



Lars Wundram (Autor)

Langzeit-Bohrungsverschluss: Konzeptentwicklung, numerische Modellierung und feldtechnische Erprobung

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen



TU Clausthal

Langzeit-Bohrungsverschluss: Konzeptentwicklung, numerische Modellierung und feldtechnische Erprobung

Lars Wundram

Promotion an der Technischen Universität Clausthal
Arbeitsgruppe Rock Mechanics in Petroleum Engineering
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Z. Hou

Band 25



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6900>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	XIX
ABSTRACT	XXI
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 FRAGESTELLUNGEN UND ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT	3
2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	6
2.1 GRUNDLEGENDES ZUM STEINSALZ ALS GEOLOGISCHES BARRIERENGESTEIN	6
2.2 DAS FESTIGKEITSVERHALTEN VON STEINSALZ	7
2.3 DAS KRIECHVERHALTEN VON STEINSALZ	11
2.3.1 <i>Stoffmodelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Steinsalz</i>	13
2.3.1.1 Stoffmodell LUBBY2	14
2.3.1.2 Stoffmodell Hou/Lux.....	17
2.4 GRUNDLEGENDES ZUM SALZGRUS ALS BOHRUNGSVERSATZ	23
2.4.1 <i>Das mechanische Verhalten von Salzgrus</i>	24
2.4.2 <i>Das Stoffmodell CWIPP zur Beschreibung der Salzgruskompaktion</i>	28
2.5 GEOLOGISCHE GEGEBENHEITEN IM NORDDEUTSCHEN BECKEN INNERHALB DER ALTMARK-REGION	30
2.6 TIEFBOHRTECHNISCHE UND GEOLOGISCHE BEDINGUNGEN EINES NAHEZU AUSGEFÖRDERTEN ERDGASFELDES HINSICHTLICH DER ENDBEDINGUNGEN EINER CO ₂ -SPEICHERSTÄTTE UND NACHWEIS DER INTEGRITÄT VON GEOLOGISCHEN BARRIEREN	35
2.6.1 <i>Tiefbohrtechnische Aspekte</i>	35
2.6.2 <i>Geologische Bedingungen</i>	37
2.6.3 <i>Kriterien zum Nachweis der Barrierenintegrität</i>	38
2.7 VERSCHLUSSRELEVANTE UNTERSCHIEDE ZWISCHEN KONVENTIONELLEN ERDÖL-/ERDGASLAGERSTÄTTEN UND CO ₂ -SPEICHERN SOWIE VORSTELLUNG DER KORROSIONSPROBLEMATIK	42
2.8 KONVENTIONELLE BOHRUNGSVERSCHLUSSTECHNOLOGIE IN DER ERDÖL-/ERDGASTECHNIK.....	46
2.9 MULTI-BARRIERENKONZEPT.....	49
2.9.1 <i>Technische Barriere</i>	51
2.9.2 <i>Geotechnische Barriere</i>	51
2.9.3 <i>Geologische Barriere</i>	52
2.9.4 <i>Kurzzeit- und Langzeitbarrieren</i>	54
2.10 ANWENDUNGSGEBIETE VON BOHRUNGSVERSCHLUSSKONZEPTEN UND DIESBEZÜGLICHE SALZMECHANISCHE ERFAHRUNGEN	55
2.10.1 <i>Kavernenverschlüsse und Kavernensolvorgänge</i>	55
2.10.2 <i>Erdgasbohrung unter Hochdruckbedingungen</i>	59
2.10.3 <i>Bohrungsverschlussmethoden von Endlagern</i>	60



2.10.4	Verschlussmethoden von CO ₂ -Untergrundspeichern	61
2.10.5	Tiefbohrtechnische Problemstellungen im Salzgebirge	63
2.10.6	Laborative Untersuchungen zur Bohrungskonvergenz	67
3	DARSTELLUNG DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN UND ERGEBNISSE.....	69
3.1	METHODIK	69
3.2	KONZEPTENTWICKLUNG FÜR DEN LANGZEIT-BOHRUNGSVERSCHLUSS IN DER ALTMARK	70
3.3	PARAMETERBESTIMMUNG FÜR DAS STOFFMODELL CWIPP.....	80
3.4	ERSTE PARAMETERABSCHÄTZUNG FÜR DIE STOFFMODELLE LUBBY2 UND HOU/LUX	82
3.4.1	<i>Einführende Erläuterungen</i>	82
3.4.1.1	Parameterbestimmung für Steinsalz der Lokation Altmark.....	83
3.4.1.2	Parameterbestimmung für Steinsalz unter Integration der Lokation Sondershausen	86
3.4.1.3	Weiterführende Laborversuche an Steinsalzproben der Lokation Altmark	89
3.4.1.4	Bewertung und Vergleich der Ergebnisse mit dem vorherigen Parametersatz ..	92
3.5	NUMERISCHE BERECHNUNGEN IM VORFELD DES FELDVERSUCHS	93
3.5.1	<i>Ablauf der numerischen Simulation</i>	94
3.5.1.1	Primär- und Sekundärspannungsermittlung	94
3.5.1.2	Simulationsablauf	97
3.5.1.3	Bohrungsmodell für die numerische Simulation	97
3.5.1.4	Eigenentwicklung und Implementierung des Kompaktionsmodells CWIPPLUBBY2 für Salzgrus innerhalb des Simulationslaufs 1	99
3.5.2	<i>Simulationsergebnisse unter Verwendung einer Bohrlochverfüllung (Simulationslauf 1)</i>	102
3.5.2.1	Ergebnisbewertung.....	109
3.5.3	<i>Numerische Simulationen ohne Salzgrusverfüllung (Simulationslauf 2)</i>	110
3.5.4	<i>Schlussfolgerungen aus der numerischen Vorstudie im Hinblick auf den Feldversuch ..</i>	114
3.6	FELDVERSUCH	116
3.6.1	<i>Einleitende Erläuterungen</i>	116
3.6.2	<i>Erstes Workover (Phase I)</i>	120
3.6.2.1	Technischer Ablauf	120
3.6.2.2	Kalibermessung	126
3.6.2.3	CCL-Messung	131
3.6.2.4	Druck-, Temperatur- und Gamma-Ray-Messung	134
3.6.2.5	Spülungssystem	137
3.6.3	<i>Konvergenzbeobachtungsphase (Phase II)</i>	144
3.6.3.1	Durchführung und Auswertung der hydrostatischen Druckmessungen.....	144



3.6.3.2	Hydraulischer Druckversuch.....	154
3.6.3.3	Flüssigkeitsprobennahme.....	158
3.6.3.4	Feststoffprobennahme.....	159
3.6.3.5	Herleitung der Volumenkonvergenz im Feldversuch.....	165
3.6.3.6	Back-Analyse.....	170
3.6.3.7	Berechnung zum zusätzlichen Solvermögen infolge Spülungstausch.....	174
3.6.4	<i>Zweites Workover (Phase III)</i>	177
3.6.4.1	Einleitende Erläuterungen.....	177
3.6.4.2	Casing-Kollaps.....	181
3.6.4.3	Kernbohrung -1. Kernmarsch.....	183
3.6.4.4	Kernbohrung- 2. Kernmarsch.....	187
3.6.4.5	1. Kernansprache sowie visueller Befund.....	188
3.6.4.6	Bewertung der Kernbohrung sowie der visuellen Befunde.....	192
3.6.4.7	Dichtheitsnachweis des Testbohrungsverschlusses anhand eines Integritätstests	196
3.7	BEGLEITENDE NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN UND MODELLVERIFIKATION.....	204
3.8	LABORVERSUCHE AN STEINSALZBOHRKERNEN AUS DER BARRIERE.....	226
3.8.1	<i>Mineralogische Zusammensetzung einer Feststoffprobe</i>	227
3.8.2	<i>Laborative Bestimmung der Porosität im Ton- und Steinsalzanteil des Bohrkerns..</i>	228
3.8.2.1	Porosität des Steinsalzanteils.....	228
3.8.2.2	Porosität des Baryt-/Tonanteils.....	230
3.8.3	<i>Permeabilitätsmessung am Rohrschuh</i>	232
3.8.4	<i>Visueller Befund sowie Permeabilitätsmessung an einem präparierten Prüfkörper in der Triaxialzelle</i>	236
4	ZUSAMMENFASSUNG, ABSCHLIEßENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....	240
4.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE UND ERGEBNISSE AUS DER KONZEPTPLANUNG, DER NUMERIK, DES FELDVERSUCHS SOWIE DEN LABORERGEBNISSEN.....	240
4.1.1	<i>Konzeptplanung</i>	241
4.1.2	<i>Numerische Simulationen</i>	242
4.1.3	<i>Feldversuch</i>	246
4.1.4	<i>Labor Versuchsergebnisse</i>	249
4.1.5	<i>Generelle Empfehlungen</i>	250
4.2	ABSCHLIEßENDE DISKUSSION HINSICHTLICH DER INTEGRITÄTBEWERTUNG DES TESTBOHRUNGSVERSCHLUSSES.....	251
4.3	AUSBLICK AUF WEITERE WISSENSCHAFTLICHE STUDIEN DER TUC-HOU ZUM LANGZEITBOHRUNGSVERSCHLUSS SOWIE ÜBERTRAGUNG DER ERKENNTNISSE AUF ANDERE LOKATIONEN.....	255



5	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN	258
5.1	KAPITEL IN FACHBÜCHERN	258
5.2	VERÖFFENTLICHTE PUBLIKATIONEN IN FACHZEITSCHRIFTEN	258
5.3	PUBLIKATIONEN IN TAGUNGSBÄNDEN BZW. PROJEKTVERÖFFENTLICHUNGEN	258
5.4	BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN (HAUPTBETREUER: PROF. M.Z. HOU).....	259
6	LITERATURVERZEICHNIS	260
7	ANLAGEN.....	269
GESAMTSEITENZAHL:		303