



VERÖFFENTLICHUNGEN
des Instituts für Geotechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Herausgeber: H. Konietzky

Heft 2018-4

**Diskontinuumsmechanische
Modellierung von Salzgesteinen**

von Markus Knauth

Freiberg 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Salzgestein als Diskontinuum	5
2.1	Verformungscharakteristik von Salzgesteinen	5
2.2	Mikroskopische Grundlagen	10
2.3	Fluidperkolation und Einschlussvermögen	17
2.4	Verheilung	18
3	Merkmale und Grenzen der kontinuumsmechanischen Modellierung	21
3.1	Finite-Difference-Methode	23
3.2	Grenzen der Kontinuumsmechanik	26
4	Diskontinuumsmechanische Modellierung	29
4.1	Grundidee und Berechnungsablauf der Distinct-Element Methode	29
4.2	Stoffmodelle für inter- und intrakristalline Wechselwirkungen	32
4.2.1	Elasto-visko-plastisches Stoffmodell	32
4.2.2	Adhäsives Scherreibungsmodell für Kontaktflächen	34
4.3	Voronoi-Triangulation	38
4.3.1	Mathematische Grundlagen	38
4.3.2	Voronoi-Diskretisierung beliebiger Modellgeometrien	39
4.3.3	Strukturanalyse von zwei- und dreidimensionalen Voronoi-Zerlegungen	45
5	Entwicklung einer konsistenten Parametrisierungsstrategie	49
5.1	Intra- und interkristalline Wechselwirkungen	49
5.2	Ermittlung elastischer Parameter basierend auf Schallmessungen	54
5.3	Strategie zur Ermittlung der Festigkeitsparameter	58

5.4	Mikroskopische und makroskopische Zugfestigkeit	62
6	Hydro-mechanische Beanspruchung und Perkolation	67
6.1	Darcy-Strömung und Perkolationstheorie	68
6.2	Gas- und Fluidausbreitung im Einzelschichtmodell	73
6.3	Druckgetriebene Öffnung von Fließwegen	77
7	Validierung	85
7.1	Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Prüfkörpern	85
7.1.1	Coarse-Graining-Vorstudie	85
7.1.2	Modellaufbau, Randbedingungen und Berechnungsvarianten	88
7.1.3	Berechnungsergebnisse	90
7.2	Triaxiale Druckversuche an zylindrischen Prüfkörpern	94
7.2.1	Modellaufbau, Zielstellung und Volumenmessung	94
7.2.2	Ergebnisse	95
7.2.3	Einsetzen intrakristalliner Schädigung im Nachbruchbereich	99
7.3	Pfeilermodelle	105
7.3.1	Modellaufbau, Randbedingungen und Berechnungsvarianten	105
7.3.2	Ergebnisse	107
7.4	Verheilung	109
7.5	Hydro-mechanisch gekoppelte Berechnungen	115
7.5.1	Extensionsversuche unter Fluidruckbelastung	115
7.5.2	Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung vom Spannungsfeld	117
7.5.3	Winkelabhängigkeit der Rissöffnung an Konturbereichen	118
8	Praktische Anwendungen	123
8.1	Standfestigkeit im Kammer-Pfeiler-Abbau	123
8.1.1	Aufgabenstellung	123
8.1.2	Scheibenmodell Schnitt 1	124
8.1.3	Scheibenmodell Schnitt 2	129
8.1.4	Dynamische Berechnungen	132
8.1.5	Zusammenfassung	137
8.2	Hydro-mechanische Kopplung	139

8.2.1	Grundlegende gebirgsmechanische Vorgänge bei der Gasspeicherung in Salzkavernen	140
8.2.2	Modellaufbau	143
8.2.3	Berechnungsvarianten und Betriebszyklen	144
8.2.4	Berechnungsergebnisse	145
8.2.5	Zusammenfassung	149
8.3	Thermo-hydro-mechanische Kopplung	150
8.3.1	Einführung und grundlegende Aufgabenstellung	150
8.3.2	Modellaufbau einer idealisierten flachen Lagerung	150
8.3.3	Wärmeentwicklung und Versatzmodell	152
8.3.4	Ergebnisse der thermo-hydro-mechanisch gekoppelten Berechnungen	154
8.3.5	Zusammenfassung	158
9	Optimierungsperspektiven und weitere Entwicklung	159
9.1	Einschränkungen in 3DEC & UDEC	159
9.2	Alternative Methoden	160
9.2.1	FEM/DEM	160
9.2.2	Adaptive Vernetzung	162
9.2.3	Erweiterte Finite Elemente (XFEM)	165
10	Zusammenfassung	169
11	Extended Summary	171
	Symbolverzeichnis	183
	Literaturverzeichnis	187
	Abbildungsverzeichnis	195
	Tabellenverzeichnis	204
Anhang A	Validierung - weitere Abbildungen und Daten	205
Anhang B	Anwendungen - Modellparameter und ergänzende Abbildungen	215