

Inhaltsverzeichnis

1	Fragen der Kommission	1
1.1	Themenbereich 1 (Verfahren zur sicheren Einlagerung der radioaktiven Abfälle).....	1
1.2	Themenbereich 2 (Anforderung an die geologische Beschaffenheit möglicher Bohrorte).....	9
1.3	Themenbereich 3 (Reversibilität von Entscheidungen und Rückholbarkeit)	11
1.4	Themenbereich 4 (Stand der Bohrtechnik)	13
1.5	Literatur Kapitel 1	16
2	Einleitung	17
2.1	Vorgehen.....	21
2.2	Nationale und internationale Entwicklung und Aktivitäten.....	23
2.2.1	USA.....	25
2.2.2	Brasilien	28
2.2.3	Schweden	28
2.2.4	Niederlande.....	30
2.2.5	England.....	30
2.2.6	Russland	30
2.2.7	IAEA	30
2.2.8	Fazit	31
2.3	Literatur Kapitel 2	31
3	Grundkonzept für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern	39
3.1	Sicherheitskonzept und -anforderungen	39
3.2	Exploration	43
3.3	Bohrungen.....	44
3.4	Behälter.....	45
3.5	Verrohrung	45
3.6	Bohrlochfluid (Bohrlochbetriebsfluid)	46

3.7	Bohrlochverschluss	46
3.8	Einlagerung	48
3.9	Monitoring / Überwachung	48
3.10	Schlussbemerkung	49
3.11	Literatur Kapitel 3	50
4	Stand der Bohrtechnik.....	51
4.1	Einige grundlegende Aspekte der Bohrtechnik	52
4.1.1	Notwendigkeit von Verrohrungen und ihre Aufgaben	52
4.1.2	Gefährdungspotenzial durch Hochdruckzonen, Niederdruckzonen, Verlustzonen, Kohlenwasserstoffe und andere Gase	56
4.2	Übliche Bohrtechniken und -verfahren	57
4.2.1	Rotary-Bohren	58
4.2.2	Bergbau-Bohren (Mining-Drilling)	65
4.2.3	Saugbohrverfahren	66
4.2.4	Lufthebe-Verfahren	66
4.2.5	Air-Drilling, Mist-Drilling, Foam-Drilling	67
4.3	Das Bohrloch-Design	68
4.3.1	Allgemein	68
4.3.2	Funktionen der verschiedenen Rohrtouren	70
4.3.3	Rohrauslegungsberechnungen	71
4.4	Ermittlung der Mindestanforderungen an geeignete Bohranlagen	72
4.5	Anforderungsprofil an Bohrungen für eine Eignung zur Endlagerung und Auswirkungen auf das Bohrkonzept	72
4.5.1	Nutzbarer Durchmesser	72
4.5.2	Langzeit-Stabilität	73
4.5.3	Langzeit-Dichtheit	73
4.5.4	Schlussfolgerungen	74
4.6	Ablenkung von Bohrungen	75
4.7	Erfahrungen aus Forschungsbohrungen	78
4.7.1	Fallbeispiel KTB	79
4.7.2	Erkundungs- bzw. Forschungsbohrungen in der ehemaligen DDR	83

4.7.3	Soultz-sous-Forêts	86
4.8	Bohrtechnologie für unterschiedliche Szenarien und Geologien.....	90
4.8.1	Bohrlochstabilität.....	91
4.8.2	Kristallin.....	91
4.8.3	Sedimentgesteine	98
4.8.4	Salzgesteine.....	102
4.9	Bau der Bohrung und Bohren von großen Kalibern	103
4.10	Ausbau von Bohrungen.....	109
4.11	Bohrlochverschlüsse und Abschlüsse sowie Bohrlochverfüllungen.....	113
4.12	Bohrlochmessungen	116
4.13	Vorerkundung und Überwachung	119
4.13.1	Vor Beginn der Bohrarbeiten.....	120
4.13.2	Beim Abteufen der Explorationsbohrung(en)	120
4.13.3	Nach dem Abteufen der Explorationsbohrungen	121
4.13.4	Beim Abteufen der Lagerbohrungen: Logging in großkalibrigen Bohrlöchern	122
4.13.5	Nach dem Abteufen der Lagerbohrungen	125
4.13.6	Bei der Einlagerung.....	125
4.13.7	Nachbetriebsphase	125
4.13.8	Monitoring / Überwachung des Bohrlochverschlusses.....	126
4.14	Bohrlochabstand	128
4.15	Kostenabschätzung.....	130
4.16	Ausblick und geschätzte Kosten für ein Großbohrloch	132
4.17	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	133
4.18	Literatur Kapitel 4	135
5	Verfahren zur sicheren Einlagerung.....	143
5.1	Behälter	143
5.1.1	Anforderungen an die Abfallbehälter.....	143
5.1.2	Behälterauslegung	145
5.1.3	Konzeption des Abfallbehälters DBC-R (Deep Borehole Container – Retrievable).....	150

5.1.4	Variantenvergleich	155
5.2	Sicheres Einbringen von Behältern und Gerätschaften bis in 5.000 m Tiefe	159
5.2.1	Technik zur Einlagerung von Behältern	159
5.2.2	Technisches Einlagerungskonzept für DBC-R	163
5.2.3	Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus technischer Sicht	165
5.2.4	Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus kerntechnischer/radiologischer Sicht	166
5.3	Literatur Kapitel 5	167
6	Geomechanik und Stabilität.....	169
6.1	Einleitung	169
6.2	Definitionen zum Spannungstensor	170
6.3	Spannungsbeiträge und Spannungsmuster	172
6.4	Spannungsindikatoren	176
6.5	World Stress Map Projekt	177
6.6	Modellierung des 3D Spannungszustandes.....	182
6.7	Kritische Spannungszustände.....	184
6.8	Stabilität von Untertagebauwerken	187
6.9	Spannungszustand um Untertageöffnung (Tunnel, Bergwerk, Bohrung)	191
6.10	Fazit	196
6.11	Literatur Kapitel 6	197
7	Reversibilität von Entscheidungen	203
7.1	Rückholbarkeit –Verständnis im vorliegenden Projekt.....	203
7.2	Bergung –Verständnis im vorliegenden Projekt	204
7.3	Welche Situationen sind vorstellbar, die eine Rückholung oder Bergung erzwingen könnten?	204
7.3.1	Zwingende Gründe.....	204
7.3.2	Weitere mögliche Gründe	205
7.4	Technische Optionen der Rückholung und Bergung.....	205
7.4.1	Konventionelles „Fangen“	205

7.4.2	Übertragung der Fangmöglichkeit auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R	208
7.4.3	Gefahren und Risiken während Fangarbeiten.....	208
7.4.4	Übertragung der Risikobewertung von Fangarbeiten auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R	210
7.5	Konzept zur Rückholbarkeit bei der tiefen Bohrlochlagerung	210
7.6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	214
7.7	Fazit	214
7.8	Literatur Kapitel 7	215
8	Risiken-Szenarien	217
8.1	Störfälle während der Einlagerungsphase mit Radionuklidfreisetzung ...	217
8.2	Radionuklidfreisetzung bei erwarteter Entwicklung.....	224
8.3	Kritikalität.....	227
8.4	Vulkanismus.....	229
8.5	Hochwasser	232
8.6	Erdbeben.....	233
8.6.1	Seismizität.....	233
8.6.2	Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzung	237
8.7	Vergletscherung	239
8.7.1	Kaltzeitliche Rinnen.....	240
8.7.2	Spannungsänderungen durch das Auftreten und Verschwinden von Gletscherbedeckungen.	241
8.8	Randbedingungen für die Störfallbetrachtungen mit Radionuklidfreisetzungen.....	246
8.8.1	Bohrlochcharakteristik.....	246
8.8.2	Abfall	248
8.8.3	Zu erwartende Prozesse während und nach der Einlagerung	255
8.8.4	Radionuklidmobilisierung	257
8.9	Literatur Kapitel 8	261

9	Erfüllung der Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien	275
9.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich für ein Grundkonzept zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern	275
9.1.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	275
9.2	Geowissenschaftliche Kriterien zur Standortauswahl	281
9.2.1	Ausschlusskriterien	281
9.2.2	Mindestanforderungen	281
9.2.3	Abwägungskriterien.....	282
9.3	Sicherheitsanforderungen des BMU	289
9.3.1	Schutzziele	289
9.3.2	Optimierungsziele	291
9.3.3	Nachweise.....	292
9.3.4	Einzelnachweise	293
9.3.5	Langzeitsicherheit	294
9.3.6	Sicherheitsmanagement und Dokumentation	295
9.4	Reversibilität / Rückholbarkeit / Bergbarkeit.....	295
9.5	Betriebssicherheit (radiologisch)	296
9.6	Langzeitsicherheit (radiologisch).....	297
9.7	Literatur Kapitel 9	299
10	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	301
10.1	Grundkonzept.....	301
10.2	Bohrtechnologie und Verschlüsse.....	301
10.3	Behälter.....	302
10.4	Einlagerungsverfahren / Rückholung	302
10.5	Bergbarkeit / Bergung	303
10.6	Sicherheitsbetrachtungen / Sicherheitsuntersuchungen	303
	Abbildungsverzeichnis	305
	Tabellenverzeichnis.....	315