

## 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 <sub>2</sub> -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 <sub>2</sub> -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

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

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	<b>BEGLEITENDE NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN UND MODELLVERIFIKATION</b> .....	204
3.8	<b>LABORVERSUCHE AN STEINSALZBOHRKERNEN AUS DER BARRIERE</b> .....	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	<b>ZUSAMMENFASSUNG, ABSCHLIEBENDE DISKUSSION UND AUSBLICK</b> .....	240
4.1	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE UND ERGEBNISSE AUS DER KONZEPTPLANUNG, DER NUMERIK, DES FELDVERSUCHS SOWIE DEN LABORERGEBNISSEN</b> .....	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>Laborversuchsergebnisse</i> .....	249
4.1.5	<i>Generelle Empfehlungen</i> .....	250
4.2	<b>ABSCHLIEBENDE DISKUSSION HINSGEHTLICH DER INTEGRITÄTSBEWERTUNG DES TESTBOHRUNGSVERSCHLUSSES</b> .....	251
4.3	<b>AUSBlick AUF WEITERE WISSENSCHAFTLICHE STUDIEN DER TUC-Hou ZUM LANGZEITBOHRUNGSVERSCHLUSS SOWIE ÜBERTRAGUNG DER ERKENNTNISSE AUF ANDERE LOKATIONEN</b> .....	255

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