

# Heft 100 Simulation von Mehrphasen- vorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten

von Dr.-Ing.  
Hussam Sheta

**Bibliothek**

INSTITUT FÜR WASSERBAU  
UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT  
PETERSENSTR. 13, 64287 DARMSTADT  
Tel. 0 61 81 / 16 21 43 · Fax: 16 32 49

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	1
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	5
1.3	Literaturübersicht . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Mehrphasenströmung</b>	<b>10</b>
2.1	Einleitung . . . . .	10
2.2	Kapillarität . . . . .	11
2.2.1	Kapillarität bei mikroskaliger Betrachtungsweise . . . . .	11
2.2.2	Kapillarität bei mesoskaliger Betrachtungsweise (Zweiphasensystem) . . . . .	14
2.2.3	Kapillarität bei makroskaliger Betrachtungsweise (Dreiphasensystem) . . . . .	33
2.3	Relative Permeabilität . . . . .	37
2.3.1	Relative Permeabilität bei mikroskaliger Betrachtungsweise . . . . .	37
2.3.2	Relative Permeabilität bei mesoskaliger Betrachtungsweise (Zweiphasensystem) . . . . .	37
2.3.3	Relative Permeabilität bei makroskaliger Betrachtungsweise (Dreiphasensystem) . . . . .	50
2.4	Mathematisch-numerische Beschreibung der Mehrphasenströmung . . . . .	52
2.4.1	Kontinuitätsgleichung . . . . .	52
2.4.2	Fließgesetz von Darcy . . . . .	54
2.4.3	Erweiterung des Fließgesetzes für Mehrphasenströmungen . . . . .	55
2.4.4	Numerische Diskretisierung . . . . .	56

<b>3</b>	<b>Grundlage der Hysterese</b>	<b>60</b>
3.1	Hysterese auf der Mikroskala . . . . .	60
3.2	Hysterese auf der Mesoskala (Zweiphasensystem) . . . . .	63
3.2.1	Kapillardruck-Sättigungs-Hysterese . . . . .	66
3.2.2	Relative Permeabilität-Sättigungs-Hysterese . . . . .	77
3.3	Hysterese auf der Mesoskala (Dreiphasensystem) . . . . .	78
3.3.1	Kapillardruck-Sättigungs-Hysterese . . . . .	78
3.3.2	Relative Permeabilität-Sättigungs-Hysterese . . . . .	84
3.4	Entwicklung eines Hysterese-Konzeptes für das numerische Modell <i>MUFTE-UG</i> . . . . .	87
3.4.1	Zweiphasen-Modell . . . . .	87
3.4.2	Dreiphasen-Modell . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Physikalische Grundlagen zum Eindringverhalten von NAPL in hetero- genen porösen Medien</b>	<b>90</b>
4.1	Eindringbedingungen auf der Mikroskala . . . . .	90
4.2	Eindringbedingungen auf der Mesoskala . . . . .	94
4.3	Eindringbedingungen auf der Makroskala . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Verifizierung des numerischen Modells</b>	<b>100</b>
5.1	Einleitung . . . . .	100
5.2	Zweiphasenströmungen mit Gravitationseinfluß . . . . .	100
5.2.1	Analytische Lösung nach Rogers et al. . . . .	100

5.2.2	Vergleich mit numerischer Simulation . . . . .	108
5.3	Zweiphasenströmungen unter Berücksichtigung von Hysterese-Effekten . . . . .	112
5.3.1	Experiment I (Hauptdrainage- und erste Sekundärimbibitionskurve) . . . . .	112
5.3.2	Experiment II (Sekundärdrainage- und -imbibitionskurven) . . . . .	116
5.4	Dreiphasenströmungen unter Berücksichtigung von Hysterese-Effekten . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Numerische Simulation eines VEGAS-Experimentes unter Berücksichtigung von Hysterese-Effekten in der gesättigten Zone</b>	<b>127</b>
6.1	Problemstellung und Zielsetzung des Experimentes . . . . .	127
6.2	Numerische Simulation zur Vordimensionierung des Experimentes . . . . .	130
6.3	Experiment und numerische Simulation . . . . .	137
6.3.1	Experimentverlauf und -ergebnisse . . . . .	137
6.3.2	Numerische Simulation . . . . .	148
6.3.3	Effekt der Hysterese . . . . .	163
6.3.4	Zusammenfassung . . . . .	164
<b>7</b>	<b>Numerisches Experiment zu Dreiphasensystemen unter Berücksichtigung von Hysterese-Effekten</b>	<b>165</b>
7.1	Zielsetzung des Experimentes . . . . .	165
7.2	Experiment und numerische Simulation . . . . .	166
7.2.1	Modellaufbau . . . . .	166
7.2.2	Numerisches Experiment . . . . .	167
7.2.3	Numerische Ergebnisse . . . . .	172
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>180</b>