

Dipl.-Ing. Jürgen Stamm, Karlsruhe

**Numerische Berechnung  
dreidimensionaler Strömungs-  
vorgänge um Grundwasser-  
Zirkulations-Brunnen zur  
In-situ-Grundwassersanierung**

Reihe **15**: Umwelttechnik

Nr. **169**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problematik . . . . .	2
1.2	Zielsetzung . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Das Sanierungsverfahren</b>	<b>9</b>
2.1	Funktionsweise der Grundwasser-Zirkulations-Brunnen . . . . .	10
2.1.1	Die Grundwasserzirkulation mit In-situ-Strippung . . . . .	10
2.1.2	Die Grundwasserzirkulation mit On-site-Behandlung . . . . .	19
2.1.3	Multiple Zirkulationsfelder . . . . .	20
2.1.4	Die wasserungesättigte Zirkulation . . . . .	22
2.1.5	Vorteile und Nachteile des Verfahrens . . . . .	24
2.2	Charakterisierung der hydraulischen Strömung . . . . .	26
2.3	Dimensionsanalyse der GZB-Strömung . . . . .	30
2.3.1	Der GZB im Aquifer ohne Grundströmung . . . . .	32
2.3.2	Der GZB im gespannten Aquifer mit Grundströmung . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Das Superpositionsmodell</b>	<b>41</b>
3.1	Überblick . . . . .	41
3.2	Mathematisch - physikalische Grundgleichungen . . . . .	42
3.3	Das numerische Modell . . . . .	45
3.3.1	Lösung der radialsymmetrischen Strömungsgleichung . . . . .	45
3.3.2	Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten am Knoten . . . . .	49
3.3.3	Ermittlung der ungesättigten Leitfähigkeit . . . . .	51
3.3.4	Superposition im 3D-Raumgitter . . . . .	58
3.3.5	Ermittlung der Trennstromflächen . . . . .	63
3.4	Vergleich mit analytischen Berechnungen . . . . .	66

---

<b>4</b>	<b>Die vertikal-rotationssymmetrische Grundwasserzirkulation</b>	<b>73</b>
4.1	Das Potential- und Stromlinienfeld . . . . .	73
4.1.1	Gespannte Grundwasserleiter . . . . .	73
4.1.2	Grundwasserleiter mit freier Oberfläche . . . . .	77
4.2	Untersuchung der Fließgeschwindigkeiten und Fließzeiten . . . . .	80
4.2.1	Das Fließgeschwindigkeitsfeld eines GZB . . . . .	80
4.2.2	Fließzeiten im Wirkungsbereich der Zirkulation . . . . .	82
4.3	Die Teilstromentnahme und -zugabe . . . . .	86
4.3.1	Dimensionsanalytische Betrachtung der Teilstromsysteme . . . . .	87
4.3.2	Vergleich des Teilstromentnahmesystems mit einer herkömmlichen Brunnenentnahme . . . . .	88
4.3.3	Bemessungsdiagramme . . . . .	91
4.4	Einfluß geschichteter Aquiferstrukturen . . . . .	93
4.4.1	Grundlagen . . . . .	94
4.4.2	Dimensionsanalyse . . . . .	98
4.4.3	Bemessungsdiagramme . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Die Grundwasserzirkulation im gespannten Aquifer mit Grundströmung</b>	<b>105</b>
5.1	Das Potential- und Stromlinienfeld . . . . .	105
5.2	Untersuchung der Fließgeschwindigkeiten und der Fließzeiten . . . . .	111
5.2.1	Betrachtung der Fließgeschwindigkeiten . . . . .	111
5.2.2	Betrachtung der Fließzeiten . . . . .	114
5.2.3	Betrachtung dreidimensionaler Isochronenflächen . . . . .	119
5.3	Die Teilstromentnahme und -zugabe . . . . .	121
5.3.1	Bemessungsdiagramm für gespannte Grundwasserleiter . . . . .	126
5.3.2	Anwendung auf eine Grundwasseraufbereitungsanlage . . . . .	126
5.4	Bemessung einer Brunnenreihe . . . . .	129
5.4.1	Laterale Anordnung . . . . .	129
5.4.2	Axiale Anordnung . . . . .	137
5.5	Einfluß geschichteter Aquiferstrukturen . . . . .	139
5.5.1	Dimensionsanalyse . . . . .	140
5.5.2	Bemessungsdiagramme . . . . .	141

<b>6</b>	<b>Modellierung dreidimensionaler Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche</b>	<b>145</b>
6.1	Mathematisch-physikalische Grundlagen . . . . .	145
6.2	Das numerische Modell . . . . .	146
6.2.1	Lösung der Bewegungsgleichung . . . . .	146
6.2.2	Die Füllungsgrad-Methode . . . . .	151
<b>7</b>	<b>Die Grundwasserzirkulation im phreatischen Aquifer mit Grundströmung</b>	<b>157</b>
7.1	Das Strömungsmodell . . . . .	157
7.1.1	Das hydraulische Fließregime . . . . .	159
7.1.2	Vergleich zwischen H0080 und SPM . . . . .	163
<b>8</b>	<b>Feldanwendung</b>	<b>165</b>
<b>9</b>	<b>Untersuchung des Stofftransports um einen GZB</b>	<b>173</b>
9.1	Berechnungsgrundlagen . . . . .	173
9.2	Vergleich der Stofftransportberechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Dispersion . . . . .	177
9.3	Sensitivitätsstudie zur vertikal-rotationssymmetrischen Stoffausbreitung um GZB-Anlagen . . . . .	181
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>191</b>
	<b>Anhang</b>	<b>195</b>
	<b>Literatur</b>	<b>201</b>