



AGEnT

Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein

BGE TEC 2020-26

Autor(en)	Philipp Herold Eric Simo Hannes Räuschel Hans-Joachim Engelhardt Jürgen te Kook Bernd Pflüger Carsten Scior Axel Studeny
Datum	November 2020
Auftraggeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Förderkennzeichen	02E11718A und 02E11718B

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes
"Ausbau von Grubenbaue für ein HAW-Endlager in Tongestein"
(AGEnT)

Inhaltsverzeichnis

	Blatt	
1	Einleitung	1
2	Ausbaukonzepte	3
2.1	Aufgaben und Anforderungen an den Ausbau	3
2.2	Ausbausysteme im Bergbau	5
2.3	Ausbau von Tunneln im Tongestein	13
2.3.1	Belchentunnel	13
2.3.2	Boßlertunnel	15
2.3.3	Fazit	19
2.4	Ausbau in anderen Endlagerprojekten im Tongestein	20
2.4.1	Belgien und URL Mol	20
2.4.2	Tiefenlager Schweiz und Felslabor Mont Terri	23
2.4.3	Bure Frankreich und CIGEO	32
2.4.4	Schacht Konrad	40
2.5	Bisherige Ausbaukonzepte für HLW/SF Endlagerkonzepte	44
3	Standortmodelle und Endlagerkonzepte im Tongestein inkl. Ausbaukonzepte	51
3.1	Referenzmodell NORD	52
3.1.1	Geologie	52
3.1.2	Lösungen im Standortmodell NORD	53
3.1.3	Endlagerkonzept Bohrlochlagerung im Tongestein	55
3.2	Referenzmodell SÜD	59
3.2.1	Geologie	59
3.2.2	Lösungen im Standortmodell SÜD	60
3.2.3	Endlagerkonzept Streckenlagerung im Tongestein	62
4	Anforderungen an ein Ausbausystem	67
4.1	Regulatorische Vorgaben	67
4.1.1	Atomrechtliche Anforderungen	67
4.1.2	Bergrechtliche Randbedingungen	71
4.1.3	Normen und Richtlinien	72
4.2	Betriebliche Anforderungen	73
4.2.1	Querschnitte	73

4.2.2	Betriebszeit und Funktionsdauer	75
4.2.3	Rückholbarkeit	77
4.3	Geochemische und langzeitrelevante Aspekte	81
4.3.1	Wechselwirkungen mit Bentonit	81
4.3.2	Gasbildung und Gasdruckentwicklung durch Metallkorrosion	82
4.3.3	Mikrobielle Zersetzung und „Lebewesen“ im Endlager	90
5	Ausbaumaterialien für ein Endlager im Tongestein	93
5.1	Definition Beton	93
5.2	Weiterentwicklung von niedrig-pH-Beton (LPC)	99
5.2.1	Grundsätzliche Bereitung, Lagerung und Prüfung von Baustoffmischungen	101
5.2.2	Voruntersuchungen	102
5.2.3	Hauptuntersuchungen	103
5.2.4	Längenänderung	109
5.2.5	Überprüfung des pH-Wertes	110
5.3	Fazit der Entwicklung von LPC	111
5.4	Ausblick auf Weiterentwicklungen	112
6	Alterationsprozesse am Beton	113
6.1	Einwirkungen auf den Ausbau	113
6.2	Einsatz zementhaltiger Baustoffe	115
6.3	Alterationsprozesse am Beton	116
6.3.1	Auflöseprozesse (Leaching)	116
6.3.2	Reaktion mit Säuren	120
6.3.3	Reaktion mit Kohlensäure - Kalklösende Kohlensäure	121
6.3.4	Reaktion mit gelöstem Ammonium	127
6.3.5	Ca-Mg-Austausch	128
6.3.6	Reaktionen mit gelöstem Sulfat	130
6.3.7	Alkali-Kieselsäurereaktion (AKR)	132
6.3.8	Weitere Alterationsprozesse	133
6.3.9	Alteration organischer Bestandteile	135
6.4	Porensystem zementbasierter Baustoffe	136
6.4.1	Verhältnis zwischen Wasser- und Zementgehalt	136
6.4.2	Einfluss von Alterationsprozessen auf das Porensystem	139

6.5	Erfahrungen aus der Schachtanlage Konrad	146
6.6	Baustofftechnologischer Bewertung der Korrosionsprozesse	148
6.7	Abschließende Bewertung	150
6.8	Prognose Langzeitentwicklung	153
7	Eigenschaften und Bewertung von mächtigen Tongesteins-Schichtenfolgen	159
8	Zusammenwirkung Gebirgsdruck, Gebirgsaufbau und Ausbau	173
8.1	Empirische und analytische Betrachtungen	173
8.2	Variationsrechnungen mittels geotechnisch-numerischer Modelle	178
8.2.1	Rechteckstrecken	179
8.2.2	Bogenförmige Strecken	181
9	Grundlegende technische Lösungen für den Ausbau von Grubenbauen für ein Endlager im Tongestein	189
9.1	Kurzlebige Strecken	189
9.2	Langlebige Strecken	194
9.3	Fazit der Variationsrechnungen	214
9.4	Hydro-mechanisch gekoppelte Simulationen einer langlebigen Strecke	216
9.4.1	Modelltechnische Abbildung des Wirtsgesteins	216
9.4.2	Modelltechnische Abbildung der Hinterfüllung	216
9.4.3	Modellaufbau	218
9.4.4	Simulationsergebnisse für die unausgebaute Strecke	228
9.4.5	Auffahrung mit Ausbau	237
9.4.6	Veränderte Scherfestigkeit der kompressiblen Hinterfüllung	249
9.4.7	Fazit	258
10	Ableitung von notwendigen Entwicklungsarbeiten	260
11	Zusammenfassung	264
	Abbildungsverzeichnis	266
	Tabellenverzeichnis	280
	Quellenverzeichnis	282
	Anlage 1 – Vergleich Tongesteine	294