen	432
12.4.9.	Kurze Bemerkungen zu den Lösungsmöglichkeiten der Bilanzgleichungen ...	432
12.4.10.	Parameterbestimmung am Beispiel der Bilanzgleichungen	433
12.4.11.	Kopplung des Beschaffenheitsmodells mit Wassertemperatur und Durchfluß ..	436
12.4.12.	Bemerkungen zu weiteren, von den Bilanzgleichungen abweichenden Gütemodellen	437
12.5.	Anwendung gekoppelter mathematischer Wassermengen- und Wasserbeschaffenheitsmodelle	438
13.	Entwicklung und Einsatz komplexer hydrologischer Einzugsgebietsmodelle ...	441
13.1.	Aufgabenstellung und Anforderungen	441

13.2.	Aufbau komplexer hydrologischer Einzugsgebietsmodelle	443
13.2.1.	Allgemeines	443
13.2.2.	Ein- und Ausgabegrößen für komplexe hydrologische Einzugsgebietsmodelle ..	443
13.2.3.	Modellierung der Untersysteme der Erdoberfläche	450
13.2.3.1.	Interzeptionssystem	450
13.2.3.2.	Landoberflächensystem	451
13.2.4.	Untersystemmodelle des wechselfeuchten Bodenbereiches	454
13.2.4.1.	Infiltrationsmodell	454
13.2.4.2.	Untersystemmodelle zur Erfassung der Bewegung und Speicherung der Feuchte im ungesättigten Bodenbereich	455
13.2.4.3.	Berechnung der realen Evapotranspiration	458
13.2.5.	Untersystemmodelle des wassergesättigten Bodenbereiches - Das Grund- wasserspeichersystem	458
13.2.6.	Ermittlung des Gesamtabflusses	459
13.3.	Anpassen und Testen von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen	460
13.3.1.	Allgemeines	460
13.3.2.	Bestimmung der Modellparameter und Anfangswerte	463
13.3.2.1.	Ereignisauswahl und Datenbereitstellung	463
13.3.2.2.	Synthetische Bestimmung von Modellparametern	464
13.3.2.3.	Anwendung numerischer Parameteroptimierungsverfahren	465
13.3.2.4.	Parameterempfindlichkeitsanalyse	466
13.3.2.5.	Anpassungskriterien und Bewertung der Güte des Modells und seiner Parameter	468
13.3.2.6.	Anbringen von Korrekturen bei operativen Abfluvvorhersagen	469
13.3.3.	Fehleranalyse	470
13.3.4.	Rechentechische Realisierung von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen ..	471
13.4.	Einsatzmöglichkeiten für komplexe hydrologische Einzugsgebietsmodelle	476
14.	Übersichts-, Planungs- und Bewirtschaftungsbilanzen des Wasserhaushaltes für Territorien	485
14.1.	Grundsätze und Arbeitsschritte für die Aufstellung von Wasserhaushalts- bilanzen	485
14.1.1.	Allgemeine Form der Wasserhaushaltsgleichung	485
14.1.2.	Aufgabenstellung für die Wasserbilanz	485
14.1.3.	Datenanalyse	487
14.1.4.	Gebietsanalyse	487
14.1.5.	Vertikale Gliederung des Wasserhaushaltes	489
14.1.6.	Horizontale Gliederung des Wasserhaushaltes	491
14.2.	Mittlere Wasserbilanzen	492
14.3.	Aktuelle Wasserbilanzen	494
14.4.	Fehlerrechnung	496
14.5.	Algorithmen für Wasserbilanzen	497
14.6.	Beispiele für Wasserbilanzen von natürlichen und anthropogen beeinflussten hydrologischen Regionen	500
14.7.	Wasserhaushalt der DDR	511
14.7.1.	Prinzipien und Verfahren zur hydrologischen Regionalgliederung	511
14.7.1.1.	Beispiele für die genetische Methode	511
14.7.1.2.	Beispiele für die empirische Methode	513
14.7.2.	Mittlere Wasserbilanz der DDR	515

15.	Literaturverzeichnis	517
16.	Zeitschriftenverzeichnis	539
17.	Sachwörterverzeichnis	541