

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Historischer Überblick über Grundwasser und Grundwasserleiter	1
1.2 Begriffsbeschreibung	2
1.2.1 Grundwasserhydraulik in der technischen Mechanik	2
1.2.2 Normung der Begriffe nach DIN 4049	3
1.2.3 Allgemeines Schema zur Modellierung eines materiellen Systems	4
1.3 Aspekte der Bedeutung des Grundwassers und der Grundwasserhydraulik für die Ingenieurpraxis	5
<b>2 Grundgleichungen der Grundwasserströmung</b>	<b>6</b>
2.1 Einleitung	6
2.2 Die Bewegungsgleichung	7
2.2.1 Möglichkeiten zur Entwicklung	7
2.2.2 Herleitung aus den Gleichungen der Hydromechanik	8
2.2.2.1 Beschreibung der Grundgleichungen der Hydromechanik	8
2.2.2.2 Schema für die Herleitung der Bewegungsgleichung in porösen Medien mit Hilfe der Grundgleichungen der Hydromechanik	13
2.2.3 Die Bewegungsgleichung als Erfahrungsgesetz	17
2.2.4 Bemerkungen über die Bewegungsgleichung	19
2.2.4.1 Gültigkeit der linearen Bewegungsgleichung	19
2.2.4.2 Übersicht über die unterschiedlichen Formen der Durchlässigkeit	21
2.2.4.3 Sonderformen des DARCY-Gesetzes	22
2.3 Bilanzgleichungen - Kontinuitätsgleichungen der Grundwasserströmung	24
2.3.1 Allgemeine lokale und globale Form der Kontinuitätsgleichung	24
2.3.2 Sonderformen der lokalen Kontinuitätsgleichung	25
<b>3 Anfangs- und Randwertaufgaben</b>	<b>28</b>
3.1 Allgemeine Beschreibung	28
3.2 Naturausschnitt und Idealisierung des Strömungsgebietes	28
3.3 Rand- und Anfangsbedingungen	29
<b>4 Problemstellungen mit Beispielen</b>	<b>34</b>
4.1 Allgemeines	34
4.2 1D Grundwasserströmung	35

4.2.1 Gespannter Grundwasserleiter	35
4.2.2 Grundwasserleiter mit freier Oberfläche (mit D.-F.-Annahme)	37
4.3 2D Strömungsfälle	39
4.3.1 Gespannte Grundwasserströmung	39
4.3.2 Freie Grundwasserströmung (ohne D.-F.-Annahmen)	41
<b>5 Lösungsverfahren und Beispiele zu GW-Strömungsproblemen</b>	<b>43</b>
5.1 Einleitung	43
5.1.1 Allgemeine Betrachtungen	43
5.1.2 Anmerkungen zu Lösungsverfahren	45
5.2 Analytische Lösungsverfahren mit Beispielen	47
5.2.1 1D gespannter Grundwasserleiter	47
5.2.2 1D ungespannter Grundwasserleiter mit D.-F.-Annahmen	48
5.2.3 Analytische Lösungen für 2D Strömungen	49
5.2.3.1 Potentialfunktion ( $\varphi$ )	49
5.2.3.2 Stromfunktion ( $\psi$ )	50
5.2.3.3 Anwendung der analytischen Funktionen zur Lösung von 2D Problemen	52
5.2.3.4 Beispiele analytischer Lösungen von 2D Grundwasserströmungen	54
5.3 Numerische Lösungsverfahren	59
5.3.1 Die Finite Differenzen Methode FDM	59
5.3.1.1 1D, stationäre Strömungsmodellierung für homogene, gespannte GW-Leiter	59
5.3.1.2 1D, stationäre Strömungsmodellierung für inhomogene, gespannte GW-Leiter	62
5.3.1.3 1D, stationäre Strömungsmodellierung für inhomogene, freie GW-Leiter	65
5.3.1.4 1D, instationäre Strömungsmodellierung in homogenen, freien GW-Leitern	68
5.3.1.5 Allgemeine Betrachtungen zur Modellierung stationärer 2D Grundwasserströmungen mit FDM	71
5.3.1.6 2D, stationäre Strömungsmodellierung für homogene, gespannte GW-Leiter	73
5.3.1.7 2D, stationäre Strömungsmodellierung für inhomogene, gespannte GW-Leiter	75
5.3.1.8 2D, instationäre Grundwasserströmungsmodellierung mit freier Oberfläche, horizontale Ebene, D.-F.-Annahme	76

5.3.2 Die Finite Volumen (Zellen) Methode FVM	80
5.3.2.1 1D, stationäre Strömungsmodellierung für inhomogene, gespannte GW-Leiter	80
5.3.2.2 2D, stationäre Strömungsmodellierung für homogene gespannte GW-Leiter	82
5.3.3 Die Finite Elemente Methode (FEM)	84
5.3.3.1 1D Strömungsmodellierung, inhomogener gespannter GW-Leiter	84
5.3.3.2 Grundlagen der FEM für 2D stationäre Strömungsmodellierung im gespannten, inhomogenen GW-Leiter	89
5.3.3.3 Anwendung der FEM für 2D Strömungsprobleme, gespannter inhomogener GW-Leiter	94
5.3.4 Die Randelementmethode (REM, BEM) für 2D Grundwasserströmungsprobleme	97
5.3.4.1 Allgemeine Betrachtungen	97
5.3.4.2 Die REM zur Lösung von 1D Strömungsproblemen in homogenen Grundwasserleitern	98
5.3.4.3 REM zur Lösung von 2D Strömungsproblemen in homogenen GW-Leitern	101
5.3.4.4 Anwendung der REM	103
5.4 Numerisches Berechnungsbeispiel für 1D Strömungsprobleme mit FDM, FVM, FEM	105
5.4.1 Allgemeines	105
5.4.2 Lösung mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode FDM (Fall B1)	106
5.4.3 Lösung mit Hilfe der Finiten Volumen (Zellen) Methode	108
5.4.4 Lösung mit Hilfe der Finiten Element Methode FEM	110
5.4.5 Lösung durch Integration (analytisches Verfahren)	112
5.4.6 Vergleich der Ergebnisse	113
5.5 Numerisches Berechnungsbeispiel für 2D Strömungsprobleme mit FEM	114
<b>6 Modellierung der Schadstofftransportvorgänge im Grundwasser</b>	<b>117</b>
6.1 Allgemeine Betrachtungen	117
6.2 Beschreibung und mathematische Darstellung der Transportprozesse	119
6.2.1 Allgemeine Betrachtungen über die Wechselwirkung Schadstoff - Transport-Strömung	119
6.2.2 Beschreibung und mathematische Darstellung der wichtigsten Transportprozesse	122
6.2.2.1 Konvektion (Advektion)	122
6.2.2.2 Molekulare Diffusion	123

6.2.2.3 Dispersion	124
6.2.2.4 Adsorption / Desorption	132
6.2.2.5 Abbauprozesse	134
6.2.2.6 Zusätzliche Substanzeinträge ins Aquifer	134
6.3 Grundgleichungen der Transportvorgänge im Aquifer	135
6.3.1 Allgemeine Transportgleichungen in differentieller und integraler Form	135
6.3.1.1 Zusammensetzung aller transportrelevanter Prozesse	135
6.3.1.2 Herleitung der Transportgleichung	137
6.3.1.3 Gemittelte Formen der Transportgleichung	141
6.3.1.4 Dimensionslose Form der Transportgleichung	143
6.4 Problemstellung zur Modellierung von Transportvorgängen im Aquifer	144
6.4.1 Allgemeine Betrachtung	144
6.4.2 Anfangs- und Randbedingungen	145
6.4.3 Transportproblemstellung mit Beispielen	148
6.5 Lösungsverfahren und Beispiele zu Schadstofftransportproblemen	156
6.5.1 Allgemeine Betrachtungen	156
6.5.2 Beispiele zur analytischen Lösung der Transportgleichung	157
6.5.3 Die Finite Differenzen Methode (FDM)	163
6.5.3.1 Differenzenschemata der 1D Strömung und des 1D Transports	163
6.5.3.2 Stabilitätsanalyse der Differenzenverfahren	169
6.5.3.3 Numerische Dispersion	172
6.5.4 Die Finite Volumen Methode (FVM)	173
6.5.5 Die Charakteristische Methode (CHM)	178
6.5.6 Das Random-Walk-Verfahren	181
6.5.7 Allgemeine Betrachtungen zur Anwendung unterschiedlicher Verfahren	183
<b>7 Mathematische Hilfsmittel (Kurzüberblick)</b>	<b>184</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>203</b>