

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 | Verlustrhöhenarten | 86 |
| | Örtliche Verlustrhöhen 86 | |
| | Kontinuierliche Verlustrhöhen 86 | |
| 8.1.3 | Nichtkreisförmige Rohrquerschnitte | 87 |
| 8.2 | Schubspannung und mittlere Geschwindigkeit | 88 |
| 8.2.1 | Verlustrhöhe und Wandschubspannung | 88 |
| 8.2.2 | Schubspannungsverteilung | 89 |
| 8.2.3 | Darcy-Weisbach-Gleichung | 90 |
| 8.3 | Verlustrhöhenberechnung | 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 |
| | <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 |
| | <i>Dreieckgerinne</i> | 143 |
| | <i>Teilgefülltes Rohr</i> | 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 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| 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 |
| | Sammelrinne | 184 |
| | Abfluß mit Lufteinmischung | 185 |
| | Selbstbelüfteter Abfluß | 186 |
| | Zwangselüfteter Abfluß | 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 |

| | | | |
|-------|--|-----|-----|
| | 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 |