

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Mensch und Fließgewässer . . . . .	1
1.1.1 Flüsse als Abfallentsorger . . . . .	3
1.1.2 Flüsse als Transportwege . . . . .	4
1.1.3 Flüsse als Arbeitsmaschinen . . . . .	8
1.1.4 Vom Saprobenindex zur WRRL . . . . .	9
1.2 Die Entwicklung der Gerinnehydraulik . . . . .	10
1.2.1 Paradigmen der Gerinnehydraulik . . . . .	14
1.2.2 Hydrodynamik und hydrodynamisch-numerische Modelle . . . . .	15
1.2.3 Die Krise der Gerinnehydraulik . . . . .	15
1.3 Der Inhalt dieses Buches . . . . .	17
1.3.1 Neufundamentierung der Gerinnehydraulik . . . . .	17
1.3.2 Gliederung dieses Buches . . . . .	19
1.3.3 E-Learning-Konzepte . . . . .	20
<b>2 Wasserstand und Abfluss . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1 Pegelmessungen von Wasserständen . . . . .	23
2.1.1 Pegelmessungen . . . . .	24
2.1.2 Der Wasserstand in Fließgewässern . . . . .	26
2.1.3 Statistische Analyse von Wasserstandszeitreihen . . . . .	29
2.1.4 Weibull- und GammaVerteilung . . . . .	33
2.2 Vom Wasserstand zur Wassermenge . . . . .	34
2.3 Der Abfluss . . . . .	37
2.3.1 Schwimmermessungen . . . . .	37
2.3.2 Der Abfluss als Integral der Geschwindigkeit . . . . .	40
2.3.3 Die Hauptzahlen des Abflusses . . . . .	42
2.3.4 Die Bestimmung des HQ <sub>100</sub> . . . . .	43
2.3.5 Fallbeispiel: Der Pegel Schwabelweis . . . . .	46
2.4 Die Schlüsselkurve . . . . .	48
2.4.1 Bedingte Wahrscheinlichkeiten . . . . .	49

2.5	Die Massenbilanz für einen Gerinneabschnitt . . . . .	49
2.5.1	Benedetto Castelli und die Kontinuität des Abflusses . . . . .	49
2.5.2	Die Massenerhaltung für einen Gerinneabschnitt . . . . .	52
2.5.3	Die Wasserhaushaltsgleichung . . . . .	53
2.5.4	Die Massenbilanz bei ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilungen . . . . .	54
2.5.5	Die Abflussspende . . . . .	56
2.6	Der hydrologische Kreislauf . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Das Gefälle des Flusses . . . . .</b>	<b>61</b>
3.1	Die Fließformel von Chézy (1768) . . . . .	62
3.1.1	Der hydraulische Durchmesser . . . . .	67
3.1.2	Welcher Trapezquerschnitt hat die geringsten Verluste? . . . . .	68
3.1.3	Der Chézy-Beiwert . . . . .	69
3.1.4	Bemessung von Rechteckgerinnen . . . . .	69
3.2	Das Gefälle von Gerinnen und Flüssen . . . . .	71
3.2.1	Die Hangabtriebskraft . . . . .	72
3.2.2	Die Reibungskraft . . . . .	73
3.2.3	Vom Einzelpiegel zum Wasserspiegelgefälle . . . . .	73
3.2.4	Vom Einzelpiegel zum Wasserspiegelgefälle . . . . .	74
3.3	Die Fließformel von du Buat (1779) . . . . .	74
3.3.1	Die Morphodynamik des Flusses . . . . .	76
3.3.2	Das Konzept der Normalgeschwindigkeit (II.4) . . . . .	78
3.4	Die Mäandertheorie du Buats . . . . .	79
3.4.1	Die Strömung in einer Flusskrümmung (II.5) . . . . .	80
3.4.2	Flusskrümmungen als Mittel der Gefällereduktion? . . . . .	81
3.5	Zur Empirie der Mäander . . . . .	82
3.6	Die Rektifikation der Flüsse . . . . .	83
3.6.1	Von den Durchstichen der Serpentinen der Flüsse . . . . .	83
3.6.2	Die Rektifizierung des Oberrheins . . . . .	85
3.6.3	Die hydraulische Planung der Rektifikation . . . . .	89
3.6.4	Auswirkungen der Rektifikation . . . . .	91
3.7	Renaturierung von Rektifizierungen . . . . .	91
3.8	Zusammenfassung . . . . .	92
<b>4</b>	<b>Die Beschreibung der Rauheit . . . . .</b>	<b>93</b>
4.1	Die Gerinnekategorien von Bazin (1865) . . . . .	93
4.1.1	Schlüsselkurvenberechnung mit der Bazinschen Formel . . . . .	95
4.1.2	Auswirkungen der Flächenversiegelung . . . . .	96
4.2	Fließformel von Gauckler (1867) . . . . .	97
4.2.1	Nomogramme für die Gauckler-Formel . . . . .	98
4.2.2	Bewertung der Gauckler-Formel . . . . .	99
4.2.3	Die Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler . . . . .	100

4.2.4	Berechnung rechteckförmiger Kanäle nach Strickler . . . . .	101
4.2.5	Unterschiedliche Rauheiten auf Böschung und Sohle . . . . .	101
4.3	Die Weisbach-Formel (1855) . . . . .	103
4.4	Das Gesetz von Colebrook-White . . . . .	105
4.4.1	Moody-Diagramm und explizite Berechnungsverfahren . . . . .	106
4.4.2	Eine Colebrook-White-Funktion in MATLAB . . . . .	109
4.4.3	Fließformel nach Colebrook-White . . . . .	110
4.4.4	Bestimmung des Stricklerbeiwert aus der äquivalenten Rauheit . . . . .	110
4.4.5	Normalabflussberechnungen mit Colebrook-White . . . . .	112
4.4.6	Die Normalwassertiefe in einem Rechteckgerinne . . . . .	112
4.5	Gerinne mit geböschten Ufern (Trapezgerinne) . . . . .	113
4.5.1	Trapezprofil mit Vorland . . . . .	116
4.5.2	Das Doppeltrapezprofil . . . . .	119
4.6	Die Sohlschubspannung . . . . .	124
4.6.1	Die Schleppspannung . . . . .	125
4.6.2	Das Chezy-Gesetz . . . . .	126
4.6.3	Das Weisbach-Gesetz . . . . .	126
4.6.4	Die Bestimmung der Sohlrauheit . . . . .	127
4.6.5	Kompakte Gewässer . . . . .	128
4.7	Ausblick . . . . .	130
<b>5</b>	<b>Ungleichförmige Gerinneströmungen</b> . . . . .	133
5.1	Die Impulsbilanz für einen ruhenden See . . . . .	134
5.1.1	Die Gravitationskraft . . . . .	134
5.1.2	Druckkräfte . . . . .	134
5.2	Die Bilanzgleichungen für einen Fließgewässerabschnitt . . . . .	136
5.2.1	Die hydrostatische Druckapproximation . . . . .	137
5.2.2	Die Impulsbilanz eines ungleichförmigen Gewässerabschnitts . . . . .	139
5.3	Der Wechselsprung . . . . .	141
5.3.1	Die Impulsgleichung für den Wechselsprung . . . . .	142
5.3.2	Strömen und Schießen . . . . .	145
5.3.3	Steile und flache Gerinne . . . . .	147
5.3.4	Schwallwellen . . . . .	147
5.4	Die Bernoulligleichung der Gerinneströmung . . . . .	148
5.4.1	Das Energiehöhenlinie und das Energiengefälle . . . . .	150
5.4.2	Der gleichförmige bzw. Normalabfluss . . . . .	151
5.4.3	Die Energiehöhe an einem Punkt im Gerinne . . . . .	151
5.4.4	Der Wechselsprung in der Bernoulligleichung . . . . .	155
5.4.5	Die Bernoulligleichung mit Wechselsprung-Verlusthöhe . . . . .	156
5.4.6	Die Wechselsprunglänge . . . . .	157

5.5	Die infinitesimalisierte Massenbilanz . . . . .	159
5.6	Die Spiegelliniengleichung . . . . .	160
5.6.1	Rechteckförmige Querschnitte konstanter Breite . . . . .	161
5.6.2	Ein MATLAB-Programm zur Lösung der Spiegelliniengleichung. . . . .	162
5.6.3	Wasserspiegelentwicklung in flachem Gerinne . . . . .	165
5.6.4	Wasserspiegelentwicklung in steilem Gerinne. . . . .	166
5.7	Der Fluss als Speicherkette . . . . .	167
5.8	Zusammenfassende Folgerungen. . . . .	173
<b>6</b>	<b>Der Überfall über Wehre . . . . .</b>	<b>175</b>
6.1	Die Formel von Poleni . . . . .	177
6.1.1	Die Theorie der einfachen Bewegung . . . . .	178
6.1.2	Die Theorie der gemischten Bewegung . . . . .	179
6.1.3	Die Impulsbilanz für die gemischte Bewegung . . . . .	182
6.1.4	Die Wirkungsgeschichte der Poleniformel. . . . .	184
6.2	Die Überfalltheorie von du Buat . . . . .	185
6.2.1	Überfall ohne Impulzufluss . . . . .	186
6.2.2	Überfall mit Impulzufluss. . . . .	187
6.2.3	Wirkungsgeschichte der Formel von du Buat . . . . .	189
6.2.4	Messwehre . . . . .	189
6.3	Anwendung der Bernoulligleichung . . . . .	190
6.4	Die Impulsbilanz für die Wehrströmung . . . . .	192
6.5	Eingeengte und Schlitzwehre. . . . .	193
6.5.1	Anwendung der Ausflusstheorie von Malcherek . . . . .	194
6.5.2	Direkte Anwendung der Impulsbilanz . . . . .	195
6.5.3	Bestimmung der Überfallhöhe aus dem Abfluss . . . . .	196
6.5.4	Das Thomson-Wehr . . . . .	197
6.6	Die experimentellen Arbeiten von Bazin. . . . .	197
6.6.1	Ergebnisse für die Überfallbeiwerte. . . . .	198
6.6.2	Geschwindigkeit und Druckprofil im abgelösten Freistrahl . . . . .	198
6.6.3	Überfall mit anliegendem Strahl und weitere Experimente. . . . .	202
6.7	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	202
<b>7</b>	<b>Das Hubschütz als unterströmtes Wehr . . . . .</b>	<b>205</b>
7.1	Du Buats Theorie zur Schürze . . . . .	207
7.2	Experimentelle Untersuchungen zum Abflussbeiwert . . . . .	209
7.2.1	Die Form der Unterkante . . . . .	209
7.2.2	Die Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis . . . . .	210
7.2.3	Die Abhängigkeit von Viskosität und Reynoldszahl . . . . .	211

---

7.3	Analyse mit der Bernoulligleichung .....	213
7.3.1	Die Theorie der Vena contracta .....	213
7.3.2	Die Vena contracta und der Kontraktionsbeiwert. ....	215
7.3.3	Bewertung .....	217
7.4	Druckverteilung und Druckkraft auf die Schütztafel. ....	217
7.5	Die Impulsbilanz für die Hubschütze .....	222
7.5.1	Der Druckplan .....	223
7.5.2	Impulsbilanz bis zur Schützunterkante .....	226
7.5.3	Bestimmung der Impulsbeiwerte aus der Potentialtheorie ....	227
7.5.4	Verifikation des Ansatzes.....	229
7.5.5	Bestimmung der Wassertiefe aus dem Abfluss .....	229
7.6	Spiegellinienentwicklung um ein Schütz. ....	231
7.7	Abfluss mit Rückstau.....	232
7.8	Die geneigte Schütze .....	235
7.9	Bewertung und Ausblick .....	238
8	<b>Hydrologie des Flusseinzugsgebiets. ....</b>	241
8.1	Die Kopplung mit dem Grundwasser.....	241
8.1.1	Grundwasser und seine Bedeutung .....	241
8.1.2	Mariotte und der Kreislauf des Wassers. ....	243
8.2	Verdunstung und Niederschlag .....	248
8.2.1	Die feuchte Luft .....	249
8.2.2	Der Sättigungsdampfdruck .....	250
8.2.3	Die relative Luftfeuchte .....	251
8.2.4	Verdunstung .....	251
8.2.5	Wann kommt es zu Niederschlag?.....	252
8.2.6	Die Niederschlagshöhe .....	253
8.2.7	Niederschlagsdauern .....	254
8.2.8	Wo kommt es zu Niederschlägen?.....	255
8.2.9	Gebietsniederschlag .....	255
8.3	Der Boden als granulares Dreiphasensystem.....	257
8.3.1	Werte für die Porosität .....	259
8.3.2	Die Feststoffkonzentration.....	260
8.3.3	Wassergehalt und Luftanteil. ....	260
8.3.4	Das Oberflächenwasser .....	261
8.4	Das Darcysche Filtergesetz .....	262
8.4.1	Die Filtergeschwindigkeit .....	263
8.4.2	Die Filtergeschwindigkeit nach Darcy.....	264
8.4.3	Das erweiterte Darcygesetz .....	265
8.4.4	Die Hazen-Beziehung für die Durchlässigkeit. ....	265
8.4.5	Die Kozeny-Carman-Beziehung .....	266

8.4.6	Die Standrohrspiegelhöhe . . . . .	267
8.4.7	Das hydraulische Potential. . . . .	269
8.4.8	Die Infiltration . . . . .	269
8.4.9	Der Oberflächenabfluss . . . . .	271
8.5	Massenbilanzen für das Bodenwasser . . . . .	275
8.5.1	Die Veränderung des Grundwasserstands . . . . .	275
8.5.2	Exfiltration in ein Fließgewässer . . . . .	276
8.5.3	Von der Grundwasserneubildung zur Exfiltration . . . . .	278
8.5.4	Die stationäre Brunnenströmung . . . . .	279
8.6	Vom Niederschlag zum Abfluss . . . . .	281
8.6.1	Das Blockregenmodell. . . . .	283
8.7	Die Richards-Gleichung. . . . .	288
8.7.1	Die Brooks-Corey-Beziehung . . . . .	289
8.7.2	Lösung der Richards-Gleichung . . . . .	290
8.7.3	Die van Genuchten-Beziehungen. . . . .	292
8.8	Zusammenfassung . . . . .	293
<b>9</b>	<b>Die Saint-Venant-Gleichungen. . . . .</b>	<b>295</b>
9.1	Die infinitesimalisierte Impulsbilanz . . . . .	295
9.2	Lösung der Saint-Venantschen Gleichungen in MATLAB . . . . .	297
9.2.1	Randbedingungen. . . . .	300
9.2.2	Die Verifikation des Modells . . . . .	302
9.2.3	Die Wahl des oberstromigen Wasserstands . . . . .	304
9.3	Lokale Veränderungen der Gewässerstruktur . . . . .	305
9.3.1	Horizontale Aufweitungen und Verengungen . . . . .	305
9.3.2	Lokale Verengungen. . . . .	309
9.3.3	Lokale Rauheitsunterschiede . . . . .	311
9.3.4	Generalisierung . . . . .	312
9.4	Wehr und Schütz als oberstromige Ränder . . . . .	313
9.4.1	Das Wehr . . . . .	313
9.4.2	Das Schütz . . . . .	314
9.5	Zuflüsse und Ausleitungen. . . . .	317
9.5.1	Das Fernfeld der Vereinigung . . . . .	318
9.5.2	Die Saint-Venant-Gleichungen mit Zuflüssen . . . . .	319
9.5.3	Der Einfluss der Zstromrichtung . . . . .	321
9.5.4	Hydraulische Wirkung von Ausleitungen . . . . .	323
9.5.5	Bemessung von Sammelkanälen . . . . .	324
9.6	Rechen als lokale Verluste . . . . .	325
9.6.1	Ausführungen von Rechen. . . . .	326
9.6.2	Lokale Verluste. . . . .	328
9.6.3	Hydraulische Verluste von Rechen. . . . .	329
9.6.4	Berücksichtigung von lokalen Verlusten in den Saint-Venant-Gleichungen . . . . .	331

9.6.5	Berechnung mit der Bernoulligleichung . . . . .	332
9.6.6	Experimentelle Verlustbestimmung . . . . .	334
9.6.7	Beiwerte in Simulationsmodellen . . . . .	335
9.7	Zusammenfassung . . . . .	336
<b>10</b>	<b>Die Sicherung der Sohle . . . . .</b>	<b>337</b>
10.1	Die Stabilität der Sohlsedimente . . . . .	339
10.1.1	Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit . . . . .	340
10.1.2	Die Formel von Albert F. Shields . . . . .	341
10.1.3	Die morphologisch wirksame Sohlschubspannung . . . . .	343
10.1.4	Das Sohlstabilitätsdiagramm . . . . .	343
10.1.5	Das Grenzgefälle . . . . .	345
10.2	Stabilitätsanalyse des gegenwärtigen Zustands . . . . .	346
10.3	Sohlenbauwerke . . . . .	348
10.3.1	Abstürze . . . . .	348
10.3.2	Rampen . . . . .	349
10.3.3	Schwellen . . . . .	352
10.3.4	Bemessung einer Stützschwelle . . . . .	354
10.4	Schüttsteine . . . . .	356
10.4.1	Theoretische Vorüberlegungen . . . . .	357
10.4.2	Die Formel von Isbash (1936) . . . . .	358
10.4.3	Der Ansatz von Whittacker und Jäggi (1986) . . . . .	359
10.4.4	Step-Pool-Systeme: Palt (2001) . . . . .	359
10.4.5	Aufgelöste Rampen: Vogel (2003) . . . . .	359
10.4.6	Bemessungsbeispiel . . . . .	360
10.4.7	Rampenplanung mit MATLAB . . . . .	361
10.5	Folgerungen . . . . .	361
<b>11</b>	<b>Der Fluss als Wasserstraße . . . . .</b>	<b>365</b>
11.1	Buhnen als Einschränkungsbauwerke . . . . .	367
11.1.1	Bezeichnungen an Buhnen . . . . .	368
11.1.2	Strömungsprozesse um Buhnen . . . . .	369
11.1.3	Wasserbauliche Bemessung von Buhnen . . . . .	371
11.1.4	Auswirkungen auf die Schlüsselkurve . . . . .	373
11.1.5	Zusammenfassende Bewertung: Buhnen . . . . .	375
11.2	Die Entstehung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung . . . . .	375
11.2.1	Der Versailler Vertrag . . . . .	376
11.2.2	Der Übergang der der Wasserstraßen von den Ländern auf das Reich . . . . .	378
11.3	Die Stauregelung . . . . .	380
11.3.1	Notwendigkeit von Staustufen . . . . .	382
11.3.2	Funktionsweise der Stauregelung . . . . .	383
11.3.3	Die Staukurve . . . . .	386

11.3.4	Einfluss auf den Feststoffhaushalt . . . . .	387
11.3.5	Schmalwanddichtung und Binnenentwässerung . . . . .	389
11.3.6	Donauausbau nach der Variante A . . . . .	391
11.4	Eine keinesfalls abschließende Bewertung . . . . .	394
<b>12</b>	<b>Hochwasser . . . . .</b>	<b>397</b>
12.1	Ursachen und Phänomenologie von Hochwasser . . . . .	399
12.1.1	Die große Mississippiflut 1927 . . . . .	401
12.1.2	Das Donauhochwasser Juni 2013 . . . . .	403
12.2	Zur Abschätzung des Hochwasserabflusses . . . . .	404
12.3	Sohlstabilität und Hochwasser . . . . .	406
12.4	Die Dynamik von Hochwasserwellen . . . . .	410
12.4.1	Die Abflussganglinie . . . . .	410
12.4.2	Modellanpassung zur Simulation einer Hochwasserwelle . . . . .	411
12.4.3	Die Propagation einer Hochwasserwelle . . . . .	412
12.4.4	Die Fortschrittsgeschwindigkeit einer Hochwasserwelle . . . . .	413
12.4.5	Hochwasserganglinien . . . . .	415
12.4.6	Das Muskingum-Verfahren . . . . .	417
12.4.7	Die Vorhersage des Hochwasserstands aus dem Abfluss . . . . .	419
12.5	Hochwasserschutz . . . . .	421
12.5.1	Die Europäische Hochwasserrichtlinie . . . . .	421
12.5.2	Hochwasserschutz durch Eindeichung . . . . .	425
12.6	Geregelter Flotpolder . . . . .	426
12.6.1	Geregelter und ungeregelter Flotpolder . . . . .	427
12.6.2	Wirkung des Flotpolders . . . . .	428
12.6.3	Berücksichtigung im Saint-Venant-Modell . . . . .	430
12.6.4	Argumente für geregelte Flotpolder . . . . .	433
12.6.5	Nachteile von Flotpoldern . . . . .	433
12.7	Die Nutzung von Staustufen im Hochwasserschutz . . . . .	434
12.8	Bewertung . . . . .	435
<b>13</b>	<b>Die Grenzschichttheorie für Fließgewässer . . . . .</b>	<b>437</b>
13.1	Die Viskosität . . . . .	438
13.1.1	Die Viskosität Newtonscher Flüssigkeiten . . . . .	438
13.1.2	Beliebige Strömungsrichtungen . . . . .	440
13.2	Die Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	441
13.2.1	Die Differentialgleichung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils . . . . .	442
13.2.2	Viskose Scherspannungen . . . . .	443
13.2.3	Das laminare Geschwindigkeitsprofil . . . . .	445
13.3	Der turbulente Normalabfluss . . . . .	447
13.3.1	Das logarithmische Geschwindigkeitsprofil . . . . .	448
13.3.2	Das logarithmische Geschwindigkeitsprofil als Datenmodell . . . . .	450

---

13.3.3	Die tiefengemittelte Geschwindigkeit . . . . .	451
13.3.4	Die Fließformel für das logarithmische Geschwindigkeitsprofil . . . . .	453
13.3.5	Colebrook-White-Gesetz und logarithmisches Geschwindigkeitsprofil . . . . .	454
13.3.6	Vom Chézygesetz zum Geschwindigkeitsprofil. . . . .	455
13.3.7	Das Schubspannungsgesetz von Nikuradse . . . . .	456
13.4	Reynoldsgleichungen und turbulente Viskosität . . . . .	458
13.4.1	Reynoldsmittelung und Reynoldsspannungen. . . . .	459
13.4.2	Das Prinzip der Wirbelviskosität . . . . .	459
13.4.3	Die turbulente Gerinnegrenzschicht. . . . .	460
13.4.4	Das Mischungswegmodell . . . . .	460
13.4.5	Lösung mit der pdepe-Funktion. . . . .	464
13.4.6	Die Intensität der Turbulenz. . . . .	466
13.5	Der Einfluss der Vegetation . . . . .	467
13.6	Zusammenfassung . . . . .	470
14	<b>Die Rauheit beweglicher Sedimentsohlen</b> . . . . .	473
14.1	Das Auftreten von Riffeln und Dünen . . . . .	475
14.2	Die hydraulische Rauheit sedimentärer Sohlstrukturen. . . . .	477
14.3	Die Formrauheit von Dünen. . . . .	478
14.4	Die Formrauheit der Riffel. . . . .	481
14.4.1	Der Ansatz von Yalin und Scheuerlein. . . . .	481
14.4.2	Der Ansatz von van Rijn . . . . .	482
14.5	Die Gesamtrauheit der beweglichen Sohle . . . . .	483
14.6	Die Normalwassertiefe in Flüssen mit beweglicher Sohle. . . . .	486
14.7	Zusammenfassung . . . . .	487
15	<b>Der gegliederte Querschnitt</b> . . . . .	489
15.1	Der empirische Befund . . . . .	490
15.2	Das Geschwindigkeitsprofil über die Breite . . . . .	490
15.2.1	Die Impulsbilanz für einen Längsstreifen . . . . .	492
15.2.2	Die viskose Reibung zwischen den vertikalen Längsschichten. . . . .	492
15.2.3	Das stationäre reibungsfreie Querprofil. . . . .	494
15.2.4	Die tiefengemittelte Wirbelviskosität. . . . .	495
15.2.5	Das MATLAB-Modell zum Breitenprofils . . . . .	496
15.3	Inseln im Flussverlauf . . . . .	498
15.3.1	Leitdämme . . . . .	500
15.4	Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für natürliche Querschnitte . . . . .	501
15.4.1	Gegliedertes Gerinne ohne Vorlandbewuchs . . . . .	502
15.4.2	Gebt dem Fluss mehr Raum: Die Vorländer . . . . .	504
15.4.3	Vorland mit Bewuchs . . . . .	505

15.5	Die Breite eines Fließgewässers . . . . .	505
15.5.1	Die Breitenstruktur nach du Buat . . . . .	505
15.5.2	Empirische Regimetheorien zur Flussbreite . . . . .	507
15.6	Sohlschubspannung und Sohlneigung . . . . .	509
15.6.1	Der viskose Spannungstensor . . . . .	510
15.6.2	Der Normaleneinheitsvektor auf der Sohle . . . . .	511
15.6.3	Die Sohlschubspannung . . . . .	512
15.6.4	Die Neigung der Sohle . . . . .	514
15.6.5	Kann man die Sohlschubspannung auch direkt messen? . . . . .	515
15.6.6	Die Strömungsbelastung auf Böschungen . . . . .	515
15.7	Bewegungsbeginn an geneigten Sohlen . . . . .	518
15.7.1	Strömungsangriff normal zur Sohlneigung . . . . .	521
15.7.2	Strömungsangriff in Richtung der Sohlneigung . . . . .	521
15.7.3	MATLAB-Funktion zum Bewegungsbeginn . . . . .	522
15.7.4	Das erweiterte Sohlstabilitätsdiagramm . . . . .	523
15.7.5	Bemessung und Gestaltung von Uferböschungen . . . . .	524
15.8	Zusammenfassung . . . . .	525
<b>16</b>	<b>Der Transport homogenen Geschiebes . . . . .</b>	<b>527</b>
16.1	Experimentelle Untersuchungen zum Geschiebetransport . . . . .	527
16.2	Die Sedimenttransportkapazität . . . . .	529
16.2.1	Das Modell von DuBoys (1879) . . . . .	530
16.2.2	Die Untersuchungen von Shields (1936) . . . . .	531
16.2.3	Die Transportformel von Meyer-Peter und Müller (1948) . . . . .	532
16.2.4	Die Wirkung der turbulenten Fluktuationen: Einstein (1950) . . . . .	536
16.2.5	Das energetische Konzept von Bagnold (1966) . . . . .	540
16.2.6	Die Bewegung des Sedimentkorns . . . . .	543
16.2.7	Vergleichende Bewertung . . . . .	545
16.3	Geschiebetransport im Flussquerschnitt . . . . .	547
16.4	Die Verlandung von Stauräumen . . . . .	550
<b>17</b>	<b>Die Feststoffbilanz im Flusslängsprofil . . . . .</b>	<b>553</b>
17.1	Die Bilanzierung der Transportkapazitäten . . . . .	553
17.1.1	Die Exnergleichung für ein Gerinne . . . . .	555
17.1.2	Die Exnergleichung der Fläche . . . . .	555
17.2	Die Exner- und die Saint-Venant-Gleichungen . . . . .	557
17.2.1	Querschnittsausgleich in Aufweitungen . . . . .	559
17.2.2	Auflandungen bei Gefällereduktionen . . . . .	560
17.3	Abrasion und das Längsprofil eines Flusses . . . . .	561
17.4	Die Sedimenttransportrate . . . . .	565
17.5	Ursachen der Tiefenerosion . . . . .	567
17.6	Morphodynamische Reaktionen anthropogener Fließgewässeränderungen . . . . .	569

17.7	Kolke . . . . .	571
17.7.1	Pfeilerkolke . . . . .	571
17.7.2	Kontraktionskolke . . . . .	573
17.7.3	Weitere Bemessungsphänomene für Brückenpfeiler . . . . .	574
17.7.4	Kolke hinter über- oder unterströmten Wehren . . . . .	574
17.7.5	Maßnahmen zur Kolkreduktion . . . . .	575
17.8	Zusammenfassung . . . . .	575
<b>18</b>	<b>Kurven und Mäander . . . . .</b>	<b>577</b>
18.1	Die Impulsgleichungen der Primär- und Sekundärströmungen . . . . .	578
18.1.1	Die Kinematik der nicht-geradlinigen Bewegung . . . . .	578
18.1.2	Die Impulsgleichung der Hauptströmung . . . . .	579
18.1.3	Die Impulsgleichung der Sekundärströmung . . . . .	581
18.1.4	Die Querneigung des Wasserspiegels . . . . .	583
18.1.5	Die Quergeschwindigkeit an der Wasseroberfläche . . . . .	583
18.1.6	Das Geschwindigkeitsprofil der Sekundärströmung . . . . .	585
18.2	Die Neuverteilung der Hauptströmung . . . . .	587
18.3	Der hydraulische Widerstand einer Kurve . . . . .	588
18.3.1	Ansatz von du Buat . . . . .	589
18.3.2	Energieverlust durch Sekundärströmungen . . . . .	589
18.3.3	Energiedissipation und hydraulischer Widerstand . . . . .	590
18.3.4	Die Saint-Venant-Gleichungen mit einer Kurve . . . . .	591
18.3.5	Die hydraulische Wirkung einer Kurve . . . . .	591
18.4	Überflutungen in Kurven . . . . .	593
18.5	Zusammenfassung . . . . .	595
<b>19</b>	<b>Für eine zukünftige Wasserwirtschaftsverwaltung . . . . .</b>	<b>597</b>
19.1	Stakeholder des Flusses . . . . .	597
19.2	Wasserwirtschaftsdirektionen für Flusseinzugsgebiete . . . . .	598
19.3	Verstaatlichung von Stauhaltungen und Wasserkraftanlagen . . . . .	600
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>601</b>	
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>607</b>	