

Ralph C. M. Schröder

# Technische Hydraulik

Kompodium für den Wasserbau

Mit 210 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
1.1	Hydraulik als angewandte Hydromechanik	1
1.2	Fluidbezogene hydraulische Begriffe	2
1.3	Bewegungsorientierte hydraulische Begriffe	4
<b>2</b>	<b>Hydrostatische Nachweise</b>	9
2.1	Druckverteilung	9
2.2	Druckkraft nach Richtung und Größe	10
2.3	Lage der Druckkraft	11
2.4	Ersatzflächenmethode	12
<b>3</b>	<b>Hydromechanische Grundlagen</b>	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
<b>4</b>	<b>Hydraulische Grundgleichungen</b>	23
4.1	Kontinuitätsgleichung	23
4.2	Impulssatz	24
4.3	Radiale Druckgleichung	27
4.4	Bernoullische Gleichung	28
4.5	Allgemeiner Verlustansatz	33
<b>5</b>	<b>Überfall und Ausfluß</b>	35
5.1	Normal angeströmte Überfälle	35
5.1.1	Gerade Überfälle	35
	Vollkommener Überfall	36
	Unvollkommener Überfall	38

VIII Inhaltsverzeichnis

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	
<b>6</b>	<b>Potentialströmung</b>	<b>53</b>
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	
<b>7</b>	<b>Grundwasserhydraulik</b>	
7.1	Durchströmung poröser Medien	
7.1.1	Eigenschaften des Strömungsträgers	
7.1.2	Widerstandsverhalten	
7.2	Potentialtheoretische Analogie	
7.2.1	Verallgemeinerte Darcy-Gleichung	
7.2.2	Potentialnetzanwendungen	
	Bauwerksunterläufigkeit 69	
	Sohlenwasserdruck 70	
	Hydraulischer Grundbruch 71	
7.3	Strömungen mit freiem Grundwasserspiegel	
7.3.1	Aufbereitung der Kontinuitätsbedingung	
	Volumenstrombilanz 74	
	Dupuit-Annahme 74	
	Boussinesq-Gleichung 75	
	Dupuit-Forchheimer-Gleichung 75	
7.3.2	Stationäre Strömungsfälle (Boden homogen und isotrop)	
	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
<b>8</b>	<b>Rohrhydraulik</b>	<b>85</b>
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 Allievi	131
	Reglercharakteristik	132
	Allievische Kettengleichungen	132
	Druckstoß-Sonderfälle	133
	Betriebsfall "Schnellschluß"	133
	Betriebsfall "Schnellöffnung"	134
	Druckstöße nach beendetem Schließen	134
	Druckstöße nach beendetem Öffnen	134
<b>9</b>	<b>Gerinnehydraulik</b>	<b>135</b>
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	
<i>Einbauten</i>	164	
<i>Übergangsbauwerke</i>	164	
<i>Wehranlagen</i>	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>	<i>M1</i>	
<i>Methode 3, Methode 4</i>	178	
<i>Iterative Auswertung</i>	178	
<i>Berechnungsrichtung</i>	179	
<i>Vorarbeiten und begleitende Kontrollen</i>	180	
Diskontinuierlicher Abfluß	181	
<i>Streichwehr</i>	183	
<i>Sammelrinne</i>	184	
Abfluß mit Lufteinmischung	185	
<i>Selbstbelüfteter Abfluß</i>	186	
<i>Zwangselüfteter Abfluß</i>	190	
Abfluß in gekrümmten Schußrinnen	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
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>XVII</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>297</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>303</b>