

Detlef Aigner
Gerhard Bollrich

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

1. Auflage 2015

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Allgemeines	1
1.1	Geschichtliche Entwicklung	1
1.2	Formelzeichen und Einheiten in der Hydraulik	2
1.2.1	Basisgrößen der SI-Einheiten	2
1.2.2	Symbolverzeichnis	3
1.3	Dezimale Vielfache von Einheiten	7
1.4	Griechisches und kyrillisches (russisches) Alphabet, römische Ziffern und Zahlen	7
1.5	Umrechnung von britischen und US-Einheiten in metrische Einheiten	9
1.6	Historische und nicht mehr gebräuchliche Einheiten	12
1.7	Umrechnungen wichtiger Einheiten	12
2	Mathematische Grundlagen in der Hydraulik, wichtige geometrische Werte	15
2.1	Wichtige Zahlenwerte	15
2.2	Trigonometrie	15
2.2.1	Allgemeines Dreieck	15
2.2.2	Rechtwinkliges Dreieck	15
2.2.3	Umrechnungen der Winkelfunktionen	16
2.3	Wichtige Funktionen	16
2.3.1	Quadratische Gleichung	16
2.3.2	Kubische Gleichung	16
2.3.3	Newtonsches Näherungsverfahren	17
2.3.4	Taylor-Reihe	17
2.3.5	Exponentialfunktion	18
2.4	Umrechnung von Gefälle und Böschungsneigung	18
2.5	Flächenberechnung (Auswahl)	19
2.6	Volumenberechnung (Auswahl)	22
2.7	Geometrie von Gerinne-Querschnitten mit offenem Wasserspiegel	23
2.7.1	Offene Gerinne	24
2.7.2	Genormte Kanalquerschnitte bei Vollfüllung nach DIN 4263	25
2.8	Schwerpunkt S, Flächenträgheitsmoment und Zentrifugalmoment	27
2.9	Hydraulisch günstige Fließquerschnitte	28
3	Physikalische Größen und Einheiten	33
3.1	Schwerebeschleunigung	33
3.2	Corioliskraft	34
3.3	Gezeiten	35
3.4	Eigenschaften des Wassers	37
3.4.1	Dichte	37

	Seite
3.4.2	Dichteveränderungen durch Beimengungen 39
3.4.3	Relative Raumänderung des Wassers 41
3.4.4	Dampfdruck des Wassers 41
3.4.5	Viskosität von Wasser 42
3.4.6	Volumenelastizität 43
3.4.7	Druckwellengeschwindigkeit 43
3.4.8	Oberflächenspannung und Kapillarität 46
3.5	Materialwerte weiterer Flüssigkeiten und Gase 48
3.6	Materialwerte von Rohrleitungen und Baustoffen 49
3.7	Sink-, Fall- und Steiggeschwindigkeit 50
3.7.1	Allgemeiner Ansatz..... 50
3.7.2	Sink- bzw. Absetzgeschwindigkeit von Feststoffen in Wasser 54
3.7.3	Fallgeschwindigkeit von Wassertropfen in Luft 58
3.7.4	Steiggeschwindigkeit von Luftblasen im Wasser..... 59
3.8	Druck 61
3.8.1	Definition der Druck-Einheiten 61
3.8.2	Atmosphärendruck 62
3.8.3	Absolutdruck und Bezugsdruck..... 64
3.8.4	Dampfdruck, Haltedruck und Kavitation 65
3.8.5	Druckmessung..... 67
4	Hydrostatik 69
4.1	Definitionen 69
4.2	Hydrostatische Druckkraft auf ebene Flächen 71
4.2.1	Senkrechte Seitenflächen 71
4.2.2	Konstruktive Lastaufteilung 73
4.2.3	Geneigte Seitenflächen..... 75
4.2.4	Horizontale Bodenflächen, hydrostatisches Paradoxon..... 77
4.2.5	Ebene Flächen unterhalb des Wasserspiegels 78
4.3	Zerlegung der Druckkraft in horizontale und vertikale Anteile 81
4.3.1	Geneigte Seitenflächen..... 82
4.3.2	Polygonartige Stauwand..... 83
4.3.3	Einfach gekrümmte Stauwand..... 84
4.3.4	Kreiszyylinderflächen 86
4.4	Innendruck von Behältern, Kesselformel 91
4.5	Flüssigkeitsmanometer 92
4.6	Niveauflächen 94
4.6.1	Kommunizierende Gefäße..... 95
4.6.2	Niveaufläche in gleichmäßig beschleunigten Gefäßen..... 95
4.6.3	Niveaufläche in rotierenden Behältern 96
4.6.4	Wasserspiegellage in Gerinnekrümmungen..... 98
4.7	Auftrieb 99

	Seite
4.7.1	Im Wasser eingetauchte Körper 99
4.7.2	Hydrostatischer Auftrieb auf Bauwerke 100
4.7.3	Hydrodynamischer Auftrieb auf Bauwerke 101
4.8	Schwimmen und Schwimmstabilität 102
4.8.1	Nachweis der Schwimmfähigkeit 102
4.8.2	Nachweis der Schwimmstabilität 103
4.9	Hydraulische Presse 107
5	Hydrodynamische Grundgleichungen 109
5.1	Einführung 109
5.2	Begriffe und Definitionen 110
5.3	Kontinuität 113
5.4	Allgemeine Strömungsgleichungen 115
5.5	Bernoulli-Gleichung 117
5.6	Fließwechsel 118
5.7	Wellenausbreitung 120
5.8	Flachwassergleichungen 121
5.9	Saint-Venant-Gleichungen 122
5.10	Abflussformeln 123
5.11	Impuls- und Stützkräfte 124
5.12	Ausgleichsbeiwerte 126
5.13	Filtergesetz von Darcy 127
6	Druckrohrströmung 129
6.1	Einleitung 129
6.2	Energie- und Drucklinie (Durchflussberechnung) 129
6.3	Fließarten, Geschwindigkeitsprofile und Reibungsbeiwert 133
6.3.1	Laminare Rohrströmung 133
6.3.2	Turbulente Rohrströmung 134
6.3.3	Reibungsbeiwert im turbulenten Bereich 137
6.4	Absolute und relative hydraulische Rauheit 142
6.5	Q-d-I-Tafeln zur Durchflussermittlung 143
6.6	Druckrohrsortiment nach DIN (Auswahl) 147
6.7	Nicht kreisförmige Querschnitte 156
6.8	Verkrustung und Alterung von Rohren 159
6.9	Örtliche Verluste in Rohrleitungselementen und Armaturen 161
6.9.1	Verluste durch Querschnittsänderungen 162
6.9.2	Verluste durch Richtungsänderungen 170
6.9.3	Einlaufverluste 172
6.9.4	Auslaufverluste 177
6.9.5	Vereinigungsverluste 178
6.9.6	Verzweigungsverluste 184

	Seite	
6.9.7	Integraler Verlustbeiwert der Rohrverzweigung	186
6.9.8	Verluste an Armaturen	188
6.10	Lufteinschluss und Teilfüllung	199
6.11	Wasserabzug und Wasserverteilung	201
6.11.1	Stromvereinigung	201
6.11.2	Wasserabzug mit gelochten Rohren	202
6.11.3	Stromtrennung	203
6.11.4	Wasserverteilung	203
6.12	Pumpen- und Turbinenleitungen	204
6.12.1	Pumpenleitungen	204
6.12.2	Pumpensonderform: Druckluftheber	212
6.12.3	Turbinenleitungen	216
6.12.4	Hydraulik der Pumpspeicherung	219
6.13	Hydraulische Berechnung von Rohrnetzen	222
6.13.1	Wirtschaftliche Fließgeschwindigkeit und wirtschaftlicher Durchmesser	223
6.13.2	Netzaufbau	226
6.13.3	Hydraulische Kennlinien	227
6.13.4	Berechnungsregeln	231
6.13.5	Berechnungsverfahren	231
6.14	Druckstoß	233
6.14.1	Ursachen und Phänomene	233
6.14.2	Berechnungsansätze	235
6.14.3	Druckstoßverminderung	238
7	Freispiegelströmung	241
7.1	Allgemeines, Begriffe	241
7.2	Fließformeln	244
7.2.1	Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler (GMS-Formel)	245
7.2.2	Fließformel nach Darcy und Weisbach	251
7.2.3	Einfluss der Querschnittsformen auf die Abflussberechnung	254
7.2.4	Abflusskurven	256
7.3	Abfluss in teilgefüllten, geschlossenen Leitungen	258
7.3.1	Genormte Kanalquerschnitte	258
7.3.2	Zuschlagen geschlossener Leitungen bei Teilfüllung	264
7.3.3	Abfluss in Durchlässen unter Verkehrswegen	264
7.4	Schießen und Strömen	269
7.4.1	Der kritische Fließzustand	270
7.4.2	Die Bedeutung der Froude-Zahl	276
7.4.3	Hydraulische Effekte beim Fließwechsel Strömen-Schießen	277
7.4.4	Der Wechselsprung (Hydraulic Jump)	278
7.4.5	Ermittlung der Randbedingung v_1 und h_1 am überströmten Wehr	279
7.4.6	Fließwechsel durch Verringerung des Fließquerschnittes	282

	Seite	
7.4.7	Fließwechsel durch erhöhte Rauheit und Störsteine	284
7.4.8	Fließwechsel an unterströmten Verschlüssen	285
7.5	Schubspannung und Sohlbewegung	285
7.5.1	Definition der Schubspannung	285
7.5.2	Kritische Schubspannung und kritische Geschwindigkeit	287
7.5.3	Geschiebetransport	290
7.6	Lokale Verluste	292
7.6.1	Einlaufverluste	292
7.6.2	Gerinneübergänge	293
7.6.3	Krümmungen	295
7.6.4	Einbauten (Pfeilerstau)	297
7.7	Stau- und Senkungslinien	298
7.8	Instationäre Freispiegelströmungen – Schwall- und Sunkwellen	305
7.8.1	Allgemeines	305
7.8.2	Berechnungsansatz Schwallwelle	307
7.8.3	Sunkwelle, Berechnungsansatz	308
7.8.4	Schwall und Sunk im Rechteckquerschnitt	308
7.8.5	Näherungsberechnungen	309
7.8.6	Schwall in beliebig geformten Gerinnequerschnitten	310
7.8.7	Iterative Berechnung der Sunkwellen	311
7.8.8	Verformung von Schwallwellen	312
7.8.9	Berechnungsbeispiel	314
7.8.10	Maßnahmen zum Schwallabschlag	318
7.9	Ausfluss aus Öffnungen und unter Schützen	319
7.9.1	Bodenöffnungen	320
7.9.2	Seitenöffnung	321
7.9.3	Ausfluss unter Schützen	323
7.9.4	Rückgestauter Ausfluss	327
8	Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen	331
8.1	Einleitung Überfälle	331
8.2	Überfallformel	333
8.3	Überfallbeiwert	334
8.3.1	Basiswert μ_0	334
8.3.2	Beiwert μ_1 der Zulaufgeschwindigkeit	337
8.3.3	Beiwert μ_2 der Verluste durch Strahleinschnürung und Ablösung	340
8.3.4	Einfluss des Strahldruckes – Beiwert μ_3	341
8.3.5	Der unvollkommene Überfall – Beiwert μ_4	341
8.3.6	Einfluss der schrägen Anströmung – Beiwert μ_5	342
8.3.7	Einfluss von Pfeilern und Seiteneinschnürung – Beiwert μ_6	344
8.4	Rechtecküberfall	346
8.4.1	Breitkroniger Überfall	346

	Seite	
8.4.2	Scharfkantiger Überfall	349
8.4.3	Beweglicher Überfall	351
8.4.4	Zylinderwehr	354
8.4.5	Schmalkroniger Überfall	356
8.4.6	Standardüberfall	358
8.4.7	Dachwehr	361
8.4.8	Schlauchwehr	361
8.5	Dreiecküberfall	362
8.6	Parabelüberfall	364
8.7	Kreisüberfall	364
8.8	Proportionalüberfall	366
8.9	Exponentialüberfall	367
8.10	Zusammengesetzte Messwehre	368
8.11	Streichwehr	369
8.12	Piano-Wehr	371
8.13	Tiroler Wehr	372
8.14	Heberüberfall	372
8.14.1	Vergleich Heberüberfall – normaler Überfall	372
8.14.2	Grenzbedingung Unterdruck im Heberscheitel	373
8.14.3	Arbeitszyklus eines und mehrerer Heber	374
8.14.4	Abflusssteuerung durch gestaffelte Heber	375
8.14.5	Abflusssteuerung durch Belüftung des Hebers	376
8.15	Ringförmige Überfälle	379
8.15.1	Schachtüberfall	380
8.15.2	Versturzleitung	391
8.15.3	Wirbelfallschacht	392
8.16	Sammelrinne	395
8.17	Übergangsrinnen und Schussrinnen	401
8.17.1	Wasserspiegellagenberechnung	401
8.17.2	Luftaufnahme in Schussrinnen	402
8.17.3	Stoßwellen	406
8.17.4	Krümmungseinfluss	409
8.17.5	Kavitation in Schussrinnen	409
8.17.6	Schussrinnenbelüfter	410
8.17.7	Beispiel Schussrinne	411
8.18	Treppen und Kaskaden	413
8.19	Wurfstrahl und Kolkbildung	418
8.20	Tosbecken	422
8.20.1	Formen des Wechselsprunges	422
8.20.2	Die konjugierten Wassertiefen	423
8.20.3	Der Energieverlust des einfachen Wechselsprunges	424

	Seite
8.20.4	Tosbecken..... 424
8.20.5	Tosbeckenformen..... 425
8.20.6	Beispiel Tosbeckenberechnung..... 428
8.21	Grundablass und Entnahmeeinrichtung 429
9	Wasserstrahlen 435
9.1	Wasserstrahlen in der Luft 435
9.1.1	Senkrechter Wasserstrahl in der Luft 436
9.1.2	Schräger Wasserstrahl in der Luft – Wurfstrahl 441
9.1.3	Wurfstrahl bei Hochwasserentlastungsanlagen..... 445
9.2	Wasserstrahlen im Wasser 445
9.2.1	Freistrah in unbegrenztem Raum 446
9.2.2	Umgelenkter Freistrah 447
9.2.3	Freistrah in begrenztem Raum mit freiem Wasserspiegel..... 449
9.3	Strahlausbreitung in einer Querströmung 451
10	Sicker- und Grundwasserströmungen 453
10.1	Begriffe und Definitionen 453
10.1.1	Porosität..... 453
10.1.2	Suffosion, Erosion und Kolmation..... 455
10.1.3	Durchlässigkeitsbeiwert..... 456
10.1.4	Filter und Filteraufbau 461
10.1.5	Kapillare Steighöhe..... 463
10.2	Grundwasser-Strömungsgleichungen 464
10.3	Brunnenentnahme 466
10.3.1	Ungespanntes Grundwasser 467
10.3.2	Gespanntes Grundwasser 468
10.3.3	Beispiel Brunnen 469
10.4	Strom- und Potentialliniennetz 470
10.5	Sohlwasserdruck 472
10.6	Durchströmung eines Erddammes 477
10.7	Hydraulischer Grundbruch 481
10.8	Geotextile Filter 483
10.9	Stofftransport im Grundwasser 485
	Literaturverzeichnis 487
	Stichwortverzeichnis 505