

Ralph Schröder • Ulrich Zanke

Technische Hydraulik

Kompendium für den Wasserbau

2. Auflage
mit 210 Abbildungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Hydraulik als angewandte Hydromechanik	1
1.2	Fluidbezogene hydraulische Begriffe	2
1.3	Bewegungsorientierte hydraulische Begriffe	4
2	Hydrostatische Nachweise	9
2.1	Druckverteilung	9
2.2	Druckkraft nach Richtung und Größe	10
2.3	Lage der Druckkraft	11
2.4	Ersatzflächenmethode	12
3	Hydromechanische Grundlagen	15
3.1	Allgemeine Transportbilanz	15
3.2	Spezifizierte Transportbilanz	16
3.2.1	Massentransport	16
3.2.2	Fremdstofftransport	17
3.2.3	Impulstransport	18
3.2.4	Einfluß der Turbulenz	20
4	Hydraulische Grundgleichungen	23
4.1	Kontinuitätsgleichung	23
4.2	Impulssatz	24
4.3	Radiale Druckgleichung	27
4.4	Bernoullische Gleichung	28
4.5	Allgemeiner Verlustansatz	33
5	Überfall und Ausfluß	35
5.1	Normal angeströmte Überfälle	35
5.1.1	Gerade Überfälle	35
	Vollkommener Überfall	36
	Unvollkommener Überfall	38

5.1.2	Kelchüberfälle	39
	Vollkommener Überfall 40	
	Unvollkommener Überfall 41	
5.1.3	Heberüberfälle	42
5.2	Seitliche Überfälle	44
5.3	Ausfluß unter Schützen	46
	Vollkommener Grundstrahl 47	
	Unvollkommener Grundstrahl 48	
5.4	Ausfluß aus kleinen Öffnungen	50
	Vollkommener Ausfluß 51	
	Unvollkommener Ausfluß 52	
6	Potentialströmung	53
6.1	Potentialtheoretisches Modellkonzept	53
6.2	Geschwindigkeitspotential und Laplace-Gleichung	54
6.3	Stationäre ebene Potentialströmung	56
6.3.1	Potentialnetz	56
6.3.2	Netzerstellung	57
	Grafische Methode 57	
	Analytische Ansätze 58	
	Elektrische Analogie 59	
	Numerische Verfahren 59	
6.3.3	Netzauswertung	60
	Geschwindigkeitsfeld 60	
	Druckfeld 62	
7	Grundwasserhydraulik	63
7.1	Durchströmung poröser Medien	63
7.1.1	Eigenschaften des Strömungsträgers	63
7.1.2	Widerstandsverhalten	65
7.2	Potentialtheoretische Analogie	67
7.2.1	Verallgemeinerte Darcy-Gleichung	67
7.2.2	Potentialnetzanwendungen	69
	Bauwerksunterläufigkeit 69	
	Sohlenwasserdruck 70	
	Hydraulischer Grundbruch 71	
7.3	Strömungen mit freiem Grundwasserspiegel	73
7.3.1	Aufbereitung der Kontinuitätsbedingung	73
	Volumenstrombilanz 74	
	Dupuit-Annahme 74	
	Boussinesq-Gleichung 75	
	Dupuit-Forchheimer-Gleichung 75	
7.3.2	Stationäre Strömungsfälle (Boden homogen und isotrop)	76
	Dammdurchsickerung 76	
	Abzugsgräben 76	
	Entwässerungsstollen 77	
	Brunnenformeln 78	
	Kritische Wertung 79	

7.3.3	Verallgemeinerte Dupuit-Forchheimer-Gleichung	80
7.3.4	Numerische Auswertung	81
	Quadratraster 81	
	Diskretisierung 82	
	Gleichungssystem 82	
	Weitere numerische Auswertemöglichkeiten 83	
8	Rohrhydraulik	85
8.1	Stationäre Rohrströmungen	85
8.1.1	Druck- und Energielinienverlauf	85
8.1.2	Verlusthöhenarten	86
	Örtliche Verlusthöhen 86	
	Kontinuierliche Verlusthöhen 86	
8.1.3	Nichtkreisförmige Rohrquerschnitte	87
8.2	Schubspannung und mittlere Geschwindigkeit	88
8.2.1	Verlusthöhe und Wandschubspannung	88
8.2.2	Schubspannungsverteilung	89
8.2.3	Darcy-Weisbach-Gleichung	90
8.3	Verlusthöhenberechnung	92
8.3.1	Örtliche Widerstände	92
	Einlaufverlust 93	
	Rechenverlust 93	
	Verluste durch Querschnittswechsel 94	
	Umlenkungsverlust 95	
	Abzweigverluste 96	
	Verluste durch Verschlußorgane 98	
	Verluste durch Einbauten und Nischen 99	
8.3.2	Rohrwiderstand bei laminarer Strömung	100
8.3.3	Rohrwiderstand bei turbulenter Strömung	103
	Hydraulisch glattes Widerstandsverhalten 104	
	Vollkommen rauhes Widerstandsverhalten 105	
	Übergangsverhalten bei Sandrauheit 106	
8.3.4	Prandtl-Colebrook-Gleichung	106
8.3.5	Rauheitsbestimmung	108
	Schätzverfahren 108	
	Abtastverfahren 111	
	Rohrströmungsexperiment 111	
	Asymmetrische Spaltströmung 112	
8.4	Geschwindigkeitsverteilung	114
8.4.1	Laminares Geschwindigkeitsprofil	114
8.4.2	Turbulente Geschwindigkeitsprofile	115
	Glatte Rohrwand 116	
	Rauhe Rohrwand 117	
	Vergleich mit der Spaltströmung 117	
8.5	Instationäre Rohrströmungen	118
8.5.1	Schwingungsfähige Systeme	118
	Massenschwingung 119	
	Druckwellen 120	

8.5.2	Schwingung des Wasserspiegels im Schwallschacht	121
	Reduzierte Schwingungsuntersuchung 123	
	Betriebsfall "Schließen" 124	
	Betriebsfall "Öffnen" 125	
	Betriebsfall "Teilöffnen" 125	
	Betriebsfall "Allmähliches Öffnen" 126	
	Numerische Auswertung 126	
8.5.3	Einzeldruckrohr unter Druckstoßbelastung	127
	Gleichungssystem 127	
	Linearisierte Gleichungen 130	
8.5.4	Druckstoßberechnung nach Alliévi	131
	Reglercharakteristik 132	
	Alliévische Kettengleichungen 132	
	Druckstoß-Sonderfälle 133	
	Betriebsfall "Schnellschluß" 133	
	Betriebsfall "Schnellöffnung" 134	
	Druckstöße nach beendetem Schließen 134	
	Druckstöße nach beendetem Öffnen 134	
9	Gerinnehydraulik	135
9.1	Stationäre Gerinneströmungen	135
9.1.1	Normalabfluß	135
	Dimensionslose Fließformel 138	
	Manning-Strickler-Formel 139	
	Abflußkurven 142	
	Dreieckgerinne 143	
	Teilgefülltes Rohr 143	
9.1.2	Einfluß der Querschnittsform	144
9.1.3	Ebene Strömung mit freier Oberfläche	148
	Schubspannungsverteilung 149	
	Laminare Gerinneströmung 149	
	Turbulente Gerinneströmung 150	
	Glatte Sohle 151	
	Rauhe Sohle 151	
9.1.4	Gegliederte Gerinne	152
	Gerinne mit Vorländern 152	
	Rauheitsgegliederte Gerinne 154	
	Seitenwandeinfluß beim Rechteckgerinne 155	
9.1.5	Mindestenergiehöhe und mögliche Wassertiefen	157
	Schießen 158	
	Strömen 159	
	Kritischer (Grenz-)Zustand 159	
	Sonderfall Rechteckgerinne 160	
	Grenztiefe 160	
	Grenzgeschwindigkeit 160	
	Energiehöhenminimum 160	
	Maximalabfluß 160	
9.1.6	Örtliche Verlusthöhen bei strömendem Abfluß	161
	Einlaufverlust 161	
	Erweiterungsverlust 162	
	Tauchwandverlust 163	

Gerinnebauwerke	164
Einbauten	164
Übergangsbauwerke	164
Wehranlagen	165
Wechselsprung	166
9.1.7 Aufstau	168
Aufstau bei strömendem Durchfluß	169
Aufstau bei Fließwechsel	171
9.1.8 Ungleichförmiger Abfluß in Gerinnen	173
Spiegelliniengleichung	173
Abschätzung des Spiegellinienverlaufs	175
Iterative Spiegellinienberechnung	176
<i>Methode 1, Methode 2</i>	177
<i>Methode 3, Methode 4</i>	178
Iterative Auswertung	178
Berechnungsrichtung	179
Vorarbeiten und begleitende Kontrollen	180
Diskontinuierlicher Abfluß	181
Streichwehr	183
Sammetrinne	184
Abfluß mit Lufteinmischung	185
Selbstbelüfteter Abfluß	186
Zwangselüfteter Abfluß	190
Abfluß in gekrümmten Schußbrinnen	192
9.2 Instationäre Strömungen mit freiem Wasserspiegel	194
9.2.1 Vorkommen, häufige Berechnungsfälle	194
Flutwellen	194
Schwall- und Sunkwellen	194
Einzelwellen	195
Periodische Oberflächenwellen	195
9.2.2 Instationäre Spiegellinienberechnung	195
9.2.3 Einzelwellen, Schwall und Sunk	198
9.2.4 Fortschreitende Oberflächenwellen	202
Sinusoidal-Wellen	203
Cnoidal-Wellen	206
9.2.5 Wellenbewegung unter Ufereinfluß	208
Refraktion	208
Shoaling	210
Brandung	211
Diffraktion	212
Reflexion	213
9.2.6 Bauwerksbelastung durch Wellen	215
Vertikale Wand mit stehender Welle	215
Vertikale Wand mit brechender Welle	217
Pfahlartige Bauwerke	218
9.3 Einleitungs- und Ausbreitungsvorgänge	220
9.3.1 Umweltrelevante Strömungsprobleme	220
9.3.2 Geschichtete Ausbreitung	222
Dichteströme	222
Kritische Schichtdicke	225

XII Inhaltsverzeichnis

Salzwasserkeil	226
Warmwasserkeil	226
Widerstandsdaten und Dichtewerte	227
9.3.3 Durchmischte Ausbreitung	230
Diffusion und Dispersion	230
Transportgleichungen	231
Dispersionskoeffizienten	233
Salzwasserintrusion	234
Wärmeausbreitung	236
9.4 Sedimenttransport	241
9.4.1 Ursachen, Arten, Begriffe	241
Feststoffmaterial	241
Transportarten	242
Geschiebeführende Schicht	243
Maßgebende Korngröße	243
Transportkörper	244
9.4.2 Sohlenbeanspruchung	244
Kompaktquerschnitt des Hauptgerinnes	245
Sohle des Hauptgerinnes	245
9.4.3 Transportwirksame Schubspannung	246
Reduzierte Schleppspannung	247
Betrauheit	248
Kornrauheit	252
Reduktionsfaktor	252
9.4.4 Kritische Sohlenschubspannung	254
Shields-Diagramm	255
Liu-Darstellung	258
Sinkgeschwindigkeit	259
Suspensionsbeginn	261
Stabilisierende Effekte	262
9.4.5 Geschiebetransport	263
Meyer-Peter-Formel	265
Einstein-Formel	266
Engelund-Fredsoe-Formel	267
vanRijn-Formel	268
Zanke-Formel	268
Formelvergleich	269
9.4.6 Schwebstofftransport	269
Schwebstoffverteilung	270
Referenzkonzentration	272
Transportierte Schwebstoffmasse	275
9.4.7 Gesamttransport	278
Einstein-Formel	279
Pernecker-Vollmers-Formel	280
Engelund-Hansen-Formel	280
Ackers-White-Formel	280
Formelvergleich	281
Transport fraktionsweise	282
Kennzahlenübersicht	284

9.4.8 Eintiefung und Auflandung	286
Quasi-stationäre Berechnung	288
Instationäre Berechnung	288
Diffusionsanalogie	289
Hyperbolisches Modell	293
 Tabellenverzeichnis	 XV
 Formelzeichen	 XVII
 Literaturverzeichnis	 297
 Sachverzeichnis	 303