

Thomas Lege Olaf Kolditz Werner Zielke

# Strömungs- und Transportmodellierung

Mit Beiträgen von Harald Kasper und Frank Häger

Mit 169 Abbildungen und 109 Tabellen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Definition des Problemfeldes</b>	<b>7</b>
2.1 Lockergesteine (Porengrundwasserleiter)	8
2.2 Festgesteine (Kluft- und Karstgrundwasserleiter)	11
2.3 Wechselwirkung zwischen Kluft und Gesteinsmatrix	14
2.4 Beispiele	14
2.4.1 Ehemalige SAD Mönchshagen/Niedersachsen	15
2.4.2 Deponien und Altlasten im Raum Schöneiche	17
<b>3 Stoffe im Grundwasser</b>	<b>19</b>
3.1 Geogener Stoffgehalt des Grundwassers	19
3.1.1 Herkunft	20
3.1.2 Stoffgehalt natürlicher Grundwässer	20
3.2 Grundwasserkontamination durch Deponiesickerwässer	23
3.2.1 Sickerwasserdynamik	24
3.2.2 Sickerwasserzusammensetzung	30
3.2.3 Geochemische Wechselwirkungen	34
<b>4 Parameter der Strömungs- und Transportvorgänge</b>	<b>37</b>
4.1 Grundwasserhydraulik	37
4.1.1 Eigenschaften des Grundwassers	37
4.1.2 Grundwasserdynamik	38
4.1.3 Gespannte und ungespannte Grundwässer	51
4.1.4 Strömungsdifferentialgleichung für den gespannten Aquifer	53
4.2 Stoffmigration im Grundwasser	58
4.2.1 Diffusion	59
4.2.2 Advektion	64
4.2.3 Dispersion	65
4.2.4 Matrixdiffusion	70
4.2.5 Retardation	79
4.2.6 Einfluß der Anisotropie auf die Schadstoffausbreitung	88
4.2.7 Transportgleichung	88
<b>5 Analytische Methoden</b>	<b>95</b>
5.1 Lösungsverfahren	96
5.2 Brunnenhydraulik	102
5.3 Dispersionsfreie Näherung	112
5.4 Dispersiver Transport	117
5.4.1 Aufgabenstellung nach Ogata u. Banks	117

5.4.2	Aufgabenstellung nach Moench (1989)	121
5.4.3	Aufgabenstellung nach Hoopes u. Harlemann (1967)	125
5.5	Dispersiver Transport in geschichteten Aquiferen	130
5.5.1	Aufgabenstellung nach Bruch u. Street (1967)	130
5.5.2	Aufgabenstellung nach Thiele u. Diersch (1986)	132
5.6	Matrixdiffusion	136
5.6.1	Aufgabenstellung nach Lauwerier (1955)	137
5.6.2	Aufgabenstellung nach Tang et al.(1981)	141
5.6.3	Aufgabenstellung nach Gringarten u. Sauty (1975)	146
<b>6</b>	<b>Numerische Methoden</b>	<b>153</b>
6.1	Finite-Elemente-Methode	156
6.2	Zeitdiskretisierung	158
6.3	Stabilität und Konsistenz diskreter Näherungsverfahren	161
6.4	Verifikation numerischer Modelle	168
6.4.1	Dispersiver Transport	168
6.4.2	Matrixdiffusion	172
6.4.3	Flächenhafter Schadstoffeintrag	175
6.4.4	Schadstoffeintrag durch einen Brunnen	180
6.5	Kalibrierung	186
<b>7</b>	<b>Leitfaden</b>	<b>193</b>
7.1	Einordnung des Problems	195
7.2	Transformation der Fragestellung	196
7.2.1	Erkundungsprobleme	197
7.2.2	Prognoseprobleme	197
7.2.3	Optimierungsprobleme	198
7.3	Anforderungen an das Modellergebnis	199
7.3.1	Räumliche Abgrenzung	199
7.3.2	Zeitlicher Bezug	199
7.3.3	Genauigkeitsanforderungen	200
7.3.4	Bemessung des Aussagegebiets	201
7.4	Beschreibung des Systems	202
7.4.1	Datenakquisition und Bewertung	202
7.4.2	Datenergänzung	206
7.5	Abstraktion - Schematisierung des Systems	208
7.5.1	Wichtige allgemeine Gesichtspunkte	208
7.5.2	Schematisierung der Deponie und ihres Einflußbereichs	209
7.6	Erstellung eines mathematischen Modells	210
7.7	Modellauswahl	212
7.8	Modellanwendung	215
7.8.1	Diskretisierung	216
7.8.2	Verifikation	218
7.8.3	Kalibrierung	220
7.8.4	Validierung	221
7.9	Standortmodell	221

<b>8</b>	<b>Exemplarische Anwendung des Leitfadens auf die ehemalige SAD Münchehagen</b>	<b>225</b>
8.1	Einordnung des Problems	226
8.2	Transformation der Fragestellung	231
8.2.1	Erkundungsproblem	232
8.2.2	Prognoseproblem	233
8.2.3	Optimierungsproblem	233
8.3	Anforderungen an das Modellergebnis	234
8.3.1	Räumliche Abgrenzung	234
8.3.2	Zeitlicher Bezug	237
8.3.3	Genauigkeitsanforderungen	240
8.4	Beschreibung des Systems	242
8.4.1	Datensammlung und Bewertung	242
8.4.2	Datenergänzung	249
8.5	Abstraktion – Schematisierung des Systems	249
8.5.1	Allgemeines - analytische Vorbetrachtungen	249
8.5.2	Abstraktion – Schematisierung des Systems mit Matrixdiffusion	254
8.6	Modellauswahl	262
8.7	Erstellung eines mathematischen Modells	266
8.7.1	Strömungsmodell	267
8.7.2	Transportmodell	268
8.7.3	Prä- und Postprozessoren	271
8.8	Modellanwendung	272
8.8.1	Verifikation	272
8.8.2	Kalibrierung: die numerische Modellierung des Versuchs Ib	272
8.8.3	Validierung: Modellierung des Experiments II	277
8.9	Standortmodell Münchehagen	282
8.9.1	Diskretisierung und Modellparameter	282
8.9.2	Standortmodell: History – Matching	290
8.9.3	Prognoserechnung I: keine Sanierungsmaßnahme	296
8.9.4	Prognoserechnung II: Entfernung des Deponiekörpers	298
8.9.5	Modell II: Variation der Kluftabstände	300
8.9.6	Modell III: Variation des Diffusionskoeffizienten	303
8.9.7	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung	304
<b>9</b>	<b>Geometriemodelle</b>	<b>309</b>
9.1	Modellbildung	310
9.1.1	Von der Natur zum Modell	310
9.1.2	Diskretisierung	311
9.2	Gitternetzgenerierung	315
9.2.1	Allgemeine Anforderungen	315
9.2.2	Klassifikation von Gitternetzen	316
9.2.3	Methoden der Gitternetzgenerierung	316
9.2.4	Delaunay – Triangulation	320
9.2.5	Transformation von Dreiecksnetzen zu Vierecksnetzen	320
9.2.6	Triangulation von Kluftsystemen	321

9.2.7	Transformation von Tetraedernetzen in Hexaedernetze	322
9.2.8	Geometrische Qualität von Gitternetzen	322
9.3	Entwickelte Netzgenerierungssoftware	325
9.4	Anwendungsbeispiele	327
9.4.1	Vierecksnetze	327
9.4.2	Sich im Raum verschneidende Kluftsysteme	329
9.5	Zusammenfassung	333
<b>10</b>	<b>Graphische Datenverarbeitung</b>	<b>335</b>
10.1	Wissenschaftliche Visualisierung	336
10.1.1	Datenaufbereitung und Datenintegrität	336
10.1.2	Fehlersuche im Modell und Steigerung der Programmpformance	337
10.1.3	Interpretation und Präsentation von Berechnungsergebnissen	337
10.2	Aufbau einer Modellierungsumgebung	338
10.2.1	Programmiersprachen der nächsten Generationen	340
10.2.2	Einsatz graphischer Entwicklungswerkzeuge	342
10.2.3	Einsatz von User – Interface – Management – Systemen	344
10.3	Hydrologisches Modellierungssystem	346
10.3.1	Aufbau	346
10.3.2	Datenerfassung und Datenhaltung	348
10.3.3	Funktionalität	349
10.3.4	Integration von Methoden zum Datenmanagement und zur Modellbildung, Simulationssteuerung und Visualisierung	350
10.3.5	Nutzen	352
10.4	Entwicklungsstand	352
10.4.1	ROCKFLOW	352
10.4.2	DALI	353
10.4.3	Application Control Environment (ACE)	354
10.5	Schlußbetrachtung	356
10.6	Beispiele	357
10.6.1	Strömungen im verschneidenden Kluftsystem (Münchehagen)	357
10.6.2	Darstellung des Felslabors Grimsel	358
Anhang A: Checkliste für Grundwasserprogramme		359
Anhang B: Tabellarischer Leitfaden		373
<b>Literatur</b>		<b>385</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>413</b>