

Ralph Schröder • Ulrich Zanke

# Technische Hydraulik

Kompendium für den Wasserbau

2. Auflage  
mit 210 Abbildungen



Springer

# 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	Bernoulli'sche 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

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

7.3.3	Verallgemeinerte Dupuit-Forchheimer-Gleichung .....	80
7.3.4	Numerische Auswertung .....	81
	Quadratstraster 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	

## X Inhaltsverzeichnis

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	
	<i>Betriebsfall "Schnellschluß"</i> 133	
	<i>Betriebsfall "Schnellöffnung"</i> 134	
	<i>Druckstöße nach beendetem Schließen</i> 134	
	<i>Druckstöße nach beendetem Öffnen</i> 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	
	Teilgefäßtes 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	
	<i>Glatte Sohle</i> 151	
	<i>Rauhe Sohle</i> 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	
	<i>Grenztiefe</i> 160	
	<i>Grenzgeschwindigkeit</i> 160	
	<i>Energiehöhenminimum</i> 160	
	<i>Maximalabfluß</i> 160	
9.1.6	Örtliche Verlusthöhen bei strömendem Abfluß .....	161
	Einlaufverlust 161	
	Erweiterungsverlust 162	
	Tauchwandverlust 163	

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

## XII Inhaltsverzeichnis

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

<b>9.4.8 Eintiefung und Auflandung .....</b>	<b>286</b>
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>