

Technische Universität Dresden
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

SYSTEMANALYSE IN DER WASSERWIRTSCHAFT
AUFGABEN UND LÖSUNGEN

Peter-Wolfgang Gräber

Sommersemester 2010

Das vorliegende Lehrmaterial ist internes Studienmaterial für die Studiengänge der Fachrichtung Wasserwesen der TU Dresden. Das Material unterliegt den Urheberrechten und ist nur zum Gebrauch für interne Aus- und Weiterbildung innerhalb der TU Dresden gestattet. Jegliche Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Zustimmung des Verfassers zulässig.

Redaktion und Gestaltung: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Wolfgang Gräber
TU Dresden
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten

Tel.: (03501) 530029

Fax: (03501) 530022

e-mail: peter-wolfgang.graeber@tu-dresden.de

Internet: <http://www.tu-dresden.de/fghhiaa>

Redaktionsschluss: 30.11.2009

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	X
I Aufgaben und Lösungen - Mathematische Grundlagen	1
1 Algebraische Grundlagen	3
1.1 Exponential- und Logarithmus-Ausdrücke	4
1.2 Matrizen	8
1.3 Lineare Gleichungssysteme	19
2 Vektoralgebra und Analysis	81
3 Interpolationsverfahren	99
4 Optimierungsprobleme	125
5 Gewöhnliche Differentialgleichungen	127
5.1 Aufstellen von Differentialgleichungen	128
5.2 Analytische Methoden	137
5.2.1 DGL erster Ordnung	137
5.2.2 Analytische Methoden - DGL höherer Ordnung	162
5.3 Integraltransformationen	167
5.4 Numerische Methoden	213
5.4.1 Integration	213

5.4.2	Numerische Lösung von Differentialgleichungen	234
II	Aufgaben und Lösungen - Partielle Differentialgleichungen der unterirdischen Prozesse	249
6	Überblick	251
7	Horizontale Grundwasserströmungsgleichung	253
8	Analytische Lösung der Brunnenanströmung	255
9	Numerische Grundwasserströmungsmodelle	307
10	Simulationsprogrammsystem ASM	343
III	Aufgaben und Lösungen - Systemtheorie und Modellierung	349
11	Grundlagen	351
12	Modellbestimmung an Hand von Kenngrößen	353
12.1	Übertragungsfunktionen	354

Tabellenverzeichnis

5.1	Korrespondenztabel LAPLACE-Transformation	170
5.1	Korrespondenztabel - Fortsetzung	171
8.1	Brunnenfunktion $W(\sigma)$ für den Bereich $1 \cdot 10^{-12} \leq \sigma \leq 9$	263
8.2	Berechnung der Absenkung als Funktion der Zeit für $r_1 = 5\text{ m}$	266
8.3	Berechnung der Absenkung als Funktion der Zeit für $r_2 = 10\text{ m}$	266
8.4	Berechnung der Absenkung als Funktion der Zeit für $r_3 = 20\text{ m}$	267
8.5	Berechnung der Absenkung als Funktion der Zeit für $r_4 = 50\text{ m}$	267
8.6	Absenkung s in Abhängigkeit von der Zeit bei stufenförmiger Förderung und $r = 10\text{ m}$	271
8.7	Absenkung s in Abhängigkeit von der Zeit bei stufenförmiger Förderung und $r = 5\text{ m}$	272

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der Konzentrationsverteilung als Äquipotentiallinien	91
2.2	Darstellung der Äquipotentiallinien der Konzentrationsverteilung	93
2.3	Darstellung der Hydroisohypsen	95
5.1	Füllvorgang eines Restloches mit konstantem Volumenstrom	128
5.2	Füllvorgang eines Restloches mit variablem Volumenstrom	128
5.3	Gekoppelte Speicherkaskade	128
5.4	Schematische Darstellung des Grundwasserspiegels mit Blockschaltbild . .	129
5.5	Wasserstandsregelung eines Bewässerungsgrabens	129
5.6	Füllvorgang eines Restloches mit konstantem Volumenstrom	130
5.7	Füllvorgang eines Restloches mit variablem Volumenstrom	131
5.8	Gekoppelte Speicherkaskade	132
5.9	Schema der Grundwasserfließverhältnisse	134
5.10	Wasserstandsregelung eines Bewässerungsgrabens	136
5.11	Schematische Darstellung des Grundwasserspiegels	138
5.12	Füllvorgang eines Restloches	139
5.13	Abhängigkeit des Grundwasserstandes von geohydraulischen Verhältnissen	155
5.14	Grundwasserstandsänderung bei sinusförmiger Hochwasserwelle des Flusses	158
5.15	Prinzipieller Zeitverlauf der Konzentrationsänderung	159
5.16	Schematische Darstellung des Grundwasserspiegels	168
5.17	Füllvorgang eines Restloches	169

5.18 Schema der Grundwasserverhältnisse	198
5.19 Änderung des Grundwasserstandes bei sprunghafter Änderung des Flusswasserstandes	203
5.20 Grundwasserhöhe z_R gegenüber der Flusswasserspiegelhöhe h_{Fl}	208
5.21 Prinzipieller Zeitverlauf der Konzentrationsänderung	210
5.22 Grundwasserstand in Abhängigkeit vom Radius	214
5.23 Numerische Integration mit verschiedenen Verfahren und Schrittweiten . .	217
5.24 Numerische Integration mit verschiedenen Verfahren und Schrittweiten . .	220
5.25 Numerische Integration mit verschiedenen Verfahren und Schrittweiten . .	223
5.26 Entwicklung des Integrals im Intervall 1 bis 1,3 mittels der Rechteck- und Trapezformel	225
5.27 Grundwasserstand in Abhängigkeit vom Radius	232
5.28 Füllvorgang eines Restloches	235
5.29 Verlauf der Lösungsfunktion, Quantisierungsschrittweite als Parameter . . .	237
5.30 Abhängigkeit des Integrationsergebnisses von Quantisierungsschrittweite .	238
5.31 Verlauf der Lösungsfunktion, Quantisierungsschrittweite als Parameter . . .	243
5.32 Verlauf der Lösungsfunktion, Quantisierungsschrittweite als Parameter . . .	245
5.33 Abhängigkeit der Konzentration von der Zeit	246
5.34 Prinzipieller Zeitverlauf der Konzentration	247
8.1 Unendlich ausgedehnter Grundwasserleiter mit Brunnen und GWBR	256
8.2 Grundwasserleiter mit unvollkommenem Fluss, Brunnen und Baugrube . . .	257
8.3 Grundwasserleiter mit Brunnen und Baugrube, Spundwand und Fluss . . .	257
8.4 Grundwasserstand in Abhängigkeit vom Radius	258

8.5	Grundwasserleiter mit Fluss, Brunnen und Hangzufluss	259
8.6	Unendlich ausgedehnter Grundwasserleiter mit einem Förderbrunnen . . .	260
8.7	Realer Fluss mit Entnahmebrunnen (Grundwasseranreicherungsanlage) . .	261
8.8	Grundwasseranreicherungsanlage mit Brunnen und Spundwand	261
8.9	Uferfiltratanlage mit Brunnen und Fluss	262
8.10	Gespannter Grundwasserleiter mit Entnahmebrunnen und Grundwasserbe- obachtungsrohr	264
8.11	Absenkung in Abhängigkeit von der Zeit für $r = 10m$	268
8.12	Absenkung in Abhängigkeit von der Zeit innerhalb der ersten $30min$ und für $r = 10m$	268
8.13	Absenkung in abhängigkeit von der Zeit und für verschiedene Radien . . .	269
8.14	Absenkung in Abhängigkeit vom Radius und für unterschiedliche Zeiten . .	269
8.15	Förderganglinie und deren Aufteilung in einzelne Förderleistungen	273
8.16	Absenkung in Abhängigkeit von der Zeit bei stufenförmiger Förderung . .	273
8.17	Grundwasserleiter mit unvollkommenem Fluss und Brunnen	274
8.18	Detailansicht der Zusatzlängen und virtuellen Brunnen	275
8.19	Schema zur Entfernungsbestimmung der realen und der virtuellen Brunnen	276
8.20	Lage der virtuellen Brunnen bei der Begrenzung durch eine Barriere	278
8.21	Lage des virtuellen Brunnens bei einem idealen Fluss als Randbedingung .	282
8.22	Abhängigkeit des Grundwasserstandes und der Absenkung vom Hangzufluss	290
8.23	GWBR mit Förderintervall	292
8.24	RB dritter Art $\rightarrow$ Verschiebung	294
8.25	Zwei Brunnen an einem Fluss	298
8.26	Grundwasseranreicherungsanlage	300

8.27	Schematische Anordnung mit Brunnen und Spundwand	302
8.28	Grundwasserleiter mit Brunnen und Fluss	305
9.1	Geschichteter Grundwasserleiter mit stationärem Strömungsregime	308
9.2	Geschichteter Grundwasserleiter mit instationärem Strömungsregime	308
9.3	Einbau eines Tunnelbauwerkes in einem Grundwasserleiter	309
9.4	Deichbauwerk mit Kerndichtung	309
9.5	Grundwasserleiter mit Fluss und Brunnen	310
9.6	Wirkung eines Flusses und eines Hangzuflusses auf den Grundwasserleiter .	311
9.7	Quantisierter Grundwasserleiter mit stationärem Strömungsregime	312
9.8	Iterationsverhalten des Wasserstandes	317
9.9	Quantisierter Grundwasserleiter mit Speicherkapazitäten	318
9.10	Verlauf eines Absenkungsvorganges	319
9.11	Wasserstand in Abhängigkeit von Zeit und Ort	323
9.12	Schematisierung des Grundwasserleiters mit Tunneleinbau	324
9.13	Deich mit Kerndichtung und Quantisierungsschema	328
9.14	Darstellung des quantisierten Grundwasserleiters	331
9.15	Grundwasserstand nach einem Tag	334
9.16	Grundwasserleiter mit Quantisierungsschema	335
9.17	Ankopplung des Flusses über zusätzliche Widerstände	339
10.1	Grundwasserleiter mit Brunnen und Baugrube	345
10.2	Geschichteter Grundwasserleiter mit stationärem Strömungsregime	345
10.3	Geschichteter Grundwasserleiter mit instationärem Strömungsregime	346
10.4	Einbau eines Tunnelbauwerkes in einem Grundwasserleiter	346

10.5 Deichbauwerk mit Kerndichtung	346
12.1 Impulsantwort eines Säulen-Durchlaufversuches	358
12.2 Grundwasserstand in Abhängigkeit vom Radius	359
12.3 Bestimmung der Zeitkonstanten T aus dem Absenkungsverlauf	361
12.4 Absenkungsverlauf bei $\dot{V} = 0,005m^3s^{-1}$	362
12.5 Eingangssignal $\dot{V} = 0,1m^3s^{-1}$	363
12.6 Bestimmung der Zeitkonstante	363
12.7 Konzentrationsverlauf C_{r1}	367
12.8 Konzentrationsverlauf mit ausgewählten Punkten zur Parameterbestimmung	368
12.9 Konzentrationsverlauf C_{r1} mit Bestimmung der Parameter	371
12.10 Konzentrationsverlauf C_{r2} und Parameterbestimmung	372
12.11 Impulsantwort eines Säulen-Durchlaufversuches	374
12.12 Auswertung der Impulsantwort	375
12.13 Antwortsignal eines Pumpversuches	378
12.14 Temperaturverlauf des Fluss- und des Grundwassers in der Fassung	380
12.15 Impulsantwort mit Parameterbestimmung	382