

Ein optimierter semi-analytischer hydromechanischer Kopplungsansatz für die geologische CO₂-Speicherung

Hydraulische Reaktivierung von Störungen



von Markus Adams

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XIX
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	3
2 Geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid	5
2.1. Beschreibung der Carbon Capture and Storage Technologie (CCS)	5
2.2. Speicherung von CO ₂ in salzwasserführenden Grundwasserleitern	7
2.2.1. Rückhaltemechanismen	8
2.2.2. Schlüsselindikatoren für die Bewertung eines potenziellen CO ₂ - Speichers	9
2.2.3. Verbreitung potenzieller Speicherstandorte in Deutschland	11
2.3. Bisherige Anwendungen von CCS	12
2.4. Diskussion und Bewertung	14
2.4.1. Leistungsfähigkeit und wirtschaftliche Perspektive	14
2.4.2. Unsicherheiten und Risiken	15
2.4.3. Risikoanalysen und aktueller Forschungsbedarf	17
3 Stratigraphie und Strukturgeologie	21
3.1. Genese von Gesteinen	21
3.2. Plattentektonik und Gebirgsbildung (Orogenese)	24
3.3. Entstehung der Sedimentgesteine des Zentraleuropäischen Beckens	29
3.3.1. Sedimente des Trias	30
3.3.2. Sedimente des Jura, der Kreide und des Känozoikums	32
3.4. Geologische Störungen	32
3.4.1. Tektonische Faktoren bei der Entstehung von Störungen	34

3.4.2. Nicht-tektonische Faktoren bei der Entstehung von Störungen	36
3.4.3. Beschaffenheit von Störungen.....	38
3.5. Zusammenfassung.....	41
4 Prozessmodellierung von geologischer CO₂-Speicherung in salzwasserführenden Formationen	43
4.1. Beschreibung der auftretenden Prozesse	43
4.2. Grundlagen der hydraulischen Prozesse	48
4.2.1. Definitionen.....	48
4.2.2. Mehrphasenfluss als thermodynamischer Prozess	49
4.2.3. Fluideigenschaften.....	51
4.2.4. Mehrphasenfluss unter teilgesättigten Bedingungen.....	52
4.2.5. Kontinuumsmechanische Grundgleichungen.....	59
4.3. Grundlagen der geomechanischen Prozesse	61
4.3.1. Theorie der effektiven Spannungen nach Terzaghi und Biot.....	62
4.3.2. Stoffgesetze	65
4.4. Thermo-hydromechanische Kopplungen von Mehrphasenfluidfluss-Simulationen	79
4.4.1. Arten der thermo-hydromechanischen Kopplung	80
4.4.2. Ansätze zur Beschreibung der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung einer Störung	83
4.5. Zusammenfassende Bewertung und aktueller Forschungsbedarf.....	84
5 Formulierung eines semi-analytischen hydromechanischen Kopplungsansatzes	87
5.1. Methodik des neuen Ansatzes.....	87
5.2. Konzeptionelle Grundannahmen	90
5.3. Formulierung des neuen Ansatzes	93
5.3.1. Verwendete Definitionen.....	93
5.3.2. Mathematische Beschreibung des neuen Ansatzes	96
5.3.3. Zugrundeliegende Hypothesen	99
5.3.4. Anwendung des neuen Ansatzes	101
5.4. Methodik zur Validierung des neuen Kopplungsansatzes.....	102
5.5. Zusammenfassung.....	102
6 Berechnungsmodelle und numerische Umsetzung	103
6.1. Gliederung	103
6.2. Beschreibung des verwendeten Programmsystems	104
6.2.1. Funktionsweise von ABAQUS.....	104
6.2.2. Validierung der hydromechanischen Funktionsweise von ABAQUS	107

6.3.	Numerische Implementierung des neuen Ansatzes in ABAQUS	110
6.4.	Beschreibung der synthetischen Modellvariationen	114
6.4.1.	Stratigraphische Beschreibung des synthetischen Basismodells und der daraus entwickelten Modellvariationen	115
6.4.2.	Beschreibung des Berechnungsausschnitts, der Diskretisierung und der Randbedingungen	121
6.4.3.	Definition der verwendeten Homogenbereiche, Bezugselemente und Referenzelemente für den semi-analytischen Kopplungsansatz.....	123
6.4.4.	Verwendete Stoffgesetze, Parametrisierung und Initialisierung des Modells	126
6.4.5.	Modellierung des Injektionsprozesses	130
7	Validierung des semi-analytischen Kopplungsansatzes für Einphasenfluidfluss durch die Störung	131
7.1.	Zielsetzung und Gliederung	131
7.2.	Gesamtübersicht, inhaltliche Zuordnung und Beschreibung der Parameterstudien	132
7.3.	Beschreibung der hydromechanischen Prozesse am Beispiel einer Modellvariation	137
7.3.1.	Ergebnisse und Diskussion	137
7.3.2.	Qualitative Verifizierung der Simulationsergebnisse	144
7.4.	Ergebnisse von Untersuchungsreihe 1 zur Ermittlung der Anwendungsgrenzen und zur Validierung der Hypothesen	146
7.4.1.	Untersuchung zum Einfluss der horizontalen Diskretisierung der Störung.....	146
7.4.2.	Ermittlung der Anwendungsgrenzen einer Basissimulation.....	149
7.4.3.	Untersuchung zur Validierung von Hypothese 1.....	154
7.4.4.	Untersuchung zur Validierung von Hypothese 2.....	160
7.4.5.	Untersuchung zur Validierung von Hypothese 3 und 4.....	162
7.5.	Diskussion der Ergebnisse von Untersuchungsreihe 1	167
7.5.1.	Untersuchung zum Einfluss der horizontalen Diskretisierung der Störung.....	167
7.5.2.	Ermittlung der Anwendungsgrenzen einer Basissimulation.....	168
7.5.3.	Untersuchungen zur Validierung der Hypothesen 1 bis 4	170
7.6.	Ergebnisse und Diskussion von Untersuchungsreihe 2 zur Validierung des semi-analytischen Kopplungsansatzes	174
7.7.	Zusammenfassung und Fazit.....	185

8 Validierung des semi-analytischen Kopplungsansatzes für Mehrphasenfluidfluss durch die Störung	187
8.1. Zielsetzung.....	187
8.2. Numerische Umsetzung und Implementierung des semi-analytischen Kopplungsansatzes.....	187
8.3. Modellbeschreibung des untersuchten synthetischen geologischen CO ₂ -Speichers.....	189
8.3.1. Beschreibung der verwendeten Modellvariation, Homogenbereiche, Bezugs- und Referenzelemente.....	189
8.3.2. Beschreibung des Berechnungsausschnitts, der räumlichen Diskretisierung und der Randbedingungen.....	190
8.3.3. Definition der verwendeten Homogenbereiche, Bezugselemente und Referenzelemente für den semi-analytischen Kopplungsansatz.....	190
8.3.4. Verwendete Stoffgesetze, Parametrisierung und Initialisierung des Modells.....	191
8.4. Simulationsdurchführung und Simulationsübersicht.....	193
8.5. Ergebnisse und Diskussion der FE-Simulationen.....	195
8.6. Zusammenfassung und Fazit.....	203
9 Zusammenfassung und Ausblick	205
Literaturverzeichnis	211
Vorveröffentlichungen	223
Anlagen	225

p