

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft	3
2.1	Smoothed Particle Hydrodynamics	3
2.2	Mehrphasenmodelle für Böden	5
2.3	Modellierung von Böden im Rahmen der SPH	8
2.4	Forschungsbedarf	9
3	Zielsetzung und Methodik	11
4	Physikalische Grundlagen	15
4.1	Bodenmechanik	15
4.1.1	Volumenanteile	15
4.1.2	Prinzip der effektiven Spannungen	16
4.1.3	Theorie poröser Medien	16
4.1.4	Stoffmodelle für Boden	18
4.2	Bilanzgleichungen	21
4.2.1	Massenbilanz	21
4.2.2	Impulsbilanz	22
4.3	Strömungen durch poröse Medien	22
4.3.1	Betrachtungsskalen	23
4.3.2	Fließregime	25
4.3.3	Interaktion zwischen der festen Phase und der Wasserphase	26
5	Mathematische Grundlagen der Smoothed Particle Hydrodynamics	31
5.1	Einleitung in die Methode	31
5.2	Approximierungsstrategie	31
5.2.1	Kernelapproximierung	32
5.2.2	Partikelapproximierung	34
5.3	Approximierung der Erhaltungsgleichungen	36
5.3.1	Massenbilanz	36
5.3.2	Impulsbilanz	38
5.4	Berechnung des Drucks für Fluide	39
5.5	Konvergenz und Konsistenz der Methode	41
5.6	Vorgabe von Randbedingungen	43
5.6.1	Wandpartikel	43
5.6.2	Spiegelpartikel	44

5.6.3	Rückstoßkräfte	45
5.6.4	Randintegrale	45
5.7	Code im Rahmen der Smoothed Particle Hydrodynamics	45
5.7.1	Entstehung und Entwicklung	45
5.7.2	Berechnungsablauf und Besonderheiten	46
6	Zweiphasenmodell für den wassergesättigten Sand	53
6.1	Stoffmodelle	53
6.1.1	Stoffmodelle für den Boden	53
6.1.2	Zustandsgleichung für Wasser	56
6.2	Kopplung zwischen der festen Phase und der Wasserphase	57
6.3	Randbedingungen	58
6.3.1	Feste Ränder	58
6.3.2	Inlet- und Outlet-Ränder	59
6.4	Phasenübergänge	59
6.5	Fazit	62
7	Verifizierung	65
7.1	Verifizierung der Implementierung der Stoffmodelle	65
7.1.1	Modellierung von Elementversuchen	65
7.1.2	Böschungsrutschung	70
7.2	Verifizierung des Zweiphasenmodells	74
7.2.1	Vertikale Durchströmung eines Bodenkörpers	74
7.2.2	Horizontale Durchströmung eines Bodenkörpers	77
7.3	Fazit	80
8	Anwendungsbeispiele	81
8.1	Bodensäule unter Wasser	81
8.2	Durchströmung eines Dammes	85
8.3	Wechsellast auf gesättigtem Sand	88
8.4	Eindringen eines Wasserstrahls in den gesättigten Boden	94
8.4.1	Hydraulisches Lösen von Böden	94
8.4.2	Zweidimensionale Modellierung	98
8.4.3	Dreidimensionale Modellierung	102
8.4.4	Parametervariation	103
8.4.5	Dimensionsanalyse zur Reichweite des eindringenden Fluidstrahls	109
8.4.6	Ansatz zur Berechnung der Eindringtiefe des Fluidstrahls	110
8.4.7	Rechenleistung bei seriellen und parallelen Berechnungen	116
8.5	Fazit	118
9	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	125

Anhang	135
A Notation	135
A.1 Mathematische Symbole	135
A.2 Mathematische Operatoren	135
A.3 Physikalische Größen	136
A.4 Sonstige Symbole	138
A.5 Indizes	139
B Struktur des Codes	141
C Suspensions- und Turbulenzmodell	145
D Korrekturen im SPH-Code	147
E Ergebnisse aus der dreidimensionalen Simulation des Eindringens eines Wasserstrahls in den gesättigten Boden	149