

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                    | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Stand der Forschung und Technik</b>                               | <b>5</b>  |
| 2.1      | Entwicklung der Theorie Poröser Medien . . . . .                     | 6         |
| 2.2      | Implementierung und Anwendung von Mehrphasenformulierungen . . . . . | 13        |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzung</b>                                                   | <b>17</b> |
| <b>4</b> | <b>Grundlagen</b>                                                    | <b>21</b> |
| 4.1      | Konzept der Volumenanteile . . . . .                                 | 21        |
| 4.2      | Prinzip der effektiven Spannungen . . . . .                          | 25        |
| 4.3      | Kapillarität . . . . .                                               | 29        |
| 4.4      | Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .                         | 33        |
| 4.4.1    | Brooks & Corey . . . . .                                             | 33        |
| 4.4.2    | Van Genuchten . . . . .                                              | 33        |
| 4.4.3    | Kapillardruck-Sättigungs-Kurven verschiedener Bodenarten . . . . .   | 34        |
| 4.4.4    | Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Kurve . . . . .              | 35        |
| 4.4.5    | Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .           | 35        |
| 4.5      | Strömung von Wasser und Luft . . . . .                               | 37        |
| 4.5.1    | Durchlässigkeit . . . . .                                            | 43        |
| 4.5.1.1  | Korrelation mit der Kornverteilung . . . . .                         | 43        |
| 4.5.1.2  | Abhängigkeit von der Porenzahl . . . . .                             | 44        |
| 4.5.1.3  | Abhängigkeit von der Sättigung . . . . .                             | 46        |
| 4.6      | Zug- und Scherfestigkeit teilgesättigter Böden . . . . .             | 53        |
| 4.7      | Stoffgesetze . . . . .                                               | 62        |
| 4.7.1    | Elastizität . . . . .                                                | 63        |
| 4.7.2    | Mohr-Coulomb-Plastizität . . . . .                                   | 64        |

|          |                                                                    |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.7.3    | Hypoplastizität . . . . .                                          | 65         |
| 4.8      | Herleitung des Dreiphasenmodells . . . . .                         | 69         |
| 4.8.1    | Massendichten . . . . .                                            | 69         |
| 4.8.1.1  | Fluidphasen . . . . .                                              | 69         |
| 4.8.1.2  | Feststoff . . . . .                                                | 70         |
| 4.8.2    | Massen- und Impulsbilanzen . . . . .                               | 71         |
| 4.8.3    | Finite-Elemente-Formulierung des Dreiphasenmodells . . . . .       | 74         |
| 4.8.3.1  | Feststoffphase . . . . .                                           | 75         |
| 4.8.3.2  | Fluidphasen . . . . .                                              | 76         |
| 4.8.3.3  | Gesamtgleichungssystem . . . . .                                   | 78         |
| 4.8.4    | Sonderfälle der dynamischen Dreiphasenformulierung . . . . .       | 80         |
| <b>5</b> | <b>Implementierung</b>                                             | <b>87</b>  |
| 5.1      | Elementtypen . . . . .                                             | 87         |
| 5.1.1    | Spannungs- und Dehnungszustand . . . . .                           | 87         |
| 5.1.2    | Ansatzfunktionen . . . . .                                         | 87         |
| 5.1.3    | Räumliche Integration . . . . .                                    | 91         |
| 5.2      | Integration der Bewegungsgleichung . . . . .                       | 94         |
| 5.3      | Berechnungen mit großen Verformungen . . . . .                     | 99         |
| 5.4      | Materialverhalten und -parameter . . . . .                         | 100        |
| 5.5      | Lasten, Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .                     | 101        |
| 5.6      | Visualisierung der Ergebnisse . . . . .                            | 103        |
| 5.7      | Verwendung des Elements im Kontakt . . . . .                       | 106        |
| 5.7.1    | Kontaktformulierungen in Abaqus/Standard . . . . .                 | 106        |
| 5.7.2    | Kontakt in Kombination mit benutzerdefinierten Elementen . . . . . | 107        |
| 5.7.3    | Mechanische Kontaktformulierung . . . . .                          | 108        |
| 5.8      | Parallelisierbarkeit . . . . .                                     | 110        |
| <b>6</b> | <b>Benchmarkversuche</b>                                           | <b>113</b> |
| 6.1      | Konsolidierung . . . . .                                           | 113        |
| 6.1.1    | Eindimensionale Konsolidierung . . . . .                           | 114        |
| 6.1.1.1  | Porenzahlabhängige Durchlässigkeit . . . . .                       | 123        |
| 6.1.2    | Zweidimensionale Konsolidierung . . . . .                          | 127        |
| 6.1.2.1  | Streifenfundament . . . . .                                        | 128        |
| 6.1.2.2  | Kreisfundament . . . . .                                           | 131        |

|           |                                                                        |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2       | Entwässerung einer Sandsäule . . . . .                                 | 133        |
| 6.2.1     | Simulation mit zwei Phasen . . . . .                                   | 135        |
| 6.2.2     | Simulation mit drei Phasen . . . . .                                   | 139        |
| 6.3       | Eindimensionale Wellenausbreitung in wassergesättigtem Boden . . . . . | 147        |
| 6.4       | Berechnungen mit großen Verformungen . . . . .                         | 155        |
| 6.5       | Verwendung des Elements im Kontakt . . . . .                           | 159        |
| <b>7</b>  | <b>Teilgesättigte Triaxialversuche</b>                                 | <b>163</b> |
| 7.1       | Versuchsbeschreibung . . . . .                                         | 163        |
| 7.2       | Simulation . . . . .                                                   | 164        |
| 7.3       | Ergebnisse . . . . .                                                   | 165        |
| <b>8</b>  | <b>Wellenausbreitung in teilgesättigten Böden</b>                      | <b>169</b> |
| 8.1       | Grundlagen . . . . .                                                   | 169        |
| 8.2       | Simulation . . . . .                                                   | 175        |
| 8.3       | Ergebnisse . . . . .                                                   | 177        |
| <b>9</b>  | <b>Welleninduzierte Bodenverflüssigung</b>                             | <b>183</b> |
| 9.1       | Versuchsbeschreibung . . . . .                                         | 184        |
| 9.2       | Simulation . . . . .                                                   | 185        |
| 9.3       | Ergebnisse . . . . .                                                   | 188        |
| <b>10</b> | <b>Pfahlinstallation</b>                                               | <b>191</b> |
| 10.1      | Einführung . . . . .                                                   | 191        |
| 10.2      | Simulation . . . . .                                                   | 196        |
| 10.3      | Ergebnisse . . . . .                                                   | 200        |
| 10.3.1    | Wellenausbreitung . . . . .                                            | 200        |
| 10.3.2    | Abklingen der Schwingungen . . . . .                                   | 201        |
| 10.3.3    | Porenwasserdruck . . . . .                                             | 202        |
| 10.3.4    | Spannungszustand . . . . .                                             | 206        |
| <b>11</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                    | <b>209</b> |
| 11.1      | Zusammenfassung . . . . .                                              | 209        |
| 11.2      | Ausblick . . . . .                                                     | 211        |