

# Inhaltsverzeichnis

Seite

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

	Seite
3.4.2 Dichteänderungen 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
<b>3.5 Materialwerte weiterer Flüssigkeiten und Gase</b> .....	<b>48</b>
<b>3.6 Materialwerte von Rohrleitungen und Baustoffen</b> .....	<b>49</b>
<b>3.7 Sink-, Fall- und Steiggeschwindigkeit</b> .....	<b>50</b>
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
<b>3.8 Druck</b> .....	<b>61</b>
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
<b>4 Hydrostatik</b> .....	<b>69</b>
<b>4.1 Definitionen</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2 Hydrostatische Druckkraft auf ebene Flächen</b> .....	<b>71</b>
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
<b>4.3 Zerlegung der Druckkraft in horizontale und vertikale Anteile</b> .....	<b>81</b>
4.3.1 Geneigte Seitenflächen .....	82
4.3.2 Polygonartige Stauwand .....	83
4.3.3 Einfach gekrümmte Stauwand .....	84
4.3.4 Kreiszylinderflächen .....	86
<b>4.4 Innendruck von Behältern, Kesselformel</b> .....	<b>91</b>
<b>4.5 Flüssigkeitsmanometer</b> .....	<b>92</b>
<b>4.6 Niveaumethoden</b> .....	<b>94</b>
4.6.1 Kommunizierende Gefäße .....	95
4.6.2 Niveaumethode in gleichmäßig beschleunigten Gefäßen .....	95
4.6.3 Niveaumethode in rotierenden Behältern .....	96
4.6.4 Wasserspiegellage in Gerinnekrümmungen .....	98
<b>4.7 Auftrieb</b> .....	<b>99</b>

	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
<b>4.8 Schwimmen und Schwimmstabilität .....</b>	<b>102</b>
4.8.1 Nachweis der Schwimmfähigkeit.....	102
4.8.2 Nachweis der Schwimmstabilität .....	103
<b>4.9 Hydraulische Presse.....</b>	<b>107</b>
<b>5 Hydrodynamische Grundgleichungen .....</b>	<b>109</b>
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
<b>6 Druckrohrströmung .....</b>	<b>129</b>
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 <i>Q-d-I</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
<b>6.9 Örtliche Verluste in Rohrleitungselementen und Armaturen .....</b>	<b>161</b>
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

6.9.7	Integraler Verlustbeiwert der Rohrverzweigung .....	186
6.9.8	Verluste an Armaturen .....	188
6.10	<b>Lufteinchluss und Teilstellung .....</b>	199
6.11	<b>Wasserabzug und Wasserverteilung .....</b>	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	<b>Pumpen- und Turbinenleitungen .....</b>	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	<b>Hydraulische Berechnung von Rohrnetzen .....</b>	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	<b>Druckstoß .....</b>	233
6.14.1	Ursachen und Phänomene .....	233
6.14.2	Berechnungsansätze .....	235
6.14.3	Druckstoßverminderung .....	238
7	<b>Freispiegelströmung .....</b>	241
7.1	<b>Allgemeines, Begriffe .....</b>	241
7.2	<b>Fließformeln .....</b>	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	<b>Abfluss in teilgefüllten, geschlossenen Leitungen .....</b>	258
7.3.1	Genormte Kanalquerschnitte .....	258
7.3.2	Zuschlägen geschlossener Leitungen bei Teilstellung .....	264
7.3.3	Abfluss in Durchlässen unter Verkehrs wegen .....	264
7.4	<b>Schießen und Strömen .....</b>	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
<b>7.5</b>	<b>Schubspannung und Sohlbewegung</b> .....	285
7.5.1	Definition der Schubspannung .....	285
7.5.2	Kritische Schubspannung und kritische Geschwindigkeit .....	287
7.5.3	Geschiebetransport .....	290
<b>7.6</b>	<b>Lokale Verluste</b> .....	292
7.6.1	Einlaufverluste .....	292
7.6.2	Gerinneübergänge .....	293
7.6.3	Krümmungen .....	295
7.6.4	Einbauten (Pfeilerstau) .....	297
<b>7.7</b>	<b>Stau- und Senkungslinien</b> .....	298
<b>7.8</b>	<b>Instationäre Freispiegelströmungen – Schwall- und Sunkwellen</b> .....	305
7.8.1	Allgemeines .....	305
7.8.2	Berechnungsansatz Schwallwelle .....	307
7.8.3	Sunkwelle, Berechnungsansatz .....	308
7.8.4	Schwäll und Sunk im Rechteckquerschnitt .....	308
7.8.5	Näherungsberechnungen .....	309
7.8.6	Schwäll 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
<b>7.9</b>	<b>Ausfluss aus Öffnungen und unter Schützen</b> .....	319
7.9.1	Bodenöffnungen .....	320
7.9.2	Seitenöffnung .....	321
7.9.3	Ausfluss unter Schützen .....	323
7.9.4	Rückgestauter Ausfluss .....	327
<b>8</b>	<b>Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen</b> .....	331
<b>8.1</b>	<b>Einleitung Überfälle</b> .....	331
<b>8.2</b>	<b>Überfallformel</b> .....	333
<b>8.3</b>	<b>Überfallbeiwert</b> .....	334
8.3.1	Basiswert $\mu_0$ .....	334
8.3.2	Beiwert $\mu_1$ der Zulaufgeschwindigkeit .....	337
8.3.3	Beiwert $\mu_2$ der Verluste durch Strahleinschnürung und Ablösung .....	340
8.3.4	Einfluss des Strahldruckes – Beiwert $\mu_3$ .....	341
8.3.5	Der unvollkommene Überfall – Beiwert $\mu_4$ .....	341
8.3.6	Einfluss der schrägen Anströmung – Beiwert $\mu_5$ .....	342
8.3.7	Einfluss von Pfeilern und Seiteneinschnürung – Beiwert $\mu_6$ .....	344
<b>8.4</b>	<b>Rechtecküberfall</b> .....	346
8.4.1	Breitkroniger Überfall .....	346

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

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