

Tiefe Bohrlöcher

**Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 52**



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

Tiefe Bohrlöcher

Bracke, Guido (GRS)
Charlier, Frank (NSE)
Geckeis, Horst (KIT-INE)
Harms, Ulrich (GFZ)
Heidbach, Oliver (GFZ)
Kienzler, Bernhard (KIT-INE)
Liebscher, Axel (GFZ)
Müller, Birgit (KIT-AGW)
Prevedel, Bernhard (GFZ)
Röckel, Thomas (Piewak & Partner)
Schilling, Frank (KIT-AGW)
Sperber, Axel (IDEAS)

Mit Unterstützung von

Reich, Matthias (TU Freiberg)
Röhlig, Klaus-Jürgen (TU Clausthal)

Februar 2016

Auftrags-Nr.: 565 000

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag der AG 3 der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

1 Executive Summary

Auftrag

Im Dezember 2015 wurde die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH von der AG3 der „Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe“ mit der Erstellung eines Gutachtens zu „Tiefen Bohrlöchern“ beauftragt. Die GRS beteiligte an der Erstellung des Gutachtens das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit dem Institut für Nukleare Entsorgung (INE) und dem Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ), die international nuclear safety engineering gmbh (NSE) und das Ingenieurbüro Piewak & Partner GmbH. Eine interne Durchsicht und Kommentierung von Teilen des Gutachtens erfolgte durch Prof. K.-J. Röhlig, TU Clausthal, und Prof. M. Reich, TU Freiberg.

Die Ausschreibung des Gutachtens umfasste vier Themenbereiche:

1. Verfahren zur sicheren Einlagerung der radioaktiven Abfälle
2. Anforderungen an die geologische Beschaffenheit möglicher Bohrorte
3. Reversibilität von Entscheidungen und Rückholbarkeit
4. Stand der Bohrtechnik

Zu jedem Themenbereich wurden Fragen gestellt, die im Gutachten beantwortet werden.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen zur Standortauswahlverfahren und Kriterien wurde darüber hinaus eine Befassung mit den Sicherheitsanforderungen des BMU und den vorläufigen geowissenschaftlichen Auswahlkriterien angeboten.

Vorgehensweise

Die Einlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern wurde bisher in Deutschland nicht näher in Erwägung gezogen (siehe zuletzt /AKE 02/). Auch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sind für ein Endlagerbergwerk in einer tiefen geologischen Formation aufgestellt. Daher war es erforderlich, ein Grundkonzept zu entwi-

ckeln, welches die Beantwortung der Fragen der Kommission erlaubt. Dieses Grundkonzept wurde möglichst einfach gestaltet und ist bei einer weiteren Befassung fortzuschreiben. Entsprechend diesem Grundkonzept wurde die fachliche Bearbeitung strukturiert.

Die Lagerung in tiefen Bohrlöchern ist eine Form der geologischen Tiefenlagerung, die in verschiedenen Wirtsgesteinen vorstellbar ist und mit unterschiedlichen geologischen Barrieren die Sicherheit der Einlagerung radioaktiver Abfälle bewirken kann. Basis sind die in Deutschland vorliegenden geologischen Gegebenheiten.

Randbedingungen für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern bis 5.000 m

Aus Gründen der Stabilität des Bohrlochs ist eine Verrohrung der Bohrung erforderlich. Auch ist der Verzicht auf ein „trockenes“ Bohrloch vorauszusetzen.

Der Minstdurchmesser einer Bohrung wird durch die vorgesehene Einlagerung von Kokillen mit verglasten hoch-radioaktiven Abfällen bestimmt. Diese Abfälle wurden in Frankreich, England und bei der VEK in Karlsruhe konditioniert und befinden sich in dünnwandigen Stahlbehältern, die nicht druckstabil sind. Daher müssen diese Kokillen in einem hinreichend dickwandigen Einlagerungsbehälter (Overpack) umgepackt werden. Somit liegt der erforderliche innere Durchmesser einer Bohrung mit Verrohrung bei mindestens 60 cm.

Die Dimensionierung der Einlagerungsbehälter über die o. g. Mindestanforderung bzgl. des Durchmessers hinaus ist z. B. abhängig von der gewählten Teufe (hydrostatischem Druck) und dem Überlagerungsdruck durch die übereinander gestapelten Behälter.

Die direkte Einlagerung von Pollux- oder gar Castorbehälter stellt wegen des Durchmessers und Gewichts noch höhere Anforderungen an Bohr- und Einlagerungstechnologie. Daher wird eine Umladung der abgebrannten Brennelemente in geeignete Einlagerungsbehälter ebenfalls erforderlich.

Der im vorliegenden Gutachten konzipierte Behälter kann sowohl Kokillen als auch abgebrannte Brennstäbe aufnehmen.

Grundkonzept

Anforderungen an die geologische Beschaffenheit eines Standorts für tiefe Bohrlöcher ergeben sich nicht primär aus der Anwendung der Bohrtechnologie, sondern aus der Anforderung die Abfälle langfristig sicher einzuschließen. Aufgrund der Tiefe bis 5.000 m können mächtige sedimentäre Deckschichten mit mehreren geologischen Barrieren zum Einschluss beitragen. Auch der Abstand zum Schutzgut lässt lange Transportzeiten von Schadstoffen erwarten. Die Ausweisung konkreter einschlusswirksamer Gebirgsbereiche ist nur standortspezifisch möglich.

Das Grundkonzept sieht eine Einlagerung im kristallinen Grundgebirge mit mindestens zwei geologischen Barrieren (Tonformation / Salzformation) und einer Fallenstruktur vor, die eine Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ermöglichen. Die Mindestteufe beträgt 1.500 m.

Bohrtechnik

Bohrlöcher mit einem Durchmesser von > 1 m, die trocken ausgebaut sind, werden als Schächte betrachtet und werden deshalb nicht im Detail behandelt. Bis in eine Teufe (vertikale Tiefe) von 5.000 m kann heute mit Standardbohrverfahren ein nutzbarer Durchmesser von 450 mm in einem verrohrten Bohrloch realisiert werden. Wird eine geringere Teufe zugrunde gelegt, ist ein größerer Durchmesser mit der heute eingesetzten Technik erreichbar, z. B. bei 2.000 m Teufe sind dies ca. 650 mm. Größere Durchmesser wurden in der Vergangenheit in wissenschaftlichen und militärischen Bohrvorhaben realisiert.

Die bisher industriell in der Mehrheit mit 12 ¼" (311,1 mm) geteuften Tiefbohrungen weisen bei einer Endteufe von 5.000 m nicht die für eine Endlagerung als erforderlich anzusehenden Mindestdurchmesser auf. Sofern eine geringere Endteufe gewählt wird, reduzieren sich einerseits die (Stabilitäts-)Anforderungen an den Behälter und andererseits steigen die mit heutiger Technik realisierbaren Bohrdurchmesser an.

Kosten

Eine Standardbohrung mit einem Durchmesser von 375 mm und einer Teufe von 5.000 m würde ca. 30 Mio. € kosten (reine Bohrkosten Stand Ende 2015). Die Kosten steigen überproportional mit dem Durchmesser. Hinzu kommt der Zusatzaufwand für

Erkundung, Einrichtung einer kerntechnischen Anlage zur Einlagerung von übertage, sowie Monitoring.

Einlagerung, Rückholung und Bergung von hoch-radioaktiven Abfällen

Die Verfahren zur Einlagerung und Rückholung während der Betriebsphase eines tiefen Bohrlochs sind anhand des Grundkonzepts skizziert. Dies ist mit heute gängigen Verfahren als umsetzbar. Die Reversibilität der Einlagerung, d.h. die Rückholbarkeit der Einlagerungsbehälter, ist bis zum Verschluss des Bohrlochs gegeben.

Eine Bergung für einen Zeitraum bis ca. 100 Jahren wird mit erheblichem technischem Aufwand als möglich eingeschätzt, wenn technische Weiterentwicklungen der Einlagerungsbehälter erfolgen um ihre langfristige Handhabbarkeit sicherzustellen. Auch bei Vorliegen einer Handhabbarkeit und Aerosoldichtigkeit der Behälter erscheint eine Bergung nach einem Zeitraum von 100 Jahren aus großen Teufen derzeit als nicht machbar.

Aufgrund der zu erwartenden Korrosion der im Gutachten konzipierten Stahlbehälter unter den Einlagerungsbedingungen kann derzeit eine Bergbarkeit der Behälter nach Verschluss der Bohrung nicht gezeigt werden.

Betriebs- und Langzeitsicherheit

Auf Grund der jahrzehntelangen Erfahrungen mit vielen tausenden von Tiefbohrungen ist eine bergtechnische Betriebssicherheit während der Bohrlocherstellung gegeben. In der Einlagerungsphase ist unter Anforderungen des Strahlenschutzes für eine kerntechnische Anlage ein Einlagerungsbetrieb denkbar.

Bedingt durch Verwendung eines Bohrlochbetriebsfluids ist aus heutiger Sicht bei defektem Behältermaterial ein Kontakt der Abfallform mit Lösung zu erwarten. Die Radionuklidmobilisierung aus verglasten Abfällen und abgebrannten Kernbrennstoffen kann unter dem Vorbehalt einer sehr vereinfachten Betrachtung für verschiedene Havariefälle abgeschätzt werden. Bereits bei geringen Schadensausmaßen ist von erheblichen Radionuklidfreisetzungen in das Bohrlochbetriebsfluid auszugehen. Die Relevanz und die Auswirkungen solcher Prozesse sind insbesondere für solche Störfälle bei der Einlagerung zu quantifizieren, bei denen eine Reparatur / Rückholung längere Zeit in Anspruch nehmen wird.

Dies erfordert die vorbereitende Planung von Rückhol- und Reparaturmaßnahmen unter den Bedingungen des Strahlenschutzes, die für den Umgang mit offenen Radionukliden maßgeblich sind, sowie die Vorhaltung technischer Einrichtungen, die eine Reparatur bzw. Umfüllung rückgeholter defekter Behälter (Einrichtung von Kontrollbereichen, Heißen Zellen etc.). Ggfs. sind Technologien zur Dekontamination in Bohrlochbereichen zu entwickeln, falls eine Rückholung wegen einer Havarie mit Behälterdefekt im Bereich des Schutzguts auftritt. Um etwaige Havarien mit einer Freisetzung von Radionukliden zu bewerten sind entsprechende Störfallanalysen erforderlich.

Es ist weiterhin für die Langzeitsicherheit zu prüfen, ob durch Korrosion von Behälter und Casing und der damit einhergehenden Wasserstoffgasbildung durch Zwei-Phasenfluss eine aufwärts gerichtete Wasserbewegung entstehen kann und welche Auswirkungen dies auf die Ausbreitung von Radionukliden haben wird. Das Ausmaß eines Radionuklidtransports in möglicherweise gestörten Randbereichen der geologischen Barriere und im Umfeld des Einlagerungsbereichs ist zu betrachten. Dies konnte im vorliegenden Gutachten nicht erfolgen.

Standortauswahlkriterien und Sicherheitsanforderungen

Die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien im Berichtsentwurf der Kommission /KOM 15/ und diejenigen des AK End /AKE 02/ wurden am Grundkonzept der Lagerung in tiefen Bohrlöchern diskutiert. Diese sind für die Anwendung auf eine Standortauswahl eines Endlagerbergwerkes ausgerichtet. Mit den Annahmen für das Grundkonzept kann eine Erfüllung von Standortauswahlkriterien angepasst auf eine Bohrlochlagerung erreicht werden.

Die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen ergibt sich primär aus den spezifischen Eigenschaften eines Standorts. Der Sicherheitsgedanke des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfordert eine sorgfältige und umfassende Charakterisierung der jeweiligen geologischen Gegebenheiten am Standort. Die Funktion der jeweiligen geologischen Barrieren muss standortspezifisch nachgewiesen werden.

Es ergibt sich für das Grundkonzept die Herausforderung, dass sich die Sicherheitsnachweise auf Systeme in größeren Teufen beziehen und – je nach Konfigurationstyp des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs - möglicherweise auch größere horizontale Ausdehnungen betrachtet werden müssen, was den Nachweisaufwand erhöht.

Vorteile der tiefen Bohrlochlagerung

Es können mehrere diversitäre geologische Barrieren genutzt werden.

Es findet eine weiträumige Trennung der eingelagerten Abfälle von der Biosphäre statt.

Der mannlose Untertagebetrieb ist mit einem relativ geringem Zeitbedarf für Einlagerung und Verschluss nach Erstellung eines Bohrlochs verbunden. Es ist dabei aber zu definieren, ob sich Betriebszeiten auf einzelne Bohrlöcher / Bohrfelder bis zum Verschluss beziehen, oder den Gesamtprozess der Einlagerung aller hoch-radioaktiven Abfälle beinhaltet.

Es sind lange Versiegelungsstrecken mit Kombinationen unterschiedlicher, langzeitstabiler Materialien möglich. Es sind vergleichbare Verschlusskonzepte wie bei einer Bergwerkslagerung möglich. Durch die geringeren Durchmesser von Bohrungen ist zudem der durch das Auffahren geschädigte Gebirgsbereich deutlich reduziert.

Eine Rückholung als Umkehrung des laufenden Betriebes ist innerhalb der relativ kurzen Betriebsdauer eines Bohrlochs bzw. Bohrlochfeldes möglich.

Aufgrund der großen Tiefe wird eine Proliferation von hoch-radioaktiven Materialien nach Bohrlochverschluss bei Annahme des Einsatzes heutiger Technologie unterbunden.

Nachteile der tiefen Bohrlochlagerung

Aufgrund der Einlagerungstechnologie ist mit Korrosion der im Gutachten konzipierten Einlagerungsbehälter und der Verrohrung zu rechnen. Eine Behälterentwicklung z.B. aus Verbundmaterialien könnte die Anforderungen an die Handhabbarkeit hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit, Aerosoldichtheit und der mechanischen Stabilität an den Behälter für eine Bergbarkeit erfüllen.

Eine Darstellung einer Bergung eines handhabbaren Behälters für 500 Jahre erscheint derzeit nicht machbar.

Prognosen zu den geologischen/geochemischen/hydraulischen/hydrogeologischen Gegebenheiten im tiefen Untergrund erfordern an jedem Standort eine sorgfältige Ex-

ploration. Für jedes Bohrloch/Bohrfeld ist eine umfängliche Erkundung der geologischen, geomechanischen und hydrochemischen Bedingungen erforderlich.

Bedarf an Forschung und Entwicklung

Für die Erstellung von tiefen Bohrlöchern und Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle kann auf existierende Verfahren zurückgegriffen werden, die technisch entsprechend angepasst und weiterentwickelt werden müssen. Dies betrifft auch Technologien zur Erkundung und Beobachtung.

Demonstrationsversuche sind erforderlich, um die technischen Verfahren und alle damit einhergehenden Interaktionen ausreichend bewerten zu können. Dies beinhaltet darüber hinaus die Entwicklung eines detaillierten Konzeptes mit einer generischen und standortspezifischen Sicherheitsanalyse und die Weiterentwicklung von Einlagerungsbehältern.

Fazit

Die passive Beobachtung und Verfolgung der internationalen Entwicklung der Bohrtechnologie erscheint aus dem nachfolgenden Grund nicht ausreichend um Vorteile einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern realisieren zu können. In der Öl- und Gasindustrie werden aus Kostengründen Bohrungen mit möglichst kleinem Durchmesser angestrebt. Deshalb sind Weiterentwicklungen zu größeren Durchmessern dort nicht zu erwarten.

Es erscheint weiterhin zweckmäßig die Dimensionierung der Bohrung und der Einlagerungsbehälter entsprechend dem Grundkonzept in Abhängigkeit von der angestrebten Einlagerungsteufe zu bemessen. Dies würde zu einer deutlichen Kostenreduktion und Zeitersparnis gegenüber Bohrungen großen Durchmessers in großen Teufen führen, die einen erheblich höheren Entwicklungsaufwand erfordern.

Daher ist unter der Voraussetzung einer geeigneten Geologie für die Endlagerung die Teufe des Einlagerungsbereichs standortspezifisch festzulegen. Dies setzt ein standortspezifisches Sicherheits- und Einlagerungskonzept voraus.

Es besteht ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, um eine sicherheitstechnisch umsetzbare Option der Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefen Bohr-

löchern zu erhalten. Dieser Bedarf ist im Gutachten ausgewiesen. Eine Vollständigkeit konnte nicht erreicht werden.

Die Anforderung einer Bergbarkeit (bzw. Handhabbarkeit der eingelagerten Behälter) über 500 Jahre ist derzeit nicht erfüllbar. Es bedarf eines Verzichts auf diese Anforderung, wenn eine Lagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern als Entsorgungsoption in Betracht gezogen werden soll.

Eine Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle in großen Tiefen mittels tiefer Bohrungen kann unter der Voraussetzung einer aktiven Unterstützung von Forschung und Entwicklung sowie Verzicht auf eine Bergbarkeit mittelfristig in Deutschland eine denkbare technische Option sein.

2 Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	I
2	Inhaltsverzeichnis	II
3	Fragen der Kommission	1
3.1	Themenbereich 1 (Verfahren zur sicheren Einlagerung der radioaktiven Abfälle).....	1
3.2	Themenbereich 2 (Anforderung an die geologische Beschaffenheit möglicher Bohrorte).....	8
3.3	Themenbereich 3 (Reversibilität von Entscheidungen und Rückholbarkeit)	11
3.4	Themenbereich 4 (Stand der Bohrtechnik)	12
3.5	Literatur Kapitel 3	15
4	Einleitung	16
4.1	Vorgehen.....	20
4.2	Nationale und internationale Entwicklung und Aktivitäten.....	22
4.2.1	USA.....	24
4.2.2	Brasilien	27
4.2.3	Schweden	28
4.2.4	Niederlande.....	29
4.2.5	England	29
4.2.6	Russland	29
4.2.7	IAEA	30
4.2.8	Fazit	30
4.3	Literatur Kapitel 4	30
5	Grundkonzept für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern	39
5.1	Sicherheitskonzept und -anforderungen	39
5.2	Exploration	43
5.3	Bohrungen.....	44
5.4	Behälter	45

5.5	Verrohrung	46
5.6	Bohrlochfluid (Bohrlochbetriebsfluid)	46
5.7	Bohrlochverschluss	47
5.8	Einlagerung	48
5.9	Monitoring / Überwachung	49
5.10	Schlussbemerkung.....	50
5.11	Literatur Kapitel 5	51
6	Stand der Bohrtechnik.....	52
6.1	Einige grundlegende Aspekte der Bohrtechnik	54
6.1.1	Notwendigkeit von Verrohrungen und ihre Aufgaben	54
6.1.2	Gefährdungspotenzial durch Hochdruckzonen, Niederdruckzonen, Verlustzonen, Kohlenwasserstoffe und andere Gase	57
6.2	Übliche Bohrtechniken und -verfahren	59
6.2.1	Rotary-Bohren	59
6.2.2	Bergbau-Bohren (Mining-Drilling).....	67
6.2.3	Saugbohrverfahren	68
6.2.4	Lufthebe-Verfahren	68
6.2.5	Air-Drilling, Mist-Drilling, Foam-Drilling.....	69
6.3	Das Bohrloch-Design	70
6.3.1	Allgemein	70
6.3.2	Funktionen der verschiedenen Rohrtouren.....	72
6.3.3	Rohrauslegungsberechnungen	73
6.4	Ermittlung der Mindestanforderungen an geeignete Bohranlagen.....	74
6.5	Anforderungsprofil an Bohrungen für eine Eignung zur Endlagerung und Auswirkungen auf das Bohrkonzept.....	75
6.5.1	Nutzbarer Durchmesser	75
6.5.2	Langzeit-Stabilität.....	75
6.5.3	Langzeit-Dichtheit	76
6.5.4	Schlussfolgerungen.....	76
6.6	Ablenkung von Bohrungen.....	77
6.7	Erfahrungen aus Forschungsbohrungen.....	80

6.7.1	Fallbeispiel KTB	81
6.7.2	Soultz-sous-Forêts	88
6.8	Bohrtechnologie für unterschiedliche Szenarien und Geologien.....	92
6.8.1	Bohrlochstabilität.....	93
6.8.2	Kristallin.....	93
6.8.3	Sedimentgesteine	100
6.8.4	Salzgesteine.....	104
6.9	Bau der Bohrung und Bohren von großen Kalibern	105
6.10	Ausbau von Bohrungen.....	111
6.11	Bohrlochverschlüsse und Abschlüsse sowie Bohrlochverfüllungen.....	115
6.12	Bohrlochmessungen	118
6.13	Vorerkundung und Überwachung	121
6.13.1	Vor Beginn der Bohrarbeiten.....	122
6.13.2	Beim Abteufen der Explorationsbohrung(en)	122
6.13.3	Nach dem Abteufen der Explorationsbohrungen	123
6.13.4	Beim Abteufen der Lagerbohrungen: Logging in großkalibrigen Bohrlöchern.....	124
6.13.5	Nach dem Abteufen der Lagerbohrungen.....	127
6.13.6	Bei der Einlagerung.....	127
6.13.7	Nachbetriebsphase	127
6.13.8	Monitoring / Überwachung des Bohrlochverschlusses.....	128
6.14	Bohrlochabstand	130
6.15	Kostenabschätzung.....	132
6.16	Ausblick und geschätzte Kosten für ein Großbohrloch	134
6.17	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	136
6.18	Literatur Kapitel 6	137
7	Verfahren zur sicheren Einlagerung.....	145
7.1	Behälter	145
7.1.1	Anforderungen an die Abfallbehälter.....	145
7.1.2	Behälterauslegung	147

7.1.3	Konzeption des Abfallbehälters DBC-R (Deep Borehole Container – Retrievable).....	152
7.1.4	Variantenvergleich	157
7.2	Sicheres Einbringen von Behältern und Gerätschaften bis in 5.000 m Tiefe	161
7.2.1	Technik zur Einlagerung von Behältern	161
7.2.2	Technisches Einlagerungskonzept für DBC-R.....	165
7.2.3	Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus technischer Sicht.....	167
7.2.4	Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus kerntechnischer/radiologischer Sicht	168
7.3	Literatur Kapitel 7	169
8	Geomechanik und Stabilität.....	171
8.1	Einleitung	171
8.2	Definitionen zum Spannungstensor	172
8.3	Spannungsbeiträge und Spannungsmuster	174
8.4	Spannungsindikatoren	179
8.5	World Stress Map Projekt	180
8.6	Modellierung des 3D Spannungszustandes.....	185
8.7	Kritische Spannungszustände.....	187
8.8	Stabilität von Untertagebauwerken	190
8.9	Spannungszustand um Untertageöffnung (Tunnel, Bergwerk, Bohrung)	194
8.10	Fazit	199
8.11	Literatur Kapitel 8.....	200
9	Reversibilität von Entscheidungen	206
9.1	Rückholbarkeit –Verständnis im vorliegenden Projekt.....	206
9.2	Bergung –Verständnis im vorliegenden Projekt	207
9.3	Welche Situationen sind vorstellbar, die eine Rückholung oder Bergung erzwingen könnten?	207
9.3.1	Zwingende Gründe.....	208
9.3.2	Weitere mögliche Gründe	208
9.4	Technische Optionen der Rückholung und Bergung.....	208

9.4.1	Konventionelles „Fangen“	208
9.4.2	Übertragung der Fangmöglichkeit auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R	211
9.4.3	Gefahren und Risiken während Fangarbeiten.....	211
9.4.4	Übertragung der Risikobewertung von Fangarbeiten auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R	213
9.5	Konzept zur Rückholbarkeit bei der tiefen Bohrlochlagerung	213
9.6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	217
9.7	Fazit	217
9.8	Literatur Kapitel 9	218
10	Risiken-Szenarien	219
10.1	Störfälle während der Einlagerungsphase mit Radionuklidfreisetzung ...	219
10.2	Radionuklidfreisetzung bei erwarteter Entwicklung.....	226
10.3	Kritikalität.....	229
10.4	Vulkanismus	231
10.5	Hochwasser	234
10.6	Erdbeben.....	235
10.6.1	Seismizität.....	235
10.6.2	Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzung	239
10.7	Vergletscherung	241
10.7.1	Kaltzeitliche Rinnen.....	242
10.7.2	Spannungsänderungen durch das Auftreten und Verschwinden von Gletscherbedeckungen.	243
10.8	Anhang: Randbedingungen für die Störfallbetrachtungen mit Radionuklidfreisetzungen	248
10.8.1	Bohrlochcharakteristik	248
10.8.2	Abfall	250
10.8.3	Zu erwartende Prozesse während und nach der Einlagerung	257
10.8.4	Radionuklidmobilisierung	259
10.9	Literatur Kapitel 10	263

11	Erfüllung der Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien	276
11.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich für ein Grundkonzept zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern	277
11.1.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	277
11.2	Geowissenschaftliche Kriterien zur Standortauswahl	282
11.2.1	Ausschlusskriterien	282
11.2.2	Mindestanforderungen	282
11.2.3	Abwägungskriterien.....	283
11.3	Sicherheitsanforderungen des BMU	290
11.3.1	Schutzziele	290
11.3.2	Optimierungsziele	292
11.3.3	Nachweise.....	293
11.3.4	Einzelnachweise	294
11.3.5	Langzeitsicherheit	295
11.3.6	Sicherheitsmanagement und Dokumentation	296
11.4	Reversibilität / Rückholbarkeit / Bergbarkeit.....	297
11.5	Betriebssicherheit (radiologisch)	297
11.6	Langzeitsicherheit (radiologisch).....	298
11.7	Literatur Kapitel 11	301
12	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	303
12.1	Grundkonzept.....	303
12.2	Bohrtechnologie und Verschlüsse.....	303
12.3	Behälter	304
12.4	Einlagerungsverfahren / Rückholung	305
12.5	Bergbarkeit / Bergung	305
12.6	Sicherheitsbetrachtungen / Sicherheitsuntersuchungen	305
	Abbildungsverzeichnis	307
	Tabellenverzeichnis	317

3 Fragen der Kommission

Die „Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe“ hat mit der Beauftragung des Gutachtens folgende Fragestellungen für vier Themenbereiche formuliert, die in diesem Kapitel zusammenfassend beantwortet werden sollen. Die Antworten und Aussagen werden in weiteren Kapiteln (siehe Verweise) dieses Gutachtens erläutert.

Im Folgenden steht die Aufzählung Tx-y.z für:

T = Themenbereich mit x = Nummer des Themenbereichs

y = Punkt

z = Frage.

3.1 Themenbereich 1 (Verfahren zur sicheren Einlagerung der radioaktiven Abfälle)

T1-1.1 Welche Anforderungen sind an sichere Behälter zu richten?

Neben den Anforderungen, die sich aus den Sicherheitsanforderungen des BMUB ergeben, sind Art und Menge der endzulagernden Abfälle (Brennstäbe, Glaskokillen), Bohrlochteufe und Durchmesser, sowie die zu erwartenden Temperaturen und Druckbedingungen im Einlagerungsbereich und das Medium, in welchem eingelagert wird, auslegungsrelevant für das Behälterdesign und die Behältermaterialwahl.

Da der Verzicht auf ein „trockenes“ Bohrloch vorauszusetzen ist (siehe Kapitel 5 und 6), sind weitere Anforderungen an die Behälter zu formulieren, die bislang nicht systematisch abgeleitet wurden und in der Endlagerforschung als neuartig einzustufen sind. Hier besteht erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Siehe Kapitel 7.

T1-1.2 Wie kann ein Behälter aussehen, wenn man von einem Bohrlochdurchmesser von 1 m ausgeht?



Der Abfallbehälter kann z. B. wie oben abgebildet konzipiert sein. Bei einer Zielteufe von 5.000 m hat der Behälter einen ungefähren Außendurchmesser von 0,64 bis 0,74 m, eine Wandstärke von 10 – 15 cm und eine Länge von ca. 5,6 m.

Die Maße ergeben sich aufgrund des Durchmessers der Glaskokillen und der Länge gezogener Brennstäbe, um diese im gleichen Behälertyp einlagern zu können.

Zu diesen Maßen ist die notwendige Verrohrung des Bohrlochs zu rechnen. Bei einer Wandstärke von 15 cm wird daher ein Bohrdurchmesser von 1 m benötigt.

Weiteres Entwicklungspotenzial zur Optimierung ist bei der Auswahl des Materials und Konstruktion des Behälters gegeben, was die mechanische Stabilität bei Stapelung, die Korrosionsfestigkeit und Handhabbarkeit betrifft. So ist bei geringerer Teufe bereits eine Wandstärke von 4,5 cm des Behälters ausreichend.

Siehe Kapitel 7.

T1-1.3 Wie groß wäre die Nutzlast eines Behälters?

Die Nutzlast des konzipierten Behälters liegt bei ca. 3.000 kg bei einer Bruttomasse des Behälters von bis zu 15.000 kg abhängig von der Wandstärke von 10 – 15 cm. Bei einer Wandstärke von 4,5 cm ist die Bruttomasse ca. 6.200 kg

Siehe Kapitel 7.

T1-1.2.1 Inwieweit ist es möglich, entsprechende Behälter mit radioaktiven Abfällen bis in 5.000 m Tiefe sicher abzulassen?

Die Hakenlasten von Bohranlagen liegen nach Stand der Technik bei bis zu 1.000 Mg. Ein sicheres Ablassen der Behälter an einem Gestänge mit zusätzlicher Seilsicherung ist nach Stand der Technik möglich.

Da die Behälter nicht selbstabschirmend ausgelegt sind, muss die Anlage zum Ablassen der Behälter über Abschirmungsmechanismen verfügen. Realversuche der DBE Technology GmbH haben die Machbarkeit für eine Einlagerung in Bohrlöchern von wenigen hundert Metern hierzu gezeigt. Zur Adaption/Konzeption einer solchen Anlage für den aktuellen Anwendungsfall ist weiterer Entwicklungsbedarf notwendig.

Siehe Kapitel 6 und 9.

T1-3.1 Wie können die Behälter endgelagert werden?

Derzeit erscheint die Endlagerung in einem verrohrten Bohrloch die technische Vorzugsvariante zu sein. Die Einlagerung der Behälter kann mittels Gestänge und zusätzlicher Seilsicherung erfolgen. Die konzipierten Behälter können übereinander gestapelt werden. Ein zusätzlicher Lastabtrag ist nicht notwendig. Das Bohrloch im Einlagerungsbereich der Behälter bleibt nach Verschluss dauerhaft mit einem zu definierenden Bohrlochbetriebsfluid gefüllt.

Siehe Kapitel 5, 6 und 9.

T1-3.2 Wie viele Behälter können in einem Bohrloch untergebracht werden?

Ausgehend von dem im Gutachten konzipierten Behälter und dem Einlagerungskonzept könnten ca. 30 – 100 Bohrlöcher unterhalb einer Teufe von 1.500 m (Grundkonzept) bis zu einer Teufe von 5.000 m zur Einlagerung ausreichend sein. Auf einer nutzbaren Bohrlochlänge von 2.000 m können ca. 350 Behälter endgelagert werden.

Siehe Kapitel 7.

T1-4.1 Welche Havarien sind vorstellbar und wie kann man technisch damit umgehen?

Havarien, die bei der übertägigen Handhabung der Behälter auftreten können, sind auch für andere End- und Zwischenlagerkonzepte möglich und werden daher nicht dargestellt. Angeführt werden bohrlochspezifische Havarien.

Ein Verkanten der Behälter im Bohrloch während des Einlagerungsvorganges ist vorstellbar. Maßnahmen sind Rückholung des Behälters oder der Verrohrung inkl. des Behälters oder Verschluss der Bohrung. Weitere Auswirkungen von Havarien insbesondere solchen, die zur Freisetzung von Radioaktivität führen können, sind in Kapi-

tel 10 beschrieben. Ein Absturz eines Behälters über größere Distanzen ist aufgrund der Konzeption mit der Verwendung eines Bohrlochbetriebsfluids nicht möglich bzw. unwahrscheinlich. Bei Havarien mit Freisetzung von Radioaktivität sind Konzepte zur Rückholung des Behälters vorzusehen (siehe Kapitel 10), sowie übertägige Einrichtungen, die eine Handhabung hoch-radioaktiver Abfallbehälter erlauben.

T1-4.2 Welche Sicherheitsmaßnahmen sind zu ergreifen, um Havarien zu verhindern?

Konzipiert wurde eine mehrfache Verrohrung, das Einbringen der Behälter mit Gestänge und einer zusätzlichen Seilsicherung sowie ein Bohrlochbetriebsfluid (siehe Kapitel 5). Im Bereich der Schutzgüter sollten mehrere technische Barrieren (mindestens zwei einzementierte Rohrtouren) ausgebildet werden um einen sicheren Transport zu gewährleisten. Im Bereich der Schutzgüter wird ein zusätzliches Führungsrohr (technisch: Linerverlängerung) vorgeschlagen um Behälter verlässlich rückholen zu können.

T1-5 Wie soll das Entstehen einer Wassersäule verhindert werden und was kann im Falle eines Wassereintruchs getan werden?

Nach Erstellung einer Bohrung zur Endlagerung ist eine fluidgefüllte Verrohrung vorhanden, die einen externen Wassereintruch verhindert. Sollte eine Wegsamkeit zur Bohrungsumgebung bestehen (z.B. durch korrodierte Rohre) würde sich mit der Zeit die Bohrspülung/das Betriebsfluid mit der Umgebung austauschen. Dies wird nicht als Havarie verstanden.

Bei der Lagerung in tiefen Bohrlöchern (Deep Borehole Disposal, DBD) handelt es sich entweder um einen Schacht mit vergleichsweise kleinem Durchmesser oder ein Bohrloch mit vergleichsweise großem Durchmesser. Bei sehr tiefen Schächten oder Bohrungen ist es nicht möglich, diese Öffnung langfristig luftgefüllt zu betreiben. Sie muss zur Stabilisierung eine Fluidsäule enthalten. Nach dem Bohrbetrieb und dem Einbau der Verrohrungen und vor dem Einlagerungsbetrieb kann diese Bohrspülung durch ein wenig korrosiv wirkendes Betriebsfluid ausgetauscht werden. Eine „trockene“ Lagerung wird nicht erreicht, so dass eine sukzessive Korrosion des Behälters auch bei entsprechender Materialauswahl über Jahrzehnte/Jahrhunderte nicht auszuschließen sein wird. Bohrlochverschlüsse unterschiedlicher Art oberhalb des Einlagerungsbereichs dienen als technischen Barrieren wie Streckenverschlüsse in Bergwerken.

Schachtanlagen und Bergwerke können eine Lagerung in einer trockenen Umgebung ermöglichen. Im Gegensatz dazu wird bei Bohrlöchern immer ein Fluid beim Abteufen eingesetzt und ist zur Stabilisierung erforderlich. Der Einfluss von Fluiden im Bohrloch muss deshalb bei einer Sicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden.

Siehe auch Kapitel 6 zum Stand der Bohrtechnik.

T1-6.1 Wie kann ein Verschluss des Bohrlochs erfolgen und die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden?

Verschiedene Verschlussysteme werden für unterschiedliche Lithologien und Anforderungen (Kohlenwasserstoffindustrie, Geothermie) eingesetzt. Dabei werden i.d.R. verschiedene geotechnische Barrieren ausgebildet.

Prinzipiell können Verschlussaufbauten analog zu Bergwerksverschlüssen konzipiert werden. Für die Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle gibt es dazu keine Erfahrungen. Die einzelnen Verfüllstrecken sind bei einer Bohrlochlagerung i.d.R. deutlich länger bei geringerem Durchmesser verglichen mit Barrieren in Bergwerken.

Verschlüsse:

- Zementationen (kann alleine eine Langzeitsicherheit nicht garantieren)
- Nutzung der duktilen Eigenschaften von Salz („natürliche Barriere“ – kann nach heutigem Kenntnisstand als langzeitsicher betrachtet werden)
- Verschiedene Composit-Materialien können als zusätzliche Barriere eingebaut werden.
- Verschluss auf Bitumenbasis als zusätzliche Barriere. Bitumen haben über Jahrmillionen in geologischen Systemen überdauert.
- Bentonit-Suspensionen. Dieses anorganische Material kann als langzeitstabil betrachtet werden.
- Schwere „Spülungen“ – besitzen eine geringe abdichtende Wirkung. Sie sind eine technische Unterstützung für andere Barrieren, insbesondere bei der Verfüllung.
- Versatz

Im Anschluss an die einzelnen Verfüllstufen erfolgen i.d.R. Erfolgs- und Qualitätskontrollen, um die Integrität des Verschlusses zu testen, potentielle Leckagewege zu identifizieren und zu beseitigen. Für den Verschluss eines Bohrlochs existieren verschiedene Möglichkeiten. Ein Langzeitsicherheitsnachweis wäre in gleicher Weise zu führen wie für Strecken- oder Schachtverschlüsse in Bergwerken, die ähnliche Materialien verwenden.

Siehe Kapitel 6.

T1-7.1 Welche Methoden werden gegenwärtig angewendet und welche Materialien verwendet, um Bohrlöcher zu verschließen?

Generell gilt, dass die erbohrten geologischen Formationen bei ihrer Rückverfüllung möglichst mit demselben oder einem vergleichbar festem Material aufgefüllt werden sollen, so dass mittels natürlich dichtender Füllmaterialien ein Kurzschluss von Fluiden zwischen geologischen Schichten über die Bohrung vermieden wird.

Dazu ist die Verrohrung in diesen Formationen zu beseitigen und dichtende Füllmaterialien einzubringen. Das Entfernen der Verrohrung kann durch Ziehen der Verrohrung oder Ausfräsen der Verrohrung erfolgen. Dichtende Füllmaterialien werden in erster Linie expandierende Zemente, quellende Tone oder plastisches Salz sein (siehe besonders Abb. 6-23 in Kapitel 6.8.4).

Der Verschluss einer Bohrung für die Einlagerung von hoch-radioaktivem Abfällen ist nach einem ähnlichen Verfüllkonzept vorzunehmen. Im Bereich der geologischen Barrieren ist deshalb ein direkter Kontakt von Gebirge und dem Verschlussmaterial (Bentonit, Salz, Bitumen) erforderlich.

Siehe Kapitel 6.

T1-7.2 Wie sind diese Verschlüsse hinsichtlich Langzeitsicherheit zu beurteilen?

Detaillierte Rechnungen zur Dichtigkeit eines angepassten Bohrlochverschlusses konnten im vorliegenden Gutachten nicht durchgeführt werden. Aufgrund der geringeren Durchmesser und der längeren Verfüllstrecke ist der Stofftransport entlang der verfüllten Strecke deutlich geringer als bei einer Schachtabdichtung wie diese für Endlagerbergwerke vorgesehen sind. Dabei wird zugrunde gelegt, dass ähnliche Verfüll-

lungen verwendet werden (überwiegend Materialien, die über geologische Zeiträume ihre Stabilität nachgewiesen haben). Da bei einer Bohrung die Zerrüttungszone (in guter Näherung proportional zum Durchmesser der Bohrung) geringer ist als bei größeren Durchmessern z. B. einer Schacht- oder Streckenauffahrung, ist in der Bohrlochumgebung mit einem geringeren Stofftransport zu rechnen, zumal die Dimension der durch den Bohrvorgang entstehenden und angetroffenen Klüfte mit abnehmendem Bohrdurchmesser abnimmt.

Bohrlochverschlüsse aus konvergierendem Salz, kompaktiertem Salzgrus, Ton oder Bentonit können langzeitige Sicherheitsfunktionen in ähnlicher Weise wie Strecken- oder Schachtverschlüsse für Bergwerksauffahrungen übernehmen. Die entsprechenden Nachweise sind gleichermaßen zu führen.

Zusätzlich kommen Materialien wie Zemente als technische Barrieren zum Einsatz, denen bei einer Sicherheitsanalyse keine langzeitige Barrierenwirkung zugesprochen wird.

Siehe Kapitel 6.

T1-8.1 Mit welchen Methoden kann das Verhalten des Verschlusses in der Zeit nach dem Verschluss (bspw. für etwa 100 und 500 Jahre) überwacht werden?

Verschiedene Verfahren können eingesetzt werden, um die Qualität von Verschlüssen zu überprüfen. Neben Drucktests kommen auch Messsonden in Frage, welche unterschiedliche physikalische Eigenschaften untersuchen (z.B. elastische, elektrische, dielektrische Eigenschaften) oder chemische Untersuchungen erlauben (z.B. spektrales gamma-ray, Probennahmesysteme, U-tubes). Dabei muss beachtet werden, dass der Einbau spezieller Messsonden in den Verschluss (z.B. zur Gasmessung, zur Beobachtung von Änderungen physikalischer Eigenschaften im Verschlussmaterial) zu zusätzlichen Leckagepfaden führen kann. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Bohrung stufenweise zurückzubauen, um das Verhalten einzelner Barrieren zu überwachen (z.B. durch Fluidprobenanalysen, Druckmessungen). Der Austrag von Gasen und Radionukliden kann durch ein oberflächennahes Monitoring oder durch Erkundungsbohrungen erfasst werden. Um Migrationspfade zu minimieren sollten speziell für die tiefe Bohrlochlagerung ausgebaute Beobachtungsbohrungen für das Monitoring genutzt werden. Die Sensorik kann dabei dem Stand der Technik immer wieder aktualisiert werden.

Die Überwachung z.B. über Beobachtungsbohrungen ist für einige Jahrzehnte nach dem Stand der Technik bereits heute möglich.

Die Überwachungsmöglichkeit für einen Zeitraum von mehreren Jahrhunderten ist nach heutigem Stand der Technik nicht zuverlässig plan- bzw. prognostizierbar. Hier sind nicht nur technische, sondern auch gesellschaftspolitische Aspekte zu behandeln.

Siehe Kapitel 6.

T1-8.2 Gibt es Technologien für ein entsprechendes Monitoring?

Permanente Monitoring-Stationen zur Überwachung von z.B. Endlagerkomplexen und deren Bohrlochinstallationen sind heute in der Form von über- und untertägigen Messstationen Stand der Technik. Als Messverfahren werden üblicherweise Netzwerke von akustischen, optischen, elektrischen und radiologischen Sensoren herangezogen. Permanente Bohrlochinstallation, entweder kabellos an der Einlagerungs- oder auch kabelgebunden in den Nachbarbohrungen kann kontinuierlich Daten nach über Tage bezüglich des Betriebszustandes der Bohrung selbst und der darin eingelagerten Materialien liefern. Obertägige Datenaufzeichnungsstationen sammeln die Information und leiten diese zur weiteren Auswertung und Speicherung via Internet, Telefon oder Satellit an dezentrale Datenzentren weiter.

Siehe auch Kapitel 5, 10 und 11.

3.2 Themenbereich 2 (Anforderung an die geologische Beschaffenheit möglicher Bohrorte)

T2-1.1 Wie kann ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Tiefen von 3.000 m bis 5.000 m Tiefe aussehen?

Die Definition des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) beinhaltet, dass die Abfälle im ewG dauerhaft verbleiben müssen und soweit sicher abgeschlossen bleiben, sodass diesen Bereich langfristig keine bzw. allenfalls geringfügige Stoffmengen verlassen können.

Im kristallinen Gestein in größeren Tiefen können Bereiche mit geringer Durchlässigkeit (Abstandsgeschwindigkeit) angetroffen werden, die bei entsprechender Charakterisierung als ewG ausgewiesen werden könnten. Jedoch beinhaltet aus heutiger Sicht

ein einschlusswirksamer (Gebirgs-)Bereich im Kristallingestein derzeit noch weitere technische und geotechnische Barrieren.

Das Grundkonzept (siehe Kapitel 5) ermöglicht die Ausweisung weiterer Konfigurationstypen für einen oder mehrere ewG für Bohrlöcher. Die Ausmaße eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden von den standortspezifischen Gegebenheiten bestimmt und können daher außerhalb des Teufenbereichs von 3.000 bis 5.000 m liegen bzw. überschreiten.

T2-1.2 Mit welchen Methoden kann ein einschlusswirksamer Bereich sicher nachgewiesen werden?

Für die Charakterisierung des Gebirges für Bohrlöcher stehen ähnliche Technologien zur Verfügung wie bei einer Auffahrung eines Bergwerks. Grundsätzlich besitzt die Sensorik im Nahbereich eine gute Auflösung, die mit dem Abstand zur Messsonde abnimmt.

Durch Erkundungsbohrungen mit Standardmethoden können wesentliche Informationen über die wichtigsten gesteinsphysikalischen und geochemischen Eigenschaften im bohrlochnahen Umfeld sehr detailliert und im bohrlochferneren Bereich mit geringerer Auflösung gewonnen werden. Bei mehreren Erkundungsbohrungen können durch s. g. „cross-hole“ Verfahren zusätzliche Informationen zur Definition des einschlusswirksamen **Gebirgsbereichs** verwendet werden (nicht Bereich!). Bei einem zu führenden Nachweis ist unter Umständen ein großräumigerer ewG auszuweisen als bei einer Auffahrung eines Bergwerks, um Unsicherheiten abdeckend zu berücksichtigen.

Siehe Kapitel 6.

T2-1.3 Wenn kein einschlusswirksamer Bereich nachgewiesen werden kann: Wie könnte in einem solchen Fall der Nachweis eines sicheren Einschlusses aussehen?

Das in Kapitel 5 vorgestellte Grundkonzept berücksichtigt nicht nur eine geologische Barriere im kristallinen Gestein, so dass ein sicherer Einschluss auch durch die den Einlagerungsbereich überdeckenden geologischen Formationen (Tonstein, Steinsalz) zusätzlich erfolgen kann. Entsprechende Lithologien sind in Deutschland an verschiedenen Stellen bekannt.

Weiterhin könnte durch Übernahme von einschlusswirksamen Eigenschaften durch ein zu entwickelndes Behälterkonzept mit anderen Materialien der Nachweis eines sicheren Einschlusses erfolgen. Bei Letzterem bestehen jedoch Zweifel an der Nachweisbarkeit über lange Zeiträume.

T2-2 Anforderungen an die Beschaffenheit der Bohrstrecke bis zur Oberfläche

Aus bohrtechnischer Sicht sollte eine möglichst hohe Bohrlochstabilität, die abhängig von der Gebirgsspannung ist, zur Erstellung gegeben sein (siehe Kapitel 6.5). Nach Erstellung des Bohrlochs ergeben sich aus der Betrachtung der Einlagerungsvorgänge keine erhöhten Anforderungen an die geologische Beschaffenheit der Bohrstrecke. Grundsätzlich ungeeignete Lithologien sollten ausgeschlossen werden. Jedoch bestehen Anforderungen aus dem Grundkonzept (Kapitel 5) an den grundsätzlichen geologischen Aufbau, um mehrere Barrieren realisieren zu können. Diese sind im Grundkonzept skizziert und umfassen neben den genannten Salz- und Tonschichten auch eine Formation um potenziellen Effekte durch freigesetzte Gase zu eliminieren. Die geologischen Barrieren liegen in einer ausreichenden Tiefe, um Gefährdungen der Barrierewirkung durch kaltzeitliche Ereignisse auszuschließen.

Siehe Kapitel 6 und 10.

T2-3 Hydrogeologische Anforderungen

Die hydrogeologischen Anforderungen sind vergleichbar mit anderen Konzepten zur geologischen Tiefenlagerung. Eine geringe Abstandsgeschwindigkeit und hohes Grundwasseralter zeigen günstige Gegebenheiten an. Eine umfängliche Charakterisierung der relevanten Gebirgsbereiche ist wie für einen Standort eines anderen geologischen Tiefenlagers für jedes Bohrloch durchzuführen, aus der größeren Tiefe ergeben sich jedoch besondere diesbezügliche Herausforderungen. Wegsamkeiten durch vorhandene oder durch die Bohrung induzierten Störzonen sind hierbei zu identifizieren und ihr Einfluss zu quantifizieren.

Siehe Kapitel 5 und 6.

3.3 Themenbereich 3 (Reversibilität von Entscheidungen und Rückholbarkeit)

T3-1.1 Welche Situationen sind speziell bei einer tiefen Bohrlochlagerung aus heutiger Sicht vorstellbar, die eine Rückholung nahelegen oder erzwingen können?

Folgende Situationen sind denkbar:

Durch neue Erkenntnisse wird die Gültigkeit des Sicherheitsnachweises widerlegt oder fraglich und / oder nachweisbare Kontaminationen des Schutzgutes sind zu erwarten.

Kurzfristige Änderungen in der Einschätzung der Notwendigkeit der Einlagerung oder alternative Entsorgungsstrategien, lassen eine Rückholung sinnvoll erscheinen.

Im Falle einer Havarie im Transferbereich ist die Rückholung der Behälter oberhalb des Einlagerungsbereichs erforderlich, um eine Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt zu vermeiden.

Siehe Kapitel 9.

T3-2.1 Inwieweit und unter welchen Bedingungen ist eine Rückholung des hoch-radioaktiven Abfalls (z.B. für einen Zeitraum von 100 bis 500 Jahren nach der Herstellung des Verschlusses) möglich?

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand und auf Basis des hier entwickelten Konzepts ist eine Bergung nach beispielsweise 500 Jahren (nicht Rückholung im Sinne der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/) aufgrund der Teufe und des schwer einzuschätzenden Zustandes der Verrohrung und der Behälter kaum durchführbar bzw. ist nach heutigem Kenntnisstand sehr erschwert. Die Möglichkeit einer Bergung ist nur mit extremen Aufwand vorstellbar und setzt erhebliche technologische Fortschritte voraus (siehe auch Kapitel 7, 9 und 10).

Bei Verwendung herkömmlicher Behältermaterialien (wie z. B. für den konzipierten DBC-R Behälter) ist der Erhalt der Bergbarkeit im Sinne einer Handhabbarkeit des Behälters unter den gegebenen Bedingungen über mehr als 100 Jahre derzeit nicht darzustellen. Es wird daher mit Radionuklidfreisetzung aus dem Behälter im Einlagerungsbereich gerechnet.

T3-3.1 Welche Technologien sind für eine solche Rückholung erforderlich?

Eine Rückholung (d. h. bis zum Verschluss der Bohrung) ist im Wesentlichen eine Umkehrung der Einlagerung (siehe Kapitel 7) und ist mit den bereits heute vorhandenen Technologien technisch machbar. Ein intaktes Bohrloch und handhabbarere Behälter werden vorausgesetzt.

T3-3.2 Sind derartige Technologien heute verfügbar?

Ja. Technologien zur Rückholung eingebrachter Behälter sind bereits heute verfügbar. (Details siehe Kapitel 7). Hier ist das Vorhandensein einer verrohrten Bohrung im Einlagerungsbereich vorausgesetzt.

3.4 Themenbereich 4 (Stand der Bohrtechnik)

T4-1.1 Welche Bohrlöcher sind heute Stand der Technik?

Der heutige Stand der Bohrtechnik erlaubt mit Laser vermessene vertikale Raisebohrungen, so wie abgelenkte bis horizontale Bohrlöcher bis zu einer Tiefe und Länge von bis zu 8.000 m (siehe Kapitel 6). Bohrungen bis zum einen Durchmesser von 450 mm sind mit heute verfügbarer Technik in 5.000 m erreichbar. Die bisher industriell in der Mehrheit mit 12 ¼“ (311,1 mm) geteufte Tiefbohrungen weisen bei Endteufe nicht die für eine Endlagerung als erforderlich anzusehenden Mindestdurchmesser auf (siehe Kapitel 6).

T4-1.2 Für welche Zwecke sind sie bisher eingesetzt worden?

In erster Linie wird die Bohrtechnologie seit etwa 100 Jahren in der Kohlenwasserstoffgewinnung eingesetzt und dort auch kontinuierlich und federführend weiter entwickelt. Weitere industrielle Anwendungsbereiche finden sich in der Bergbauexploration, Geothermie und Wassergewinnung, so wie in wissenschaftlichen Projekten (siehe Kapitel 6).

T4-1.3 Welche Bohrlochdurchmesser für den Zielort sind üblich?

In der Industrie gelten vornehmlich wirtschaftliche Kriterien, so dass die Investition Bohrung i. d. R. unabhängig vom Standort so „klein wie möglich und so groß wie nötig“ geplant und auch gebohrt wird. Ausschlaggebend ist alleinig der erforderliche Bohr-

loch-Enddurchmesser bei Endteufe, der entsprechend der zu erwarteten Förderrate festgelegt wird. Von diesem leiten sich alle Bohrlochausbaukonfigurationen, so wie auch der obertägige Anfangsbohrdurchmesser ab. Nach Kosten-/Leistungsbeurteilung des Bohrfortganges hat sich in der Industrie weltweit ein Bohrlochdurchmesser für die geologische Zielformation von 216 mm etabliert, für den sie auch eine maximale Palette an Werkzeugwahlmöglichkeiten entwickelt hat (siehe Kapitel 6).

T4-2.3 Welche Bohrlochdurchmesser am Zielort können nach heutigem Stand der Technik bei Bohrungen bis 3.000 m bis 5.000 m Tiefe erreicht werden?

Die größten mit heute am Markt verfügbarer Bohrtechnik erreichbaren Bohrlochdurchmesser in 3.000 – 5.000 m Tiefe liegen im Bereich von ca. 450 mm (siehe Kapitel 6). Bis 3.000 m sind es 500 mm und bis 2.000 m sind dies 650 mm. In Forschungsbohrungen und militärischen Bohrungen wurden schon größere Durchmesser realisiert.

T4-2.4 Was ist erforderlich, um Bohrlochdurchmesser am Zielort von mindestens 1 m zu erreichen?

Die Leistung (Hakenlast) der heute verfügbaren Bohranlagentechnik müsste verzehnfacht werden, sowie die für diese Bohrdurchmesser benötigten Bohr- und Servicewerkzeuge noch entwickelt und in ausreichenden Mengen gefertigt werden. Entsprechend der größeren einzusetzenden Bohranlagen wird auch der obertägige Platzbedarf wachsen (siehe Kapitel 6). Rückfragen bei potenziellen Herstellern haben ergeben, dass der Bau solcher Anlagen möglich ist, jedoch aufgrund der Zielsetzung in der Kohlenwasserstoffindustrie (kleine Bohrlochdurchmesser) nicht zum Standardprogramm gehört.

Ein intensives Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit Demonstrationsvorhaben erscheint notwendig.

Mit dem hier angedachten Grundkonzept (Kapitel 5) und skizzierten Behältern (Kapitel 7) könnten auch kleinere Durchmesser und Teufen ausreichend sein.

T4-3.1 Welche Havariefälle kommen vor und wie wird nach Stand der Technik damit umgegangen?

Die zu erwartenden Havariefälle in einer Bohrung sind für Grossloch- sowie Kleinlochbohrungen dieselben. Es sind in erster Linie Bohrlochstabilitätsprobleme und damit das

fest werden des Bohrwerkzeuges, so wie Druckdifferenzen zwischen Formations- und Bohrlochfluid und damit die Gefahr von unkontrollierten Ausbrüchen oder Kollaps des Bohrloches. Um solche Situationen zu vermeiden werden für alle Bohrlochdimensionen korrekt bemessene Fluide, Pumpleistungen etc. benötigt. Zusätzlich muss die Bohrspülung kontinuierlich überwacht und „chemisch gepflegt“ werden. Technische Havariefälle sind in der Erstellungsphase der Bohrung zu erwarten. Bei einem entsprechend ausgebauten und überwachten Bohrloch können Havarien in der Einlagerungsphase vermieden und entsprechende Vorkehrungen getroffen werden (siehe Kapitel 6 und 9).

T4-3.2 Wie werden Bohrlöcher vor Wassereinbruch geschützt?

Bohrlöcher werden durch ihren Ausbau mit Futterrohren vor dem Einbruch von Wasser, geologischen Fluiden und Gasen von außen geschützt. Diese Stahlrohre werden nach geologischer Maßgabe bei jedem Bohrprojekt in bestimmten Teufen eingebaut und in der Formation fest einzementiert (siehe Kapitel 6).

Nach Verschluss des Bohrlochs ist auf lange Sicht mit der Korrosion der Verrohrung zu rechnen, so dass Formationswässer an die Behälter gelangen kann.

T4-4.1 Welchen Abstand sollten die Bohrungen aus bohrtechnischen Gründen mindestens haben, wenn sie bis in 3.000 m bis 5.000 m Tiefe abgeteuft werden?

Aus gebirgsmechanischen Gründen reicht ein dreifacher Abstand des zu bohrenden Durchmessers zu der Nachbarbohrung. Aus Sicherheitsgründen und um eine bereits bestehende Bohrung beim Abteufen in der Tiefe nicht anzufahren ist ein Sicherheitsabstand von ca. 50 m heute üblich und ausreichend (siehe Kapitel 6).

T4-4.2 Welche Kosten entstehen für eine Bohrung bis 5.000 m Tiefe in Abhängigkeit vom Durchmesser der Bohrung?

Die Kosten einer Bohrung mit heute verfügbarer Technologie und einem Enddurchmesser von ca. 450 – 500 mm bis 5.000 m Tiefe werden sich im Bereich von ca. 30 Millionen Euro bewegen. Die Bauzeit dafür wird etwa ein halbes Jahr dauern.

Die Bohrkosten steigen mit dem Durchmesser und der Endteufe exponentiell an. So könnte eine Grosslochbohrung mit ca. 1 m Durchmesser in 5.000 m Tiefe nach ersten Schätzungen einige hundert Millionen Euro, bis zum Zehnfachen einer heutigen Bohrung, kosten (siehe Kapitel 6).

T4-4.3 Welche Kosten und welcher Flächenbedarf fallen für die Einrichtung eines Bohrplatzes für eine Bohrung bis in 3.000 m bis ca. 5.000 m Tiefe an?

Die Kosten für den Bau eines Bohrplatzes nach Richtlinie des Wirtschaftsverbands Erdöl- und Erdgasgewinnung (W.E.G.) e.V. für eine heute verfügbare Bohranlage zum Abteufen einer 5.000 m tiefen Endlager-Bohrung wird sich in der Größenordnung von 3 Millionen Euro bewegen. Die Ausmaße eines solchen Platzes werden mit 60 m x 100 m (6.000 m²) angenommen (siehe Kapitel 6).

Die Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle erfordert für jedes Bohrloch übertägige kerntechnische Anlagen und Lagerbereiche. Die Kosten und der Flächenbedarf dafür werden zusätzlich zur Einrichtung des Bohrplatzes benötigt und werden hier nicht abgeschätzt.

3.5 Literatur Kapitel 3

/BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.

4 Einleitung

Die „Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe“ wird Mitte 2016 ihren Abschlussbericht dem Bundestag vorlegen. Die essenziellen Aufgaben der seit Mai 2014 arbeitenden Kommission bestehen in der Evaluierung des Standortauswahlgesetzes, der Festlegung von verfahrenstechnischen Anforderungen an dem Endlagerauswahlprozess, der Öffentlichkeitsbeteiligung und der Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen (Sicherheitsanforderungen, Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen). Zur Umsetzung der Aufgaben hat die Kommission Arbeitsgruppen (AG) eingerichtet. Wesentliche Teile des Kommissionsberichtes werden dabei im Entwurf von den Arbeitsgruppen verfasst.

Als mögliche Alternative bzw. weitere Option zur Einlagerung von hoch-radioaktiven wärmeentwickelnden Abfällen in einem Bergwerk wird die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern untersucht bzw. diskutiert. In Deutschland wird diese Option derzeit als weiter zu beobachten eingestuft, da eine Bergwerkslagerung priorisiert wird /KOM 16/.

Das vorliegende Gutachten wurde entsprechend dem Auftrag der AG 3 zu den Fragestellungen „Tiefe Bohrlöcher“, welche die Erarbeitung der genannten Entscheidungsgrundlagen unterstützen soll, angefertigt.

Als Vorteile einer geologischen Lagerung in tiefen Bohrlöchern werden in diesem Gutachten gesehen:

- ein größerer Abstand zum menschlichen Lebensraum und weiteren Schutzgütern,
- eine längere Versiegelungsstrecke des Zugangs zum Einlagerungsbereich mit geringem Durchmesser¹,
- keine Auffahrung eines Bergwerks mit Personeneinsatz unter Tage,
- ein technisch aufwändigerer Zugriff auf die Abfälle als Schutz vor Proliferation,

¹ Bohrungen bis in eine Teufe (vertikale Tiefe) von 5 km mit Durchmessern von mehreren Metern sind weit jenseits einer derzeit vorstellbaren technischen Möglichkeit und werden daher im Folgenden nicht berücksichtigt. Trockene „Bohrungen“ mit entsprechenden Durchmessern werden als Schachtanlagen im Bergbau betrachtet.

- ein voraussichtlich geringerer Zeitbedarf zum Bau einer Bohrung als Endlager, der Einlagerung (Betriebszeit) und des Verschlusses im Vergleich zur Einlagerung in Bergwerken.

Zusätzlich

- können mehrere Standorte in Betracht gezogen werden
- und mehr (unterschiedliche) geologische Barrieren in Betracht gezogen werden.

Im vergangenen Jahr fanden Veranstaltungen mit internationaler Beteiligung zum Thema einer Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlochlöchern statt /BRA 15b/, /NWTRB 15/. Zudem liegen aktuelle Stellungnahmen zu diesem Thema vor /SCH 15/, /DAEF 15/. In den Workshops und Stellungnahmen wurden Chancen und Maturität einer Lagerung in tiefen Bohrlochern diskutiert und bewertet. Das Ergebnis war, dass für eine tiefe Bohrlochlagerung heute noch nicht alle notwendigen Überprüfungen und Sicherheitsbetrachtungen in ausreichendem Maße stattgefunden haben und deshalb Demonstrationsvorhaben sinnvoll erscheinen, um den Gesamtprozess maßstabsgetreu abbilden und validieren zu können, falls man das Konzept verfolgen und weiterentwickeln möchte. Für eine Endlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlochern wurden bisher keine systematischen, standortspezifischen Sicherheitsanalysen durchgeführt.

In der Kurzstellungnahme der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) /DAEF 15/ werden eine Lagerung in tiefen Bohrlochern kritisch und die Chancen und Risiken als schwierig bewertbar angesehen, da es außer Studien (z. B. /BAT 14/, /BES 08/, /ARN 14/, /ARN 11/, /GRU 14/, /HAR 00/) bislang kein technisches Konzept und keinerlei technische Erprobungen gibt. Als zu lösende Fragestellungen, Schwächen und Risiken werden in /DAEF 15/ genannt (gekürzt dargestellt):

- Eine qualitätsgesicherte Erkundung der Einlagerungsbereiche in 3.000 bis 5.000 m für die Endlagerung sei in diesen großen Teufen nicht Stand der Technik.
- Ein Sicherheitskonzept, das die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) vorsieht, liegt für die Tiefe Bohrlochlagerung nicht vor.

- Bohrungen mit einem Durchmesser von mehreren Metern, wie von der AG 3 formuliert /KOM 15/, sind für die vorgesehene Tiefe nicht Stand der Technik. Dies gilt demnach auch für die dafür erforderliche Verrohrung.
- Ein zuverlässiger und sicherer Betrieb der Einlagerung von Endlagerbehältern in einer solchen Tiefe ist nicht Stand der Technik.
- Folgen von Betriebsstörungen scheinen aufgrund der Unzugänglichkeit im beengten Bohrloch unter Strahlenschutzbedingungen im Gegensatz zu solchen Störungen in einem Endlagerbergwerk nicht beherrschbar, wodurch eine Fehlerkorrektur nahezu unmöglich sei.
- Ein Monitoring im Einlagerungsbereich ist in der vorgesehenen Tiefe von 3.000 bis 5.000 m deutlich komplizierter bis unmöglich, insbesondere im Hinblick auf die kabellose Datenübertragung über große Distanzen des viele hundert Meter mächtigen Verschlussbereichs.
- Eine Rückholbarkeit in der Betriebsphase und eine Bergbarkeit innerhalb von 500 Jahren nach Verschluss der Bohrlöcher sind in keinem der vorliegenden Konzepte vorgesehen /GRU 10/, /BRA 09/, eine Bergung wird zudem als nahezu unmöglich angesehen.
- Bei der Endlagerung ausgedienter Brennelemente führe die Einlagerung großer Mengen Spaltmaterials in einem Bohrloch unter Berücksichtigung der begrenzten Behälterstandzeit und des Vorhandenseins von Wasser als Moderator zu Kritikalitätsrisiken. Dies betrifft insbesondere die Endlagerung von ausgedienten MOX-Brennelementen, die in Deutschland im Unterschied zu den USA und skandinavischen Ländern mehr als 10 % der ausgedienten Brennelemente ausmachen².
- Wie ein qualitätsgesicherter Verschluss der Bohrlöcher unter Berücksichtigung des Strahlenfeldes und der notwendigen Abschirmmaßnahmen in den beengten Bohrlöchern realisiert werden soll, sei nicht erkennbar.

Auf den internationalen Workshops /BRA 15b/, /NWTRB 15/ wurden Chancen und Herausforderungen der Einlagerung in tiefen Bohrlöchern diskutiert. Nationale Aspekte hinsichtlich einer Standortauswahl, Konstruktion, Einlagerung, Stilllegung mit Monitoring und Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit wurden auf dem Workshop im Juni 2015 in

² 8 % nach Tab. 3.3 auf S. 8 /PEI 11/ (VSG AP 3, Stand Atomausstieg). Siehe auch Tab. 7-1 hier.

Berlin-Schönefeld /BRA 15b/ speziell angesprochen. Die technische Machbarkeit, die Verlässlichkeit, die Langzeitsicherheit und die Akzeptanz wurden diskutiert. Insbesondere wurde aufgezeigt, wie sich der Stand der Bohrtechnik und Bohrlochmesstechnologie mit der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) und bei der Kohlenwasserstoffexploration weiterentwickelt haben. Es wurde gefolgert,

- dass eine Abstimmung zwischen den Erfahrungsträgern der verschiedenen Fachdisziplinen zur Bewertung der Option einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern erforderlich ist,
- dass die grundlegenden Technologien, die für eine Endlagerung in einem tiefen Bohrloch notwendig sind, vorhanden sind,
- dass sich die Erkundungstechnologien in den vergangenen Jahren erheblich verbessert haben und eine ausreichende Qualifizierung von Formationen erlauben,
- dass der Entwicklungsstand der tiefen Bohrlochlagerung nicht den der Bergwerkslagerung besitzt,
- dass verschiedene Optionen zur Fehlerkorrektur auch unter Strahlenschutzbedingungen zu adressieren sind,
- dass insbesondere die Prozesskette als Ganzes überprüft werden muss,
- dass die Nutzung diversitärer geologischer Barrieren und die große Entfernung zu den Schutzgütern einen Sicherheitsgewinn darstellen können,
- dass die unterschiedlichen geologischen Barrieren für ein Multibarrierensystem kombiniert werden können,
- dass tiefe Bohrlöcher ein Optimierungspotenzial und Forschungs- und Entwicklungsbedarf haben, da die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten auf kleine Bohrlochdurchmesser ausgerichtet war,
- dass verschiedene Verschlusskonzepte für Bohrungen und deren Anwendbarkeit zu prüfen sind,
- dass eine Dimensionierung entsprechender Behälter für die Einlagerung erforderlich ist, um daraus den notwendigen Bohrlochdurchmesser ableiten zu können.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen des U.S. Nuclear Waste Technical Review Board /NWTRB 16/ aus dem Workshop zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern sind:

- dass die Bohrlochlagerung die Erfordernis eines Bergwerks nicht beseitigt³,
- dass für die Erstellung eines Regelwerks und ein Genehmigungsverfahren wahrscheinlich eine ähnliche Dauer wie für eine Bergwerkslagerung angesetzt werden muss,
- dass der geplante Feldtest des Departement of Energy (DOE) nur begrenzte Informationen zur Machbarkeit und Standorteignung liefert und
- dass die betrieblichen Auswirkungen und Randbedingungen einer Einlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen nicht vergleichbar mit einer Einlagerung von inaktiven Abfällen sind und daher von äußerster Bedeutung für das Design und Einschätzung der Machbarkeit sind.

Das DOE verfolgt die Option der Einlagerung von radioaktiven Abfällen in Bohrlöchern derzeit, um Aktivitäten zu zeigen, die auf eine Endlagerung ziviler, radioaktiver Abfälle hinzielen. Um möglichst landesweit ohne Vorfestlegung suchen zu können, wurde das kristalline Grundgebirge als Formation ausgewählt, obwohl auch andere Formationen in den USA denkbar sind. Die Entsorgung der Sr-Kapseln des DOE und eventuell weiterer Forschungsabfälle werden als Ziel der Machbarkeitsstudie genannt, um Widerstände seitens der kommerziellen Versorger zu vermeiden. Es wird jedoch seitens des DOE durchaus in Betracht gezogen die eigenen (und kommerziellen) abgebrannten Brennelemente langfristig mittels einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern entsorgen zu können. Es war unstrittig, dass eine geologische Entsorgung der hochaktiven Sr-Kapseln mit vergleichsweise kurzer Halbwertszeit in tiefen Bohrlöchern nicht als zwingend anzusehen ist.

4.1 Vorgehen

Um eine Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern als eine mögliche Endlagerungsoption in Betracht zu ziehen, wird ein systematisches Vorgehen als erforderlich angesehen. Dies beinhaltet:

³ Dies gilt für das vom DOE vorgestellte Konzept. Bei anderen Ländern und Konzepten kann sich dies anders darstellen.

- Entwicklung eines Grundkonzepts mit einer Behälterkonzeption
- Darstellung des Standes der Bohrtechnik mit Exploration, Erschließung und Monitoring
- Darstellung der Einlagerung mit Rückholung und Bergung sowie denkbarer Szenarien
- Diskussion der Standortauswahlkriterien und Sicherheitsanforderungen für eine Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern

Um die Stärken und Schwächen einer tiefen Bohrlochlagerung anschaulich diskutieren zu können, wird ein erster Entwurf für ein Grundkonzept einer Lagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern im Gutachten vorgestellt, der die notwendige Randbedingungen unter Berücksichtigung der in Deutschland derzeit geltenden Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfällen /BMU 10/ erfüllen könnte. Dieses Grundkonzept soll zudem Möglichkeiten berücksichtigen, die durch die vielfältige Geologie in Deutschland gegeben sind.

Im Gutachten werden nur solche Bohrtechnologien näher betrachtet, die sich als Stand der Technik bewährt haben. Es wird ein Ausblick über eine mögliche gezielte Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten gegeben. Der Stand der konventionellen Technik (z. B. Ein- und Ausbau oder Bergung schwerer Komponenten mit einigen zehner Tonnen (Mg) Gewicht bei tiefen Bohrungen) gehört seit Jahrzehnten zum Bohralltag d. h. die notwendigen Technologien sind bereits in der Praxis vielfach erfolgreich erprobt worden. Das Ziel von Tiefbohrungen war es in den vergangenen Jahrzehnten mit dem kleinstmöglichen Durchmesser die Zielformationen zu erreichen. Größere Durchmesser wurden bereits vor Jahrzehnten genutzt (z. B. F&E Vorhaben). Nach /BES 08/ sind Bohrungen mit großen Durchmessern und Teufen (vertikale Tiefe) bekannt (bis 2.000 m Teufe Durchmesser bis 200 cm, bis 3.000 m Teufe Durchmesser bis ca. 80 cm). Gerade in Deutschland besteht mit der kontinentalen Tiefbohrung (KTB) und den damit einhergehenden technischen Entwicklungen ein erhebliches Know-How, das heute noch vorhanden ist und bei der Bearbeitung des Gutachtens eingebunden wurde.

Für die Fragestellung wird es als unverzichtbar erachtet, das Zusammenwirken der Technologien und die mit der Fragestellung zusammenhängenden wissenschaftlich-technologischen Fragen konkret zu adressieren. Dabei werden die Besonderheiten der

aktuellen nationalen Anforderung in Deutschland an Betrieb, Rückholbarkeit, Bergbarkeit und Langzeitsicherheit vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden Geologie berücksichtigt. Die Möglichkeiten und Grenzen der Technologien, die für Vorerkundung, Bohrung, Einlagerung und Überwachung unter Beachtung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik für ein solches Konzept notwendig sind, werden deshalb zusammenfassend in diesem Gutachten dokumentiert⁴. Sie werden an dem auf die nationalen Besonderheiten ausgerichteten Grundkonzept reflektiert.

Neben den unterschiedlichen – für eine Endlagerung notwendigen – Technologien werden die von der Kommission gestellten Fragen adressiert. Einige Fragestellungen können zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt werden, da entsprechende Demonstrationsvorhaben weltweit fehlen. Deshalb wird im Gutachten auch auf den F&E Bedarf hingewiesen, der notwendig ist, falls man das Konzept einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern verfolgen und weiterentwickeln möchte.

4.2 Nationale und internationale Entwicklung und Aktivitäten

In Deutschland wurde die Idee einer tiefen Bohrlochlagerung in mehreren km Tiefe bisher nicht ernsthaft in Erwägung gezogen. Eine Einlagerung in 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern im Salzgestein, ausgehend von einer Sohle eines Bergwerks nach der Auffahrung wurde als Konzept angedacht /CLO 00/, /RSK 05/ und untersucht /BRA 15a/. Entsprechende Überlegungen sind bereits in den '80iger Jahren dokumentiert /CLO 80/.

Die Entsorgung von Schadstoffen in und über Bohrungen in den tiefen Untergrund findet statt. Beispielsweise werden die bei der Produktion von Kohlenwasserstoffen und Kalisalz anfallenden Wässer verpresst /WIK 16/. Es werden auch bei Bohrungen und Produktion anfallende natürliche radioaktiv belastete Feststoffe auf diese Weise entsorgt.

Erste Ideen zur tiefen Bohrlochlagerung (Deep Borehole Disposal - DBD) gibt es seit den 1950er Jahren in den USA und der UdSSR /GIB 14/. Ein Forschungsantrag an die US National Academy of Sciences wurde 1957 zunächst abgelehnt /NAS 57/. 1983 wurden Bohrungen bis 6.000 m Tiefe und 50 cm Durchmesser vorgeschlagen

⁴ Neben den im Gutachten dargestellten Methoden werden in der Forschung z.T. weitere Verfahren eingesetzt. Die dargestellten Verfahren sollen einen Überblick über den Stand der Technik ermöglichen.

/WOO 83/. 1989 wurde die Lagerung in tiefe Bohrlöchern in Schweden für Bohrungen von 80 cm Durchmesser und vier km Tiefe studiert /JUH 89/. Diese Option wurde 1992 in einem Ranking mit den Kriterien Kosten, Zeit und Sicherheit gegenüber einer Lagerung in einem Bergwerk im Kristallin allerdings nicht priorisiert /AHL 95/, /SKB 92/. Später folgten Ansätze von /GIB 00/ und /CHA 03/ in Großbritannien. Ein Review zum Konzept einer tiefen Bohrlochlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen /NIREX 04/ fasste zusammen, dass einerseits in den 90'ger Jahren ein verstärktes Interesse zur Entsorgung von waffenfähigem Plutonium daran bestand, aber auch dass nennenswerte Finanzmittel erforderlich wären um den gleichen Kenntnisstand wie bei der Einlagerung mittels Bergwerken zu erreichen. 2006 sprach das CoRWM (Komitee für Management von radioaktivem Abfall in Großbritannien) folgende Empfehlung aus: "die Entscheidungsfindung sollte die Möglichkeit offen lassen, dass andere langzeitige Handlungsoptionen (z. B. Lagerung in Bohrlöchern) als praktikable Alternativen aufgenommen könnten"⁵ /COR 06/.

Das diese Einlagerungsoption mit bereits vorhandener Bohrtechnologien möglich sei folgerte /HAR 00/, obwohl es eine der größten Herausforderungen für die Bohrtechnologie darstelle⁶. 2012 stellte die "Blue Ribbon Commission" der USA fest, dass tiefe Bohrlöcher eine potentiell vielversprechende Technologie für die geologische Abfallentsorgung sowie für die Flexibilität des gesamten Abfallbehandlungssystems sein könnten, die daher weitere Forschung, Entwicklung und Anwendung verdient⁷.

Aktuell werden in Russland, der Tschechischen Republik, Süd-Korea und China in Zusammenarbeit mit DOE und / oder der Universität Sheffield Forschungsprojekte zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern entwickelt /GIB 15/.

In allen beschriebenen Konzepten ist eine Bergung der Behälter nach Bohrlochverschluss nicht vorgesehen.

⁵ „...decision making should leave open the possibility that other long term management options (for example borehole disposal) could emerge as practical alternatives,“

⁶ „it is possible to drill the well with currently existing technology, although it represents one of the biggest challenges to be presented to the drilling industry“

⁷ „...identified deep boreholes as a potentially promising technology for geologic waste disposal that could increase the flexibility of the overall waste management system and therefore merits further research, development, and demonstration“

4.2.1 USA

Das Department of Energy (DOE) der USA hat bereits 2011 sowohl die technische Basis für eine Lagerung in Bergwerken als auch für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern im Kristallin in Planung und Untersuchung aufgenommen /UFDC 11/.

Das DOE hat einen Feldtest im Hinblick auf eine mögliche Nutzung zur tiefen Bohrloch-lagerung für kleinere Abfallformen und auch der geothermischen Energiegewinnung (Nachnutzungsmöglichkeit) in einer kristallinen Gesteinsformation beauftragt /WNN 16/, /DOE 16/. Dieser Feldtest ist auf ca. fünf Jahre mit einem Finanzvolumen von 35 Mio. US \$ angelegt. Neben geowissenschaftlicher Forschung ist ein kalter Test der Einlagerungstechnik vorgesehen. Zwischenzeitlich haben sich Verzögerungen ergeben, da das betroffene County nicht rechtzeitig über den offiziellen Start der Arbeiten informiert wurde. Daher wurde ein Moratorium der Geländearbeiten erlassen /DON 16/.

Die Sicherheitsanalysen für Transport, Konstruktion, Operation und Verschluss und für die Zeit danach werden zurzeit erarbeitet. Im kalten Feldtest sollen inaktive Behälter von ca. 1,10 m Länge und 11,5 cm Durchmesser eingebracht werden vor dem Hintergrund einer möglichen Einlagerung von Sr-Kapseln an anderen Standorten in den USA (Abb. 4-1). Es werden noch verschiedene Arten von Verfüllungen der Bohrungen im Bereich der Container diskutiert, z.B. Komplettierungsfluide oder Feststoffverfüllungen (z.B. für Legierungen mit niedrigem Schmelzpunkt). Eine testweise Rückholung der inaktiven Behälter ist geplant.

Vereinigte Staaten

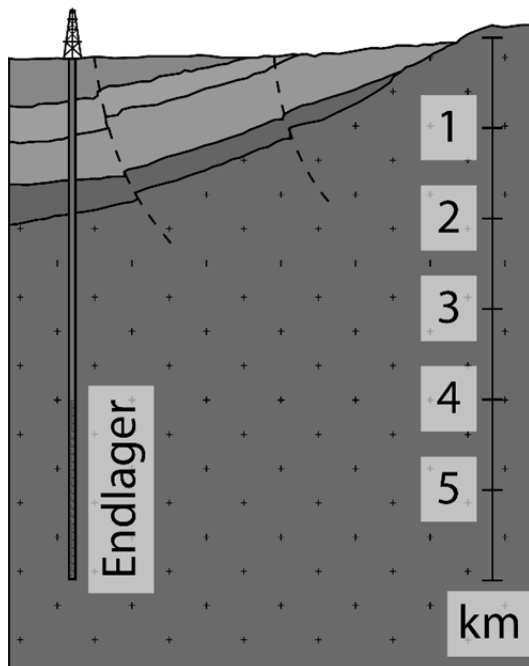


Abb. 4-1 Schematische Darstellung der Bohrlochlagerung von radioaktivem Abfall in den USA in Kristallingestein in Tiefen größer 4.000 m.

Im Oktober 2015 wurde vom U.S. Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) ein Workshop veranstaltet, um das Vorhaben der DOE zur tiefen Bohrlochlagerung näher zu diskutieren und aus fachlicher Sicht für den US Präsidenten zu bewerten /NWTRB 15/.

Der vor kurzem veröffentlichte Bericht des NWTRB /NWTRB 16/ als Zusammenfassung des Workshops für den Kongress und den Minister für Energie benennt als Ziele⁸

- die technischen und wissenschaftlichen Fragen zu adressieren, welche die Machbarkeit einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern für ausgewählte radioaktive Abfallgebinde ermöglichen, und
- ob die Ergebnisse des DOE-Feldtests die notwendigen technischen Daten und das wissenschaftliche Verständnis erbringen, um die Machbarkeit der Einlagerung ausgewählter Abfallgebinde in tiefen Bohrlöchern zu zeigen.

⁸ (1) technical and scientific issues that may affect the feasibility of the deep borehole disposal option for select radioactive waste forms and

(2) whether results that will be obtained from the DOE Deep Borehole Field Test will provide the necessary technical data and scientific understanding for determining the feasibility of disposing of select waste forms in deep boreholes

Das NWTRB kommt zum Resultat⁹, dass

- dass die Bohrlochlagerung die Erfordernis eines Bergwerks nicht beseitigt¹⁰,
- dass für die Erstellung eines Regelwerks und das Genehmigungsverfahren wahrscheinlich eine ähnliche Dauer wie für eine Bergwerkslagerung angesetzt werden muss,
- dass der geplante Feldtest des DOE nur begrenzte Informationen zur Machbarkeit und Standorteignung liefert und
- dass die betrieblichen Auswirkungen und Randbedingungen einer Einlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen nicht vergleichbar mit nicht-radioaktiven Abfällen sind und daher von äußerster Bedeutung für das Design und Einschätzung der Machbarkeit sind.

Diese Einschätzungen sind auch vor dem Hintergrund der zukünftigen weiteren Nutzung der Kernenergie in den USA zu sehen.

Die Einlagerung in den kristallinen Untergrund zu untersuchen wird in den USA auch deshalb verfolgt, da entsprechende Standorte fast überall in den USA zu finden seien und sich damit keine Präjudizierung zum Nachteil einzelner Bundesstaaten in den USA ergeben.

⁹ Even if disposal of some radioactive waste in deep boreholes is determined to be feasible, the need for a mined, geologic repository is not eliminated.

Establishing a regulatory framework, identifying an acceptable site, and characterizing a deep borehole at depths down to 5 km (3.1 mi) are challenging and time consuming activities, suggesting that the time required for completing a deep borehole disposal facility might be comparable to that of a mined, geologic repository.

The Deep Borehole Field Test will provide only limited information on which to base an evaluation of the feasibility of the deep borehole disposal concept and the selection of a deep borehole disposal site.

The operational implications and limitations of handling and emplacing highly radioactive waste at depth are very different from those for operations involving non-radioactive material; however, evaluating and understanding those implications and limitations are of utmost importance for the design of a deep borehole disposal facility and for the feasibility assessment of the deep borehole disposal concept.

¹⁰ This is an important point for countries that have limited resources. A deep borehole program will not eliminate the need to also have a geologic repository. However, any well designed and licensed repository will be able to accommodate the waste of a deep borehole program." /EWI 16/

Das NWTRB geht davon aus, dass eine Bohrlochlagerung nicht für alle Abfälle eingesetzt werden wird, sondern sich die Nutzung von tiefen Bohrlochern auf spezielle Abfälle beschränken könnte.

4.2.2 Brasilien

In Brasilien stellen radioaktive Quellen einen großen Teil des radioaktiven Abfalls dar. Diese sollen im Rahmen des BOSS (borehole disposal of sealed sources) Konzepts in Bohrungen im Kristallin unterhalb des Trinkwasserhorizonts und unterhalb des geklüfteten Bereich des Kristallins gelagert werden. Zurzeit sind Bohrungen mit einer Tiefe von ca. 400 m geplant. Dazu können sowohl Rotary Spülbohren als auch Lufthebebohren (siehe Kapitel 6) verwendet werden. Die Bohrungen sollen mit einem einzementierten Stahlrohr ausgekleidet werden. Der Abfall selbst soll in Blei-Behältern eingelagert werden. Ein besonderer Bohrlochverschluss ist dabei nicht vorgesehen.

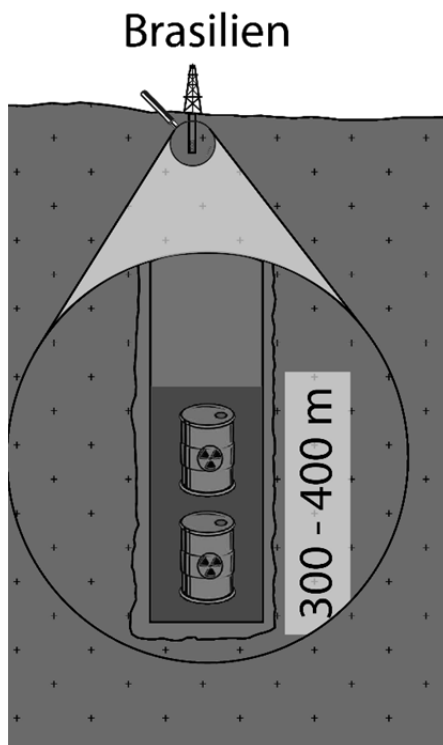


Abb. 4-2 Das brasilianische Konzept der Endlagerung radioaktiver Quellen sieht Bohrungen im Kristallin bis ca. 300 - 400 m Tiefe mit relativ geringem Durchmesser vor.

4.2.3 Schweden

Als Option wurde die Lagerung von abgebrannten Brennelementen in Behältern aus Titan in Tiefen von 2 – 4 km in Bohrlöchern im Granitgestein in Schweden untersucht. Obwohl aufgrund der Tiefe eine gute Barrierefunktion des Wirtsgesteins erwartet wurde, wurden die Unsicherheiten hinsichtlich der Behälter und der Ausbreitung als zu groß eingeschätzt /BIR 92/, /OLS 92/, /SKB 92/. Auch die Kosten wurden im Vergleich als höher angesehen /AGE 92/. Daher kam diese Option mit den getroffenen Annahmen im Vergleich zu verschiedenen Varianten der Endlagerung in einem Bergwerk nicht in die engere Wahl.

In dem späteren Vorhaben „Project on alternative System Study“ (Pass) wurden nochmals Studien zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern durchgeführt und mit dem Entwicklungsstand zu einer Einlagerung in einem Bergwerk im Kristallingestein - dem KBS3-Konzept mit Kupferbehältern - verglichen. In der Untersuchung /GRU 10/ kommt man zu dem Schluss, dass bei einer Endlagerung der radioaktiven Abfälle in Bohrlöchern mit 80 cm Durchmesser und bis zu 4.000 m Tiefe im Kristallin die langfristige Sicherheit vorrangig auf der Zurückhaltung der Radionuklide auf der vorausgesetzten, sehr langsamen Fließgeschwindigkeit, den Dichteunterschieden auf Grund der hohen Salinität der Lösungen und der geringen Durchlässigkeit (Permeabilität) im Gestein, das die Bohrung umgibt, beruht. Damit würde der Einschluss der Abfälle durch die geologische Umgebung ausreichend gewährleistet werden, im Gegensatz zum KBS3-Konzept, das den Einschluss vornehmlich durch die technische und geotechnische Barrieren (Kupferbehälter) gewährleistet.

Ein Endlager wird als kerntechnische Anlage betrachtet und muss demnach entsprechende Anforderungen gemäß dem schwedischen Regelwerk erfüllen /ULF 08/. Seitens Svensk Kärnbränslehantering (SKB) ist nicht publiziert, ob und wie die erforderlichen Sicherheitsnachweise für eine tiefe Bohrlochlagerung erbracht werden. Es blieb ungeklärt, wie Unfälle verhindert und Störungen im Betrieb wieder behoben werden können /GRU 10/. Außerdem sind Schutzmechanismen für die Behälter und Bentonitabdichtungen um Behälter in Bohrlöchern schwer zu realisieren /GRU 10/. SKB kam zum vorläufigen Fazit, dass in Bezug auf Sicherheit in der Idee der Tiefen Bohrlochlagerung derzeit keine Vorteile im Vergleich zum KBS3-Konzept gesehen werden. Ein Übersichtspapier zur tiefen Bohrlochlagerung /PUS 12/ wurde publiziert. Weitere Studien erfolgten in Anlehnung an die amerikanischen Arbeiten zu radiologischen Konsequenzen /GRU 13/, Gasbildung /GRU 14/, Thermohydraulik /MAR 13a/, Geodaten

/MAR 13b/, die bisher den weiteren Entscheidungsprozess in Schweden nicht für eine tiefe Bohrlochlagerung beeinflussten /GIB 15/.

4.2.4 Niederlande

In den 80er Jahren wurden in den Niederlanden verschiedene Techniken der Einlagerung in Salzgestein untersucht. Dazu zählen tiefe Bohrlöcher, Salzkavernen und die Auffahrung eines Bergwerkes /NAS 99/. Mittels tiefer Bohrlöcher von übertage wurde eine Einlagerung nicht nur in Salzstöcken sondern auch in tieferen Salzsichten deutlich unterhalb 1.000 m in Betracht gezogen /NAS 99/. Zement wurde als Bohrlochverschluss vorgeschlagen. Mit ersten Überlegungen in /NAS 99/ wurde dem Aspekt der Rückholung im Konzept Rechnung getragen.

4.2.5 England

In /NIREX 04/ wurde die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern für England betrachtet. Die Studie betonte, dass trotz der bisherigen Überlegungen noch keine praktische Anwendung eines solchen Konzepts erfolgt ist. Es wurde als wahrscheinlich angesehen, dass beträchtliche Finanzmittel und weitere Forschung mit Entwicklung /ARN 14/ erforderlich sind um den gleichen Kenntnisstand wie bei einer Einlagerung in einem Bergwerk zu erreichen.

/GIB 14/ kommt zum Schluss, dass die tiefe Bohrlochlagerung weiterhin eine interessante Alternative ist, jedoch trotz der technischen Möglichkeiten ein Nachweis der praktischen Machbarkeit noch nicht erfolgt ist, obwohl die tiefe Bohrlagerung technisch möglich sei und günstiger als andere Optionen erscheint. Ein umfassender Sicherheitsnachweis neben dem technischen Feldtest zur Machbarkeitsnachweis steht aus.

4.2.6 Russland

Die Entsorgung hoch-radioaktiver militärischer Abfälle (unverarbeitete abgebrannte Brennelemente) in bis zu 300 m tiefe Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 100 cm ist in /STE 98/ angesprochen. Über eine Verwirklichung dieser Absicht liegen keine Informationen vor.

4.2.7 IAEA

Die Einlagerung von radioaktiven Abfällen (Quellen) in Bohrlöchern wird in /IAEA 03/, /IAEA 09/ und /IAEA 11/ behandelt. Die Tiefe der Bohrlöcher soll mindestens ca. 30 m bei Durchmessern von mindestens ca. 26 cm liegen. Die Entsorgung von kleineren Volumina radioaktiver Abfälle und von verbrauchten Quellen wird als bevorzugte Anwendung einer Lagerung in Bohrlöchern verstanden. Eine Einlagerung radioaktiver Abfälle in noch tieferen Bohrlöchern ist nicht ausgeschlossen aber auch nicht evaluiert worden.

4.2.8 Fazit

In den allen genannten internationalen Ansätzen sind bisher weder vertiefte Untersuchungen noch Demonstrationsvorhaben erfolgt. Dennoch ist ein breites Spektrum sowohl bzgl. des Abfallinventars als auch der Tiefe der Bohrlöcher angedacht. Eine spätere Bergung von Behältern nach Verschluss einer Bohrung wurde in keinem Ansatz vorgesehen.

4.3 Literatur Kapitel 4

- /AGE 92/ Ageskog, L., Högbom, T.: Project on Alternative Systems Study – PASS. Cost comparison of repository systems, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 92-44, 66 S., VBB VIAK AB: Stockholm, Sweden, 1992.
- /AHL 95/ Ahlbom, K., Olsson, O., Sehlstedt, S., Svensk kärnbränslehantering AB.: Temperature Conditions in the SKB Study Sites, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 1995.
- /ARN 11/ Arnold, B.W., Brady, P.V., Bauer, S.J., Herrick, C., Pye, S., Finger, J.: Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, SAND2011-6749, 67 S., Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico, 2011.

- /ARN 14/ Arnold, B.W., Brady, P.V., Sutton, M., Travis, K.P., MacKinnon, R., Gibb, F.G.F., Greenberg, H.: Deep Borehole Disposal Research: Geological Evaluation, Alternative Wasteforms, and Borehole Seals, SAND2014-17430R, Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico, 2014.
- /BAT 14/ Bates, E.A., Driscoll, M.J., Lester, R.K., Arnold, B.W.: Can deep boreholes solve America's nuclear waste problem?, Energy Policy, Bd. 72, S. 186–189, DOI 10.1016/j.enpol.2014.03.003, 2014.
- /BES 08/ Beswick, J.: Status of technology for deep borehole disposal, Report for NDA, Contract NP, Bd. 1185, 2008.
- /BIR 92/ Birgersson, Lars, Skagius, K., Wiborgh, M., Widén, H.: Project Alternative Systems Study – PASS. Analysis of performance and long-time safety of repository concepts, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 92-43, 132 S., Kemakta Konsult AB: Stockholm, Sweden, 1992, zitiert am 26. Januar 2016.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /BRA 09/ Brady, P.V., Arnold, B.W., Freeze, G.A., Swift, P.N., Bauer, S.J., Kanney, J.L., Rechard, R.P., Stein, J.S.: Deep borehole disposal of high-level radioactive waste, SAND2009-4401, Hrsg.: Sandia National Laboratories, DOI 10.2172/985495, 75 S., Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico 87185, 2009, erreichbar unter <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>, zitiert am 22. Januar 2016.
- /BRA 15a/ Bracke, G., Fischer-Appelt, K.: Methodological approach to a safety analysis of radioactive waste disposal in rock salt. An example, Progress in Nuclear Energy, Bd. 84, S. 79–88, DOI 10.1016/j.pnucene.2015.01.012, 2015.

- /BRA 15b/ Bracke, G., Schilling, F., Müller, B., Hurst, S., Merkel, B. (Hrsg.): Proceedings of the Workshop "Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety", June 2015, GRS-405, ISBN 978-3-944161-87-7, GRS gGmbH: Köln, 2015.
- /CHA 03/ Chapman, N., Gibb, F.: A truly final waste management solution - Is very deep borehole disposal a realistic option for high-level waste or fissile materials?, Radwaste Solutions, Bd. 10, S. 26–37, 2003.
- /CLO 00/ Closs, K.-D.: Anforderung an Plutonium-Abfallprodukte aus der Sicht der Endlagerung. in: Sammlung der AKE-Vorträge 1999 - 2006, 2000, erreichbar unter https://www.dpg-phy-sik.de/dpg/gliederung/ak/ake/tagungen/vortragssammlung/vor_1999_2006.html?print=true&, zitiert am 14. Februar 2016.
- /CLO 80/ Closs, K.D.: Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit. Studie "Entsorgungsalternativen", KfK 3000, Hrsg.: Kernforschungszentrum Karlsruhe, 284 S., Kernforschungszentrum Karlsruhe; Batelle Institut Frankfurt; Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen Hannover; Elektrowatt Ingenieurunternehmung Zürich; ECN Netherlands Energy Research Foundation; Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin; Kraftwerk Union Offenbach, Erlangen, Karlstein; Nukem Hanau; Siemens Transplan Netphen: Karlsruhe, 1980, zitiert am 26. Januar 2016.
- /COR 06/ CoRWM: Managing our Radioactive Waste Safely, Hrsg.: Committee on Radioactive Waste Management, 195 S.: London, 2006, erreichbar unter https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294118/700_-_CoRWM_July_2006_Recommendations_to_Government.pdf, zitiert am 28. Januar 2016.

- /DAEF 15/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): DAEF-Kurzstellungnahme zur Idee der »Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in bis zu 5000 m tiefen vertikalen Bohrlöchern von über Tage«, Hrsg.: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF), 12 S., 2015, erreichbar unter http://www.daef2014.org/DAEF/assets/daef_kurzstellungnahme-tiefe-bohrl%c3%b6cher_jun2015.pdf, zitiert am 26. Januar 2016.
- /DOE 16/ U. S. Department of Energy: Energy Department selects Battelle team for a deep borehole field test in North Dakota, erreichbar unter <http://www.energy.gov/articles/energy-department-selects-battelle-team-deep-borehole-field-test-north-dakota>, zitiert am 28. Januar 2016.
- /DON 16/ Donovan, L.: Rocky road for nuclear waste bore hole study, Stand vom 29. Januar 2016, erreichbar unter http://bismarcktribune.com/news/state-and-regional/rocky-road-for-nuclear-waste-bore-hole-study/article_7698d465-0316-5031-83e9-bc727d3592b9.html, zitiert am 14. Februar 2016.
- /EWI 16/ Ewing, R.: Bohrlochlagerung. An Guido Bracke, e-mail, 10. Februar 2016.
- /GIB 00/ Gibb, F.G.F.: A new scheme for the very deep geological disposal of high-level radioactive waste, *Journal of the Geological Society*, Bd. 157, Nr. 1, S. 27–36, DOI 10.1144/jgs.157.1.27, 2000.
- /GIB 14/ Gibb, F.G.F., Beswick, A.J., Travis, K.P.: Deep borehole disposal of nuclear waste. Engineering challenges, *Proceedings of the ICE - Energy*, Bd. 167, Nr. 2, S. 47–66, DOI 10.1680/ener.13.00016, 2014.
- /GIB 15/ Gibb, F.G.F.: An international Perspektive on deep Borehole Disposal, erreichbar unter <http://www.nwtrb.gov/meetings/2015/oct/gibb.pdf>, zitiert am 19. Februar 2016.
- /GRU 10/ Grundfelt, B.: Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, *Svensk kärnbränslehantering (SKB)*, 2010.

- /GRU 13/ Grundfelt, B.: Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 16 S., Kemakta Konsult AB: Stockholm, 2013, citerat am 25. Januar 2016.
- /GRU 14/ Grundfelt, B., Crawford, J.: The deep borehole concept - A conceptual model for gas generation and gas transport, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB P-13-11, 28 S., Kemakta Konsult AB: Stockholm, 2014, citerat am 25. Januar 2016.
- /HAR 00/ Harrison, T.: Very Deep Borehole: Deutag's Opinion on Boring, Container Emplacement and Retrieval, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB Report R-00-35: Stockholm, Sweden, 2000.
- /IAEA 03/ IAEA: Safety considerations in the disposal of disused sealed radioactive sources in borehole facilities, IAEA-TECDOC, Bd. 1368, 65 S., ISBN 9789201064035, International Atomic Energy Agency: Vienna, 2003.
- /IAEA 09/ IAEA: Borehole disposal facilities for radioactive waste, IAEA Safety standards series, SSG-1, 98 S, ISBN 978-92-0-109109-3, IAEA: Vienna, 2009.
- /IAEA 11/ IAEA: BOSS: borehole disposal of disused sealed sources. A technical manual, IAEA-TECDOC, Bd. 1644, 89 S., ISBN 920101810X, International Atomic Energy Agency: Vienna, 2011.
- /JUH 89/ Juhlin, C., Sandstedt, H.: Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes, Feasibility Study and Assessment of Economic Potential, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, TR-89-39: Stockholm, Sweden, 1989.

- /KOM 15/ Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Arbeitsgruppe 3 "Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen: Darstellung und erste Bewertung möglicher Pfade zum Umgang mit hoch-radioaktiven Abfallstoffen. Beschluss der Kommission am 20. April 2015, K-Drs. 98 neu, K-Drs./AG3-11 neu, 2015.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Arbeitsgruppe 3 "Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen: Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 4 (Entsorgungsoptionen und ihre Bewertung). Entwurf der AG 3 für die 20./21. Sitzung der Kommission am 21./22. Januar 2016, K-Drs. 160, 2016.
- /MAR 13a/ Marsic, N., Grundfelt, B.: Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 55 S., Kemakta Konsult AB: Stockholm, 2013, zitiert am 25. Januar 2016.
- /MAR 13b/ Marsic, N., Grundfelt, B.: Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 28 S., Kemakta Konsult AB: Stockholm, 2013, zitiert am 25. Januar 2016.
- /NAS 57/ US National Academy of Sciences (NAS): The Disposal of Radioactive Waste on Land. Report to the Committee on Waste Disposal of the Division of Earth Sciences, Publication 519: Washington, DC, USA, 1957.
- /NAS 99/ Naser, (Hadzegrija) Jahic, van den Broek, Wim M.G.T.: Disposal of High-Level Radioactive Waste in Deep Boreholes in Salt, WM'99 Conference, February 28 - March 4, 1999, 1999.

- /NIREX 04/ UK Nirex Ltd (Nirex): A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, Hrsg.: Nirex, U.K., Nirex report no. N/108, 89 S., 2004, erreichbar unter http://www.mkg.se/uploads/Nirex_Report_N_108_-_A_Review_of_the_Deep_Borehole_Disposal_Concept_for_Radioactive_Waste_June_2004.pdf, zitiert am 26. Januar 2016.
- /NWTRB 15/ Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): International Technical Workshop on Deep Borehole Disposal of Radioactive Waste. October 20-21, 2015, Board Workshop, erreichbar unter <http://www.nwtrb.gov/meetings/meetings.html>, zitiert am 25. Januar 2016.
- /NWTRB 16/ Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy, Hrsg.: Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), 70 S.: Arlington, Virginia, 2016, zitiert am 8. Februar 2016.
- /OLS 92/ Olsson, L., Sandstedt, H.: Project on Alternative Systems Study – PASS. Comparison of technology of KBS-3, MLH, VLH and VDH concepts by using an expert group, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 92-42, 89 S., Geostatistik Lars Olsson AB; Bergsäker Öst AB: Stockholm, Sweden, 1992, zitiert am 26. Januar 2016.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-54-0: Köln, 2011.
- /PUS 12/ Pusch, R., Ramqvist, G., Kasbohm, J., Knutsson, S., Mohammed, H.: The concept of highly radioactive waste (HLW) disposal in very deep boreholes in a new perspective, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Bd. 2, Nr. 3, S. 1–24, 2012.

- /RSK 05/ RSK: STELLUNGNAHME - Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept "Streckenlagerung von dickwandigen Behältern", 31.03.2005 (380. RSK-Sitzung), 10 S., 2005, zitiert am 14. Februar 2016.
- /SCH 15/ Schilling, F.: Kurze Zusammenstellung der Ergebnisse des Workshops „Deep Borehole Repository Using Multiple Geological Barriers“. 5. - 6. Juni 2015 Berlin - Schönefeld, Hrsg.: Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, K-Drs./AG3-27, 12 S., 2015, erreichbar unter http://www.bundestag.de/blob/380098/e061c846004df8fb6726cc500e0a4cdf/drs_027-data.pdf, zitiert am 16. Februar 2016.
- /SKB 92/ Svensk Kärnbränslehantering AB: Project on Alternative Systems Study (PASS) - Final report, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB, 93-04, 120 S.: Stockholm, Sweden, 1992, zitiert am 26. Januar 2016.
- /STE 98/ Stenhouse, M.J., Kirko, V.I. (Hrsg.): Defence Nuclear Waste Disposal in Russia: International Perspective, NATO ASI Series, Series 1, Bd. 18, 340 S., ISBN 9789401061483, Springer: Dordrecht, 1998.
- /UFDC 11/ Used Fuel Disposition Campaign: Used Fuel Disposition Campaign Disposal_R&D_Roadmap__Rev_0.1_, FCR&D-USED-2011-000065 REV 0, 121 S., U. S. Department of Energy, 2011, erreichbar unter http://energy.gov/sites/prod/files/UFD_Disposal_R%26D_Roadmap_Rev_0.1.pdf, zitiert am 15. Februar 2016.
- /ULF 08/ Ulf Yngvesson (Hrsg.): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities. The Swedish Radiation Safety Authority's general advice on the application of the regulations (SSMFS 2008:1) concerning safety in nuclear facilities, SSMFS 2008:1, Swedish Radiation Safety Authority, 3. Oktober 2008.

- /WIK 16/ Wikipedia: Verpressung, Stand vom 6. Februar 2016, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=147449916>, zitiert am 19. Februar 2016.
- /WNN 16/ WNN: Team selected for US deep borehole field test, erreichbar unter <http://world-nuclear-news.org/WR-Team-selected-for-US-deep-borehole-field-test-0801168.html>, zitiert am 14. Februar 2016.
- /WOO 83/ Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, CA: Very deep hole systems engineering studies, 326 S.: United States, 1. Januar 1983.

5 Grundkonzept für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern

Wesentliche Voraussetzungen an eine tiefe Bohrlochlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen sind:

- Nachweis der technische Machbarkeit
- Nachweis der Sicherheit beim Betrieb
- Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase

Unter der Annahme dieser Voraussetzungen wird nachfolgendes Grundkonzept dargestellt.

5.1 Sicherheitskonzept und -anforderungen

Das Sicherheitskonzept beschreibt in übergeordneter und qualitativer Weise, wie bei einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle entsprechend den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für 1 Mio. Jahre erreicht werden soll, die vor dem gedanklichen Hintergrund einer Endlagerung in einem geologischen Bergwerk aufgestellt wurden (siehe auch Kapitel 11). Dabei gilt:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich erreicht werden. (Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der /BMU 10/). Für diesen werden im Einzelnen folgende Anforderungen genannt:
 - Einschlusswirksamkeit: es sind allenfalls geringfügige Freisetzungen von Schadstoffen aus dem ewG zugelassen
 - Die geologische Barriere muss im Verbund mit den geotechnischen Barrieren den Einschluss gewährleisten
 - Keine Teilnahme des Porenwassers im ewG am hydrogeologischen Kreislauf
 - Integrität, d. h. Erhalt der Einschlusseigenschaften des ewG über eine Million Jahre

- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss der Bohrung wirksam werden und dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (Abschnitt 4.6 der /BMU 10/).

Weitere Anforderungen an ein Grundkonzept für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, die für Standorte in Deutschland zutreffen sollen, sind:

- Die im Grundkonzept vorgeschlagene Lithologie soll in Deutschland zur Verfügung stehen.
- Das Grundkonzept soll mindestens eine Einlagerung von Kokillen mit verglasten Abfällen und verbrauchten Kernbrennstoffen aus Leistungs-, Versuchs- und Forschungsreaktoren ermöglichen. Die mögliche Einlagerung sonstiger, vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle wird hier nicht gesondert betrachtet, da eine prinzipielle Übertragbarkeit angenommen wird.
- Die Anforderungen des BMUB hinsichtlich einer Rückholbarkeit sollen eingehalten werden.

Für das Grundkonzept wird zudem zugrunde gelegt, dass:

- eine Überwachung während der Betriebs- und Nachbetriebsphase möglich sein soll und
- dass in aktuellen Regeln zum Bohrlochbergbau ein geologisches Multibarrierenkonzept gefordert wird¹¹.

Die wesentlichen und übergeordneten Sicherheitsfunktionen des Grundkonzepts sind:

1. Durch die große Tiefe kann erreicht werden, dass im Hangenden des Einlagerungsbereiches mehrere unabhängig wirkende geologische Barrieren genutzt werden (Multibarrierenkonzept), gebildet durch mehrere Tonsteinschichten und Salzschiefer. Dies bedeutet, dass die Bohrungen insbesondere im Bereich dieser Barrieren zuverlässig abgedichtet werden.
2. Aufgrund geringer Grundwasserbewegung wird in großer Tiefe ein diffusionsdominiertes Transportverhalten erwartet. Aufgrund des großen Abstandes zwischen Einlagerungsbereichen und dem Schutzgut ist von extrem langen Trans-

¹¹ Nationale /KSpG 12/ und europäische Gesetzgebung

portzeiten auszugehen, weswegen signifikante Radionuklideinträge in die Biosphäre unwahrscheinlich sind¹².

Dies sind konzeptionelle Überlegungen. Die Ableitung eines Sicherheitskonzeptes muss standortspezifisch erfolgen.

Aus den oben genannten Anforderungen und Sicherheitsfunktionen wird ein Konzept abgeleitet, welches nachfolgend detaillierter beschrieben wird:

1. Einlagerungsbereich (vertikale Tiefe): 3 000 – 5 000 m

Für die Auslegung wird entsprechend der Vorgabe der Angebotseinholung eine Einlagerung im Bereich zwischen 3 000 und 5 000 m Teufe in einem kristallinen Grundgebirge angenommen. Der Einlagerungsbereich wird im vorliegenden Konzept von sedimentären Ablagerungen überdeckt. Grundsätzlich wird von einer Mindestteufe von 1 500 m für eine Einlagerung ausgegangen. Durch diese Tiefe ist gewährleistet, dass kaltzeitliche Einwirkungen auf den Einlagerungsbereich in jedem Fall ausgeschlossen werden können, mehrere unabhängig wirkende geologische Barrieren im Hangenden des Einlagerungsbereiches existieren und ein diffusionsdominiertes Transportsystem erwartet werden kann. Die Maximalteufe (vertikale Tiefe) von ca. 5 000 m ergibt sich aus dem Stand der Bohrtechnik. In der Öl- und Gasindustrie sind auch tiefere Bohrungen bekannt, aber selten. Es wird im vorgeschlagenen Grundkonzept von einer Einlagerung in einer nahezu vertikalen Bohrung ausgegangen¹³.

2. Das Grundkonzept berücksichtigt mehrere geologische Barrieren. Folgende geologische Formationen mit diversitären Barriereigenschaften kommen in Betracht:

- a. Tongesteine: Das Grundkonzept sieht eine überdeckende Tonformation als unabhängige Barriere vor, idealerweise in einer Schichtung, in der eine ausreichende Retardations- und/oder Dichtwirkung des Tones (viskoplastisches Verhalten, bei gegebenen thermischen und geomechanischen Randbedingungen besitzen Tone und Tonsteine selbstabdichtende Eigenschaften) angenommen werden kann.

¹² Mit einfachen Annahmen (mittlere Partikelgeschwindigkeit, Mächtigkeit der Formationen und bei dauerhaftem aktiven Antrieb – Druckentwicklung über mehrere Millionen Jahre) kann gezeigt werden, dass Verunreinigungen erst nach > 1 Mio. Jahren im Bereich der Schutzgüter erwartet werden.

¹³ Es sind auch stark geneigte bis horizontale Bohrungen sowie multilaterale Bohrungen im Einlagerungsbereich denkbar.

- b. Salz: Eine überdeckende Salzschieht wird als Barriere mit hoher Dichtwirkung und aufgrund seiner visko-plastischen Gesteinseigenschaften genutzt¹⁴ (bei gegebenen thermischen und geomechanischen Randbedingungen besitzen Salze selbstabdichtende Eigenschaften). Die selbstabdichtenden Eigenschaften sollen für den Bohrlochverschluss genutzt werden.
- c. Kristallines Grundgebirge als Wirts- und Einlagerungsgestein.
- d. Auffang- bzw. Fallenstruktur für Gase, die im Einlagerungsbereich, z.B. als Korrosionswasserstoff, freigesetzt werden können¹⁵.

Im vorgeschlagenen Konzept werden somit mehrere Barrieren in Kombination unterstellt. Dabei sollten mindestens zwei unabhängig wirkende geologische Barrieren vorhanden sein. Das Grundkonzept ist schematisch in Abb. 5-1 dargestellt. Die Fallenstruktur liegt dabei zwischen der Salzformation und dem kristallinen Grundgebirge. Der Einlagerungsbereich wird als „Bestimmungsgemäßer Bereich“ bezeichnet. Eine weitere geologische Barriere, welche ebenfalls die vollständige Wirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches besitzt, wird als zusätzliche „Rückhalteformation“ betrachtet. Zwischen Schutzgut und Rückhalteformation befindet sich ein Transferbereich (siehe auch Kapitel 9).

Die Fallenstruktur liegt dabei zwischen der Salzformation und dem kristallinen Grundgebirge. Der Einlagerungsbereich wird als „Bestimmungsgemäßer Bereich“ bezeichnet. Eine weitere geologische Barriere, welche ebenfalls die vollständige Wirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches besitzt, wird als zusätzliche „Rückhalteformation“ betrachtet. Zwischen Schutzgut und Rückhalteformation befindet sich ein Transferbereich.

¹⁴ Ähnlich wie der Vorschlag von /SCH 15/ wird hier zusätzlich zum Grundgebirge eine Salzformation als Barriere genutzt.

¹⁵ Für freigesetzte Gase aus dem Einlagerungsbereich scheint eine zusätzliche Fallenstruktur sinnvoll zu sein. Im vorgestellten Grundkonzept wird dies durch einen porösen Speicherhorizont mit geringer natürlicher Grundwasserfließbewegung und ausreichendem Speichervolumen gewährleistet. Durch diese Fallenstruktur wird der Pfad der Entgasung in eine sichere Fallenstruktur in mehr als 1500 m Entfernung zum Schutzgut vorgegeben.

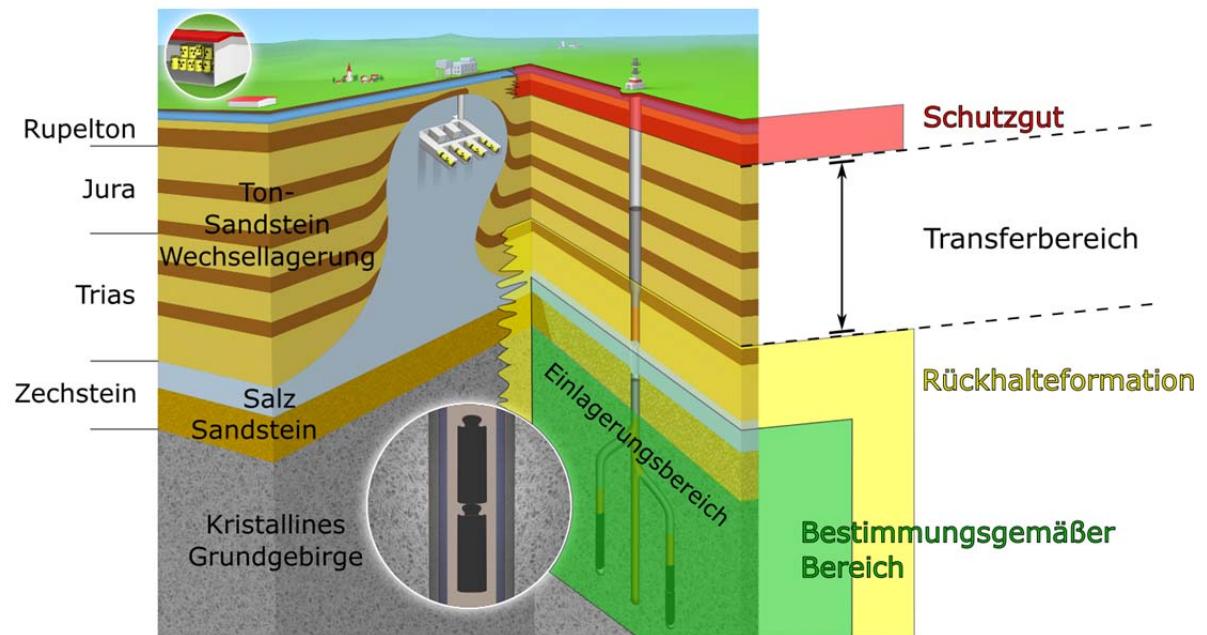


Abb. 5-1 Schema einer denkbaren Bohrlochlagerung im Kristallin unter Salz und Tongestein.

5.2 Exploration

Um den Untergrund charakterisieren zu können muss dieser nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erkundet werden. Die Vorerkundungsverfahren vor Beginn der bergbaulichen Aktivitäten (Erstellen der Einlagerungsbohrung) umfassen:

- Geologie
- Geophysik
- Geomechanik
- Geochemie
- Baselinemonitoring¹⁶

Um eine ausreichende dreidimensionale Charakterisierung des Untergrundes im Einlagerungsbereich und Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu ermöglichen, sind Erkundungsbohrungen mit geringem Durchmesser für die Charakterisierung des Standortes erforderlich. Folgende Messmethoden, die als Stand der

¹⁶ Z. B. Grundwassercharakterisierung, GPS, passive Seismologie, natürliche Gasströme aus dem Untergrund, einschließlich radiologischem Monitoring etc.

Technik angesehen werden, können in den Bohrlöchern zusätzlich zur Charakterisierung genutzt werden:

1. „Formation Evaluation“ (Logging – Bohrlochuntersuchungen zur Lithologie, Geomechanik, Geochemie, physikalische Eigenschaften)
2. “Cross-hole” Geophysik – (z.B. Seismik, Geoelektrik),
3. Fluidprobennahme
4. Hydraulische Tests,
5. gekernte Bohrungen (Gewinnung von Bohrkernen zur Gesteinscharakterisierung einschließlich der Untersuchung ihrer Rückhalteigenschaften für Radionuklide)
6. Spannungsfeldcharakterisierung

Um die Erkundung zu optimieren und um bestmögliche Standorte auszuwählen kann es sinnvoll sein, Felder mit mehreren Bohrungen zu entwickeln. Dadurch könnten auch die übertägigen Anlagen effizienter eingesetzt werden. (siehe auch Kapitel 6). Es wird davon ausgegangen, dass mehrere Erkundungsbohrungen in jedem Einlagerungsfeld abgeteuft werden, die anschließend zur eigentlichen Endlagerbohrung ausgebaut werden können und reinen Beobachtungsbohrungen, die nicht bis in die großen Teufen des ewG gehen werden.

5.3 Bohrungen

Entsprechend dem Behälter- und Einlagerungskonzept¹⁷ wird in Kapitel 7 ein minimaler Durchmesser des Bohrlochs mit Verrohrung von ca. 750 mm abgeschätzt (Variante C, maximale Teufe 3 600 m)¹⁸. Für größere Teufen werden dickwandigere Einlagerungs-

¹⁷ Eine Umkonditionierung der Kokillen mit verglasten Abfällen (Durchmesser 43 cm) in kleinere Behälter wird nicht erwartet. Aus dem Durchmesser der verglasten Abfälle und der notwendigen Wandstärken der Behälter (Stabilität, Korrosionsfestigkeit) ergibt sich ein minimaler Durchmesser der Bohrung für eine Einlagerung. Dabei ist ein Spalt zwischen Verrohrung und Behälter berücksichtigt.

¹⁸ Es werden nur Verfahren im Konzept berücksichtigt, die bereits im Feld erprobt sind. Größere Durchmesser und Teufen sind denkbar.

behälter benötigt. Entsprechend größere Bohrlochdurchmesser wären damit erforderlich. Es wird ein Standard Rotary-Bohrverfahren angenommen¹⁹.

Im Einlagerungsbereich wird aus bohrtechnischer Sicht ein Mindestabstand zwischen zwei Bohrungen von 50 m vorgeschlagen, um die Beeinflussung der einzelnen Bohrungen (Zerrüttungszone ca. 3 m Radius²⁰) ausschließen zu können. Erste Abschätzungen zur thermischen Entwicklung (siehe Kapitel 10) deuten darauf hin, dass auch hierfür ein Abstand von 50 m zwischen den Bohrungen ausreichend sein könnte. Eine Auslegung kann nur standortspezifisch erfolgen. Die genannten 50 m werden als Minimalabstand angesehen, größere Abstände sind von der Bohrtechnologie ohne Probleme zu realisieren.

5.4 Behälter

Das Grundkonzept für einen Einlagerungsbehälter (DBC-R-Kokille) ist in Kapitel 7 beschrieben.

¹⁹ Bereits vor 25 Jahren wurden bei der KTB-Bohrung Durchmesser von 37 cm bis in Tiefen von über 6 km beherrscht und Offshore-Bohrungen erreichen 70 cm Durchmesser bis in eine Tiefe von 3 000-4 000 m /BES 08/. Für größere Durchmesser in größeren Tiefen besteht ein Entwicklungsbedarf (die Entwicklung der letzten Jahre war auf die Nutzung möglichst kleiner Durchmesser ausgerichtet, wie diese im Kohlenwasserstoffbereich benötigt wurde. Einige tiefere Bohrungen mit größeren Durchmessern wurden im Rahmen der Geothermie und Off-Shore abgeteuft.

²⁰ Ähnlich wie im Bergwerk hängt die Zerrüttungszone von der Lithologie ab. Es wird generell angenommen, dass der wesentliche Einfluss im Abstand von ca. 3-5 Bohrradien abgeklungen ist.

5.5 Verrohrung

Eine Verrohrung wird sowohl aus technischen Gründen der Bohrung als auch sicherheitstechnischen Gründen für den Zeitraum der Einlagerung vorgesehen. Daraus folgt:

1. Im Bereich der Schutzgüter (z.B. Biosphäre, Trinkwasserhorizonte) sind mindestens zwei einzementierte Rohre (Rohrtouren) vorgesehen.
2. Der Bereich der Einlagerung wird mit eingehängten und zementierten Rohren (Liner) ausgebaut²¹. Die gesamte Bohrung ist dadurch vollständig verrohrt und zementiert.
3. Die Bohrung ist mit einem Fluid (Bohrlochbetriebsfluid) gefüllt.

Als zusätzliche Sicherheit für den Einlagerungsvorgang der Behälter wird ein zusätzliches nicht zementiertes Rohr (Liner-Verlängerung) vom einzementierten Liner bis zur Oberfläche formschlüssig geführt. Dieses Rohr kann ggf. zusammen mit einem havarierten Behälter gezogen werden.

Die Verrohrung wird im Bereich der geotechnischen Barrieren bzw. soweit möglich zurückgebaut.

5.6 Bohrlochfluid (Bohrlochbetriebsfluid)

Beim Bohren wird eine Bohrspülung eingesetzt. Nach dem Einbau der Rohre und deren Zementation wird diese gegen ein Bohrlochbetriebsfluid ausgetauscht. Dieses Fluid verbleibt auch nach der Einlagerung der Behälter im Einlagerungsbereich.

Aufgrund der Anforderung zur Rückholbarkeit sollten feststofffreie Fluide eingesetzt werden. Weitere zu erfüllende Anforderungen sind:

1. Kompatibel zum Behältermaterial und der Verrohrung
2. eine hinreichende Dichte um die Bohrlochstabilität zu gewährleisten (keine Gase)
3. angepasste Viskosität
4. korrosionsverringende Eigenschaften

²¹ bis in die (von oben betrachteten) erste geologischen Barriere (z.B. Ton- bzw. Salzschieht)

5. wenig komplexierende Eigenschaften für Radionuklide

Es ist denkbar, z.B. pH-eingestelltes Fluid auf Wasserbasis zu verwenden. Andere Substanzen wie ölbasierte Systeme oder Salzlösungen sind zu prüfen und müssen mit dem verwendeten Behältermaterial, den Rohren und dem Strahlungsfeld kompatibel sein.

5.7 Bohrlochverschluss

Der Bohrungsverschluss (zwischen Einlagerungsbereich, Schutzgüter und Oberfläche) muss auf die spezifischen Eigenschaften der durchteuften Gebirgsformationen abgestimmt sein. Folgende Anforderungen müssen vom Verschlussystem erfüllt werden:

- Das System des Bohrlochverschlusses muss sicherstellen, dass keine Freisetzung aus dem Einlagerungsbereich (z. B. Radionuklide) in den Bereich der Schutzgüter erfolgt.
- Der Bohrlochverschluss muss auch sicherstellen, dass kein Grundwasserzutritt aus dem Hangenden in den Einlagerungsbereich erfolgt.

Um diesen Anforderungen zu genügen, werden hier im Rahmen des Konzeptes verschiedene Materialien für die unterschiedlichen Gesteinsschichten vorgeschlagen. Als langfristig wirksam werden hier nur solche Materialien betrachtet, die bereits über geologische Zeiträume ihre Stabilität und Eignung nachgewiesen haben. Dies sind z. B. Salz, Ton und Bitumen/Asphalt. Alle drei Materialien sind z. B. aus Erdgas/Erdöllagerstätten als natürliche Barrierenmaterialien / Dichtungsmaterialien bekannt und können redundant und diversitär eingesetzt werden. Zusätzliche technische Maßnahmen die für den Einbau erforderlich sind (z.B. Zementverfüllung, mechanische Stopfen) werden nicht als sichere Barriere gewertet. Die große „Bohrlochverschluss-Strecke“ > 1 000 m führt bei den vergleichsweise kleinen Durchmessern mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einer erfolgreichen Abdichtung. Damit ergibt sich von unten nach oben (technische Maßnahmen, die mehrfach erforderlich sind, werden hier nicht im Detail diskutiert):

1. Im Einlagerungsbereich der Behälter bis in den Bereich der Gasfalle verbleibt ein angepasstes Bohrlochfluid und Zementationen²².
2. Im Bereich von Salzgestein wird die Verrohrung ausgefräst, damit sich durch die Konvergenz ein natürlicher Salzverschluss als Langzeitverschluss ausbilden kann. Durch das technische Einbringen von Salz/Salzgrus kann dieser Prozess beschleunigt werden²³.
3. In Bereichen mit permeablen Sedimenten muss die Verrohrung nicht ausgefräst werden und ein Bohrlochfluid mit entsprechender Dichte (Tonsuspension) und Zementstopfen (technische Maßnahme) wird eingesetzt.
4. Im Bereich von quellfähigen Tonschichten wird die Verrohrung ausgefräst und es werden quellfähige Bentonit-basierte Stopfen als Langzeitdichtung bzw. Bitumen/Asphalt eingesetzt.

Den unterschiedlichen hydraulischen und rheologischen Eigenschaften der Gesteine sind dadurch angepasste Verschlussmaterialien zugeordnet. Durch die Ausfräsung der Verrohrung wird eine kraft- und geochemisch-schlüssige Verbindung zwischen den Verschlussmaterialien und den Barrierengesteinen Ton und Salz gewährleistet.

5.8 Einlagerung

Beim Einbau der Einlagerungsbehälter kann auf Erfahrungen eines automatisierten Bohrbetriebes und Einlagerungsbetriebes zurückgegriffen werden. Es können verschiedene routinemäßige Verfahren eingesetzt werden, um einen Behälter in der gewünschten Tiefe einzubringen:

- Mit Hilfe eines Bohrgestänges (besonders geeignet für größere Lasten bis 300 Mg) – Stand der Technik
- An einem Seil/Kabel (bis ca. 120 Mg für 44,5 mm Seil) – Stand der Technik

²² Z. B. damit entstehender Korrosionswasserstoff in die Formation, die als Gasfalle wirkt, entweichen könnte.

²³ Aufgrund der hohen lithostatischen Drücke und erhöhten Temperaturen in > 1 500 m Teufe verhalten sich die durchbohrten Salzformationen duktil. Reduziert man den Fluiddruck in einer unzementierten Strecke setzt dabei eine rasche Konvergenz ein, die zu einem natürlichen Verschluss führt. Durch Einbringen von Salzgrus kann dieser Prozess beschleunigt werden. Aufgrund der Teufe und Temperaturfeld sollte die natürliche Konvergenz in den Bohrlöchern für einen Verschluss ausreichen. Details siehe auch Kapitel 6.8.4 und Abb. 6-23.

- Über ein „Coiled Tubing“ Verfahren – Stand der Technik. Dieses Verfahren ist auf Nutzlast bis zu ca. 45 Mg (bei 114 mm Rohr) mit heutiger Technologie beschränkt.
- Das DOE schlägt ein hydraulisches Absenken der Behälter vor (Details siehe weiter unten). Diese Technologie ist noch nicht hinreichend erprobt, um es als Stand der Technik zu bewerten (wird als F&E Fragestellung betrachtet).

Die Einlagerungsbehälter werden an einem Bohrgestänge automatisiert einzeln eingebracht. Als weitere Sicherheit dient dabei ein zusätzlich angebrachtes hochfestes Drahtseil. Das Bohrgestänge bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten die Proben (Behälter) zu bewegen (nach oben, unten, drehend), sowie eine *in-situ* Fluidprobennahme zum Nachweis einer Kontamination.

Die Einbringung der Einlagerungsbehälter kann nach gegenwärtigen Annahmen von übertage unter Berücksichtigung des Strahlenschutzes erfolgen. Dies ist vor Erstellung des Bohrlochs zu planen und gehört zu den standortspezifischen Festlegungen.

5.9 Monitoring / Überwachung

Das Überwachungskonzept soll vor, während und nach der Einlagerung die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- Radiologische Überwachung
- Mechanisch-hydraulische Integrität des Bohrlochs
- Temperaturfeld

Folgende Methoden stehen dafür zur Verfügung (nur Methoden, die als Stand der Technik angesehen werden):

- Radiometrisches Ausmessen aller nach übertage geführten Komponenten und Stoffe
- Gasmessungen des Bohrlochfluids
- Fluidprobennahmen vor, während und nach Einlagerung in allen Bohrungen (vor Verschluss)

- Tracer-Überwachung solange das Bohrloch offen ist, anschließend über Beobachtungsbohrungen möglich
- Geophysikalische Überwachung (Temperatur, Seismizität, elektrische Leitfähigkeit über Beobachtungsbohrungen bzw. hinter der Verrohrung mit Glasfasermethoden)
- Überwachung der hydraulischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften (über Beobachtungsbohrungen und Einlagerungsbohrung bis zu ihrem Verschluss und Verfüllung)
- Begleitendes Trinkwassermonitoring im Umfeld (als zusätzliche Absicherung)

Ein Monitoring in der Nachbetriebsphase ist vorzusehen. Dies kann über Beobachtungsbohrungen und Messungen von über Tage mit Standardmethoden erfolgen.

5.10 Schlussbemerkung

Auch andere geologische Gegebenheiten sind für eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern denkbar. Dieser erste Ansatz eines Grundkonzepts dient als Basis für die weitere Diskussion im Gutachten. Ein konkretes und detailliertes Sicherheits- und auch Nachweiskonzept muss standortspezifisch entwickelt werden. Hierzu besteht Bedarf an Forschung und Entwicklung (F&E).

5.11 Literatur Kapitel 5

- /BES 08/ Beswick, J. (Hrsg.): Status of Technology for Deep Borehole Disposal, EPS International, 2008.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /KSpG 12/ Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das durch Artikel 116 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. KSpG. 2012.
- /SCH 15/ Schreiber, U., Ewert, T., Jentzsch, G.: Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen. - Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell -, 28 S., Universität Essen, 22. April 2015, erreichbar unter https://www.bundestag.de/blob/395402/f31ce26e4e7fc8528c956bd5986fce75/kmat_42-data.pdf, zitiert am 18. Februar 2016.

6 Stand der Bohrtechnik

In diesem Teil des Gutachtens wird eine Übersicht über die Bohrtechnik (Stand der Technik, geeignete Verfahren, bisheriger Einsatz und übliche Durchmesser), die Bohrtechnologie für unterschiedliche Szenarien und Geologien, die Machbarkeit großkalibriger Bohrungen / Schachtbau (bis 1 m Durchmesser oder größer) für große Tiefen (3.000 m bis 5.000 m) und ein Kostenrahmen dargestellt.

Insbesondere wird die klassische Bohrtechnologie im Bereich der konventionellen und unkonventionellen Kohlenwasserstoffe (KW) erläutert, die Bohrtechnologien für Geothermie und Bergbau untersucht, auf die Richtbohrtechnik eingegangen und ein Überblick und Erfahrungen aus verschiedenen Forschungsbohrungen (inkl. KTB und Soultz-sous-Forêts) gegeben.

Industrielle, so wie auch wissenschaftliche, Bohrungen werden heute mit erprobter Technik in verschiedenen Durchmesserbereichen niedergebracht, die von einigen Zentimetern (Aufschlussbohrungen im Bergbau) bis in den Meterbereich (Schachtbohrungen) variieren können. Wegen des benötigten „Deponievolumens“ ist hier beim DBD-Ansatz insbesondere der „nutzbare“ Durchmesser einer Bohrung von Interesse, so dass große Bohrungsdurchmesser erforderlich erscheinen. Jedoch wirken in Bohrungen physikalische Gesetze, die es zu beachten gilt und die umso kritischer werden können je tiefer ein Bohrloch werden soll.

Im Folgenden werden die üblicherweise heute bei Tiefbohrungen zum Einsatz kommenden Techniken und die dabei gängigen Bohrdurchmesser betrachtet. In der internationalen Bohrtechnik ist bei den Bohrloch- und Werkzeugdurchmessern der Begriff Inch (Zoll) geläufig. Einem Inch entsprechen ca. 2,54 cm oder 25,4 mm. Nach Möglichkeit wird die Angabe cm oder mm verwendet. Die Tab. 6-1 listet die Fachbegriffe und Abkürzungen auf.

Tab. 6-1 Verzeichnis der verwendeten Fachbegriffe und Abkürzungen

Casing	zutage geführte Verrohrung
Liner	nicht zutage geführte Verrohrung (wird in der vorherigen Rohrtour mittels eines Liner-Hangers mechanisch verkeilt abgehängt)
BOP	Blow-Out Preventer (hydr. Schleusensystem zur Beherrschung von Bohrlochzuflüssen und –drücken während des Bohrfortganges)
Tool Joint	verdickter Gewindeverbinderteil des Bohrgestänges
API	American Petroleum Institute
FGT	Formations-Gradienten-Test
FIT	Formation-Integrity Test
LOT	Leak-Off-Test
TVD	True Vertical Depth (wahre Teufe = Vertikalteufe)
MD	Measured Depth (Bohrteufe = Bohrungslänge)
WEG	Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgas-Gewinnung e.V.
DHM	Untertage-Spülmotorantrieb (Down Hole Motor)
RSS	Mit Stran rotierender Bohrsteuerkopf (Rotary Steerable System)
MWD	Measurement-While-Drilling
DLS	Dogleg-Severity (Bohrlochkrümmung durch Neigungs-/Richtungsänderung)
PDC	Diamantmeißel (Polycrystalline Diamond Compact)
PCD	Poly-Crystalline Diamond
OD	Outer Diameter (Außendurchmesser)
ID	Inside Diameter (Innendurchmesser)
LK	Linerkopf
ZK	Zementkopf
SG	Spezifisches Gewicht (kg/lit)
WOB	Meißelbelastung (Weight-on-Bit)
RPM	Umdrehungszahl (Revolutions-per-Minute)
TQ	Drehmoment (Torque)
ROP	Bohrfortschritt, Bohrgeschwindigkeit (Rate of Penetration)
Roundtrip	Ausbau und Wiedereinbau des Bohrstrangs (z.B. zum Meißelwechsel)

6.1 Einige grundlegende Aspekte der Bohrtechnik

6.1.1 Notwendigkeit von Verrohrungen und ihre Aufgaben

Grundsätzlich stellt jede Bohrung eine Störung des Gleichgewichtszustandes im Gebirge dar. Der in einer bestimmten Tiefe herrschende Druck durch das darüber lagernde Gestein (Überlagerungsdruck), der sich nach der Formel

$$P_{\text{Gestein}} = \rho * g * h$$

mit ρ = mittlere Dichte des Gesteins, g = Erdbeschleunigung und h = Höhe (hier: Tiefe) berechnen lässt, ist durch den Vorgang der Gesteinszerstörung und der Entnahme des zerstörten Gesteins (Bohrklein) im Bohrloch nicht mehr vorhanden. Dadurch entsteht im Bohrloch eine Druckdifferenz, die mit der Tiefe zunimmt und deren an der Bohrlochwand erzeugte Spannungen im Gestein so hoch werden können, dass die Gesteinsfestigkeit überschritten wird und das Bohrloch nicht mehr standfest ist, sondern die Bohrlochwand ausbricht und das Bohrloch „kollabiert“.

Diese Gebirgsdruckdifferenz wird verringert, wenn das Bohrloch nach der Entnahme des Bohrkleins nicht leer ist, sondern mit einer Flüssigkeit - z.B. Wasser - gefüllt bleibt. Der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule wirkt dabei im Bohrloch als Stützdruck und reduziert so den effektiv wirkenden Gebirgsdruck an der Bohrlochwand; dieser Effekt wirkt sich grundsätzlich positiv auf die Standfestigkeit eines Bohrloches aus.

Die meisten Bohrverfahren nutzen deshalb eine „Bohrspülung“, die neben der Stützfunktion auch zur Unterstützung des Bohrfortschrittes und zur Reinigung des Bohrloches dient.

Neben der Tiefe eines Bohrlochs ist auch der Bohrdurchmesser eine wichtige Einflussgröße auf die Standfestigkeit. Je größer der Durchmesser des Bohrlochs ist, desto geringer ist dessen Stabilität.

Die geschilderte Standfestigkeitsproblematik impliziert, dass eine Bohrung nicht ohne einen stützenden „Ausbau“ in große Tiefen gebracht werden kann und dann auch langzeit-standfest bleibt.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass jedes Bohrloch mit einem entsprechenden Ausbau versehen werden muss; dies geschieht i. d. R. durch Einbau von Stahlrohren.

Hinzu kommt, dass bereits während des Niederbringens einer Bohrung Gesteinsschichten angetroffen werden können, die auch aus Sicherheitsgründen eine abschnittsweise Vertiefung des Bohrlochs mit Zwischenverrohrungen in verschiedenen Tiefen erfordern. Die Verrohrung dient dabei zur Sicherung der bereits erbohrten Abschnitte gegen Nachfall aus der Bohrlochwand, Kollaps des Bohrlochs sowie zur Trennung unterschiedlicher Horizonte voneinander. Nach Einbau einer Rohrtour wird der Ringspalt zwischen Verrohrung und Bohrlochwand mit Zement gefüllt, um eine Abstützung und Abdichtung zu erzielen. Nach Aushärtung des Zementes wird die Bohrung mit einem kleineren Meißel, der durch die zuletzt eingebaute Rohrtour hindurch eingefahren werden kann, weiter vertieft bis zur nächsten Verrohrungsteufe. Dieses Schema (Bohren, Verrohren, Zementieren, Bohren, etc) wird fortgesetzt bis die Endteufe, d.h., der Zielhorizont erreicht ist. Daraus ergibt sich bei tiefen Bohrungen häufig ein Bohrlochschema mit 4 bis 6 Verrohrungstouren, was dazu führt, dass die Bohrungen immer mit großem Durchmesser begonnen werden und am Ziel mit einem erheblich kleinerem Durchmesser enden (Abb. 6-1).

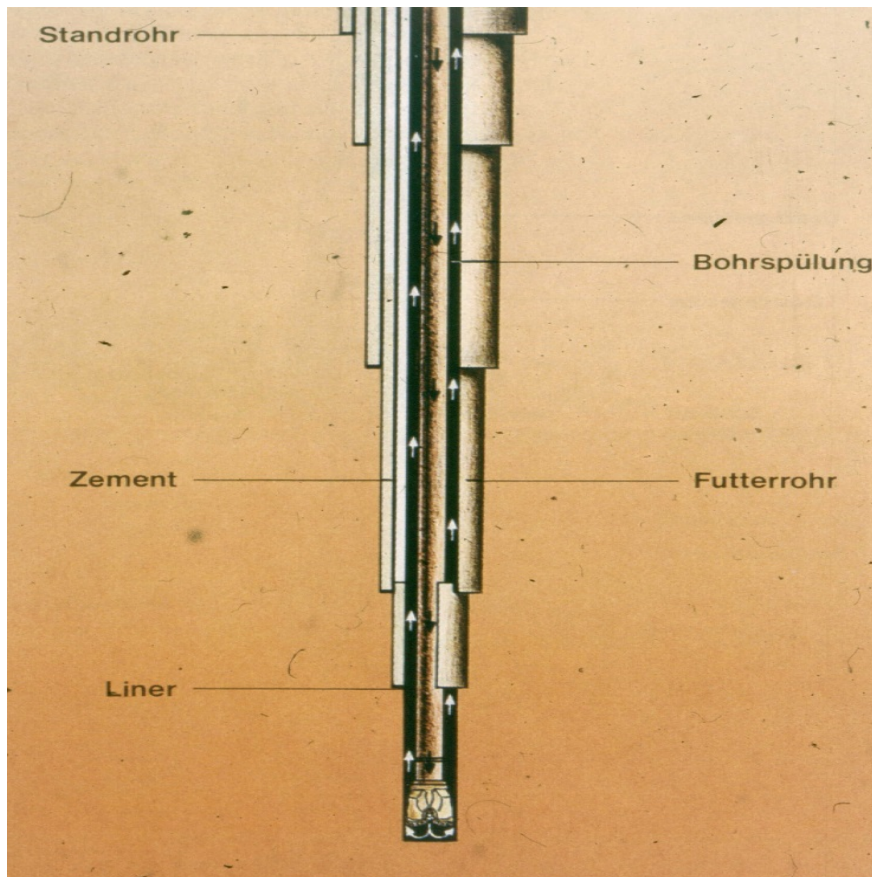


Abb. 6-1 Bohr- und Verrohrungsschema einer Tiefbohrung /SPE 05/

Eine wichtige Rolle bei Planung und Realisierung eines tiefen Bohrprojektes kommt daher dem Bohr- und Verrohrungskonzept zu. Der abschnittsweise Einbau von Rohren dient zusammengefasst allgemein den folgenden Zielen:

- dem Schutz von Grundwasser,
- zur Sicherung bereits erbohrter Abschnitte (z. B. in instabilen Formationen),
- zur Trennung von Abschnitten/Formationen mit unterschiedlichem Druck/Druckgradienten und/oder unterschiedlichen Fluiden (z. B. Salinität),
- zur Abdichtung des Bohrloches gegen unerwünschte Zuflüsse aus dem Gebirge (Gas, Öl, Wasser)
- zur Vermeidung unerwünschter Abflüsse (Verluste) aus dem Bohrloch in das Gebirge.

Um diese Ziele zu erreichen wird üblicherweise nach jedem Rohrtoureinbau ein Zement in den Zwischenraum zwischen Rohraußenseite und Bohrlochwand gepresst, der

nach Aushärtung eine Abdichtung und lastaufnahmefähige Verbindung zum Gebirge bildet.

Generell nimmt nach jedem Rohrtoureinbau der Durchmesser ab, da einerseits das Rohr in das vorher gebohrte Loch mit ausreichend „Spiel“ passen muss, und andererseits auch das nächste Bohrwerkzeug durch die letzte Verrohrung durchgehen muss, um den nächsten Abschnitt zu bohren. Es ist zu unterscheiden zwischen „Tagestouren“, die – wie der Name schon sagt – bis zutage reichen, und „Linern“, die nur bis in die vorherige Rohrtour geführt und in dieser mit einem „Linerhänger“ abgehängt werden.

Die Verrohrungen von Tiefbohrungen müssen verschiedenen Belastungen widerstehen können. Auf die Rohre wirken

- Außendrucke
- Innendrucke
- Zuglasten
- Biegebelastungen
- u.U. korrosive Fluide (Gas, Öl, Wasser) aus dem durchteuften Gebirge
- hohe Temperaturen und Temperaturänderungen

Der Nominaldurchmesser der Rohrtouren wird vornehmlich durch technisch-wirtschaftliche Aspekte bestimmt. Grundsätzlich gilt, dass die Herstellungskosten der Bohrung mit wachsenden Durchmessern steigen, weshalb heute in der Industrie Bohrungen i.d.R. **so klein wie möglich und nur so groß wie nötig** hergestellt werden.

6.1.2 Gefährdungspotenzial durch Hochdruckzonen, Niederdruckzonen, Verlustzonen, Kohlenwasserstoffe und andere Gase

Grundsätzlich sind abnormale Formationsdrücke – also Abweichungen von dem normalen hydrostatischen Druckprofil – nie auszuschließen und können verschiedene Ursachen haben. Allgemein wird die Spüldichte aus Sicherheitsgründen i.d.R. so eingestellt, dass sie etwas über dem Porendruck der zu durchteufenden Formation liegt. Der Porendruck entspricht meistens, im „Normalfall“ dem hydrostatischen Druck der mittleren Dichte des Porenfluids – i.d.R. Salzwasser - multipliziert mit der Teufe

und der Erdbeschleunigung. Dieser hydrostatische Druck der Wassersäule berechnet sich dann nach der Formel

$$P_{\text{hydrostat}} = \rho * g * h$$

mit ρ = Dichte des Fluids, g = Erdbeschleunigung und h = Höhe (hier: Vertikalteufe TVD).

Schwankungen sind dabei vor allem in der Dichte möglich, da diese primär von der Salinität der Lösungen abhängt, die i.d.R. mit der Tiefe bis zur Salzsättigung zunehmen. Beträgt beispielsweise die Dichte des Porenfluids 1,03 kg/l, so wird die Bohrspülung dann auf einen Wert von ca. 1,05 – 1,1 kg/l eingestellt; damit ist dann ein sicheres Bohren möglich.

Dies gilt nicht mehr, wenn mit einer solchen Spülung Schichten angebohrt werden, die höhere oder niedrigere Drücke aufweisen. Bei höheren Porendrücken können dann – abhängig von der Permeabilität der Formation – Zuflüsse in das Bohrloch auftreten. Diese werden erst stoppen, wenn die Spüldichte durch Zugabe von Beschwerstoffen wie z.B. Schwerspat entsprechend erhöht worden ist, so dass zumindest ein Gleichgewicht oder leichte „Overbalance“ der „Säule“ im Bohrloch nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren wieder hergestellt ist. Wird ein Zufluss nicht rechtzeitig erkannt und das Bohrloch nicht eingeschlossen, so kann das zufließende Fluid bei entsprechendem Überdruck unkontrolliert aus dem Bohrloch austreten. Es entsteht in der Folge ein so genannter „Kick“, der sich ohne rechtzeitige Gegenmaßnahmen und Einschließen des Bohrloches am Blow-Out-Preventer (BOP) zu einem unkontrollierten Ausbruch entwickeln kann.

Um dies zu vermeiden wird an der Bohranlage ständig das Spülungsumlaufvolumen bilanziert. Sowie die Rücklaufmenge aus dem Bohrloch größer ist als der in die Bohrung eingepumpte Volumenstrom wird die Zirkulation gestoppt und eine Zuflusskontrolle vorgenommen; bestätigt sich dabei ein Zufluss, so wird die Bohrung mit einer Bohrlochsicherung (Preventer) eingeschlossen. Durch die danach beobachteten Druckanstiege am Kopf des Bohrstrangs und des Gestänge-Ringraums werden Art und Druckgradient des Zuflusses bestimmt. Diese Daten dienen dann zur Festlegung der erforderlichen schweren Spülung zum „Totpumpen“ des Zuflusses.

In Niederdruckzonen sind die Porendrücke geringer als es dem Druck einer hydrostatischen Säule entsprechen würde. Auch dafür kann es verschiedene Ursachen geben, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Entscheidend ist letztlich, wie die Formation auf den Überdruck aus dem Bohrloch reagiert. Weist sie eine gewisse Permeabilität auf, so wird sich ein mehr oder weniger starker Spülungsverlust einstellen, der aber bei feststoff-beladener Bohrspülung unter Bildung eines Filterkuchens schnell nachlässt oder auch gestoppt wird. Bei stärkeren Verlusten müssen der Spülung Verstopfungsmaterialien zugegeben werden; im Extremfall sind auch Zementationen zur Verstopfung/Abdichtung nötig. Starke plötzlich auftretende Spülungsverluste, wie sie z.B. in klüftigen Verlusthorizonten auftreten können, gefährden durch ein partielles Leerlaufen des Bohrloches u.U. die Bohrlochstabilität, da dadurch der „Stützdruck“ der Spülungssäule auf die Bohrlochwand stark verringert werden kann.

Es können aber auch schwache geologische Formationen angetroffen werden, die unter dem Druck einer hydrostatischen Säule mechanisch brechen und dadurch Flusswege für einen Spülungsverlust öffnen können. In solchen Fällen ist das spezifische Gewicht einer Bohrspülung unverzüglich durch Zugabe von Wasser oder unter Umständen auch Gasen zu reduzieren.

6.2 Übliche Bohrtechniken und -verfahren

Im Folgenden werden die heute üblicherweise zum Teufen von Bohrungen eingesetzten Bohrverfahren beschrieben. Dabei wird auch auf die dabei gängigen Bohrdurchmesser und Teufenbereiche des Einsatzes der jeweiligen Technik eingegangen.

Geht man von der Technik der Gesteinszerstörung aus, so sind als Verfahren prinzipiell das schlagende und das drehende Bohren zu unterscheiden. Das reine Schlagbohren (z.B. beim „Seilschlagbohren“) wird heutzutage jedoch kaum noch angewandt, sondern eher in der Kombination mit einem rotierenden Bohrstrang. Aus diesem Grund wird hier auf diese Technik nicht näher eingegangen.

6.2.1 Rotary-Bohren

Bei den drehenden Bohrverfahren hat sich in den letzten Jahrzehnten das „Rotary-Verfahren“ /SPE 05/, /MOO 86/, /SCH 90/, /WIK 16b/ durchgesetzt. Es wird sowohl für

Aufschluss, Produktion und Speicherung von Kohlenwasserstoffen als auch in der tiefen Geothermie angewandt und eignet sich prinzipiell für alle Gesteinsarten.

Bei diesem Verfahren wird das Bohrloch im jeweiligen Durchmesser mit einem auf der Bohrlochsohle rotierenden Bohrmeißel hergestellt, der das Gestein unter dem Meißel zerstört. Hierzu dienen verschiedene Meißeltypen, die nach dem zu bohrenden Gebirge ausgewählt werden. Unterschieden wird zwischen Rollenmeißeln (Abb. 6-2 links oben) und Diamantmeißeln, die wiederum unterschiedlich aufgebaut sein können. Hier kann zwischen PDC-Meißel mit Schneidplatten aus künstlich gefertigten Diamanten („Poly-Crystalline Diamonds“) (Abb. 6-2 rechts oben), Dia-Meißel mit in die Schneidoberfläche gesetzten Naturdiamanten (Abb. 6-2 links unten) oder solche mit einer Matrix aus Sintermetall im Schneidenbereich, in der Diamantsplitter eingeschmolzen sind (Abb. 6-2 rechts unten), unterschieden werden. Außer beim Rollenmeißel, der das Gestein „bricht“, ist bei allen anderen genannten Meißeltypen das Gesteinszerkleinerungsprinzip als „spanabhebend“ oder „schmirgelt“ zu bezeichnen.

Die Meißel verfügen i. d. R. über auswechselbare Düsen, die den Spülstrom stark einschnüren und so die Aufprallgeschwindigkeit auf der Bohrlochsohle erhöhen. Dadurch wird gewährleistet, dass das vom Meißel aus der Sohle gelöste Bohrklein sofort weggespült wird, bevor es noch weiter zerkleinert wird, was zu einer Verlangsamung des Bohrfortschrittes und vorzeitigem Verschleiß des Werkzeuges führen würde. Düsenstrahlgeschwindigkeiten von über 100 m/s sind keine Seltenheit.



Abb. 6-2: Meißeltechnologie (Abbildungen aus /NAT 16/)

Der Antrieb des Bohrmeißels erfolgt von über Tage, entweder durch Rotation des gesamten Bohrstrangs mittels Drehtisch und Mitnehmerstange („Kelly“) oder Kraftdrehkopf (Topdrive) (Abb. 6-3), oder durch einen Untertageantrieb, der durch die hindurchströmende Bohrspülung angetrieben wird. Der Meißelandruck wird üblicherweise durch das Gewicht des unteren Teils des Bohrstrangs aufgebracht.

Der Bohrstrang besteht aus Schwerstangen (für den Meißelandruck), Bohrgestänge und Spezialteilen wie Stabilisatoren, usw. Der Bohrstrang ist innen hohl und erlaubt so die Zirkulation der Spülung bei einem Standardbohrverfahren im Inneren nach unten und außen nach oben.



Abb. 6-3 links: Drehtisch und Mitnehmerstange („Kelly“)
rechts: Kraftdrehkopf (Topdrive) (Abbildungen aus /SCH 16/)

Die Schwerstangen sind sehr dickwandig und weisen neben der hohen Masse eine hohe Biegesteifigkeit auf, wodurch sie axiale Druckkräfte übertragen können. Der eigentliche Bohrstrang – das Bohrgestänge – hingegen besteht aus dünnwandigeren Rohren, die nicht mit axialer Drucklast beaufschlagt werden sollten, da sie sonst leicht ausknicken. Das Bohrgestänge ist auf hohe Zugbelastung ausgelegt und verfügt über Schraubverbinder an beiden Enden (oben Muffen-, unten Zapfengewinde), die zur Erhöhung der Zug- und Drehmomentkapazität des Gewindes verdickt ausgeführt sind („Tool Joints“) (Abb. 6-4).



Abb. 6-4 Tool Joint mit Muffengewinde (Abbildung von OMSCO Industries 1997)

Die Spülung wird in einem Kreislauf gefahren, welcher in Abb. 6-5 schematisch dargestellt ist. Die nachfolgenden Zahlen in Klammern beziehen sich auf diese Abbildung. Die Bohrspülung hat u. a. die Aufgaben das Bohrklein auszutragen und das Bohrloch zu stabilisieren. Sie wird von den Spülpumpen (4) durch die Steigleitung (8), den Spülschlauch (9) und den Spülkopf (18) in den Bohrstrang (19; 25) gepumpt. Im Strang fließt sie nach unten bis in den Bohrmeißel (26), tritt aus den Meißeldüsen aus und steigt im Ringraum zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand bzw. Verrohrung wieder nach oben. An der Oberfläche (28) wird die Spülung durch Schüttelsiebe (2), Hydrozyklone und Zentrifugen vom Bohrklein gereinigt. Nach der Reinigung fließt sie zurück in den Tankanlage, wo sie von den Spülpumpen wieder angesaugt und auf eine neue „Rundreise“ geschickt wird. Die übertägige Ausrüstung des Spülungskreislaufs ist wichtiger Bestandteil jeder Bohranlage.

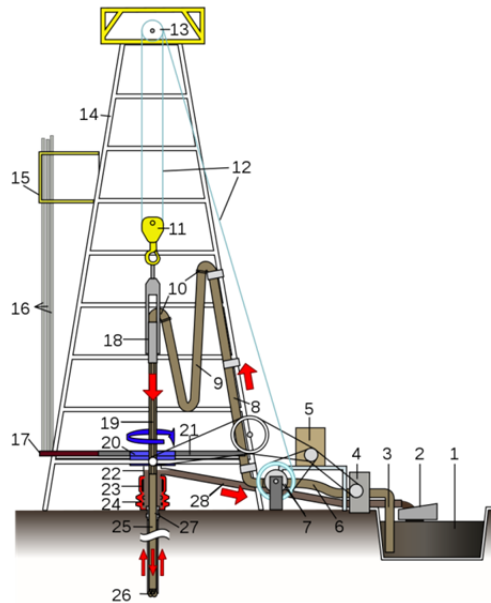


Abb. 6-5 Schemazeichnung eines Bohrturms /WIK 16b/

1. Tank oder Teich für die Bohrspülung
2. Rüttelsieb, engl. Shale Shakers und Fliehkraftabscheider
3. Saugrohr zu den Spülpumpen
4. Spülpumpe, engl. Rig Pump
5. Bohrturmantrieb (meist Dieselmotoren)
6. Das Hochdruckschlauchstück zwischen Spülpumpe und Standrohr
7. Hebewerk als Hauptzug, engl. Draw Works
8. Standrohr, engl. Stand Pipe
9. Schlauch zum Spülkopf, Kelly-Schlauch, engl. Kelly Hose
10. Goose Neck, Rohrkrümmer für den Spülschlauch, auch Schwanenhals genannt
11. Kloben, engl. Traveling Block. Die Unterflasche des Flaschenzugs des Hebewerks.
12. Seil des Hebewerks, engl. Drilling Line
13. Turmrollenlager, engl. Crown Block. Die Oberflasche des Flaschenzugs des Hebewerks.
14. Bohrturmmast, engl. Derrick genannt
15. Gestängebühne oder Aushängebühne, engl. Monkey Board
16. Züge des Bohrgestänges, engl. Stands (of drill-pipes)
17. Holzlager für geparkte Gestängezüge
18. Spülkopf, engl. Circulating Head
19. Kelly, die Mitnehmerstange zur Kraftübertragung an das Bohrgestänge
20. Drehtisch, engl. Rotary Table
21. Arbeitsbühne, engl. Rig Floor
22. Spülungsauslauf, engl. Bell Nipple
23. und 24. Bohrlochkontrollvorrichtung, engl. Blow-Out Preventer (BOP)
25. Bohrgestänge
26. Bohrmeißel
27. Kopf der Verrohrung
28. Bohrspülungrückleitung

Mit dem Rotary-Bohrverfahren können Bohrungen prinzipiell in beliebige Richtungen gesteuert werden. Dies geschieht entweder mit den mit dem Spülungskreislauf hydraulisch angetriebenen Untertage-Antrieben (downhole motor = DHM), die über ein einstellbares Knickstück (benthousing) verfügen (Abb. 6-6), oder mit sogenannten „Rotary Steerable Systemen“ (RSS). In beiden Fällen werden die Richtung und Neigung des Bohrlochs jeweils direkt am Meißel gemessen und mittels Druckpuls-Mustern, die dem Spülstrom aufmoduliert werden, nach über Tage gesendet; dort werden die Messwerte ausgelesen und aus ihnen der Bohrungsverlauf berechnet (Abb. 6-7).

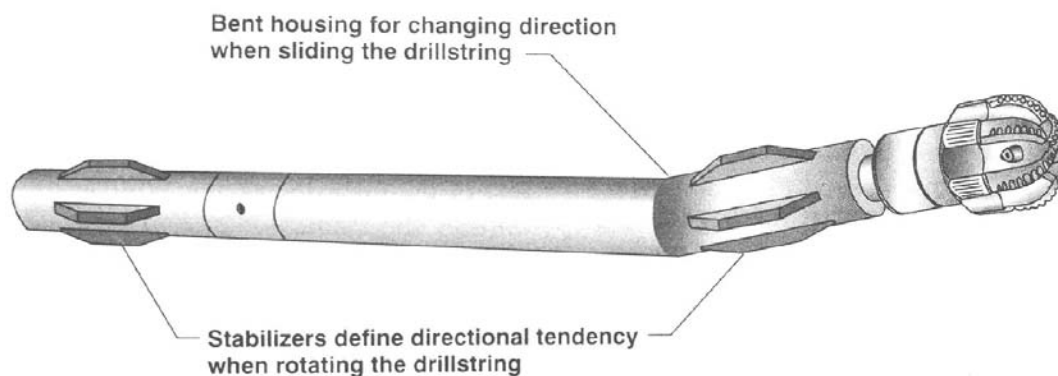


Abb. 6-6 Downhole-Motor mit benthousing /ECO 98/

Die Koordinatenspur eines Bohrloches im Raum muss nach der klassischen geodätischen Vermessungsmethode, ähnlich wie im Berg- und Tunnelbau, Messpunkt für Messpunkt ermittelt werden, da es im Untergrund keinen GPS-Empfang gibt. Da Vermessungsmethoden auf Laserbasis wegen der flüssigkeitsgefüllten Bohrlocher ebenfalls nicht möglich ist, verbleiben nur der Schwerkraft- und geographische oder magnetische Nordvektor zur Vermessung der einzelnen Bohrlochmesspunkte mit Hilfe von klassischen geodätischen Messinstrumenten, verpackt in drucksicheren Stahlbehältern und eingefahren mit Kabelwinden oder am Gestänge. Sie sind in einer Vielfalt von Größen, Genauigkeiten und Arten ihres Messprinzips am Markt erhältlich und weisen allesamt einen mehr oder weniger großen Messfehler durch z.B. Bohrlochexzentrizität oder Teufenfehler auf, weshalb jede der aus ihren Messwerten errechnete Bohrlochposition mit einem bestimmten Messfehler behaftet ist, der sich über die gesamte Bohrlochstrecke bis zur Bohrlochendposition weiterpflanzt. Wenn man all diese möglichen Fehlerquellen einbezieht, dann wird die Bohrlochposition innerhalb eines Ellipsoids zu liegen kommen, innerhalb dessen der exakte Messpunkt mit einer gewissen statistischen Sicherheit liegen wird. Die Größe dieses Ellipsoids kann durch die mehrmalige Vermessung des Bohrloches mit unterschiedlichen Messverfahren reduziert werden,

aber sie kann durch die falsche Wahl der Vermessungsmethoden oder die Wahl von schlecht kalibrierten Messgeräten oder Billiganbietern erheblich vergrößert werden /WOL 81/.

Es gibt hochgenaue mechanische oder optische Kreiselkompass-Systeme, die am elektrischen Kabel in ein mehrere Kilometer tiefes Bohrloch eingefahren, die Bohrlochendpunktposition sogar bei hohen Neigungen innerhalb eines Ellipsoidraumes von 1 m³ bestimmen können, - jedoch wirken Bohrlochtemperaturen eindeutig gegen diese Messleistung /PRE 85/. Mechanische oder galvanische Pendel in Verbindung mit Spulen-Magnetometern sind im Gegensatz klein gebaut und weisen eine erhebliche Temperaturstabilität bis über 200°C auf, jedoch kann ihr Messverfahren durch die Anwesenheit von ferro-magnetischem Material, in der Form von Mineralen wie Hämatit in der geologischen Formation oder durch den metallischen Bohrlochausbau selbst, empfindlich verfälscht werden.

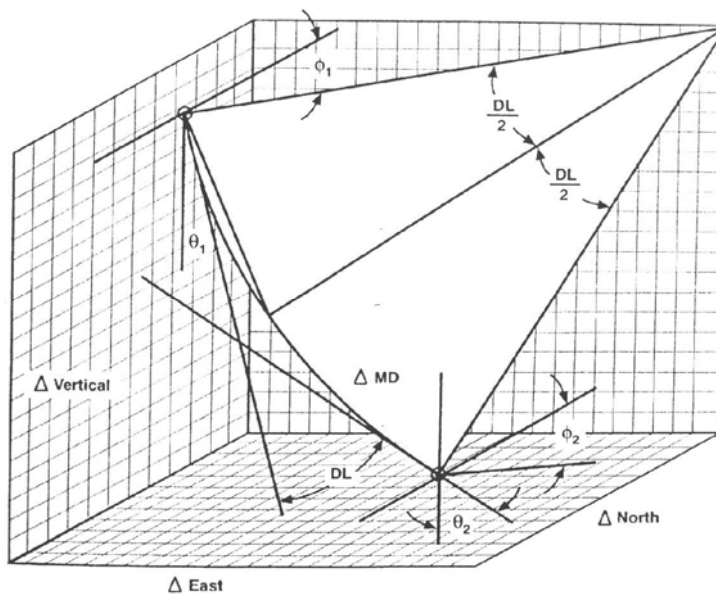


Abb. 6-7 Bohrlochverlauf mit 2 Messpunkten /ECO 98/

Mit der Richtbohrtechnik können Neigungswinkel von 0 – 90° oder grösser (in der Tiefbohrtechnik aus der Vertikalen gerechnet) gebohrt und selbst dreidimensionale Bohrlochverläufe hergestellt werden; selbstverständlich können damit auch hochgenaue Vertikalbohrungen geteuft werden. Die Genauigkeit der Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Bohrlochverlaufs liegt bei einer ca. 5 km tiefen Bohrung im Bereich von wenigen Metern.

Neben dem oben geschilderten „Rotary-Bohrverfahren“ sind noch einige andere Bohrverfahren im Einsatz, die man allerdings als Modifikationen des Rotarybohrens ansehen kann, da sie alle auf einem rotierenden Bohrstrang basieren und sich nur in Details vom Rotary-Verfahren unterscheiden.

- Bergbau-Bohren (Mining-Drilling)
- Saugbohrverfahren
- Lufthebe-Verfahren
- Air-Drilling, Mist-Drilling, Foam-Drilling

Auf diese Verfahren wird nachfolgend kurz eingegangen.

6.2.2 Bergbau-Bohren (Mining-Drilling)

Es dient primär der Erkundung von bergbaulichen Lagerstätten. Die Erkundungsbohrungen werden häufig als Kernbohrungen niedergebracht, da die Bohrkerne den besten Aufschluss zur Beurteilung der Lagerstätte und des Deckgebirges ergeben. Hierfür reichen zumeist relativ kleine Durchmesser. Zur Beschleunigung der Kerngewinnung wird überwiegend die Seilkerntechnik eingesetzt, bei der die Bohrkerne zusammen mit dem Innenkernrohr mittels Drahtseil zutage befördert werden ohne den kompletten Bohrstrang ausbauen zu müssen. Dies bedingt natürlich, dass der gesamte Bohrstrang über einen ausreichend großen Innendurchmesser verfügt, durch den das Innenkernrohr gezogen werden kann. Um die Menge des zu zerstörenden Gesteins möglichst gering zu halten und so den Bohrfortschritt zu maximieren, sind die Außendurchmesser der Seilkernstränge relativ groß und demzufolge der Ringspalt zwischen Bohrstrang und Bohrloch nur klein.

Da auch bei diesen Bohrungen oftmals Zwischenverrohrungen eingebaut werden müssen um die Zielhorizonte zu erreichen, sind die verschiedenen Bohrlochdurchmesser so aufeinander abgestimmt, dass der Bohrstrang der vorherigen Sektion als Verrohrung im Bohrloch verbleiben kann und der nächst kleinere Bohrstrang hindurch passt. Umso schlank wie möglich zu bleiben sind die Muffen- bzw. Zapfengewinde der Bohrstrangverbinder oftmals direkt in die unverdickte Rohrwandung geschnitten; damit kann natürlich nur eine relativ geringe Zugfestigkeit der Schraubverbindungen erreicht werden, wodurch die Teufenkapazität der meisten Seilkernsysteme relativ stark limitiert

ist. Dies stellt aber in den meisten Fällen kein Problem dar, da bergbaulichen Aufschlüsse nur selten tiefer als ca. 2 – 3 km sind. Für tiefere Aufschlussbohrungen wie sie z.B. in Südafrika geteuft werden, wurden speziell für diese Teufen geeignete Bohrstrangsysteme mit verdickten Gewindeverbindern entwickelt. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Kerndurchmesser in Relation zum Bohrdurchmesser ungünstiger (kleiner) wird.

Für alle im Bereich Bergbauerkundung eingesetzte Seilkernsysteme gilt, dass die Bohrdurchmesser i.d.R. nicht mehr als ca. 5 ¾“ (146 mm) bis 6“ (152,4 mm) betragen /SPE 15/.

6.2.3 Saugbohrverfahren

Das - häufig für Brunnenbohrungen eingesetzte - Saugbohrverfahren kann als eine Sonderform des Rotarybohrens angesehen werden. Der Hauptunterschied besteht hierbei in der Spülrichtung. Entgegen der Spülrichtung beim oben geschilderten Rotarybohren wird hier die Bohrspülung in den Ringraum zwischen Bohrloch und Bohrstrang eingeleitet, wo sie nach unten zum Bohrmeißel fließt. Auf der Bohrlochsohle nimmt sie das Bohrklein mit und tritt durch entsprechende Öffnungen in den Bohrmeißel ein. Der Antrieb des Spülstroms erfolgt durch eine am Bohrgestänge installierte Saugpumpe. Bedingt durch die zum Austrag des Bohrkleins im Bohrstrang nur geringere benötigte Strömungsgeschwindigkeit ist im Vergleich zum Rotarybohren nur eine deutlich niedrigere Pumpenleistung erforderlich. Allerdings liegt hierin auch der Nachteil des Verfahrens: Die Bohrgeschwindigkeit ist i.d.R. erheblich geringer, da die Bohrlochsohlenreinigung aufgrund der Nichteinsetzbarkeit von Düsen weniger effektiv ist und es dadurch verstärkt zu Mehrfachzerkleinerung des aus der Sohle gelösten Bohrkleins kommt. Auch ist ein gezieltes Richtbohren mit diesem Verfahren nicht möglich.

6.2.4 Lufthebe-Verfahren

Das Verfahren kann als Sonderform des Saugbohrens und damit auch als eine Sonderform des Rotarybohrens angesehen werden. Es wird ebenfalls häufig für Brunnenbohrungen eingesetzt. Die Spülrichtung verläuft wie beim zuvor geschilderten Saugbohren, die Bohrspülung wird also in den Ringraum zwischen Bohrloch und Bohrstrang eingeleitet, wo sie nach unten zum Bohrmeißel fließt. Bei diesem Spülbohrverfahren wird das Bohrklein jedoch mittels eines Gemisches aus Bohrspülung und Luft zutage

gefördert, indem Pressluft in den Bohrstrang oberhalb des Bohrmeißels injiziert wird. Dadurch wird die Dichte des Dreiphasengemisches aus Bohrspülung, Bohrklein und Luft niedriger eingestellt als die Dichte der Spülung im Ringraum, wodurch der Spülungskreislauf in Gang gesetzt und gehalten wird. Nach /SPE 16/ können so bei genügend großen Leitungsdurchmessern (ca. 300 mm) Bohrtiefen von 1.000 m erreicht werden. Der Lufteintrag erfolgt i.d.R. entweder durch einen im Bohrgestänge hängenden Injektionsstrang oder über konzentrisches Doppelwand-Bohrgestänge.

Neben der limitierten Teufenkapazität des Verfahrens ist jedoch auch hier der Nachteil in der im Vergleich zur Rotarytechnik geringen Bohrgeschwindigkeit, so wie der Unfähigkeit zum gezielten Richtbohren zu sehen.

6.2.5 Air-Drilling, Mist-Drilling, Foam-Drilling

Das „Air Drilling“ ist Rotarybohren mit Luft als Bohrspülung /AIR 16a/, /AIR 16b/, /AIR 16c/. Vorteil des Verfahrens gegenüber dem Bohren mit Flüssigkeitsspülung ist der oftmals deutlich höhere Bohrfortschritt, Nachteil ist aber vor allem die Einschränkung der Bohrlochstabilität infolge des fehlenden Stützdruckes, wodurch die erreichbaren Teufen allgemein deutlich unter den mit einer gut eingestellten Flüssigkeitsspülung erreichbaren Teufen liegen. Außerdem kommt es zu Austragsproblemen, wenn aus erbohrten Formationen Wasser in das Bohrloch zufließt. Dann muss die Luftrate deutlich erhöht werden; außerdem empfiehlt sich dabei die Zugabe von Schaumbildnern (z.B. Seife) um das zufließende Wasser austragen zu können (Übergang zu „Mist-Drilling“). In diesem Fall ergibt sich oftmals ein ungleichmäßiger Austrag, der von Luft zu wässriger Phase mit Feststoffen wechseln kann.

Mit Schaumbohren (Foam-Drilling) bezeichnet man das Bohren, wenn ein Flüssigkeits-Gasgemisch, das mit Schaumbildnern versetzt ist, benutzt wird.

Bei diesen Spülverfahren in verschiedenen jeweils betrachteten Teufen ergibt sich durch die Kompressibilität des Gasanteils eine unterschiedliche Dichte, die das Austragsverhalten beeinflusst. Bei möglichem Auftreten/Zutritt von (gasförmigen) Kohlenwasserstoffen muss aus Sicherheitsgründen (Gefahr der Bildung explosionsfähiger Gemische!) zudem die Luft durch Stickstoff ersetzt werden.

Erfahrungen aus einer schwedischen Geothermie-Bohrung (Lund DGE1) /BJE 06/ lassen darauf schließen, dass die dort im 12 ¼"- (311,1 mm) Bohrloch bei 3.365 m Teufe

mit dem Luftbohren aufgetretenen Probleme, die zum teilweisen Verlust des Bohrlochs mit Notwendigkeit einer Ablenkung führten, auf den Verlust der Bohrlochstabilität in einer gestörten Zone infolge fehlenden Stützdrucks durch Bohrspülung zurückzuführen waren. Die fehlende Bohrlochstabilität führte zu massiven Bohrlochrandausbrüchen/Bohrlochkollaps, wodurch der Bohrstrang in Nachfall begraben wurde und nicht mehr befreit werden konnte.

Dieser Fall – wie auch andere Fälle – zeigt, dass für die Erstellung die Bohrlochstabilität ein entscheidendes Kriterium ist, das wiederum stark von Faktoren wie Geologie, Bohrlochdurchmesser und „Bohrlochfüllung“ (Bohrspülung oder Komplettierungsfluid) beeinflusst wird. Daher muss jedes Bohrloch lokationsspezifisch konzipiert (geplant) werden.

6.3 Das Bohrloch-Design

6.3.1 Allgemein

Als Bohrloch-Konstruktion bezeichnet man die Planung des Bohr- und Verrohrungsschemas. Es stellt einen der wichtigsten Faktoren für den Erfolg einer Tiefbohrung dar. Das Bohrloch-Design beinhaltet die Beantwortung der Fragen

- Wo müssen Verrohrungen eingebaut werden?
- Welche Rohrdurchmesser sind nötig?
- Welche Bohrlochdurchmesser müssen dafür gebohrt werden?

Die Anzahl der Rohrtouren (Casing oder Liner) hängt primär von der Geologie ab. Die Planung beginnt grundsätzlich bei der Endteufe mit dem dort benötigten Minstdurchmesser und geht i.d.R. stufenweise (rohrgrößenweise) nach oben (Abb. 6-8).

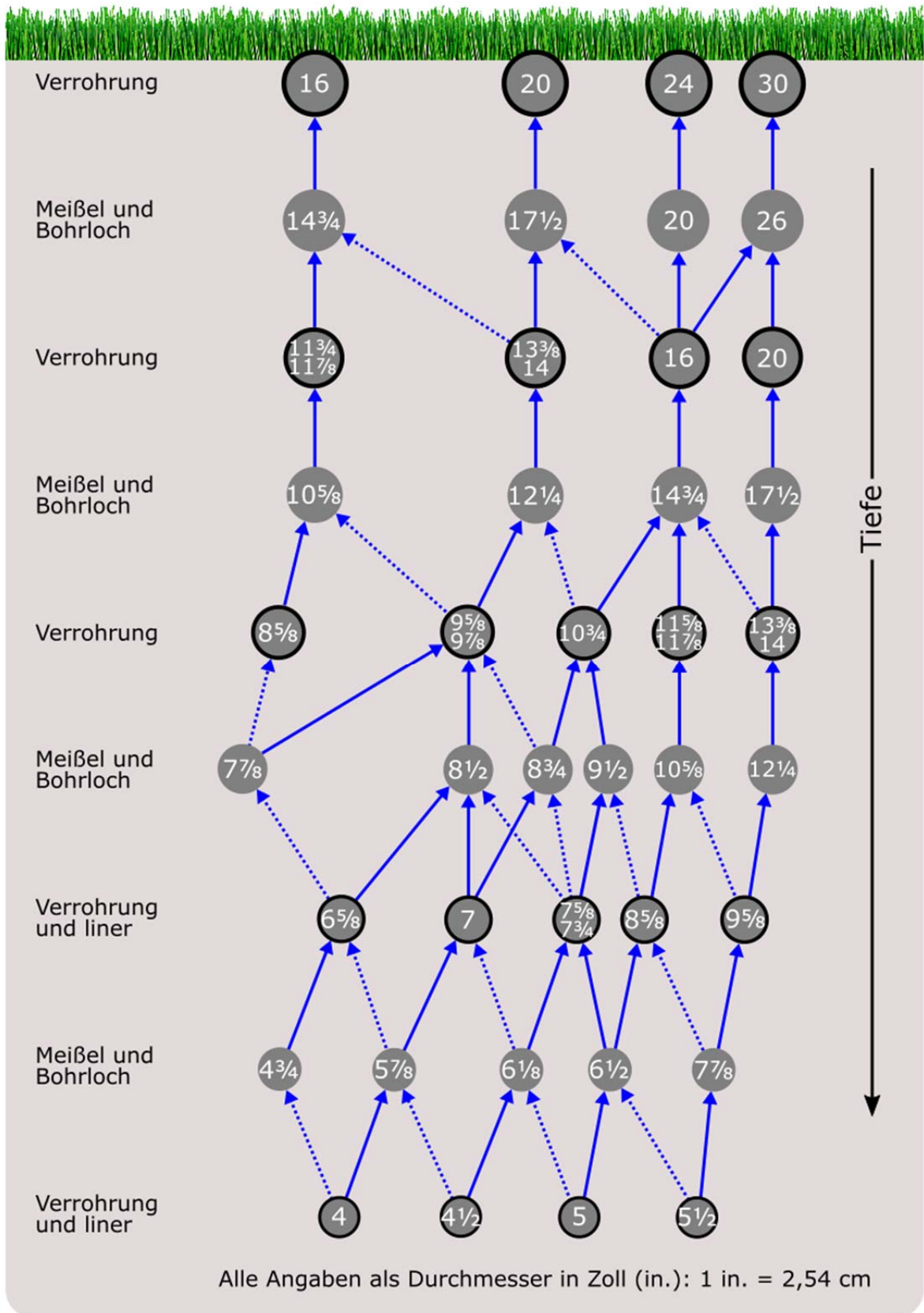


Abb. 6-8 heute übliche Bohrmeißel/Verrohrungsschema (eigene Darstellung)

6.3.2 Funktionen der verschiedenen Rohrtouren

Nachfolgend werden die grundsätzlichen Aufgaben und Funktionen der verschiedenen Rohrtouren einer Bohrung kurz skizziert.

Standrohr

Das Standrohr wird üblicherweise im Zuge der Bohrplatzherrichtung durch Rammen oder mittels Trockenbohrverfahren eingebracht. Es dient dem Schutz des Grundwassers und soll zudem ein eventuelles Unterspülen der Turmfundamente durch die Bohrspülung verhindern. Abhängig von den lokationsspezifischen Gegebenheiten wird die Rohrtour zwischen ca. 40 bis 80 m Tiefe eingebracht.

Ankerrohrtour

Die Ankerrohrtour dient der sicheren „Verankerung“ der Bohrung und muss daher in der Lage sein sehr hohe Axiallasten zu tragen, da über den Bodenflansch alle später einzubauenden zutage geführten Rohrtouren dort abgelandet werden, so dass die Lasten auf den Ankerrohrkopf übertragen werden. Hinzu kommen eventuell noch weitere zusätzliche Zuglasten, wie sie z.B. zur Kompensation der bei einem Fördertest erzeugten thermischen Elongation beim Abhängen der nachfolgenden Rohrtouren aufgebracht werden sowie eventuelle Zuglasten, wie sie bei Injektion kalten Wassers in die Bohrung durch die Abkühlung erzeugt würden.

Die Ankerrohrtour dient zugleich der Sicherung der Bohrung gegen unkontrollierte Ausbrüche von Fluiden; dazu wird auf dem Bodenflansch die Bohrlochsicherung (der Preventer-Stack) aufgebaut.

Technische Rohrtouren

Weitere Rohrtouren werden i.d.R. als „technische“ Rohrtouren bezeichnet. Anzahl und Absetzteufen richten sich nach technischen und geologischen Voraussetzungen.

Produktionsrohrtouren

Die Verrohrung an der geplanten Endteufe eines Bohrloches wird als Produktionsrohrtour bezeichnet, da durch diese üblicherweise der Zugang zu der Lagerstätte erfolgt.

6.3.3 Rohrauslegungsberechnungen

Für Rohrauslegungsberechnungen sind grundsätzlich die zu erwartenden maximalen Formationsporendrücke und die auftretenden Innendrucke im Falle einer eventuell nötigen Totpumpaktion, so wie die Spülungsdichten beim Weiterbohren aus der Rohrtour heraus als Parameter von Interesse. Weiter ist zu berücksichtigen, welche Druckbelastungen (Innendruck, Außendruck) durch Zuflüsse (z.B. Kicksituation) oder durch (partielles) Evakuierung/Leerlaufen z.B. im Verlauf von Testarbeiten oder nach Beendigung der Bohrarbeiten zu berücksichtigen sind.

Die Rohrberechnung erfolgt allgemein nach bestimmten Regeln, die international überwiegend auf den vom American Petroleum Institute (API) aufgestellten Formeln beruhen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Berechnungen

- zur Erfassung der voraussichtlichen Belastungen einerseits, und
- den Berechnungen der Belastbarkeitsgrenzen der Rohre andererseits.

Je nach „Einsatzzweck“ der Rohrtour (z.B. Grundwasserschutztour, Ankerrohrtour, Zwischenrohrtour, Produktionsrohrtour oder -liner) sind Berechnungen vorzunehmen, welche die jeweils möglichen einsatzspezifischen Belastungen berücksichtigen.

Im Endeffekt müssen die Rohrtouren so ausgelegt werden, dass die Belastbarkeitsgrenzen der Rohre immer größer sind als die über die Lebensdauer der Bohrung auftretenden Belastungen. Hier ist ggf. auch zu berücksichtigen, dass an Rohrtouren Wandstärkenminderungen (z.B. durch Korrosion oder durch den nach Einbau einer Verrohrung folgenden Bohrvorgang selbst) auftreten können, welche die Belastbarkeiten im Laufe der Zeit reduzieren.

Die so geplanten Rohrtouren eines Verrohrungsschemas müssen bei der Realisierung einer Bohrung mit der Bohranlage eingebaut werden können. Insbesondere bei tiefen Bohrungen, die mit großen Durchmessern möglichst tief verrohrt werden sollen, können die Gewichte der einzelnen Rohrtouren schnell mehrere hundert Tonnen betragen. Dies liegt u.a. daran, dass die Druckfestigkeiten von Rohren bei angenommener gleicher Wandstärke mit zunehmendem Durchmesser stark abnehmen. Dies bedingt für große Durchmesser sehr große Wanddicken, was wiederum das Gewicht der Rohrtour signifikant erhöht.

6.4 Ermittlung der Mindestanforderungen an geeignete Bohranlagen

Für die Prüfung, ob eine Bohranlage für ein Bohrprojekt geeignet ist – bzw. ob eine geeignete Bohranlage verfügbar ist – sind daher vornehmlich die Pump- und Hakenlastkapazitäten zu betrachten.

Für die Ermittlung der Hakenregel- und -ausnahmelasten sind im konkreten Fall Schleiflastberechnungen für ausgewählte Bohrstränge und Verrohrungen vorzunehmen. Bei den Verrohrungen sind zusätzlich die durch Federbogen-Zentralisation erzeugten Schleiflasten mit zu berücksichtigen.

Zusätzlich zu den mit den Schleiflastberechnungen ermittelten Lasten ist das Gewicht der beweglichen Komponenten (Block, Haken, Top-Drive bzw. Rohreinbaugeschirr) des Flaschenzugsystems für die benötigte Bohranlage einzurechnen.

Aufgrund der im Vergleich zu den Verrohrungen geringen Durchmesser der üblichen Bohrstränge (2 3/8“ (60,3 mm) bis maximal 6 5/8“ 168,3 mm)) sind i. d. R. die in den Bohrphasen zu erwartenden Stranggewichte relativ gering und betragen selten mehr als ca. 200 Mg. Für die Beurteilung der Eignung einer Bohranlage für ein Bohrprojekt sind daher primär die Lasten bei Einbau der geplanten Verrohrungen entscheidend. Schwere Bohranlagen verfügen deshalb allgemein über Hakenlastkapazitäten von ca. 450 Mg und mehr.

Für die Bohrlochhydraulik ist insbesondere der Bohrkleinaustrag ein wichtiges Kriterium; dieser wird – abhängig von dem Ringraumquerschnitt – z. T. stark von der Bohrlochneigung beeinflusst und erfordert i. d. R. in geneigten Bohrlöchern höhere Pumpraten als in Vertikalbohrungen. Bei der Berechnung der erforderlichen Pumpenleistung sind realistische rheologische Eigenschaften und Dichteannahmen der Spülung zugrunde zu legen.

6.5 Anforderungsprofil an Bohrungen für eine Eignung zur Endlagerung und Auswirkungen auf das Bohrkonzept

6.5.1 Nutzbarer Durchmesser

Geht man von den Abmessungen der bisher hergestellten „Containern“ (Glaskokillen) aus, so ist zunächst von einem Minstdurchmesser der Bohrung im Teufenbereich des Endlagers von > 500 mm auszugehen. Da die Glaskokillen nicht druckstabil sind, ist ein mindestens druckstabiler Einlagerungsbehälter erforderlich. Dies erhöht den Minstdurchmesser der Bohrung im Teufenbereich des Endlagers weiter (siehe Kapitel 7). Im Hinblick auf eine Rückholbarkeit sollte das Bohrloch verrohrt und die Verrohrung „langzeit-drucksicher“ ausgelegt sein.

Außerdem ist grundsätzlich zu entscheiden, ob die Bohrung mit ihrer Verrohrung als einzige Sicherheit gegen Druckkräfte (und andere Kriterien?) dienen soll oder ob die einzulagernden „Container“ selbst auch noch zusätzlich Sicherheiten aufweisen sollen (siehe Kapitel 7).

6.5.2 Langzeit-Stabilität

Eine Rückholbarkeit ist nur gegeben, wenn die Bohrung für diesen Zeitraum langzeitstabil ist. Dies gilt mindestens für den vorgesehenen Zeitraum der Betriebsphase bis zum Verschluss. Dies gilt sowohl für verrohrte als auch für eventuelle (aktuell nicht vorgesehene) unverrohrte Bohrabschnitte. Hier ist zu berücksichtigen, dass einige geologische Formationen zum „Kriechen“ neigen und dabei erhebliche Radialkräfte aufbauen, die u.U. selbst dickwandige Rohre verformen und bis hin zum Kollaps bringen können. Als besonders kritisch anzusehen sind dabei Belastungen, die nicht allseitig („hydrostatisch“), sondern einseitig (punktuell) wirken.

Daneben sind Angriffe von korrosiven Fluiden auf die Verrohrungen und Zementationen nicht auszuschließen. Die Einflüsse können prinzipiell durch Auswahl geeigneter Materialien (z.B. korrosionsfeste Stähle, magnesium- und sulfatresistente Zemente) gemildert werden, allerdings liegen für die geforderten Zeiträume einer Endlagerung weit über 100 Jahre keine Erfahrungen vor.

6.5.3 Langzeit-Dichtheit

Neben der Langzeit-Stabilität muss auch die Langzeit-Dichtheit gewährleistet sein. Dies gilt sowohl für die Ringraum-Zementationen als auch für alle Verschlüsse in einer Bohrung. Auch hier gilt, dass für die geforderten Zeiträume einer Endlagerung weit über 100 Jahre keine praktischen Erfahrungen vorliegen können. Grundsätzlich können die in den Bohrungen eingebrachten Dichtelemente ausgetauscht werden, z. B. durch Ausbohren der alten und Einbringen neuer Elemente.

Gleiches gilt für den Bohrlochkopf als obersten Abschluss mit Dichtfunktion.

6.5.4 Schlussfolgerungen

Aus der Analyse der vorherigen Kapitel lassen sich folgende Schlüsse ableiten:

- Verrohrungen sind unabdingbar.
- Damit Notwendigkeit verschiedener ineinander passender Bohr- und Verrohrungsdurchmesser.
- Bohrlochstabilität bedingt stützende „Füllung“ der Bohrung sowohl in der Bohr- als auch in der Nutzungsphase.
- Fluidfüllung zum Bohren als Zirkulationsmedium nötig (Bohrspülung).
- Fluidfüllung bei Einlagerung nötig.
- Fluiddichte von entscheidendem Einfluss auf Spannungszustand im Bohrloch.
- Fluidzusammensetzung wichtig für (Langzeit-)Bohrlochstabilität, insofern offene nicht verrohrte Bohrlochsektionen geplant werden.
- Die bisher industriell in der Mehrheit mit 12 ¼“ (311,1 mm) geteufte Tiefbohrungen weisen bei Endteufe nicht die für eine Endlagerung als erforderlich anzusehenden Mindestdurchmesser auf.

Voraussetzungen für eine Realisierbarkeit eines Endlagers für hoch-radioaktiven Abfall mittels heute gängiger Tiefbohrungen sind:

- Möglichst geringe Anzahl von benötigten Zwischenverrohrungen um mit größtmöglichem Durchmesser bei Endteufe zu landen

- Möglichst hohe Bohrlochstabilität (günstiger Gebirgsspannungszustand)
- Möglichst hoher Stützdruck im Bohrloch durch Fluid hoher Dichte zur Reduzierung der Spannungsänderung vom lithostatischen auf den hydrostatischen Zustand

Voraussetzung ist somit der Verzicht auf ein „trockenes“ (leeres) Bohrloch!

Die ersten beiden Kriterien sind von der Geologie abhängig.

6.6 Ablenkung von Bohrungen

Bohrungen wurden in der Vergangenheit vornehmlich als Vertikalbohrungen oder Schrägbohrungen hergestellt. Insbesondere in den letzten ca. 10 Jahren wurde die Horizontalbohrtechnik, primär zur Erschließung von Kohlenwasserstoffen, sehr weit entwickelt.

Der Abstand von Bohrungen, die als Endlager genutzt werden sollen, muss untereinander so groß sein, dass sie nicht miteinander kollidieren, oder dass sie sich negativ beeinflussen. Insbesondere gilt dies für den Bereich, in dem schon Behälter eingelagert wurden. Schon vor der Lagerung von Behältern mit hoch-radioaktiven Abfällen kann während der Bohrphase das Bohrloch noch aufgegeben oder korrigiert werden. Für die Ablenkung von Bohrungen liegen sehr umfangreiche Erfahrungen vor.

Die Schwierigkeiten bei den Genehmigungen von Bohrplätzen führen in der Praxis häufig dazu, dass die Anzahl der Bohrplätze sehr stark reduziert wird bzw. werden muss. Ein bekanntes Beispiel ist hierfür die Ölförderplattform Mittelplate im Wattenmeer. Von dieser Bohrplattform aus wird ein Großteil des Öllagers in den Sandsteinen des Doggers im Bereich des Büsumer Salzstockes entölt. Weitere Bohrplattformen werden hier nicht mehr genehmigt. Ein weiterer Teil der Lagerstätte wird vom Bohrplatz Dieksand von Land aus entölt. Hier waren Bohrstrecken von zum Teil über 10.000 m Länge notwendig.

/LAN 03/ beschreiben, dass sich alle hoch abgelenkten Bohrverläufe von Land zur Lagerstätte nur geringfügig in ihrer Bohrlochneigung und Azimut voneinander unterscheiden, da sie alle auf geringe Drehmomente und Schleiflasten ausgelegt werden mussten.

Auf der Bohrinself Mittelplate wurden bis zum Jahr 2003 insgesamt 17 Bohrungen von möglichen 44 Bohrungen abgeteuft /FRA 03/. Mit der Umrüstung der Bohranlage sollten Bohrungen mit einer Länge von etwa 7.500 m ermöglicht werden.

In Abb. 6-9 ist eine Übersicht über den horizontalen Verlauf von Bohrungen von der Station Dieksand und von der Bohrplattform Mittelplate im Bereich der Öllagerstätte Mittelplate gegeben.

Die Öllagerstätte Mittelplate liegt am Salzstockrand in verschiedenen Horizonten des Doggers und ist kompliziert gebaut. Um die Lagerstätte entölen zu können sind zahlreiche Bohrungen mit unterschiedlichen Bohrpfeilen notwendig. Wegen des Naturschutzes durften zahlreiche Bohrungen nur von einer Bohrplattform abgeteuft werden. Dies bedingt, dass oberflächennah die Bohrungen extrem geringe horizontale Abweichungen voneinander besitzen. Die Bohrplattform hat Abmessungen von ca. 100 x 70 m.



Abb. 6-9 Übersicht über den horizontalen Verlauf von Bohrungen von der Station Dieksand und von der Bohrplattform Mittelplate im Bereich der Öllagerstätte Mittelplate im Wattenmeer (Bild: Google). In hellblau ist der Salzstock Büsum eingezeichnet. Links oben im Bild ist die Vogelinself Trischen. Der Gridabstand ist 1.000 m. Der Horizontalverlauf der Bohrungen Mittelplate und Dieksand ist /FRA 03/ entnommen.

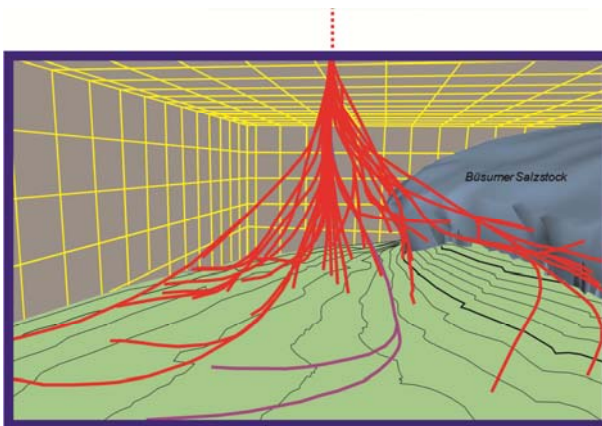


Abb. 6-10 Oberer Teil: Bohrplattform Mittelplate/WIK 16a/.

Unterer Teil Bohrpfade der Bohrung Mittelplate (rot). Verlauf einer Duolateralbohrung (magenta). Hier wurde aus einer 6.100 m langen Bohrung heraus ein zweite Bohrung mit einer Länge von 1.500 m erstellt und mit Produktionsstrang versehen (nach /DEA 15/).

Auf der Bohrplattform Mittelplate sind zahlreiche technische Installationen vorhanden. Die Abmessungen des eigentlichen Bohrplatzes sind demnach noch deutlich geringer. In Abb. 6-10 sind die Bohrpfade der Bohrungen von der Bohrplattform Mittelplate dargestellt. Dieses Beispiel wie viele andere Beispiele aus der Off-Shore-Bohrtechnik zeigen, dass nahezu beliebige Bohrpfade realisiert werden können. Hierbei ist wichtig, dass die Bohrpfade aktiv gesteuert werden und in ihrem Verlauf dem geplanten Bohrpfad entsprechen.

6.7 Erfahrungen aus Forschungsbohrungen

Ein weiterer Punkt in diesem Abschnitt geht auf zu Forschungszwecken geteufte Bohrungen ein. Im Gegensatz zu kommerziellen Bohrungen sind hier die Erfahrungen zum Teil gut publiziert und die Ergebnisse der Öffentlichkeit gut zugänglich gemacht.

Aus Forschungsbohrungen liegen wichtige Erfahrungen vor. Dies gilt sowohl für Bohrungen im Kristallin, wie auch für Bohrungen in Sedimenten. In einer Reihe von Bohrungen wurden sowohl Sedimente wie auch Kristallin erbohrt. Sehr viele bohrtechnische Erfahrungen wurden im Kristallin von der KTB-Vorbohrung und der KTB Hauptbohrung gemacht.

In Sedimenten wurden die Forschungsbohrungen Groß-Schönebeck und Genesys abgeteuft. Aus den Forschungsbohrungen Urach 3 und Urach 4 liegen Erfahrungen vor, bei denen sowohl das sedimentäre Deckgebirge, als auch das kristalline Grundgebirge erbohrt wurden. Dies trifft auch für die Forschungsbohrungen in Soultz-sous-Forets im Elsass (F) zu.

Wenig bekannt ist die Tatsache, dass in der ehemaligen DDR zahlreiche Forschungsbohrungen abgeteuft wurden. Für diese sind aber im Vergleich zu den vorgenannten Bohrungen nur vergleichsweise wenige Daten publiziert. Eine Auswertung dieser Bohrungen könnte die Datenbasis aber deutlich verbessern. In Schweden wurde die Bohrung Gravberg auf über 6.000 m im Granit niedergebracht. Hier liegt eine Reihe von Informationen vor. Diese Bohrung war aber keine Forschungsbohrung, sondern diente der Suche nach unkonventionellen Kohlenwasserstoffen.

Die tiefste Bohrung der Welt ist die Bohrung Kola SG 3. Diese Bohrung wurde auf der Halbinsel Kola in der ehemaligen Sowjetunion auf über 12.000 m abgeteuft. Über diese Bohrung liegen vereinzelt Informationen vor. Da die Temperatursituation und die geologischen Verhältnisse unterschiedlich sind, sind die Erfahrungen nur teilweise übertragbar.

Bohrungen mit kleinen Durchmessern sind deutlich kostengünstiger zu erstellen als Bohrungen mit großen Durchmessern. Aus diesem Grund wird in der Regel bei Forschungsbohrungen versucht mit möglichst kleinen Bohrdurchmessern die Endteufe zu erreichen. Um die Bohrungen sehr tief niederbringen zu können ist es erforderlich einzelne Bohrlochabschnitte mit einer Stahlverrohrung abzusichern. Danach muss mit ei-

nem geringeren Meißeldurchmesser gebohrt werden. Diese Technik wird, wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, auch „Teleskopieren“ genannt. Hieraus ergibt sich, dass bei sehr tiefen Bohrungen der Bohrloch-Startdurchmesser deutlich größer ist als bei weniger tiefen Bohrungen. Über Erfahrungen mit Bohrungen aus der Öl- und Gasindustrie sind aus Wettbewerbsgründen nur vereinzelt Informationen verfügbar. Aus diesem Grunde werden hier vor allem Erfahrungen aus Forschungsbohrungen erläutert. Mit am besten dokumentiert sind hierbei die Bohrungen des KTB-Projektes. Dieses Projekt ist hervorragend dokumentiert /ENG96/. Wichtige Informationen des folgenden Kapitels sind dieser Dokumentation entnommen.

6.7.1 Fallbeispiel KTB

Die Machbarkeitsstudie für das KTB-Projekt ergab frühzeitig ein Konzept für zwei Bohrungen. Im Rahmen einer Pilotbohrung sollten für den oberen Abschnitt im Wesentlichen grundlegende Daten gesammelt werden. Hierzu war ein umfangreiches Bohrlochmessprogramm vorgesehen. Des Weiteren war vorgesehen die Bohrung weitestgehend zu kernen um eine maximale Ausbeute an Informationen zu gewinnen.

Um sehr große Teufen zu erreichen, ist es notwendig, Bohrungen mit sehr großen Durchmessern zu beginnen, damit für mehrere Verrohrungen ausreichend Platz zur Verfügung steht. In Bohrungen mit sehr großen Durchmessern ist das Kernieren schwierig. Auch bei Bohrlochmessungen standen bei großen Durchmessern nur wenige Tools zur Verfügung. Aus diesem Grunde wurde entschieden zuerst ein Pilotloch bis zu einer Tiefe von 4.000 m auszuführen und danach die Hauptbohrung abzuteufen.

KTB-Vorbohrung (VB)

Mit der Pilotbohrung sollten Problembereiche wie Störungszonen, Zufluss- oder Verlustzonen erkannt werden. Auch Bereiche und Gesteine mit Bohrlochstabilitätsproblemen oder Zonen, in denen die Bohrung besonders stark aus der Vertikalen abweicht, sollten frühzeitig erkannt werden. Bis zum Abteufen der KTB-Hauptbohrung sollten auch neue Messverfahren im Kristallin erprobt werden. Die Erstellung eines durchgehend optimalen geowissenschaftlich Profils war ein wichtiges Ziel. Damit sollten Grundlagen für die beste Bohrstrategie für eine großkalibrige Bohrung geschaffen werden.

Die Zielteufe für die KTB-Vorbohrung wurde mit 3.000 bis 5.000 m festgelegt. Für die KTB-Hauptbohrung war als wesentliches Ziel das sichere Erreichen einer Zielteufe von

10.000 m vorgesehen. Hierzu sollte ein möglichst senkrechtes Bohrloch erstellt werden, das den oberen Abschnitt möglichst schnell und wirtschaftlich durchteuft um genügend Zeit und Ressourcen für den risikobehafteten tieferen Abschnitt der Bohrung zu behalten.



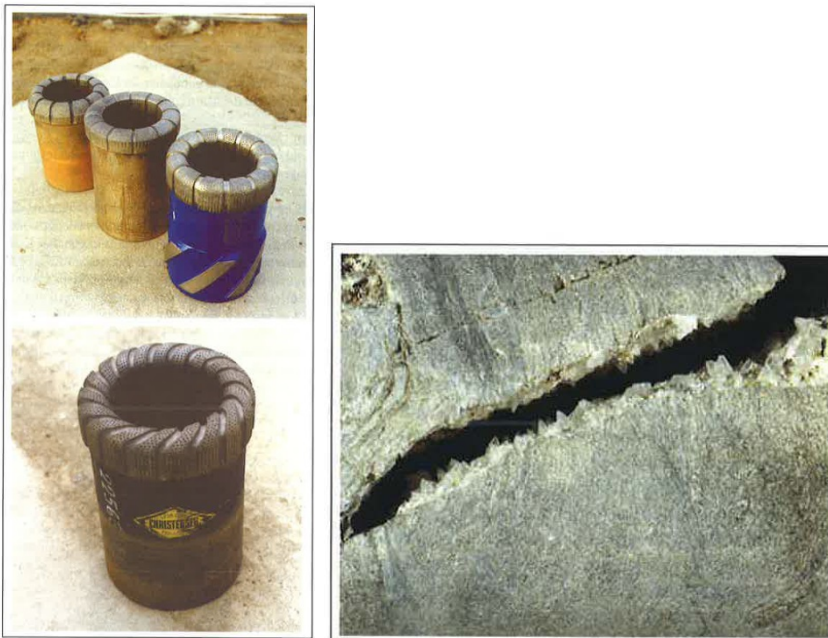
Abb. 6-11 Bohranlage GH 1400E für die KTB-Vorbohrung

Der Bohrplatz für die KTB-Vorbohrung besitzt eine Fläche von etwa 4.000 m². Die Länge beträgt 81,5 m und die Breite 50 m. Für die Vorbohrung wurde die Anlage GH 1400E (Abb. 6-11) ausgewählt. Bei dieser Anlage handelte es sich um eine Rotary-Bohranlage, die in der Lage war, bis zu einer Teufe von 5.000 m die Seilkerntechnik anzuwenden.

Die KTB Vorbohrung erreichte im Zeitraum vom 22.9.1987 bis zum 4.4.1989 eine Endteufe von 4.000,1 m. Es wurden insgesamt 956 Kernmärsche mit einer Kernlänge von insgesamt 3.593 m Kerne erbohrt. Bis zu einer Tiefe von 27,5 m wurde mit einem Durchmesser von 17^{1/2}“ (444,5 mm) gebohrt und mit einer 13^{3/8}“ (339,7 mm) Verrohrung verrohrt. Bis zu einer Teufe von 478,5 m wurde mit einem 10^{5/8}“ (269,9 mm) Roller-Cone-Core Bit gekernt und die Bohrlochstrecke bis 478,5 m mit einer 8^{5/8}“ - (219,1

mm) Verrohrung gesichert. Bis zur Endteufe von 4.000,1 wurde mit einem Durchmesser von 6“ gebohrt. Der größte Teil der Strecke wurde hierbei mit Seilkerntechnik gekernt. Der Kerndurchmesser der 6“- (152,4 mm) Diamantbohrkrone beträgt 94 mm (Abb. 6-12 links). Die Qualität der Bohrkerns war in der Regel von ausgezeichneter Qualität. Selbst in Störungszonen konnten Bohrkerns gewonnen werden. In einer Teufe von 3.447 m wurde eine offene Kluft gekernt (Abb. 6-12 rechts).

Nach Abschluss der KTB-Vorbohrung erfolgte eine intensive Vermessung der Bohrung. Hierbei wurden zahlreiche Parameter gemessen. Insbesondere wurden auch fluidführende Zonen intensiv getestet. Mit der KTB-Vorbohrung konnte gezeigt werden, dass eine Lokation bis zu einer Teufe von 4.000 m sehr gut untersucht und geowissenschaftlich extrem gut charakterisiert werden kann.



**Abb. 6-12 links: 6“- (152,4 mm) Diamant Bohrkrone,
rechts: Gneis aus einer Teufe von 3447 m mit einer offenen Kluft
/ENG 96/**

KTB Hauptbohrung (HB)

Die KTB-Hauptbohrung war auf eine Teufe von 10.000 m konzipiert, mit der Möglichkeit einer Vertiefung auf 12.000 m. In Abb. 6-13 ist die Bohranlage zu sehen. Diese ist heute noch am Geozentrum an der KTB zu besichtigen. Da Kerne bis zu einer Teufe von 4.000 m aus der KTB-Vorbohrung vorhanden waren, wurden in der KTB-Hauptbohrung erst unterhalb von 4.000 m Kerne gezogen.

Zur Sicherung des Bohrlochs wurde bis zu einer Teufe von 290,5 m eine Verrohrung mit 711 mm Durchmesser eingebaut. Danach wurde bis zu einer Teufe von 3003,5 m im Durchmesser von 444,5 mm ($17^{1/2}$ ") gebohrt und das Bohrloch bis zu einer Teufe von 3000,5 m mit einer 16"-Verrohrung (406 mm) gesichert. Für instabile Bereiche war noch eine Reserverohrtour vorgesehen. Dieser Bereich hätte auf 22" (559 mm) erweitert und mit einer $18^{5/8}$ "-Verrohrung (473 mm) gesichert werden können. Aus der 16"-Verrohrung (406 mm)- heraus wurde bis zu einer Teufe von 6018 m mit einem $14^{3/4}$ "-Durchmesser (375 mm) gebohrt und das Bohrloch bis zu einer Teufe von 6013,5 m mit einer $13^{3/8}$ " (339,7 mm) bzw. $13^{5/8}$ "- (346,1 mm) Verrohrung gesichert. Der Einbau dieser extrem langen und schweren Verrohrung von über 6000 kN Gewicht wurde bereits vor etwa 25 Jahren sicher beherrscht. Eine wichtige Voraussetzung hierfür war, dass die Schleiflasten beim Rohreinbau und die Drehmomente beim Bohren auf Grund der eingesetzten Richtbohrtechnik sehr gering gehalten werden konnten.

In der KTB-Vorbohrung war in einer Teufe von 4.000 m mit einem Bohrlochdurchmesser von 152 mm ein limitierender Faktor erreicht, während in der KTB Hauptbohrung bis über 6000 m mit einem Durchmesser von $14^{3/4}$ " (375 mm) gebohrt wurde.



Abb. 6-13 Bohrturm der KTB Hauptbohrung in Windischeschenbach

In Abb. 6-14 ist das Verrohrungsschema der KTB Hauptbohrung dargestellt. Es ist zu sehen, dass insgesamt 3 Rohrtouren bis über Tage eingebaut und danach Liner in die Verrohrungen eingehängt wurden. Im Gegensatz zu Tagestouren (= bis zutage geführt)

te Verrohrung) werden die Liner nicht bis über Tage geführt, sondern werden in der vorherigen Verrohrung abgehängt. Die KTB Hauptbohrung erreichte im Jahr 1994 ihre Endteufe von 9.101 m.

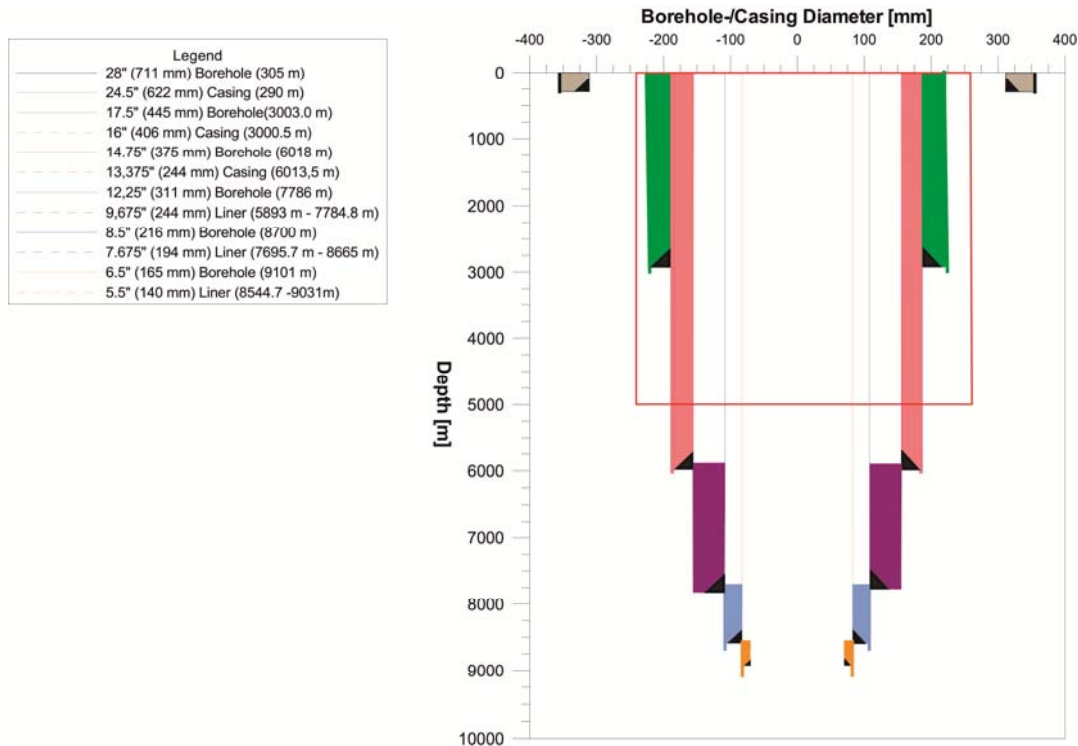


Abb. 6-14 Verrohrungsschema der KTB-Hauptbohrung. Insgesamt wurden drei Rohrtouren bis über Tage geführt und zementiert. Zusätzlich wurden unterhalb von 6.000 m drei Liner eingebaut um das Bohrloch abzuschern. In Rot ist ein Bohrerlochdurchmesser von 500 mm bis zum Teufenbereich von 5.000 m zum Vergleich eingezeichnet.

Erkundungs- bzw. Forschungsbohrungen in der ehemaligen DDR

Zwischen 1962 und 1990 wurden auf dem Gebiet der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik zahlreiche tiefe Erkundungsbohrungen durch das sedimentäre Deckgebirge und das paläozoische Grundgebirge abgeteuft. Eine Dokumentation von 63 ausgewählten Erdöl- und Erdgasbohrungen wird bei /HOT 93/ vorgestellt. In dieser Publikation sind die geologischen Kurzprofile, eine Bohrpunktkarte, eine Namensliste, die Endteufen und die tiefste erbohrte Einheit aufgelistet (Tab. 6-2).

Im Vorwort der Publikation „Die tiefen Bohrungen im zentralen Abschnitt der Mitteleuropäischen Senke - Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962 – 1990“ /HOT 93/ steht, dass „auf der Grundlage von Entscheidungen des Bundeswirtschaftsministeriums und

anderer staatlicher Behörden im Einvernehmen zwischen der Erdöl-Erdgas Gommern GmbH und den Ländern Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Sachsen die Forschungsbohrungen und einige Bohrungen von regionaler Bedeutung, die im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration in Ostdeutschland geteuft wurden, in Landeseigentum überführt.“

Die tiefste Bohrung in der ehemaligen DDR ist die Bohrung Mirow 1 in Mecklenburg-Vorpommern. In einer Bohrtiefe von 8.008,6 m (Endteufe) erbohrte sie noch Vulkanite des Rotliegend. Hiermit wurde der Nachweis erbracht, dass die Permbecken zum Teil enorme Tiefen erreichen.

56 dieser Bohrungen erreichten Teufen von 3.000 m und mehr und über 30 Bohrungen erreichten Teufen von über 5.000 m. Da die Daten den Geologischen Diensten übergeben wurden steht somit für diesen Teil der Republik eine gute Datenbasis für weitere Forschung zur Verfügung.

Tab. 6-2 Forschungsbohrungen in der ehemaligen DDR mit Kurzbezeichnungen Ansatzpunkten, Endteufen und tiefstem erbohrten Horizont.

Bundesland	lfd. Nr.	Kurzbezeichnung	Hochwert	Rechtswert	Endteufe (m)	tiefster erbohrter Horizont
MV	1	Rn 5/66	6061235.7	4587993.8	3892.4	Ordovizium
MV	2	Dke 1/68	6056710.3	4579094.3	3013.4	Oberdevon
MV	3	Rn 2/67	6053117.6	4573812.8	4602.5	Mitteldevon
MV	4	Dke 2/70	6051430.9	4578623.4	3200.0	Oberdevon
MV	5	Loh 2/70	6049758.6	5404459.4	3350.4	Ordovizium
MV	6	Sagd 1/70	6043421.3	5406371.8	3700.0	Oberdevon
MV	7	Rn 4/64	6038853.2	4585266.8	4500.0	Mitteldevon
MV	8	Pew 1/65	6038085.2	4532629.8	5243.9	Westfal B?
MV	9	Gst 1/73	6035627.1	4583331.5	5500.0	Mitteldevon
MV	10	Binz 1/73	6027904.8	5411704.8	5219.6	Ordovizium
MV	11	Barth 1/63	6017990.8	4537997.0	5505.0	Namur B
MV	12	Ric 4/65	6015966.9	4560584.9	4780.0	Westfal B
MV	13	Gd 1/62	6012093.0	4583534.5	4300.3	Westfal B, Südrügen-Pluton
MV	14	Ric 3/65	6012023.8	4560636.4	4638.5	Westfal C
MV	15	Ric 2/64	6011696.5	4554454.0	4063.7	Westfal D
MV	16	Gm 6/64	6005867.0	4569495.0	4828.6	Westfal B
MV	17	Loss 1/70	6000816.2	5404583.4	7105.0	Ordovizium
MV	18	R 1/68	5988144.1	4515662.7	4810.7	Assel-Vulkanit
MV	19	Pud 1/86	5981770.0	5442768.5	7550.0	Mitteldevon
MV	20	Swan 1/76	5979726.6	4506327.2	5796.0	Perm, Saxon I, Müritz-Folge
MV	21	Gv 1/78	5977788.0	4433123.0	6711.2	Perm, Saxon II, Havel-Folge
MV	22	Fdtl 2/70	5972166.0	5404393.4	5501.0	Assel-Vulkanit
MV	23	Lr 1/75	5964046.6	4530684.0	5315.5	Assel-Vulkanit
MV	24	FdIN 1/71	5961412.8	5402945.0	6500.0	Assel-Vulkanit
MV	25	Stav 1/76	5953867.4	4556468.2	5000.0	Assel-Vulkanit
MV	26	S 1/87	5947006.2	4451564.2	7343.0	Artinsk?-Vulkanit
MV	27	Pnl 1/75	5933025.9	4562416.6	5506.7	Assel-Vulkanit
MV	28	Ven 1/78	5919140.1	4428823.4	5700.0	Perm, Saxon II, Havel-Folge
MV	29	Feg 1/87	5912727.7	4594322.6	4920.0	Assel-Vulkanit
MV	30	Pa 1/68	5911705.7	4494533.6	7030.0	Namur B
MV	31	Pkn 1/71	5910426.2	5449557.0	6015.0	Assel-Vulkanit
MV	32	Bzg 1/74	5909778.6	4419650.5	7012.0	Namur B
MV	33	Wsbg 1/72	5905109.8	4563427.3	5160.1	Assel-Vulkanit
MV	34	Kaa 1/87	5903654.8	4437541.5	5147.0	Stefan-Vulkanit
MV	35	MirNs 1/74	5899959.3	4547521.5	8008.6	Assel-Vulkanit
BB	36	ZooGs 1/75	5898370.9	4585350.4	5146.5	Stefan?-Vulkanit
BB	37	Ela 1/74	5895702.2	4470859.6	5206.0	Namur B
BB	38	Proet 1/81	5895679.3	4470753.2	7008.0	Namur A
BB	39	RmwL 17/70	5891289.2	4412184.4	4584.0	Perm, Saxon II, Havel Folge
BB	40	Rrnwl 11A/69	5883827.4	4464047.1	4249.7	Assel-Vulkanit
BB	41	Gs 2/67	5878750.6	4563028.9	5241.7	Namur
BB	42	Am 1/68	5878003.8	5436629.7	5100.0	Namur
BB	43	Zeh 2/75	5877146.0	4585345.4	5215.7	Namur
BB	44	Chi 1/71	5867081.4	5419554.5	3957.4	Assel-Vulkanit
BB	45	Feb 1/72	5856533.3	4550103.3	5050.0	Assel-Vulkanit
BB	47	Kotz 4/74	5835904.4	4523370.4	5499.0	Stefan-Vulkanit
BB	48	Ob 1/68	5835712.2	4590282.2	5132.8	Visé
BB	49	Kotz 1/69	5827856.8	4530846.7	4471.5	Assel (-Stefan)
BB	50	Ggs 1/70	5824468.0	5468975.5	3278.1	Assel?-Vulkanit
BB	51	BzP 6/62	5781865.3	4563456.7	3293.9	Ober-/ Mitteldevon ?
BB	52	Lw 1/80	5769533.5	4585233.7	2101.5	Proterozoikum?
ST	53	Wbge 7E/75	5870098.6	4483030.8	5242.0	Perm, Saxon II, Havel-Folge
ST	54	Sw 2/64	5856457.3	4453472.0	4987.9	Assel-Vulkanit
ST	55	Pes 7/70	5854877.4	4430407.6	4617.2	Namur B
ST	56	Gap 1/86	5834826.9	4472960.2	4587.2	Assel-Vulkanit
ST	57	Zol 1/71	5818351.2	4511022.6	4199.5	Sakmara-Vulkanit
ST	58	Rx 2/62	5815379.8	4461683.3	2858.1	NamurA? Südalmark-Pluton
ST	59	Dren 3/70	5777915.2	4453874.2	980.5	Visé
ST	60	HuyNei 1/85	5758757.7	4424005.1	2640.0	Mitteldevon
ST	61	She 2/75	5749041.4	4560618.3	2350.0	Stefan?
ST	62	Qf 1/64	5697204.5	4482914.6	3001.7	Stefan

6.7.2 Soultz-sous-Forêts

Im Zuge der Erforschung geothermischer Systeme wurden in Soultz-sous-Forêts im Elsass drei Tiefbohrungen bis in über 5.000 m erfolgreich abgeteuft (GPK2, GPK3 und GPK4). Die Bohrarbeiten wurden im Wesentlichen innerhalb des vorgegebenen Zeit- und Kostenrahmens niedergebracht /TIS 06/.

Die 3 Bohrungen (GPK2, GPK3 und GPK4) wurden von einem Bohrplatz aus abgeteuft und liegen an der Oberfläche nur 6 m auseinander. Unter Tage wurden sie durch Richtbohren auf eine Entfernung von etwa 600 m auseinander gezogen (Abb. 6-15).

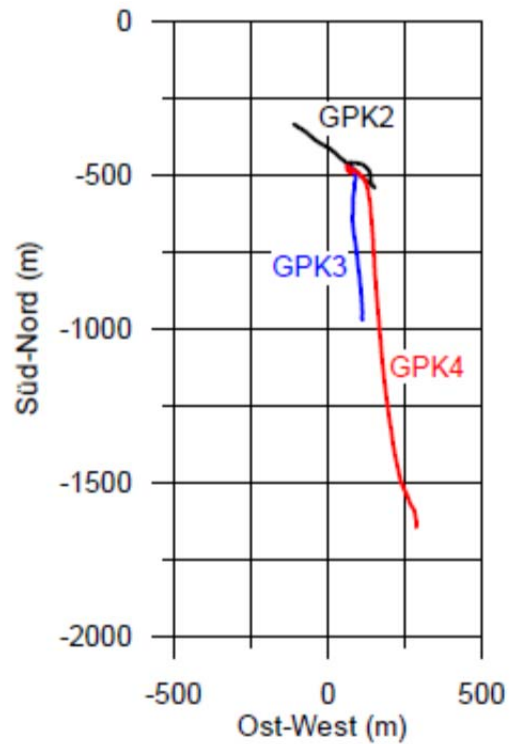
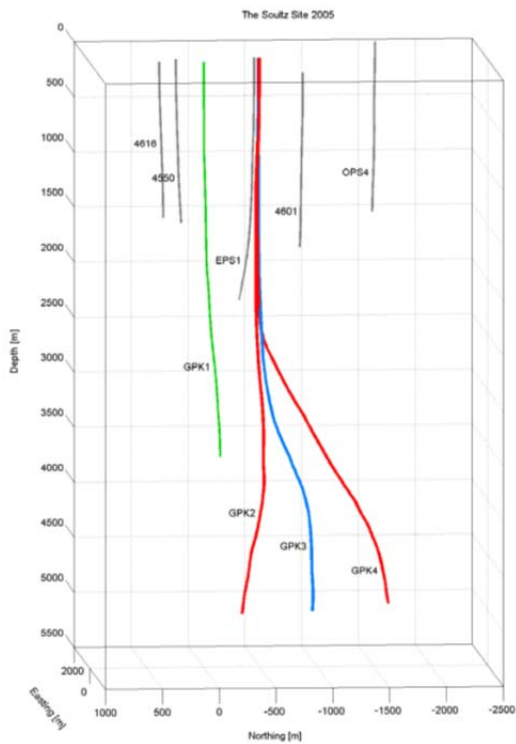
Problematisch bei diesen Bohrungen war der hohe geothermische Gradient, so dass in einer Teufe von 5.000 m Temperaturen von etwa 200 °C erwartet werden mussten. Bei diesen Temperaturen kam die Messtechnik in Tiefbohrungen an zumindest vorläufige Grenzen. Der Granit ist durch die ersten Forschungsbohrungen in Soultz-sous-Forêts als sehr hartes und abrasives Gestein bekannt. Dies stellte technische Herausforderungen bei der Abteufung der Bohrungen dar (Auswahl der Bohrwerkzeuge).

Im Gegensatz zu vielen Bohrungen in der Kohlenwasserstoffindustrie wurde in Soultz-sous-Forêts ein freier unzementierter Rohrstrang eingebaut. Dieser erlaubt eine thermische Ausdehnung während der Produktions- und eine Schrumpfung während der Injektionsphase. Die Zementation erfolgte bei diesen Bohrungen nur am Rohrschuh.

Bohrung GPK2

Im Jahre 1995 wurde die Bohrung GPK2 als Forschungsbohrung bis in eine Tiefe von 3.597 m abgeteuft und 1999 wurde sie nahezu vertikal bis auf eine Tiefe von 5.084 m vertieft.

Die Bohrung GPK2 wurde bis zu einer Tiefe von etwa 534 m mit einer 13^{3/8}" (339,7 mm) und bis 1.422 m mit 9^{5/8}" (244,5 mm) und bis 4431 m mit einer 7" (177,8 mm) Verrohrung verrohrt. Die 7"- (177,8 mm) Verrohrung ist bis zu einer Tiefe von etwa 4.160 m zementiert. Der offene Bohrlochbereich hat einen Durchmesser von 8^{1/2}". Bis zur Verrohrung mit der 7"- (177,8 mm) Verrohrung war das 8^{1/2}" (215,9 mm) Bohrloch auf einer Strecke von etwa 3.500m offen.



a)

b)

Abb. 6-15 a) 3D-Ansicht: Trajektorien der Injektionsbohrung GPK3, der Produktionsbohrungen GPK2 und GPK4, sowie aller seismischen Observationsbohrungen.

b): Aufsicht auf die Bohrlochverläufe der Bohrungen GPK2, GPK3 und GPK4 (aus /TIS 06/).

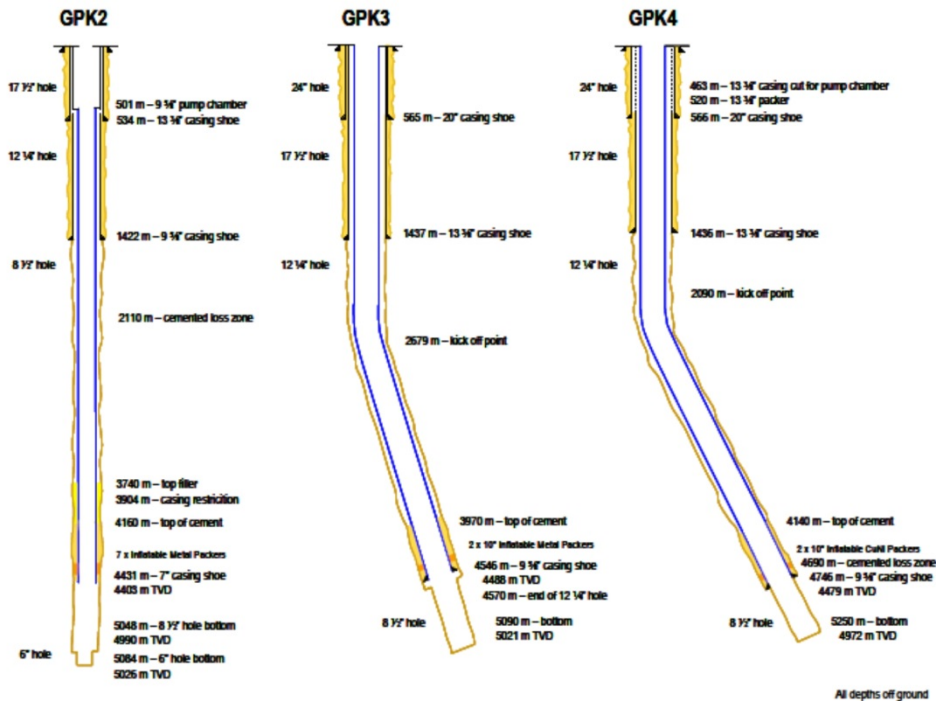


Abb. 6-16 Vertikalverlauf der Injektionsbohrung GPK3, der Produktionsbohrungen GPK2 und GPK4 mit Komplettierung (aus /TIS 06/).

Bohrung GPK3

Als zweite Bohrung wurde die GPK3 in Soultz-sous-Forêts bis auf eine Teufe von über 5.000 m abgeteuft. Mit dieser Bohrung sollte durch gezielte Stimulationsmaßnahmen eine Kommunikation mit der Bohrung GPK2 erzeugt werden.

Die beiden Bohrungen, die an der Oberfläche nur 6 m auseinander liegen, sollten im Zielbereich im Bohrlochtiefsten 600 m voneinander entfernt sein. Die GPK3 war somit die erste gerichtete Bohrung in Soultz-sous-Forêts und sollte zukünftig als Injektionsbohrung dienen.

Der 24" (609,6 mm) Abschnitt wurde bis 565 m Tiefe mit 20" Rohren verrohrt und bis zur Oberfläche zementiert. Der 17^{1/2}" (444,5 mm) Abschnitt wurde nahezu vertikal gebohrt. Bis zu einer Teufe von 1.408 m wurden die junge Grabenfüllungen des Oberreingrabens und eine mesozoische Schichtenfolge durchbohrt. Der Granit wurde in einer Tiefe von 1.408 m angetroffen. Die 13^{3/8}" (339,7 mm) Rohrtour wurde in einer Teufe von 1.439 m abgesetzt und zementiert.

Die Bohrung wurde bis zu einer Teufe von 2679 m mit einem Durchmesser von 12^{1/4}“ (311,1 mm) gebohrt. Die anschließenden Richtbohrarbeiten wurde mit einem Durchmesser von 8^{1/2}“ (215,9 mm) bis zu einer Tiefe von 3171 m gerichtet vorgebohrt. Die vorgebohrte Strecke wurde daraufhin bis zu einer Teufe von 4.570 m auf einen Durchmesser von 12^{1/4}“ (311,1 mm) erweitert. Die 9^{5/8}“ (244,5 mm) Verrohrung wurde bei 4.546 m abgesetzt und bis zur Endteufe von 5090 m wurde mit 8^{1/2}“ (215,9 mm) Meißeln gebohrt. In dieser Bohrung war während des Bohrvorganges eine Strecke von etwa 3650 m im Granit unverrohrt. Die Bohrarbeiten an der Bohrung GPK3 in Soutz-sous-Forêts wurden nach 142 Tagen, etwa 16 Tage vor der ursprünglichen Planung, erfolgreich beendet.

Bohrung GPK4

Die Bohrung GPK4 sollte in Richtung Süden abgelenkt werden, so dass ein ausreichender Abstand von 600 m zur Injektionsbohrung GPK3 eingehalten werden konnte. Der Landepunkt der Bohrung GPK4 ist etwa 1200 m von der Bohrung GPK 2 entfernt (Abb. 6-16). Die Bohrung erreichte eine Teufe (Bohrlochlänge) von 5250 m.

Am 29. August 2003 begannen die Bohrarbeiten mit einem Meißeldurchmesser von 24“ (609,6 mm). Der Bohransatzpunkt lag an der Oberfläche 6 m von der GPK3 entfernt. Bis zu einer Teufe von 576 m wurden 20“ (508 mm) Rohre eingebaut und zementiert. Danach wurde mit einem 17^{1/2}“ (444,5 mm) Meißel bis zu einer Teufe von 1.446 m gebohrt und die 13^{3/8}“ (339,7 mm) Verrohrung eingebaut. Diese Verrohrung wurde etwa 40 m tief im Granit abgesetzt.

In einer Teufe von 4.746 m wurde die 9^{5/8}“ (244,5 mm) Verrohrung in das 12^{1/4}“ (311,1 mm) Bohrloch eingebaut. Wegen der Gefahr einer Kollision der Bohrung GPK 3 mit der Bohrung GPK 4 wurde das Bohrloch mit einem Bohrlochmotor von der GPK 3 weggeführt.

Unterhalb von 4.910 m führten zunehmende Bohrlochwandausbrüche, Nachfall von Bohrklein und Festwerden zu verstärkten Schwierigkeiten.

„Am 11. April 2004 erreichte die Bohrung GPK4 eine Bohrtiefe von 5.250 m und eine vertikale Teufe von 4.972 m. Zu diesem Zeitpunkt wurde entschieden, dass die Fortsetzung der Bohrarbeiten, dominiert von hohem Drehmoment, dem damit bedingten Material- und Rohrverschleiß sowie fortdauernden spannungsbedingten Bohrloch-

wandausbrüchen, zu riskant war, und die Arbeiten wurden eingestellt. Die bohrtechnischen Grenzen für den Granit in Soultz schienen erreicht zu sein. Der Großteil des offenen Bohrlochbereichs landete trotz aller Schwierigkeiten innerhalb des geplanten Zielvolumens in 1.150 m horizontaler Entfernung vom Bohrlochkopf“ /TIS 06/.

Die Erfahrungen von Soultz-sous-Forêts zeigen, dass Bohrungen mit relativ großen Durchmessern im Granit bis in Tiefen von 5.000 m möglich sind. Erst gegen Ende der Bohrstrecke nahmen die Schwierigkeiten zu. Sie waren aber mit der Bohranlage noch beherrschbar. Zum Teil standen über 3.500 m Bohrung unverrohrt offen. Dies zeigt, dass das Kristallin (hier Granit) über eine vergleichsweise gute Gebirgsstabilität verfügt.

6.8 Bohrtechnologie für unterschiedliche Szenarien und Geologien

Da unterschiedliche Gesteine sich physikalisch und chemisch sehr unterschiedlich verhalten, ist für verschiedene Gesteine jeweils eine angepasste Bohrstrategie zu verwenden.

Im Wesentlichen sollen hier drei verschiedene Gesteine betrachtet werden:

- Kristallin
- Sediment und
- Salz.

Um eine möglichst stabile Bohrung abzuteufen, muss die Bohrtechnik - insbesondere die eingesetzte Spülung - angepasst werden. Während im Kristallin und verschiedenen Sedimenten bis zu einer bestimmten Teufe mit Luft oder Wasser gebohrt werden kann, ist eine Bohrung in Salzgesteinen mit Süßwasser als Bohrspülung nicht möglich. Lediglich bei Kavernenbohrungen wird der Umstand genutzt, dass das Gestein vollständig weggelöst wird. Bestimmte Tonsteine quellen beim Zutritt von Wasser und die Bohrungen sind nicht mehr beherrschbar.

Die verschiedenen Gesteine besitzen unterschiedliche Festigkeiten. Aus diesem Grunde werden häufig bestimmte Gesteine früher instabil als andere. Dies soll im Folgenden am Thema Bohrlochstabilität erläutert werden.

6.8.1 Bohrlochstabilität

Der limitierende Faktor bei der Herstellung von Tiefbohrungen ist die Bohrlochstabilität. Mit zunehmender Teufe steigen die Spannungen an der Bohrlochwand an und erreichen bzw. überschreiten ab einer gewissen Tiefe die Festigkeit des Gesteins. In diesem Fall kommt es zum Bruch in der Bohrlochwand.

In der Regel führt dies zu einer Veränderung des Bohrlochquerschnitts und in einer Richtung wird das Kaliber der Bohrung vergrößert. Dies muss aber noch nicht dazu führen, dass eine Bohrung nicht mehr beherrschbar ist. (s. Kapitel 8 Geomechanik und Stabilität)

6.8.2 Kristallin

In den Bohrungen von Soultz-sous-Forêts sind die Gebirgsspannungen vergleichsweise gut untersucht. Die Vertikalspannung ist aus der Dichteverteilung der Gesteine bekannt und die minimale Horizontalspannung aus verschiedenen hydraulischen Tests. Die maximale Horizontalspannung schätzen /VAL 07/ auf Grund des gleichzeitigen Auftretens von bohrtechnisch induzierten Rissen und von Breakouts ab. Der Porendruck kann aus Dichteprofilen abgeleitet werden.

In den Bohrungen GPK 1 und EPS 1 wurden Spannungsmessungen nach der Methode des Hydraulic-Fracturing (Hydrofrac-Messungen) ausgeführt. Die wichtigsten Spannungsdaten für Soultz-sous-Forêts sind in Tab. 6-3 zusammengestellt /RUM 91/, /KLE 93/, /HEI 94/. In Soultz-sous-Forêts wurde der Porendruck in einer Tiefe von 4.700 m mit 460 bar (46,0 MPa) bestimmt /TIS 06/. Mit dem entsprechenden Porendruckgradienten von 9,79 MPa/km wurden die Effektivspannungen errechnet.

Tab. 6-3 Zusammenstellung der Spannungsdaten von Soultz-sous-Forêts aus älteren Hydrofrac-messungen. S_{hmin} ist die kleinste Horizontalspannung, S_v ist die Vertikalspannung, p_0 entspricht dem Porendruck. Mit dem Zusatz S_v' und S_{hmin}' sind effektive Spannungen.

Teufe [m]	S_{hmin} [MPa]	S_v [MPa]	p_0 [MPa]	S_{hmin}' [MPa]	S_v' [MPa]	Bohrung
1458	23.8	34.9	14.3	9.5	20.6	GPK 1
1495	20.6	35.8	14.6	6.0	21.2	GPK 1
1989	25.3	47.6	19.5	5.8	28.1	GPK 1
2195	26.6	55.1	21.5	5.1	33.6	EPS 1
2205	27.0	55.4	21.6	5.4	33.8	EPS 1
3315	45.2	84.4	32.4	12.8	52.0	GPK 1
3506	44.2	89.4	34.3	9.9	55.1	GPK 1

/VAL 07/ haben die Injektionsdaten der Bohrungen GPK 2, GPK 3 und GPK 4 ausgewertet um Hinweise auf den Betrag der minimalen Horizontalspannung zu erhalten.

Sie folgen dem Ansatz von /COR 03/, wonach der maximale Druck bei der Injektion der minimalen Horizontalspannung am Casing-Shoe entspricht. Hierbei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der maximale Druck, der während des Versuches erreicht wird, resultiert aus einem Frac der Formation und wird nicht durch Scherung kontrolliert.
- Druckverluste beim Eintritt der Flüssigkeit in die Formation können vernachlässigt werden.
- Die minimale Spannung, die zum Zeitpunkt des maximalen Drucks maßgeblich ist, wird nicht durch poro-elastische Effekte vergrößert.

Diese Bedingungen scheinen während der Injektionen im flacheren Reservoir erfüllt gewesen zu sein, weil die Daten aus den Injektionstests mit den Daten der Hydrofracs gut übereinstimmen.

Tab. 6-4 Zusammenstellung der Spannungsdaten der Bohrungen von Soultz-sous-Forêts (Abkürzungen siehe auch Tab. 6-2).

Teufe [m]	S_h [MPa]	S_v [MPa]	p_o [MPa]	S_h' [MPa]	S_v' [MPa]	Bohrung	Methode
1.458	(23,8	35,9	14,3	9,5	21,6	GPK 1	Hydro-Frac
1.495	20,6	36,9	14,6	6,0	22,3	GPK 1	Hydro-Frac
1.989	25,3	49,8	19,5	5,8	30,3	GPK 1	Hydro-Frac
2.195	26,6	55,1	21,5	5,1	33,6	EPS 1	Hydro-Frac
2.205	27,0	55,4	21,6	5,4	33,8	EPS 1	Hydro-Frac
3.315	45,2	84,4	32,4	12,8	52,0	GPK 1	Hydro-Frac
3.506	44,2	89,4	34,3	9,9	55,1	GPK 1	Hydro-Frac
4.402	55,4	112,8	43,1	12,3	69,7	GPK 2	Injektion
4.402	56,9	112,8	43,1	13,8	69,7	GPK 2	Injektion
4.488	60,8	115,0	43,9	16,9	71,1	GPK 3	Injektion
4.488	61,5	115,0	43,9	17,6	71,1	GPK 3	Injektion
4.488	61,2	115,0	43,9	17,3	71,1	GPK 3	Injektion
4.933	66,0	126,6	48,3	17,7	78,3	GPK 3	Injektion
4.489	62,1	115,0	43,9	18,2	71,7	GPK 4	Injektion
4.489	61,7	115,0	43,9	17,8	71,7	GPK 4	Injektion

Die in Tab. 6-4 zusammengefassten Spannungsdaten zur minimalen Horizontalspannung und zur Vertikalspannung sind in Abb. 6-17 zusammen mit dem Porendruck dargestellt. Die Ausgleichsgerade der minimalen Horizontalspannung der Daten, die von /VAL 07/ und /RÖC 08/ ausgewertet wurden, ergeben einen Gradienten der minimalen horizontalen Hauptspannung im Granit von 13,23 MPa/km. Wenn man davon ausgeht, dass die Daten von /VAL 07/ die Obergrenze der minimalen Horizontalspannung darstellten und sie bei der Auswertung des Gradienten der minimalen Horizontalspannung nicht berücksichtigt, dann errechnet sich der Gradient der minimalen horizontalen Hauptspannung im Granit in einer Tiefe von 5.000 m zu 12,30 MPa/km.

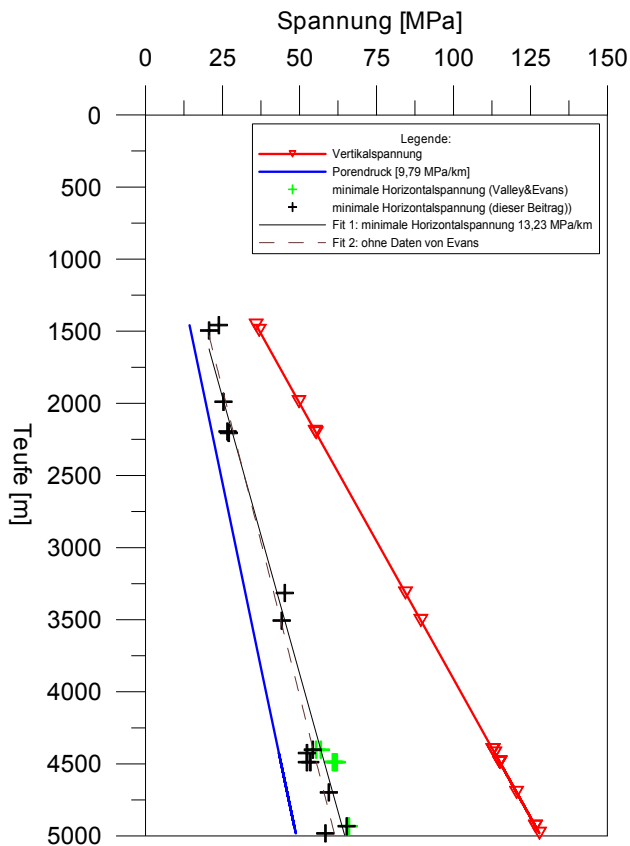


Abb. 6-17 Zusammenstellung der Spannungsdaten für die die Bohrungen im Kristallin in Soultz-sous-Forêts. In Blau ist der der Porendruck dargestellt, in Schwarz und Grün die Daten zur Minimalen Horizontalspannung und in Rot die Daten zur Vertikalspannung.

/VAL 07/ geben als Spannungsgradienten folgende Werte an:

$$S_{\text{Hmin}} = -1,78 + 14,06 z \text{ [km]}$$

$$S_{\text{V}} = -1,30 + 25,50 z \text{ [km]}$$

$$S_{\text{Hmax}} = 0,9 - 1,05 S_{\text{V}}$$

$$p_{\text{o}} = 0,9 + 9,80 z \text{ [km]}$$

Zusätzlich zu den in Tab. 6-3 erläuterten Abkürzungen steht S_{Hmax} für die maximale Horizontalspannung. Der Spülungsdruck der Bohrung wird als p_{sp} bezeichnet.

In Abb. 6-17 sind die Brucherscheinungen für die Bohrungen GPK und GPK 4 in Soultz-sous-Forêts gegen die Teufe dargestellt (In Kapitel 8 ist der Zusammenhang zwischen Spannungsfeld und Brucherscheinungen der Bohrlochwand erläutert). Es ist deutlich eine Zweiteilung der Brucherscheinungen in den beiden Bohrungen zu erkennen. Zwischen 1500 m und 3000 m dominieren vertikale und nichtvertikale bohrtech-

nisch induzierte Zugrisse. Unterhalb von 3.000 m treten bevorzugt Bohrlochrandausbrüche (Breakouts) auf. Bei etwa 4.800 m kommen sowohl Bohrlochrandausbrüche als auch bohrtechnisch induzierte Risse auf. Für die Teufen von 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m sollen die minimalen und maximalen Tangentialspannungen an der Bohrlochwand bestimmt werden. Nach /VAL 07/ liegt der Gradient der maximalen Horizontalspannung bei 0,9 bis 1,05 x S_v . Bei den Injektionen in den Bohrungen sind zahlreiche seismische Ereignisse aufgetreten. Die Herdflächenlösungen dieser Beben zeigen sowohl Blattverschiebungscharakter als auch Abschiebungscharakter. Dies zeigt, dass die Vertikalspannung und die maximale Horizontalspannung in der gleichen Größenordnung liegen. Aus diesem Grunde wird bei der Berechnung der Tangentialspannungen an der Bohrlochwand davon ausgegangen, dass die maximale Horizontalspannung der Vertikalspannung entspricht. Beim Spülungsdruck wird von einem Spülgewicht von 1,06 kg/l ausgegangen.

Tab. 6-5 Zusammenstellung der Spannungsdaten und minimalen und maximalen Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in ausgewählten Teufen.

Teufe [m]	S_{hmin} [MPa]	$S_v = S_{Hmax}$ [MPa]	p_o [MPa]	p_{sp} [MPa]	$S_{\theta\theta min}$ [MPa]	$S_{\theta\theta max}$ [MPa]
1.500	21,09	36,95	15,60	15,60	-4,88	58,56
3.000	40,40	75,20	30,30	31,20	-15,50	123,70
4.800	61,71	121,10	47,94	49,91	-21,82	199,74

Wie sich aus Tab. 6-3 ergibt nehmen mit zunehmender Teufe sowohl die tangentialen Zugspannungen (parallel zu S_H) als auch die tangentialen Druckspannungen (parallel zu S_h) zu. In einer Teufe von etwa 1.500 m erreichen die tangentialen Zugspannungen an der Bohrlochwand etwa 5 MPa. Im Übergangsbereich vom Deckgebirge zum verwitterten Granit könnte die Zugfestigkeit des Granits bei etwa 5 MPa liegen. Bei 3.000 m erreichen die Zugspannungen bereits 15 MPa. Aus diesem Grunde sind die bohrtechnisch induzierten Zugrisse in der Bohrlochwand zwischen 1.500 m und 3.000 m gut erklärbar. Auch bei 4.800 m sind bohrtechnisch induzierte Risse vorhanden. Sie treten aber im unteren Abschnitt der Bohrungen deutlich zurück. Wenn die Spannungsanisotropie geringer ist, dann werden auch die Zugspannungen geringer. Eine Verringerung der maximalen Horizontalspannung um 5% und eine Erhöhung der minimalen Horizontalspannung um 5% würde bereits dazu führen, dass die tangentialen Zugspannungen an der Bohrlochwand auf etwa 5 MPa zurückgehen. Im frischen Granit liegt die Zugfestigkeit in der Regel über 5 MPa.

Die maximale tangentielle Druckspannung berechnet sich für eine Teufe von 1.500 m zu knapp 60 MPa. Dieser Wert liegt unter den Druckfestigkeiten des Granits, der bei etwa 120 bis 150 MPa liegen dürfte. In einer Teufe von etwa 3.000 m setzen die ersten Bohrlochrandausbrüche ein. Insbesondere in Bereichen mit niedriger Druckfestigkeit kann hier die Festigkeit des Granits überschritten werden. In einer Teufe von 4.800 m erreicht die maximale Tangentialspannung rechnerisch bereits etwa 200 MPa und liegt somit über der Druckfestigkeit des frischen Granits. In Abb. 6-19 sind die Tangentialspannungen für die Teufen von 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m in Blau, Orange und Rot dargestellt. Bei einer Druckfestigkeit von 150 MPa wird die Tangentialspannung an der Bohrlochwand auf einer Breite von etwa 60° rechnerisch überschritten.

Generell ist zu erkennen, dass unterhalb von 3.000 m allmählich die Tangentialspannung die einaxiale Druckfestigkeit des Granits erreicht. Bis zu einer Teufe von 5.000 m kommt es bei dem gegebenen Spannungszustand im Granit aber nur zu einem partiellen Versagen. Unter anderen tektonischen Bedingungen kann sich dies anders darstellen. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass im Granit in Deutschland eine Teufe von 5.000 m für Bohrungen keine kritische Grenze darstellt.

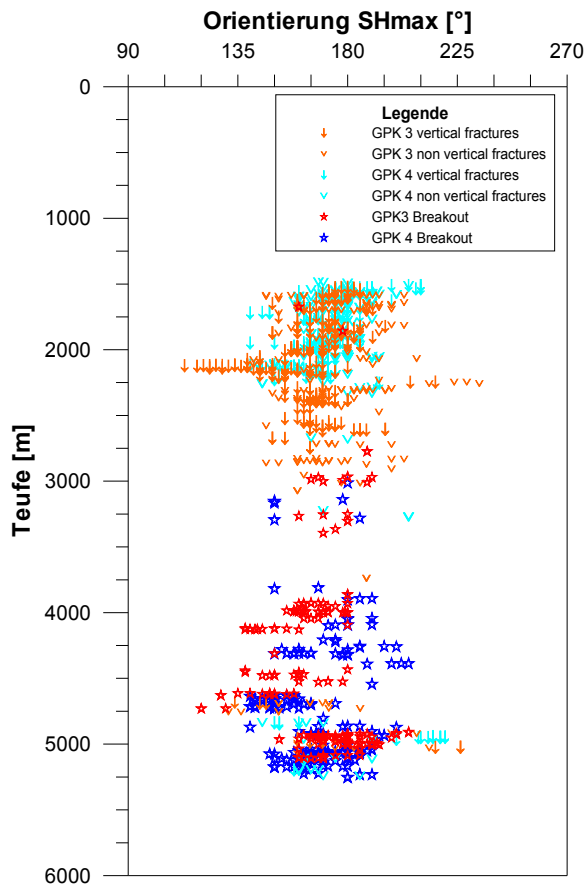


Abb. 6-18 Orientierung der maximalen Horizontalspannung abgeleitet aus Bohrlochinstabilitäten in den Bohrungen Soultz-sous-Forêts GPK 3 und Soultz GPK 4. Im Teufenbereich von 1.500 m bis 3.000 m dominieren bohrtechnisch induzierte Brüche, unterhalb von 3.000 m treten bevorzugt Bohrlochrandausbrüche auf.

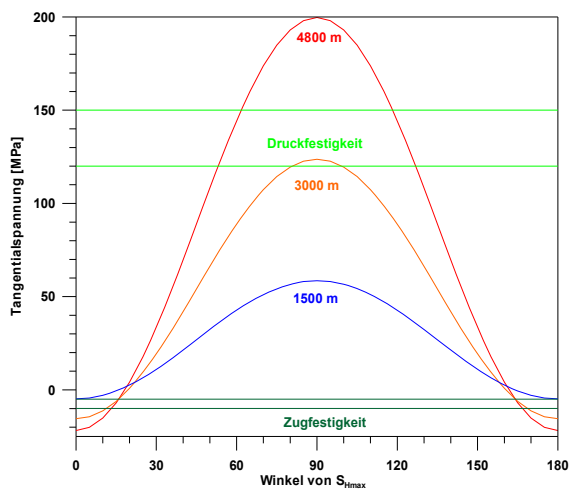


Abb. 6-19 Minimale und maximale Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in den Teufen 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m für die Bohrungen GPK 3 und GP 4 im Vergleich mit den Gebirgsfestigkeiten.

6.8.3 Sedimentgesteine

Die Sedimentgesteine wie Sandsteine und Tonsteine verhalten sich in Tiefbohrungen zum Teil sehr unterschiedlich. Tonsteine sind zum Teil extrem gering durchlässig, während Sandsteine über beträchtliche Porositäten und Durchlässigkeiten verfügen können. Hinzu kommt, dass die Schichtsilikate in den Tonformationen über eine starke Anisotropie verfügen, während die Sandsteine eher isotrope Eigenschaften besitzen. Auf Grund ihres eher plastischen Verhaltens kann in (plastischen) Tonsteinen keine hohe Gebirgsspannungsanisotropie aufgebaut werden. Die Gebirgsfestigkeit ist insbesondere in geringen Tiefen vergleichsweise gering. Sandsteine verfügen über höhere Festigkeiten und können auch erheblichen Gebirgsspannungsanisotropien ausgesetzt sein.

Die Festigkeiten von Sandsteinen sind zwar in der Regel höher als die von Tonen und Tonsteinen, aber geringer als die des Kristallins. Als besonders problematisch sind in der Bohrtechnik die quellenden Tonsteine zu betrachten.

Forschungsbohrung Lindau

In der Forschungsbohrung Lindau (bei Bayreuth) des Bayerischen Geologischen Landesamtes (jetzt LfU) wurden Gesteine des Buntsandsteins, des Zechsteins und des Rotliegenden erbohrt. Hierbei trat insbesondere in den Gesteinen des Rotliegenden eine ganze Reihe von Bohrlohrandausbrüchen auf. In der Bohrung wurde eine Reihe von Spannungsmessungen ausgeführt. Ungewöhnlicherweise wurden sehr hohe Horizontalspannungen gemessen. Ein wichtiges Ergebnis war aber, dass nach Stimulationsversuchen die Weite der Bohrlochrandausbrüche sich vergrößert hat.

In der Bohrung Lindau wurden drei Televierermessungen gefahren. Die ersten beiden Messungen wurden vor den hydraulischen Testarbeiten gefahren und die dritte Vermessung der Bohrung wurde nach den Testarbeiten ausgeführt. Zwischen der zweiten und der dritten Messfahrt kam es zur Erweiterung der Bohrlochrandausbrüche nach den Testarbeiten. Sowohl die Ausbruchstiefe wie auch die Ausbruchweite haben sich verändert. Im Mittel hat sich die Breakout-Weite von durchschnittlich $30,2^\circ$ vor den Stimulationsmaßnahmen auf $36,7^\circ$ nach den Stimulationsmaßnahmen vergrößert (Abb. 6-20, /RÖC 06/).

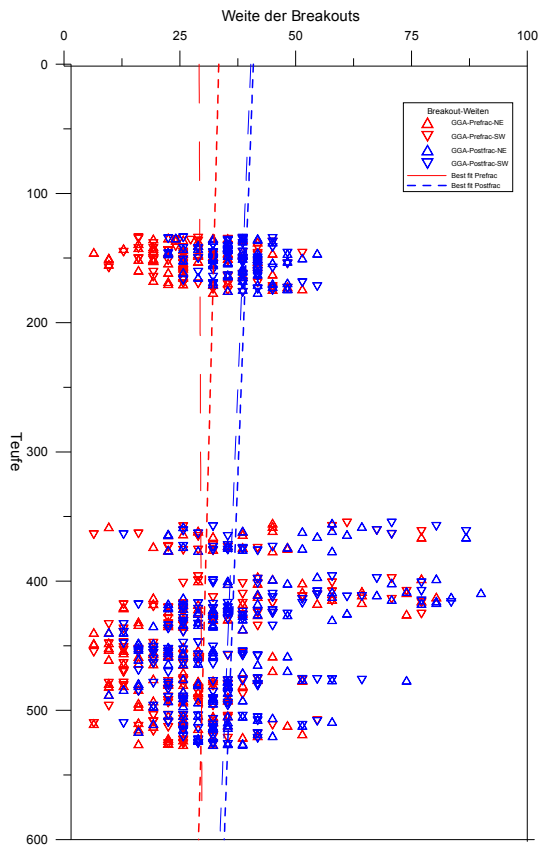


Abb. 6-20 Breakout-Weiten in der Bohrung Lindau vor und nach den Stimulationsmaßnahmen (rot: vor Breakout-Weiten vor den Stimulationsmaßnahmen, blau: nach den Stimulationsmaßnahmen).

Eine signifikante Vergrößerung der Weite der Breakouts zwischen den ersten beiden Messungen vor den Stimulationsmaßnahmen konnte nicht festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass die Vergrößerung der Breakouts in erster Linie nicht durch den zeitlichen Verlauf gesteuert wurde, sondern durch die Stimulationsmaßnahmen. Durch diese kam es zu einer Erhöhung des Porendrucks in den Testintervallen. Hierdurch kommt es zu einer starken Veränderung der Effektivspannungen. In der Boden- und Felsmechanik ist ein Versagen durch Erhöhung des Porendrucks und Veränderung der Effektivspannungen seit langem bekannt.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, dass es durch Porendruckänderungen an der Bohrlochwand in einer Bohrung zu Veränderungen der Festigkeit des Gesteins kommt.

Im Norddeutschen Becken wurden für die Gasförderung zahlreiche Bohrungen bis zu einer Tiefe von 5.000 m abgeteuft. Wenn dabei Probleme bei der Bohrlochstabilität aufgetreten sind, waren diese beherrschbar.

Die Spannungen im Norddeutschen Becken sind auch in relativ großen Teufen bekannt /RÖC 03/, /COR 12/ (Abb. 6-21). In erster Linie sind sie für die Sandsteine etwa vergleichbar mit den Werten, wie sie für Soultz-sous-Forêts dargestellt sind (Abb. 6-19).

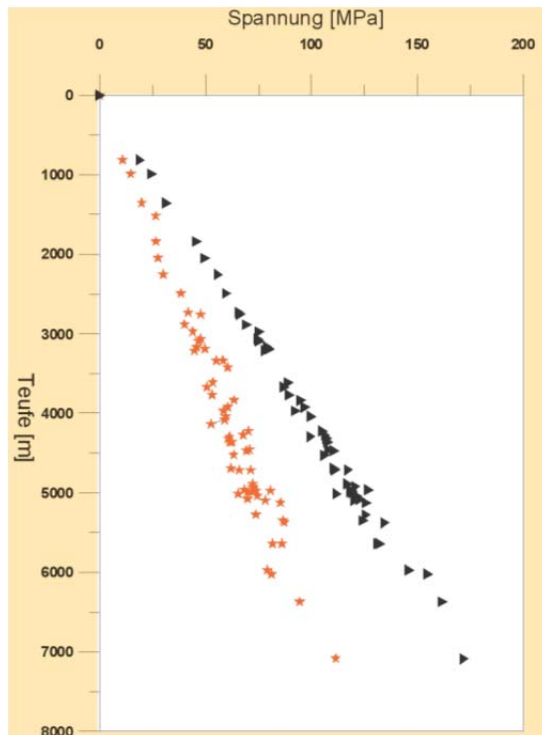


Abb. 6-21 Spannungsbeträge im Subsalinar des Norddeutschen Beckens /RÖC 03/. Die Vertikalspannungen sind als schwarze Dreiecke dargestellt, die minimalen Horizontalspannungen als orange Sterne

Insbesondere in ausgeförderten (druckabgesenkten) Gaslagerstätten, sind die Tangentialspannungen an der Bohrlochwand mit denen in Soultz-sous-Forêts durchaus vergleichbar. Dies bedeutet, dass auch im Norddeutschen Becken in einer Teufe von etwa 5.000 m mit maximalen Tangentialspannungen von über 200 MPa gerechnet werden muss.

/BÜC 03/ geben für die Sandsteine des Gasfeldes Söhlingen im Norddeutschen Becken die einaxiale Druckfestigkeit der Sandsteine mit 39 MPa an. Den Reibungswinkel aus triaxialen Versuchen geben sie mit 43° an. Somit sind die einaxialen Druckfestigkeiten dramatisch niedriger als die Tangentialspannungen an der Bohrlochwand.

Bei /KOM 14/ finden sich für Rotliegendgesteine aus der Niederländischen Nordsee zahlreiche einaxiale Druckfestigkeitsdaten für den Teufenbereich zwischen 3.000 m und 5.000 m.

Im Histogramm in Abb. 6-22 sind die einaxialen Festigkeiten gegen die Anzahl der Proben dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass so gut wie keine einaxialen Druckfestigkeiten von über 100 MPa vorhanden sind. Da die Tangentialspannungen in den großen Teufen deutlich höher sind als die einaxialen Druckfestigkeiten und die Bohrungen dennoch (zum Teil ohne große Ausbruchsintervalle) niedergebracht werden können, ist zu vermuten, dass zum Teil erheblich höhere Festigkeiten an der Bohrlochwand vorhanden sind. Dies könnte dann der Fall sein, wenn an der Bohrlochwand triaxiale Spannungsbedingungen herrschen. In diesem Fall müsste der Druck der Spülung als Stützdruck wirken. Bei einer Spüldichte von $1,2 \text{ g/cm}^3$ berechnet sich der Spülungsdruck in einer 5000 m tiefen Bohrung zu annähernd 60 MPa.

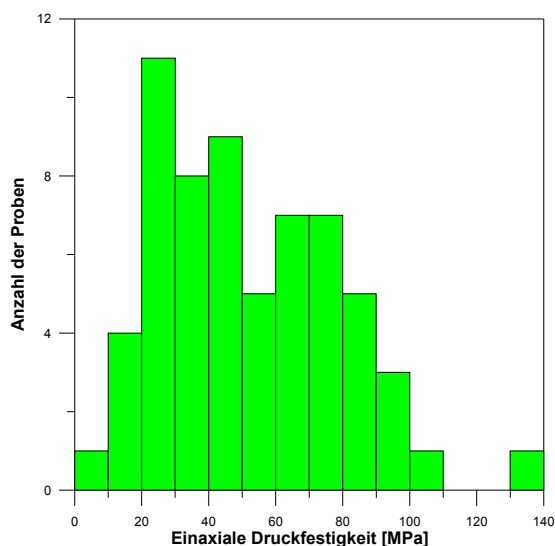


Abb. 6-22 Histogramm der einaxialen Festigkeiten gegen die Anzahl der Proben in einem Gasfeld in den Niederlanden. Es ist deutlich zu erkennen, dass so gut wie keine einaxialen Druckfestigkeiten von über 100 MPa vorhanden sind.

Für das Rotliegende des Norddeutschen Beckens sind kaum Festigkeitswerte vorhanden. Insbesondere fehlen auch Werte aus Triaxialversuchen. Für das Rotliegende des Norddeutschen Beckens kann man sich für eine erste Einschätzung an Daten aus den Niederlanden orientieren.

Insgesamt belegen die mehrere 100.000 von Bohrungen weltweit, dass Sedimentgestein bei heutigem Stand sehr gut und sicher vertikal und horizontal erbohrt werden kann. Offene Abschnitte in Bohrungen können nach wenigen Stunden oder Tagen instabil werden, andere können noch nach Wochen oder Monaten stabil sein.

6.8.4 Salzgesteine

Im Rahmen von Endlagerprojekten wurde Salz detailliert untersucht. Bei Teufen um 700 m reicht die Festigkeit von Salzfeilern um ein stabiles Bauwerk zu errichten, wenn die Pfeiler richtig dimensioniert sind. Aufgrund seines rheologischen Verhaltens kann Salz Scherspannungen durch Kriechprozesse abbauen. Dies führt dazu, dass z. B. Kavernen im Salz eine Druckbeaufschlagung erfahren müssen. Ist der Mindestdruck in der Betriebsphase zu gering wird die Konvergenz der Kaverne zu groß. Nach /MIN 15/ führen sowohl fluide als auch feste Kavernenbefüllungen in druckdicht verschlossenen Kavernen zu Überdrücken und Mikrorissbildung im Kavernendach.

In Tiefbohrungen werden Strecken im Salz jedoch allgemein sicher beherrscht; dies zeigen Horizontalbohrungen von mehreren Kilometern Länge. Bei Gasbohrungen werden Salzstöcke bis zu einer Teufe von annähernd 5.000 m regelmäßig durchteuft.

Das grundlegende Problem bei Bergwerken im Salz sind Wasserzutritte, die schwer beherrschbar sind. Beim Bohren von Tiefbohrungen kann auf eine Spülung nicht verzichtet werden, diese wird benötigt, um die oben beschriebene Konvergenz in der Betriebsphase zu verhindern.

Durch den Einbau von hochfesten, dickwandigen Rohren gelingt es, den sonst notwendigen Stützdruck bei Gasbohrungen herabzusetzen. Erfahrungswerte zeigen, dass mit schweren Spülungen von etwa $1,9 \text{ g/cm}^3$ Bohrungen in Salzstrecken stabil gehalten werden können. Gegebenenfalls kann die Spülung bis zum lithostatischen Gewicht erhöht werden. In diesem Fall hat die Spülung das gleiche Gewicht wie das Salz. Prinzipiell ist es denkbar größere Durchmesser im Salz so zu bohren.

Um die Bohrung zu verschließen können die Rohre im Salz perforiert oder aufgefräst werden (siehe Kapitel 6.11). Hier nutzt man den Sachverhalt, dass sich Salz bei hohen Temperaturen über 100°C sehr viel plastischer als bei niedrigen Temperaturen verhält und rasch die unverrohrten oder perforierten Teile einer Bohrung verschließt. In Abb. 6-23 ist dargestellt, wie ein Bohrlochverschluss in der Salzstrecke erfolgen kann-

te. Im linken Bildteil (a) ist das Bohrloch während der Einlagerung zu sehen. Zu Beginn des Verschlusses wird der untere Teil des Bohrlochs mit Zement oder speziellen Verschlussmaterialien verschlossen und oberhalb des Speicherhorizontes wird ein mechanischer Stopfen gesetzt (b). Im dritten Schritt wird die Verrohrung im Salzbereich aufgefräst (c). Im nächsten Schritt (d) wird das Bohrloch oberhalb des Salzes wieder mit einem mechanischen Stopfen verschlossen und zementiert. Zu diesem Zeitpunkt beginnt das Salz zu konvergieren und die Bohrung zu verschließen. Im rechten Bildteil (e) ist das vollständig durch Salzfließen verschlossene Bohrloch im Steinsalz zu sehen (siehe Kapitel 6.11).

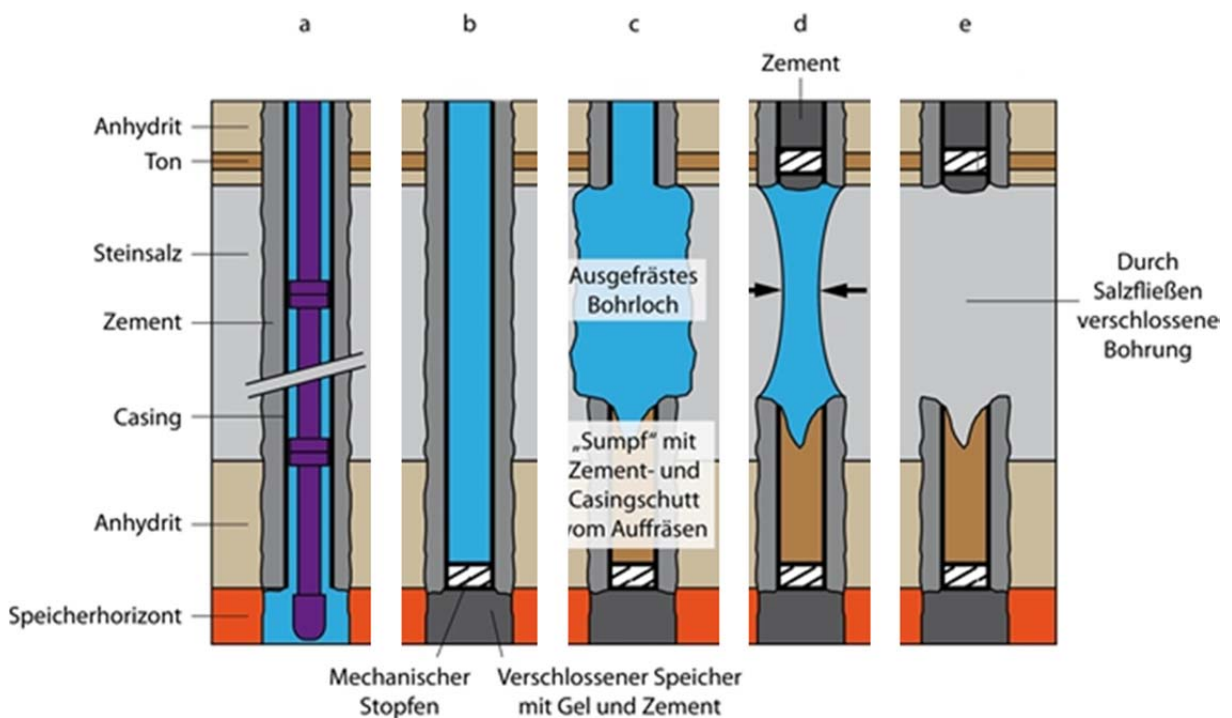


Abb. 6-23 Vorgehen zum Verschluss. Zeitlicher Verlauf der Veränderung eines Bohrlochs im Salzgestein. Die Entwicklung der Schritte a-e ist im Text erläutert.

6.9 Bau der Bohrung und Bohren von großen Kalibern

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, sind es bei Tiefbohrungen i. d. R. die geologischen Verhältnisse, die die limitierenden Faktoren für das sichere Erreichen einer vorgegebenen Bohrlochentiefe darstellen. In dem hier betrachtenden DHD-Fall treten jedoch die geforderten groß dimensionierten Bohrlochdurchmesser, zusammen mit dem geforderten trockenen Bohrungsausbau, eindeutig in den Vordergrund.

Bohrspülungen dienen im Bohrbetrieb der Kühlung der Bohrwerkzeuge, der Reinigung des Sohlen-Anschnitts, zur Stabilisation der Bohrlochwand und dem Austrag von Bohrabraum (Bohrklein; engl.: Cuttings) /ALL 65/. Ein kontinuierlicher Abtransport des Abraumes ist, wie im Bergbau, neben dem optimalen Einsatz des Schneidwerkzeuges der Hauptfaktor für den Fortschritt. Für einen sicheren kontinuierlichen Bohrkleinaustrag sind über die gesamte Bohrlochstrecke Strömungsverhältnisse mit Auftriebsgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s anzustreben. Heute in der Tiefbohrindustrie gängige Bohrdurchmesser bis 400 mm und 3 – 5 km Teufe benötigen dafür eine obertägige Hydraulikleistung von ca. 2 MW mit Spülflüssigkeitspumpraten von bis zu 5.000 l/min und Zirkulationsdrücken von bis zu 350 bar. Je tiefer die Bohrlöcher und größer die Querschnitte des Bohrlochrücklaufes werden, desto mehr Pumpleistung wird, nach einer exponentiellen Funktion, erforderlich sein, um den Bohrfortschritt aufrechterhalten zu können (Abb. 6-24).

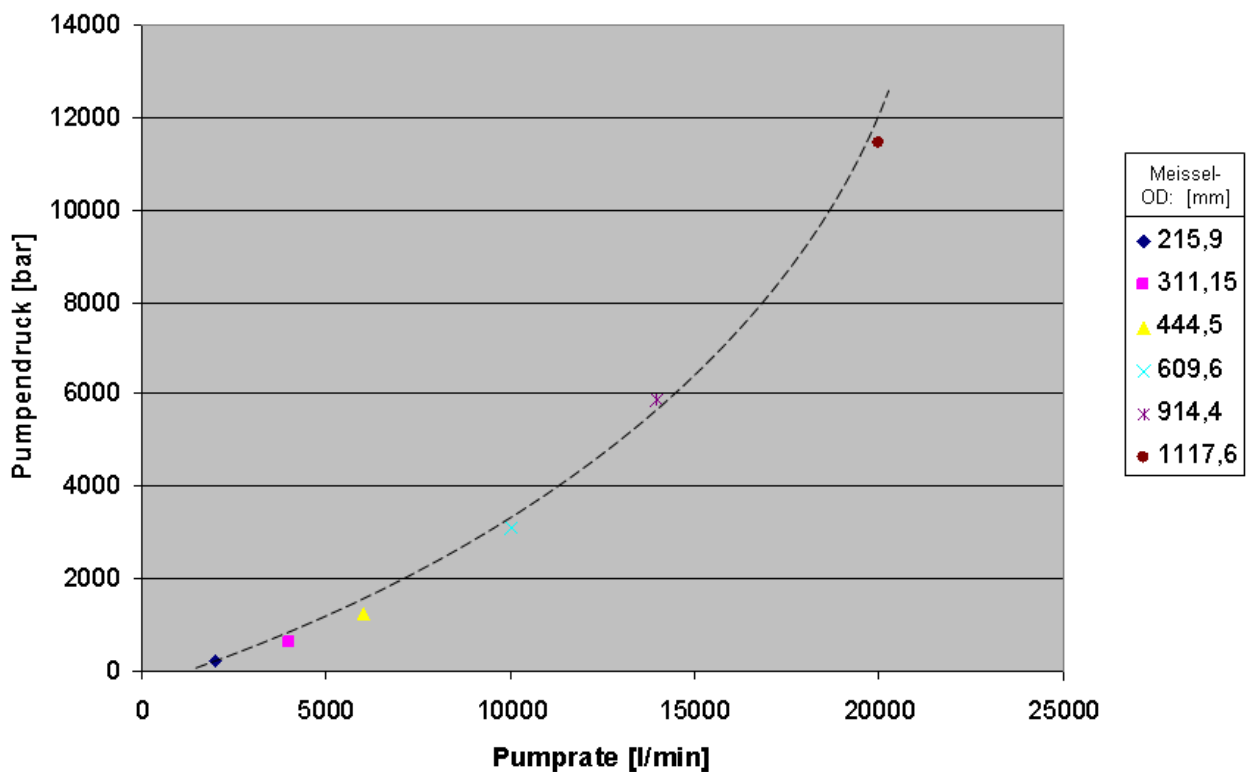


Abb. 6-24 Verhältnisse von Pumprate und Pumpendruck bei Erreichen eines turbulenten Fließregimes in unterschiedlichen großen Bohrlöchern (inkl. Trendlinie) /MOH 90/

/ARN 11/ schlussfolgern deshalb u.a. in ihrer bohrtechnischen Übersicht, dass mit der heute verfügbaren Technologie Bohrungen lediglich bis zu einem Bohrdurchmesser von 17" (432 mm) bis zu einer Teufe von 5.000 m sicher abgeteuft werden können.

a) klassisches Rotarybohren im Direktspülverfahren

Dieses Bohrverfahren bedient sich i.d.R. Bohrsträngen mit einem Innendurchgang von 2 - 3 Zoll (50-75 mm) und einem Außendurchmesser von 5,0 - 6,5 Zoll (125-175 mm) für Bohrstangen und 7 - 11 Zoll (178-280 mm) für Schwerstangen. Derartige Leitungsverhältnisse sind jedoch für großkalibrige Bohrlöcher äußerst nachteilig und würden dafür Zirkulationsdrücke von mehreren tausend bar und Zirkulationsraten von über 15.000 l/min erfordern um einen sicheren Cuttingaustrag aufrechterhalten zu können. Diese Bedingungen können aber von heute verfügbaren Bohrwerkzeugen und Bohranlagen nicht realisiert werden. Auch würde jede geologische Formation unter derartigen hydraulischen Betriebsbedingungen brechen, Spülungsverluste auftreten und ein Bohrfortgang damit zum Stillstand kommen.

Eine Alternative zur Reduktion der hydraulischen Anforderungen bei Großlochbohrungen wäre der Einsatz von großkalibrigem Bohrgestänge um damit die Ringraumquerschnittsflächen zu verkleinern. Die heute größten bekannten Bohrstränge haben einen Außendurchmesser von 11 Zoll (280 mm) und werden im Bergbau beim Raiseboring-Verfahren für die Herstellung von Förder- oder Wetterschächten eingesetzt. Futterrohre für Casingbohren haben einen Außendurchmesser von bis zu 13,58 Zoll (346 mm).

Eine DBD-Großlochbohrung würden jedoch Bohrstränge mit einem Außendurchmesser von 880 - 900 mm erfordern, - also dreimal so groß wie Raiseboring-Gestänge. Derartige Bohrstangen sind aber heute am Markt nicht erhältlich, wären durch heute verfügbare Bohranlagen nur schwer manipulierbar und würden für eine 3.000 m – 5.000 m tiefe Bohrung auch die Logistik in der Lagerung, Handhabung und Wartung eines solchen Stranges auf einer Bohrstelle überfordern. Forschung und Entwicklung in diese Richtung könnte aber einen möglichen Weg aufzeigen.

b) Luftbohren mit/ohne Bohrhammer im Direktspülverfahren

Das Rotarybohren mit Luft ist wegen seines enormen obertägigen Pumpleistungseinsatzes von bis zu 100 MW keine wirklich effiziente Alternative für das Bohren von großkalibrigen Löchern. (Abb. 6-25) Gase ermöglichen zwar theoretisch sehr hohe Austragsgeschwindigkeiten und somit große Bohrfortschritte, sind aber, wie im vorigen Kapitel bereits erläutert, nur in absolut trockenem (in der Natur aber nicht über längere Strecken vorkommenden) Gestein (engl.: Dry Rock) einsetzbar.

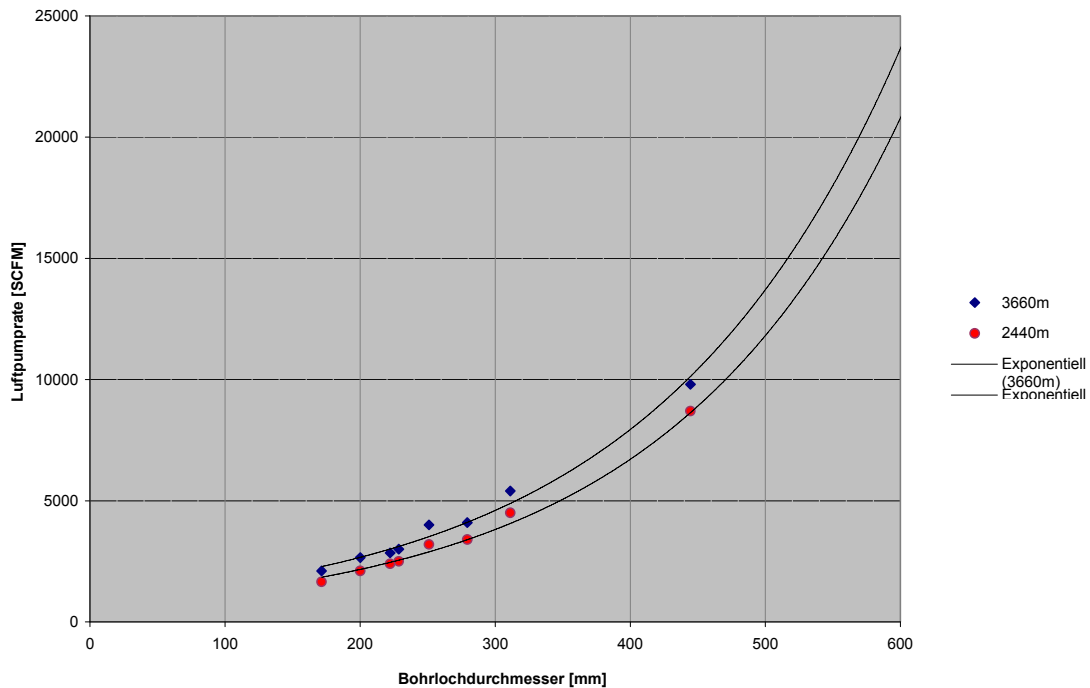


Abb. 6-25 Gaszirkulationsanforderung beim Luftbohren in 3.660 m und 2.440 m bei unterschiedlichen Bohrdurchmessern (Exponentielle Trendlinie extrapoliert die Anforderungen für ein großkalibriges Bohrloch). Eine Luft-Massenflußrate von 1.000 kg/Std bei 1 atm absolutem Druck und 15,56°C entspricht 481 Standard Cubic Feet per Minute (SCFM) /COO 77/

Tritt Formationsflüssigkeit in das Bohrloch ein, die dann zusätzlich nach Übertage mit den Cuttings ausgetragen werden muss, dann wird die Gasflußhydraulik sehr schnell ineffizient, die Pumpleistung steigt drastisch an und es muss auf Schaumspülung oder gänzlich auf Wasser basierte Spülungen umgestellt werden, womit man dann zum klassischen Rotarybohren mit Bohrspülung und den bereits unter a) genannten Einschränkungen zurückkehrt. Ein weiterer Nachteil beim Luftbohrverfahren ist die Absenz des hydrostatischen Gegendruckes auf die Bohrlochwand bei Pumpenstillstand während der Gestängenachsetz-, Logging- oder Verrohrungsarbeiten, was das Offenhalten im Besonderen eines großkalibrigen Bohrloches mit zunehmender Teufe unmöglich macht. Luftbohren ist auch wegen seiner hohen Umweltbelastung durch Staub- und Lärmemissionen von über 100 dB(A) heute nicht mehr überall akzeptabel. Für Bohren in wasserführendem Gestein ist dieses Verfahren nicht einsetzbar /COO 77/.

c) Airliftbohren im Indirektspülverfahren

Das Verfahren gilt wegen seiner geringen Fließgeschwindigkeiten als für weiche Formationen und geringe Teufen sehr effizient und auch formationsschonend. Seine Spülstrahlgeschwindigkeit am Meißel ist jedoch gegenüber dem klassischen Rotaryverfahren um das ca. 20-fache reduziert, weshalb die damit verbundene Reinigungskraft sowohl am Meißel als auch auf Sohle ebenfalls deutlich reduziert ist und in sehr geringen Bohrfortschritten resultiert /PRE 08/. Wegen der Löslichkeit von Gasen in Spülungsflüssigkeiten ist dieses Verfahren auch klar teufenbegrenzt. Heute bekannte erfolgreiche Bohreinsätze mit dieser Methode finden vornehmlich im Bauwesen bis zu einigen hundert Metern Tiefe statt und gingen in Einzelfällen in der Geothermie nicht über 2 km Bohrlochteufe hinaus. Darüber hinaus wird der Prozess des Gasliftens der Wassersäule mit der Teufe zunehmend instabil und kann leicht unkontrolliert in sich zusammen fallen /ABS 13/. Sollte das Verfahren durch flankierende Forschung weiterentwickelt werden können, so könnte es vielleicht einmal diese Dimension von Bohrlöchern bohren, aber nur zu sicherlich sehr hohen Kosten.

d) Kernbohrungen

Im Besonderen im Hartgestein im Bergbau wird oftmals, um die Schneidoberfläche zu verkleinern und den Energieeintrag pro Meißel Querschnitt-Flächeneinheit zu optimieren, das Seilkernbohren dem Vollbohren vorgezogen. Der Vorteil liegt in der überschaubaren Größe der Bohranlagen bei durchaus respektablen Teufenkapazitäten und somit in relativ geringen Bohrmeterkosten. Ein klarer Nachteil sind die reduzierten Bohrfortschritte und kleinen Kernbohrdurchmesser von 122,6 – 75,7 mm, sowie deren Beschränkung i. d. R. auf standfestes Hartgestein. Kernbohrung können heute auch noch nicht als kontrollierte vertikale oder abgelenkte Richtbohrung gebohrt werden, was ihre Einsatzmöglichkeit deshalb weiter einschränkt und auf zukünftigen Entwicklungsbedarf hinweisen könnte.

Für die Anwendung des Seilkernbohrens im DBD-Großlochbereich müsste jedoch ein komplett neues Kernbohrverfahren mit allen untertägigen Geräten und Bohrsträngen noch entwickelt und gebaut werden, was einem Rotarybohren mit großkalibrigen Bohrsträngen dann ähnlich käme /MIC 01/. Im Seilkernbohrverfahren werden üblicherweise Kernlängen von 3 m bis 6 m in einem Stück gebohrt. Es besteht aber in der Industrie bis heute keine Erfahrung mit dem Bergen von bis zu 1 m Durchmesser Bohrkernen mit dieser Länge, welche ein Gesamtgewicht pro Kern + Kernrohr von 5 Mg am Seil

aufweisen könnten. Des Weiteren muss am Ende jedes einzelnen Kernmarsches von 3 oder 6 m der Kern auf Sohle abgerissen werden um ihn am Seil mit dem inneren Kernrohr nach Obertage bringen zu können. Dies erfolgt mit dem Einsatz einer so genannten Kernfeder im Inneren des Kernrohres, die nur eine Abwärtsbewegung am Kern erlaubt und beim Hochziehen der Kernbohrgarnitur sich am gebohrten Kern verkeilt und diesen mit Zugkraft von der Bohrlochsole abtrennt. Dieser Vorgang ist bekanntermaßen in Hartgestein oft schwierig zu realisieren und kann mit steigendem Kerndurchmesser oft sehr hohe Zugkräfte erfordern. In der KTB-VB erforderte der Abriss von 94 mm Kernen auch schon 10 Mg Abrisskraft /ENG 96/. Entsprechend könnten 800 – 900 mm Kerne aus Großlochbohrungen im Granit Abrisskräfte erfordern, die mit dem Kernbohrstrang nicht so ohne weiteres aufzubringen sind und neue Verfahren dazu erst entwickelt werden müssten.

e) Trockenbohren oder Schachten

Eine weitere Großlochbohrmethode wurde im Bergbau mit dem trockenen Vertiefen von Blindschächten entwickelt. Dieses Verfahren beruht auf modifizierten Tunnelbohrgeräten oder Trockenbohrköpfen, betrieben am Gestänge von klassischen obertägigen Bohrgeräten /HER 15/, /DEU 80/. Experimentelle Einsätze dieser Methoden erstreckten sich bis auf 7-12 m Schachtdurchmesser und 2 km Teufe. Unabhängig von der Methode sind diese Schachtverfahren im gleichen Maße an die Problematik des Wasserzutritts und der Schachtwandabsicherung, vgl. beim Luftbohren gekoppelt, da ein Roboter- oder sogar Personaleinsatz zur Sicherung von Schachtwänden mit Stahlbetonelementen in den geforderten Blindschachtteufen bis zu 3.000 m – 5.000 m aus Sicherheitsgründen als nicht praktikabel angesehen werden kann.

f) Bohrtechnologien - Schlussbemerkung

Im Gegensatz zu Bohrmeißeln unterscheiden sich Bohrtechnologien nicht hinsichtlich verschiedener Geologien. Sie unterscheiden sich nur in ihren unterschiedlichen Anwendungen. Bohrmeißel unterscheiden sich aber sehr wohl in Bezug auf Geologie und sie werden auch für unterschiedliche Geologien individuell gefertigt und getunt.

Der Erfolg des klassischen Rotarybohrens liegt deshalb auch in der Tatsache begründet, dass es gemeinsam mit den geeigneten Bohrwerkzeugen die universelle Bohrmethode für alle Geologien darstellt und auch mit bis zu 500 kW hydraulischer plus me-

chanischer Leistung am Meißel den höchsten Energieeintrag von allen Bohrverfahren auf Bohrlochsohle aufweist /MOH 90/.

Alle anderen alternativen Bohrverfahren stellen Sonderverfahren für Spezialanwendungen dar und sind aufgrund ihres Nischendesigns durchwegs in ihrem Energieeintrag auf Sohle zurückgesetzt. Sie werden sehr wahrscheinlich auch aus diesem Grund für die DBD-Anwendung technisch so wie wirtschaftlich gegenüber dem Rotarybohrverfahren nicht wettbewerbsfähig sein.

6.10 Ausbau von Bohrungen

Das sichere Bohren von übertiefen Großlochbohrungen >1 m bis 3.000 m – 5.000 m ist die eine Herausforderung. Der Ausbau für einen langfristigen sicheren Betrieb ist eine nicht weniger wichtige andere Herausforderung.

Unter dem Ausbau von Bohrlöchern wird, vergleichbar mit dem Abstützen von unterirdischen Bauwerken im Berg- und Tunnelbau, das Einbringen und die Zementation von Futterrohren verstanden, die das Bohrloch zumindest für seine Betriebsdauer gegen u. a. Kollaps durch Gebirgsdruck und Korrosion durch Formationszuflüsse von außen schützen sollen. Für die Art und Nachweis des sicheren Ausbaus von Bohrlöchern gibt es in Deutschland die Richtlinie des Wirtschaftsverbandes Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (W.E.G.), sowie einschlägige bergbehördliche Verordnungen und auch DIN-Normen /WIR 06/, /AME 00/, /AME 09/, /DIN 14/, /DIN 14/.

a) Kollapsfestigkeit

Dies ist der Widerstand eines Rohres gegen seinen Zusammensturz durch Drücke von außen. Sie wird durch das Durchmesser-zu-Wandstärkenverhältnis (D/t) definiert, ist für großkalibrige Rohrdimensionen nahezu unabhängig von der Materialgüte und nimmt mit ansteigendem D/t Verhältnis exponentiell ab (Abb. 6-26) /DIN 14/. Zusätzliche Zugbeanspruchung (σ_a) durch die Strangeigenlast; Biegebeanspruchung und Bohrlochtemperaturänderungen reduzieren zusätzlich die Kollapsfestigkeit nach der kombinierten Spannungstheorie nach van Mises /GAB 14/:

$$P_{CA} / P_{CO} = \left((1 - 0,75 * (\sigma_a / \sigma_{max})^2)^{1/2} - 0,5 * (\sigma_a / \sigma_{max}) \right) \dots [\%]$$

Die Sicherheit gegen diesen in der Regel irreparablen Belastungsfall ist nach W.E.G. mit 100% anzunehmen. Der außen angenommene Zementmantel darf aufgrund möglicher Exzentrizität des Casing aus der Bohrlochachse oder dem Fehlen von gehärtetem Zementmaterial im Ringraum bei der Rohrdimensionierung nicht mit berücksichtigt werden /WIR 06/.

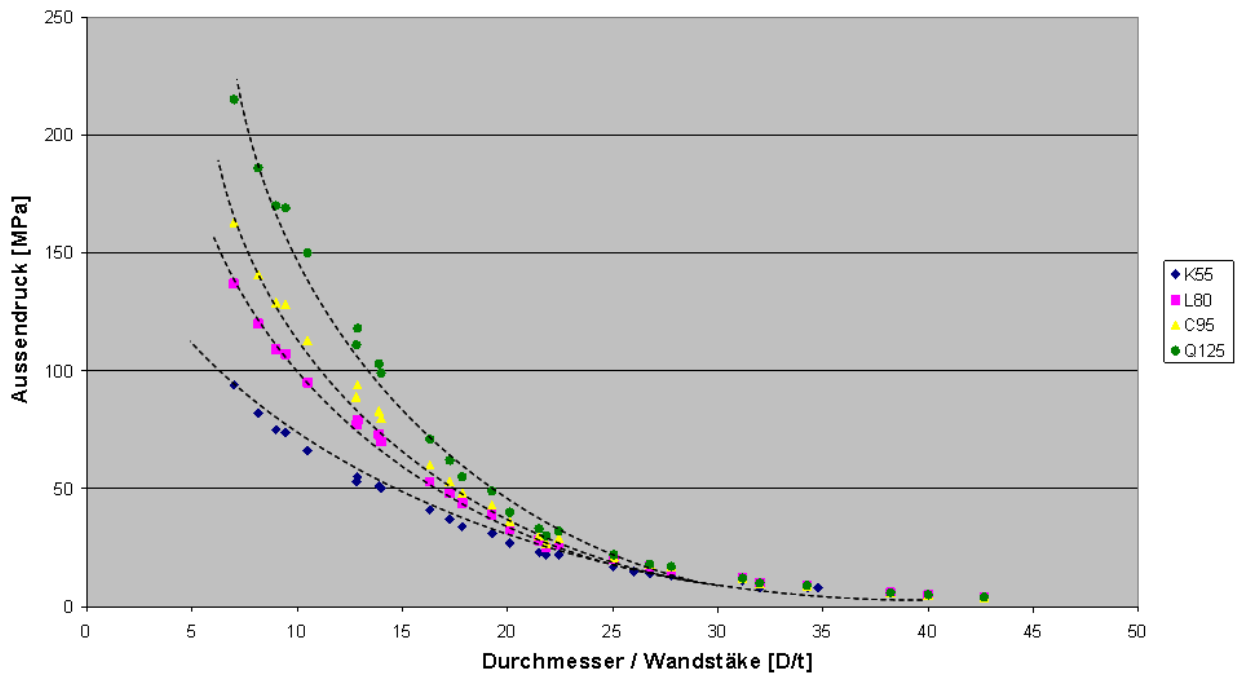


Abb. 6-26 Rohr kollapsfestigkeiten in 5.000 m Teufe nach unterschiedlichen Wandstärken (D/t-Verhältnis) und für unterschiedliche Stahlgüte K-55 bis Q-125 /DIN 14/

Für den DBD-Anwendungsfall mit einem Meißeldurchmesser von >1.000 mm in 3.000 – 5.000 m Teufe stellt die Kollapsfestigkeit die bei weitem kritischste Dimensionierung für diesen Bohrlochausbau dar. So würde eine mit Sole gefüllte Endverrohrung in einer hoch vergüteten austenitischen Stahlqualität (z.B. API Q-125) im Durchmesser von ca. 36 Zoll (914 mm) mit einer Aussendruckfestigkeit von ca. 700 bar nach W.E.G. mit S=1 ein Wandstärkenverhältnis von mind. 15 aufweisen müssen. Das hieße, dass solche verrohrten Bohrlöcher, unter Berücksichtigung eines kombinierten Lastzustandes, eine Wandstärke von ca. 100 mm hätten, was einem verbleibenden Innendurchgang von 714 mm entspräche. Würde dieser als trockener Casingstrang innen mit Atmosphärendruck dimensioniert werden müssen, dann würde dies die doppelte Wandstärke (ca. 200 mm) erfordern. Noch größere Bohrdurchmesser würde die Di-

mensionierung von solchen Casingsträngen aus Metallwerkstoffen sogar noch bis hin zum Limit ihrer theoretischen technischen Machbarkeit verschärfen. So wie auch Erfahrungen mit solch einem trockenen Bohrlochausbau aber bis heute in der Industrie und Wissenschaft noch nicht vorliegen.

/ARN 11/ (S.28) schließt deshalb trockene Bohrlöcher aus und schlägt statt dessen einen Betrieb unter Sole-Befüllung und mit druckfest konstruiertem radioaktiven Abfallkanister für den hydrostatischen Betrieb in 5.000 m Teufe unter 57 MPa (8250 psi) mit einer Sicherheit von 100% für derartige Tiefbohrentsorgungen vor.

b) Zugfestigkeit

Grosse Wandstärken erhöhen das Metergewicht von Futterrohrsträngen und damit das Gesamtgewicht, welches die Bohranlage zu bewegen hat. An einem Punkt wird das Eigengewicht solcher extremer Casingstränge die Streckgrenze ihres Werkstoffes erreichen und der Strang unter seiner Eigenlast abreißen /WIR 06/. Das erfordert deshalb bei überschweren Strängen eine entsprechende hochgradige Materialauswahl mit entsprechenden Sicherheiten besonders für großkalibrige Rohrdimensionen. (Abb. 6-27)

Ein DBD-Ausbau mit einem „leeren“ 36 Zoll (914 mm) OD Casing würde ein D/t - Verhältnis von 7 erfordern, was Metergewichten von 1.300 kg/m (1924 lbf/ft) und mehr entsprechen würde und damit die Hakenlasten einer Bohranlage beim Rohreinbau in 5 km Teufe an die zehntausend Tonnen heran kommen lässt. Damit würde die Streckgrenze von P110 Material schon überschritten werden und es müsste in einem solchen Fall auf die hochfesten Q-125 Materialien zurückgegriffen werden. Natürlich gibt es bis heute keine Bohranlagen, die derartige Stranggewichte handhaben können und auch keine Erfahrung in der Industrie im Betrieb derartig schwerer Rohrtouren, besonders unter trockenen Atmosphärenbedingungen. Neue Kran- und Mastdesigns, möglicherweise auf Basis von fest installierten Bauwerken, vergleichbar den Schachtanlagen im Bergbau, müssten erst entwickelt werden um diese Arbeitsschritte sicher bewerkstelligen zu können.

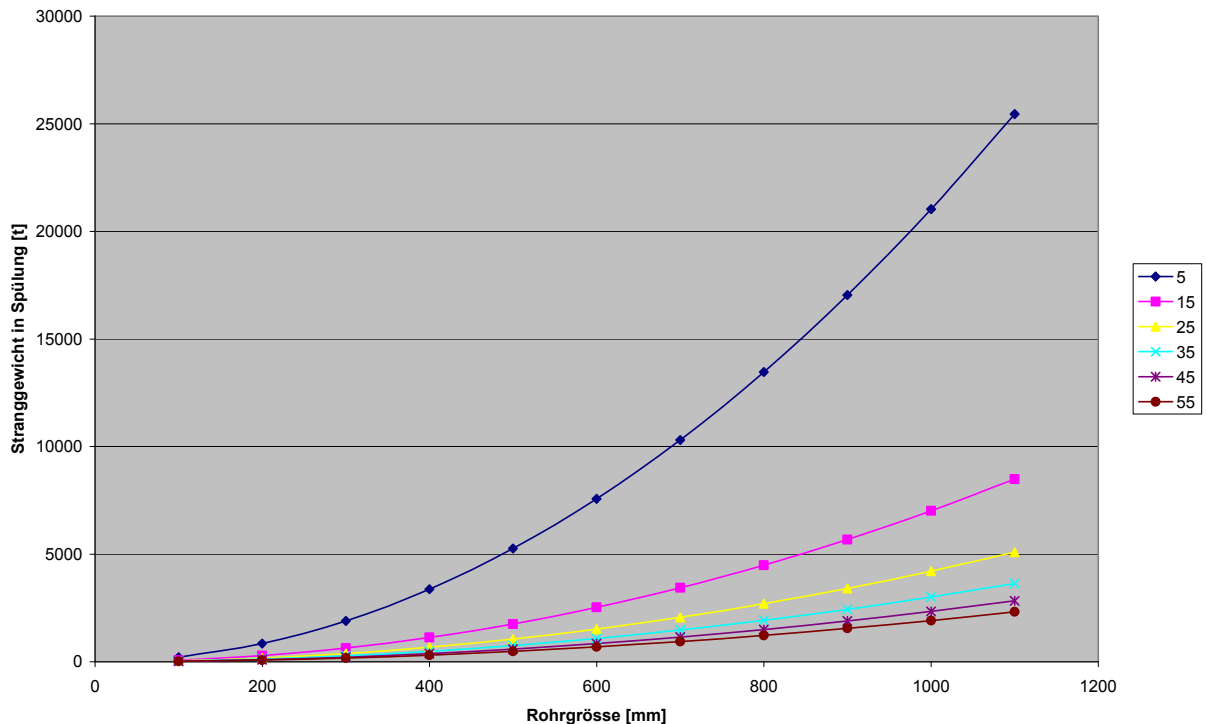


Abb. 6-27 erwartete Stranggewichte bei unterschiedlichen Rohrgrößen mit unterschiedlichen Wandstärken (D/t 5 bis 55) in ca. 5.000 m Rohrabsetzteufe /GAB 14/

c) Innendruck- (Burst), Biegewechsel- und Torsionsfestigkeit

Diese Belastungsfälle sind für den DBD-Anwendungsfall von untergeordneter Bedeutung und werden deshalb im Rahmen dieses Gutachten nicht weiter beleuchtet.

d) Rohrzementationen

Die Zementationen von großkalibrigen Futterrohren sind von den hydraulischen Bedingungen sogar einfacher und unkritischer anzusehen als die in der Öl- & Gasindustrie üblichen kleinen Verrohrungen. Jedoch sind dickwandige Casingstränge sehr schwer im Bohrloch zu zentrieren sowie auch nur schwer während der Zementation zu bewegen. Das Ergebnis wäre, dass die Bildung einer konsistent dicken Zementschale hinter den Rohren als unwahrscheinlich angesehen werden muss, womit der Wertzuwachs des Zementmantels zum Bohrlochausbau durch die Rohrzementation deutlich reduziert wird.

e) Bohrlochkomplettierung

Komplettierungsinstallationen in einem Bohrloch reduzieren den verfügbaren Innendurchgang und sollten deshalb für DBD-Bohrungen vermieden werden. Dies muss auch für kabelgebundene Systeme an der Bohrlochinnenwand gelten, denn diese Bohrlöcher werden ein exakt kaliberhaltiges gleichförmiges Bohrloch von Übertage bis zur Endlagerkammer benötigen. Sensoren und Kabel sollten deshalb an der zementierten Außenseite der Futterrohre eingeplant werden.

6.11 Bohrlochverschlüsse und Abschlüsse sowie Bohrlochverfüllungen

Die obertägigen Bohrlochabschlüsse oder Bohrlochköpfe sind wegen der wahrscheinlichen Absenz von Bohrlochzuflüssen von der Druckauslegung im DBD-Ausbau als unkritisch anzusehen und könnten in derselben Druckstufe wie für wissenschaftliche Explorationsbohrungen nach DIN ausgelegt werden. Jedoch wird der Betrieb von radioaktivem Behältern ein aufwendiges Schleusensystem im Unterbau der Bohranlage erfordern, welches auf die Bohrlochverflansung noch aufgebaut werden muss /NWTRB 13/.

Die heute bekannte Technologie für untertägige permanente oder temporäre Bohrlochverschlüsse stammen ausnahmslos aus der Öl - oder Gasspeichertechnik. Für die meisten Bohraktivitäten kann auf eine Vielfalt von nationalen und internationalen Regeln der Erdöl und Erdgasgewinnung zurückgegriffen werden: In Deutschland wird die Versiegelung durch das Bundesberggesetz /BBG 09/, die Tiefbohrverordnungen (BVOT) der Bundesländer und die Richtlinie des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen auflässiger Bohrungen (1998) geregelt /OBA 88/. In den USA ist "Rule14" der Railroad Commission Texas aus dem Jahr 1983 verbindlich. Allerdings gibt es hierin keine Richtlinien bzgl. der Langzeitstabilität.

Die Hauptaufgabe einer Bohrlochversiegelung ist, potenzielle Wegsamkeiten zwischen den Schichten mit salinen Wässern bzw. Kohlenwasserstoffen untereinander und der Biosphäre zu unterbinden. Konkret müssen Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Horizonten durch ein Bohrloch verhindert werden.

Anforderungen an die Materialien für die Versiegelung im Hinblick auf eine Endlagerung werden z. B. vorgestellt in /NAG 02/:

- Festigkeit
- Deformationsverhalten: ausreichende Duktilität
- Geringe Durchlässigkeit
- Langzeitstabilität
- Quellfähigkeit, um das Ausfüllen von Hohlräumen zu gewährleisten
- Verpumpbarkeit

Die verwendeten Materialien müssen auf die jeweilige Lithologie und das Abdichtkonzept angepasst werden. Die folgenden Verschlussmaterialien können einzeln oder in Kombination für eine entsprechende Berfüllung Verwendung finden. Prinzipiell können Verschlussaufbauten analog zu Bergwerksverschlüssen konzipiert werden. Für die Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in Bohrlöchern gibt es noch keine Erfahrungen. Die einzelnen Verfüllstrecken sind bei einer Bohrlochlagerung i.d.R. länger und bei geringerem Durchmesser verglichen mit Barrieren in Bergwerken.

- Zementationen (kann alleine eine Langzeitsicherheit nicht garantieren)
- Nutzung der duktilen Eigenschaften von Salz und Ton („natürliche Barriere“ – kann nach heutigem Kenntnisstand als Langzeitsicher betrachtet werden) /KRE 09/ (siehe auch Kapitel 6.8.4)
- Verschiedene Composite-Materialien können als zusätzliche Barriere eingebaut werden.
- Verschluss auf Bitumenbasis als zusätzliche Barriere. Bitumen haben über Jahrmillionen in geologischen Systemen überdauert.
- Bentonit-Suspensionen. Dieses anorganische Material kann als Langzeit stabil betrachtet werden, weist jedoch keinerlei Abdichtfunktionen auf, unterstützen jedoch die andere Barrieren, insbesondere beim Verfüllen.

Die Langzeitstabilität der bekannten und heute eingesetzten Verfüllmaterialien über tausende Jahre im Untergrund unter Einfluss von Salzlaugen, sauren Wässern oder Gasen ist weitgehend unbekannt und unerforscht. Schlüsselzonen für Bohrlochverfüllungssektionen sind in möglichst gering permeablen Gesteinsschichten, wie Tone, Salz, etc. zu platzieren, also nicht in Störungszonen oder Zonen mit erhöhten Zuflüssen. Den Schlüsselzonen kommt die Barrierefunktion zu.

Schlüsselzonen für Bohrlochverfüllungssektionen sind in möglichst gering permeablen Gesteinsschichten, wie Festgestein, Tone, Salz, etc. zu platzieren, also nicht in Störungszonen oder Zonen mit erhöhten Zuflüssen. In den Schlüsselzonen sollte das Bohrloch nicht ausgebrochen sein und einen möglichst runden Querschnitt aufweisen. Den Schlüsselzonen kommt die Barrierefunktion zu.

Die Zwischenzonen haben Stabilitätsfunktion und können auch in nicht maßhaltigen, weniger stabilen und höher permeablen Intervallen angebracht werden. Ihre Anforderungen an die Durchlässigkeit sind geringer, sie sollten nicht größer sein als die Durchlässigkeit des umgebenden Gesteins. Das Verfüllmaterial sollte langzeitbeständige, genügend fest und aus anorganischem Material bestehen. Diese Zonen können auch Restsektionen von nicht gefrästen Verrohrungen, sowie Brücken aus Bauzement aufweisen.

/ARN 14/ regen deshalb auch eine gezielte Forschungsstrategie in Bezug auf das Langzeitverhalten von Zementen, Bentonit, Bitumen, etc. an, inkl. der Entwicklung von zukünftigen punktuellen Schmelzprozessen von Gesteinsformationen zur sicheren Abdichtung der darüber liegenden Aquifere. Permanente mechanische Stopfen (engl.: Plugs) werden wegen der zu erwartenden Korrosion des Metalls im Sandia Report nicht weiter betrachtet. /LOW 15/ schlagen alternativ selbst-sinternde Keramikstopfen für einen kompletten Bohrlochverschluss vor.

Der großdimensionierte Innendurchgang der Casinge wird für die Art der Verfüllarbeiten aber kein spezielles Hindernis darstellen. Verfüllwerkzeuge dafür müssten jedoch auf Basis heute bekannter Designs modifiziert oder noch weiter entwickelt werden /GRA 88/, /TÜV 99/.

Eine ordnungsgemäße Durchführung eines Bohrlochabschlusses mit anschließender Erfolgs- und Qualitätskontrolle ist die Grundvoraussetzung für einen sicheren Einlagebetriebsbetrieb. Dichtigkeitsprüfungen des Verschlusses nach den einzelnen Verfüllstapen durch Abdrücken mit ca. 120% des hydrostatischen Drucks sowie Abtasten der Stopfenoberkante mit dem Verfüllgestänge sind bereits heute bei den Behörden anerkannte zulässige Nachweisverfahren.

6.12 Bohrlochmessungen

Die geophysikalischen Bohrlochmessungen am elektrischen Kabel (engl: Logging) sind eine effektive und universelle Methode um verschiedene physikalische und strukturelle Gesteins- und Fluidparameter in einem Bohrloch zu erfassen. Die am häufigsten angewandten Messungen sind natürliche Radioaktivität, elektrischer Widerstand, Gesteinsdichte, Schallwellengeschwindigkeit, Gesteinsporosität, mag. Feld und Suszeptibilität, Abbildungen der Bohrlochwand, Konzentration chemischer Elemente in der Bohrlochwand, Temperatur, Druck und elektrische Leitfähigkeit des Fluids im Bohrloch sowie bohrtechnische Parameter wie Bohrlochform, Richtung und Neigung.

Grundlagen

Logging ist die kontinuierliche Vermessung eines oder mehrerer Messgrößen über die Bohrlochteufe. Die Loggingmesswerte werden unter *in-situ* Bedingungen in einem Bohrloch gemessen und liefern damit die genauesten und am nächsten zur Realität der Untertagebedingungen liegenden Messwerte aus einem Bohrloch. Im Vergleich zu Bohrkernen oder Cuttingproben stellt Logging die einzige Möglichkeit dar, ein Bohrloch ohne Unterbrechungen zu vermessen.

Unterschiedliche Typen von Bohrlochmesssonden enthalten eine oder mehrere Sensoren für unterschiedliche Parameter und schreiben die Messwerte auf so genannte Bohrloch-Logs (Tab. 6-6). Die Bohrlochmesssonden sind mit einem Messkabel verbunden, welches durch eine Winde gezogen und auf dessen Kabeltrommel gelagert ist. Das Kabel hält das Gewicht der Sonde und beherbergt in seinem Inneren einen oder mehrere elektrische Leiter für die Stromversorgung und Datenübertragung der Sonde. Eine Loggingwinde hat einen drehbaren Kabelanschluss an der Kabeltrommel zum Übergang von der drehenden Trommel zur feststehenden Kabelzuführung zur Datenerfassungseinheit.

Die Mehrzahl der Bohrlochmessungen müssen im „offenen“ Bohrloch gefahren werden, damit die Messparameter registriert werden können, d.h. ohne eine schützende Stahl- oder Plastikverrohrung zur Gesteinsformation. Einige Sonden können aber auch in mit Stahlrohren verrohrten Bohrungen oder durch das Bohrgestänge messen.

Loggingsonden

Loggingsonden gibt es in einer Vielzahl von Größen, d.h. Außendurchmessern. Generell können Sie in zwei Gruppen eingeteilt werden, Standardgrößen und Slimhole Größen. Im Allgemeinen bezeichnet man Sonden mit einem Außendurchmesser von < 60 mm als Slimhole-Tools, wogegen Sonden mit einem Durchmesser von 86 mm (3-3/8“) oder größer als Standard-Tools bezeichnet werden.

Natürlich passen Standard Tools nicht in Slimhole Löcher, wobei umgekehrt das Einfahren von Slimhole Tools in Standardbohrlöchern ebenfalls nicht empfohlen wird, denn die Mehrheit dieser Tools verliert ihre Messgenauigkeit in großen Bohrlöchern. Sie arbeiten am besten in Bohrlöchern < 130 mm. Auch haben viele der Standardtools eine oberes Limit bei einer Bohrlochgröße von > 500 mm. Noch größere Bohrlöcher erfordern dann spezielle bauliche Anpassungen von Messsonden um repräsentative Messergebnisse liefern zu können.

Tab. 6-6 Übersicht über die Anwendungen und Messgrößen von Loggingsonden /BRA 93/, /BRA 95/

Parameter	Anwendung	Sonden Bezeichnung	Beispiele typischer Sonden Abkürzungen	Art
Bohrloch-wand Abbildungen	Bohrlochbedingungen/-stabilität, strukturelle Kennzeichen, Schichtung, Laminierung, Fracs (offen/geschlossen), Bohrlochwandausbrüche, Spannungsfeld Orientierung durch Ausbruchrichtung & induzierte vertikale Brüche	Acoustic Imager (Televiewer)	BHTV, ABI, UBI, CBIL, CAST	d
	Wie oben, aber nur Orientierung des Spannungsfeldes durch induzierte vertikale Brüche	Electric Imager	FMS, FMI, STAR, EMI	d
	wie Acoustic Imager, aber nur einsetzbar in klarem Wasser, nicht Bohrspülungen	Optical Imager	OPTICAL SCANNER	d
	strukturelle Kennzeichen, Schichtung, Laminierung, Fracs, Spannungsfeld Orientierung durch Ausbruchrichtung (Mehrfacheinfahrten)	Dipmeter	DIP, SHDT, HDT	i
Kaliber, Bohrloch Geometrie/ Orientierung	Bohrlochbedingungen: Durchmesser, Form, Volumen, Orientierung/Richtung, Verlauf, Spannungsfeld Orientierung durch Ausbruchrichtung (Mehrfacheinfahrten), technische Bohrlochinspektion	Caliper, Oriented Caliper, Geometry Tool, Gyro Survey	BGL, CAL-ORI, DIP	d
Dichte	Lithostratigraphie, Kern-Log Korrelation, davon abgeleitet:: Porosität, Mineralienerkennung	Density	LDT, DENS, FDC	i

Parameter	Anwendung	Sonden Bezeichnung	Beispiele typischer Sonden Abkürzungen	Art
Elektrischer Widerstand	Lithostratigraphie, Art der Leitfähigkeit metallisch/elektrolytisch, Fluid Invasion, Porosität, Überprüfung von magnetotellurischen & elektromagnetischen Modellen	Laterolog Resistivity	DLL, LL3	d
		Induction Resistivity	DIL, IND	d
		Micro-Resistivity	MSFL, MRS	d
Elemente Si,Ca,Fe,S, Ti,Cl,H	Mineralische Zusammensetzung von einzelnen Gesteinstypen, Lithostratigraphie	Elemental Sonde	ECS, GLT	i
Gassättigung	Lagerstättencharakterisierung	Lagerstätten Parameter	RST	i
Schwerkraft	Groß-maßstäbliches Dichteprofil (auch in verrohrten Bohrlöchern), Bestätigung von gravimetrischen Modellen	Bohrloch Gravimeter	BHG	d
Magnetische Suszeptibilität	Kern-Log Teufenkorrelation, Ablagerungsstratigraphie, inter- & intra Lavafluss Unterscheidung, Bohrlochschrott Metallerkennung, Lithologie	Sus-Log	MS, MSUS, MagSUS	d
Magnetfeld	Profil des magn. Feldvektors	Magnetometer	BHM	d
	magnetische Gesamtfeldstärke	Bohrloch Geometrie	DIP, BGL, CAL-ORI, Imagers	d
Natürliche Radioaktivität	Lithostratigraphie, Tonvolumen, Kern-Log Teufenkorrelation	Total Gamma Ray	GR	d
	U, Th & K Konzentration, Lithostratigraphie, thermische Energieproduktion, Klufiterkennung	Natural Gamma Spectrum	SGR, NGR, NGS, GRS	i
Porosität	Lagerstättencharakterisierung, Kluft/Fließwegerkennung, Lithologie, Oberfläche, Verfestigung	Neutron Porosity	NPOR, PORO	i
		Nuclear Magnetic Resonance	NMR, CMR	i
Schallgeschwindigkeit	Lithostratigraphie, Verfestigung, Lagerstättencharakterisierung, Kluft/Fließwegerkennung, seismische Schalllaufzeiten	Sonic	BS, BCS, DSI	d
Spülungsparameter: Temperatur, Druck, Widerstand, Fluß, Fluidproben	Kluft/Fließwegerkennung & Charakterisierung, Fließverhalten, Zirkulationswege tiefer Wässer, Temperaturgradient Fluidfluß, hydr. Transmissibilität & Permeabilität, Spüldichte, Zementkopf-Erkennung, Gaserkennung, Fluidproben; oftmals kombiniert mit hydr. Testen	Mud Parameter, Temperature, Salinity Flowmeter	TEMP, MP TEMPSAL, MRES FLOW, FM, MPFM, DIGISCOPE	d
Gesteinsproben	Gesteinsanisotropie, Strukturanalyse, Auffüllen von Kernlücken	Sidewall Coring Tools, Formation Sampler	MSCT, RFT	d

d = direkt gemessen, i = indirekt, d.h. der Wert wird z.B. durch Processing errechnet

Tab. 6-7 Typische Logginggeschwindigkeit von einzelnen Loggingverfahren, die Zeiten enthalten nicht den Sondenzusammenbau

Sonde	Mess-Geschwindigkeit		Zeit für 0 – 500m	Zeit für 1.000 – 1.500m	Zeit für 2.500 – 3.000m
	[m/min]	[ft/hr]	[Stunden]	[Stunden]	[Stunden]
Caliper	~ 13	< 4.000	1	1,8	3
Resistivity	10 – 15	2.000 – 3.000	1,2	2	3,2
Density	9	1.800	1,3	2,1	3,3
Neutron Porosity	9	1.800	1,3	2,1	3,3
Sonic	7 – 10	1.400 – 2.000	1,8	2,4	3,6
MagSUS	8 – 10	1.600 – 2.000	1,4	2,2	3,5
Temp/Pressure	8 – 12	1.600 – 2.400	3,6	6	10
GR Spectrum	2 – 5	400 – 1.000	4,8	5,7	7
Elemental Log	2 – 3	300 – 600	4,8	5,7	7
Electric Imager	3 – 10	600 – 2.000	3,3	4,1	5,4
Acoustic Imager	2 – 5	200 – 1.000	4,8	5,7	7
Gravity	20 – 30 per day		-	-	-
Fluid Sampler	1 – 3 per day		-	-	-

6.13 Vorerkundung und Überwachung

Dieses Kapitel beschreibt ausgehend vom Stand der Technik wesentliche Schritte der Erkundung des Untergrunds und die Möglichkeiten der Überwachung in verschiedenen Phasen der Tiefen Bohrlochlagerung.

- vor Beginn der Bohrarbeiten,
- während und nach Abteufen der Explorationsbohrung,
- während und nach Abteufen der Lagerbohrung
- während des Einlagerungsvorgangs
- Überwachung nach Verschluss der Einlagerungsbohrung.

6.13.1 Vor Beginn der Bohrarbeiten

Zur Charakterisierung des Untergrunds müssen Vorerkundungsmessungen vor Beginn der Bohraktivitäten durchgeführt werden. Dazu gehören

- Geologie
- Geophysik
- Geomechanik
- Geochemie
- Baselinemonitoring²⁴

Diese Untersuchungen sind im Kohlenwasserstoffbereich und Bergbau Stand der Technik. Die Stärken und (räumlichen) Limitationen der einzelnen Verfahren werden als bekannt vorausgesetzt und daher nicht detailliert ausgeführt.

6.13.2 Beim Abteufen der Explorationsbohrung(en)

Beim Abteufen der ersten Explorationsbohrung, die mit Standarddurchmessern gebohrt werden sollte, können die bereits heute verfügbaren Loggingtools eingesetzt werden. Der folgende Absatz gibt eine Einführung in die Methodik der Bohrlochmessungen und eine Übersicht über die heute gängigen Verfahren. Generell können durch die Kombination der verschiedenen Verfahren, Informationen über gesteinsphysikalische und geochemische Eigenschaften im bohrlochnahen Umfeld („Formation Evaluation“) sehr detailliert und im bohrlochferneren Bereich mit reduzierter Auflösung gewonnenen werden:

- Elastische und mechanische Eigenschaften
- Porosität
- Permeabilität
- Geochemische Zusammensetzung von Gestein und Gesteinsfluid
- Mineralogische Zusammensetzung der Gesteine

²⁴ Z. B. Grundwassercharakterisierung, GPS, passive Seismologie, natürliche Gasströme aus dem Untergrund, einschließlich radiologisches Monitoring etc.

- Klüftigkeit und Störungen inkl. Störungscharakterisierung
- Lokales Spannungsfeld

6.13.3 Nach dem Abteufen der Explorationsbohrungen

Nach Abteufen der Explorationsbohrung werden weitere Untersuchungen im Bohrloch vorgenommen (Kapitel 6.12). Das sind u.a. hydraulische Injektions- und Fördertests, geomechanische Untersuchungen des Gesteins. Anschließend wird die Bohrung als Beobachtungsbohrung genutzt.

Nach Beendigung einer Explorationsbohrung können Methoden eingesetzt werden, die Anregung/Messung an der Oberfläche mit Anregung/Messung in der Tiefe kombinieren wie z.B. „Vertical seismic Profiling“ oder „Moving Source“ Experimente, um die elastischen Eigenschaften hochaufgelöst durch alle durchteuften Schichten hindurch zu ermitteln (ähnlich können auch geoelektrische Verfahren genutzt werden). Dadurch kann eine hohe räumliche Auflösung auch in größeren Tiefen erreicht werden, ohne dass das Gebirge zusätzlich verritzt wird.

Danach werden weitere Explorationsbohrungen niedergebracht und Bohrlochuntersuchungen durchgeführt.

Durch die geeignete Anlage mehrerer Erkundungs-/Beobachtungsbohrungen können zusätzlich „cross-hole“ Verfahren eingesetzt werden (wie z.B. seismische Durchschallung zwischen den Bohrlöchern), bei denen sich Empfänger und Sender in unterschiedlichen Bohrungen befinden. Diese Verfahren entsprechen dem Stand der Technik. Ähnlich können „cross-hole“ geoelektrische Verfahren eingesetzt werden, um z.B. das Ausmaß der Auflockerungszonen um Bohrungen zu bestimmen /KIE 10/.

Diese Verfahren erlauben eine 3D Charakterisierung des Untergrunds und sind Stand der Technik. Ein detailliertes Untersuchungsprogramm muss standortspezifisch entwickelt werden und basiert auf den durchteuften geologischen Einheiten.

6.13.4 Beim Abteufen der Lagerbohrungen: Logging in großkalibrigen Bohrlöchern

Um den speziellen Herausforderungen für großkalibriges Openhole Logging zu begegnen, bieten Servicefirmen (z.B. Schlumberger) für einige Bohrlochsonden Modifizierungen zur Ertüchtigung für sehr große Bohrlochdurchmesser an. Hierbei werden zumeist spezielle sehr große Zentrierer, bzw. Exzentrierer, Anpressschuhe oder Kaliberarmverlängerungen verwendet. Diese Maßnahmen helfen bei Messverfahren mit zentrierter Sonde aber nur eingeschränkt. In sehr großen Bohrungen nimmt der Anteil des Messsignals aus der die Sonde umgebenden Bohrspülung im Vergleich zum Signal aus der Formation sehr stark zu. Sonden mit bauartbedingter schwacher Signalanregung, z.B. bei den kleinen Slimhole Sonden, können daher nicht einfach durch eine große Zentrierung in sehr großen Bohrlöchern verwendet werden. Die Messverfahren lassen sich alle auch für große Bohrlöcher fertigen (Upscaling). Die standardmäßig von Servicefirmen eingesetzten kleinkalibriger Bohrlochsonden wurden von den Durchmessern her für Bohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie optimiert.

Widerstandslogging:

Für alle Widerstandstools ist die Bohrlochkorrektur von großer Bedeutung. So geht das AIT* (Array Induction Imager Tool) aus von einem zylindrischen Bohrloch und den gemessenen Werten von Spülungs- und Formationswiderstand, sowie Bohrlochdurchmesser und Exzentrizität der Sonde von der Bohrlochachse. Ein Großbohrlochpaket für das AIT setzt sich aus massiven Verbreiterungen und speziellen, nicht elektrisch leitenden Federzentralisern zusammen, welche einen konstanten Toolabstand zur Bohrlochwand während der gesamten Messung gewährleisten.

Neutron Porosity Logging:

Das Großloch-Neutron Porosity Paket für die exzentriert zu fahrende CNT* (Compensated Neutron Logging Tool) weist Federschuhe und spezielle Bogenfeder auf, die am Sondengehäuse angebracht sind. Das CNT Großlochpaket wird mit einem motorbetriebenen Kaliberarm gefahren, welcher als zusätzlicher Dezentralizer zu den Bogenfedern und dem Schuh wirkt. Der Kaliberarm misst außerdem die Exzentrizität der Sondenposition im Bohrloch.

Density Logging:

Das entsprechende Großlochpaket ermöglicht Dichtemessungen in Bohrlöchern von 406 – 762 mm.

Sonic Logging:

Das Großlochpaket für das Sonic Tool beinhaltet Zentralisatoren entweder am oberen oder unteren Ende der akustischen Sender oder Empfänger. Da der minimale Außendurchmesser der Sonde mit Großlochpaket 279,4 mm beträgt, sollte diese Sonde erst ab Bohrl Lochdurchmessern von 360 mm oder größer verwendet werden.

Probenahme (Sampling):

Großlochpakete sind verfügbar für verschiedene Probenahmesonden in großen Bohrlöchern. Das Großlochpaket für den MDT* (Modular Formation Dynamic Tester) ermöglicht den Einsatz in Bohrlöchern bis zu einem Durchmesser von 480 mm. Vergrößerungen für das MSCT* (Mechanical Sidewall Coring Tool) vergrößern die Möglichkeit zur Gewinnung von Seitenkernen in unverrohrten Bohrlöchern.

Seismic Logging:

Das Großlochpaket (Tab. 6-8 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) für den CSI²⁵ (Combinable Seismic Imager) vergrößert den Einsatzbereich dieser Sonde bis zu Bohrlöchern mit 558 mm Durchmesser, wobei der kleinste Bohrl Lochdurchmesser in das dieses Tool eingefahren werden kann 177,8 mm ist.

²⁵ Trademark of Schlumberger

Tab. 6-8 Spezifikation der Bohrl Lochdurchmesser für Großloch-Logging-Pakete /SCH 04/

Borehole Size Specifications for Large-Hole Tool Kits		
	Borehole Size—Min.	Borehole Size—Max.
Resistivity		
Platform Express* AIT* Array Induction Imager Tool (AIT-H)	9½ in. [24.13 cm]	20 in. [50.80 cm]
Powered Caliper Device (PCD-B)	7 in. [17.78 cm]	25 in. [63.50 cm]
Neutron porosity		
Platform Express Highly Integrated Gamma Ray Neutron Sonde (HGNS)	15 in. [38.10 cm]	22 in. [55.88 cm]
Compensated Neutron Tool (CNT-H)	14 in. [25.56 cm]	22 in. [55.88 cm]
Density		
Litho-Density* tool (LDT-D)	14 in. [25.56 cm]	30 in. [76.20 cm]
Platform Express High-Resolution Mechanical Sonde (HRMS)	16 in. [40.64 cm]	28 in. [71.12 cm]
Sonic		
Digital Sonic Logging Tool (DSL T)	14 in. [35.56 cm]	30 in. [76.20 cm]
DSI* Dipole Shear Sonic Imager	14 in. [35.56 cm]	20 in. [50.80 cm]
Sampling		
MDT tool with MRLH-AA	7½ in. [19.05 cm]	19 in. [48.26 cm]
MSCT with shoe extender	5½ in. [13.97 cm]	19 in. [48.26 cm]
Seismic		
CSI Combinable Seismic Imager	7 in. [17.78 cm]	22 in. [55.88 cm]

Weitere Einschränkungen von gegenwärtig verfügbaren Sonden

Neben der oben bereits beschriebenen Größenlimitierung der Sonden ist das derzeitige verfügbare Spektrum an Sonden und die dazu gehörigen Auswerterroutinen auf sedimentäre Gesteine optimiert, da die Instrumente ganz überwiegend in der Kohlenwasserstoffexploration und -gewinnung eingesetzt werden. Die meisten Sonden registrieren physikalische oder chemische Eigenschaften der Oberfläche der Bohrlochwand mit Eindringtiefen von wenigen Zentimetern, allerdings können elektrische Verfahren bis einige Meter tief in die Formation eindringen. In Sedimenten ist auf Grund der überwiegend horizontalen Lagerung eine Extrapolation von vielen Messergebnissen in die weitere Umgebung gerechtfertigt. Dies trifft allerdings nicht für metamorphe und magmatische Gesteine zu. Auch bei strukturellen Diskontinuitäten, die ein Bohrloch nicht schneiden, versagen die meisten Methoden. So kann zum Beispiel eine nicht vom Bohrloch durchbohrte, wasserführende Störungszone (z.B. in Sandsteinformationen) oft nur schwer detektiert werden. Inzwischen wurden deshalb neue seismische und elektrische Verfahren mit größerer Eindringtiefe entwickelt. Diese werden noch nicht standardmäßig eingesetzt. Hier wird ein Entwicklungsbedarf, ähnlich wie bei Sonden für große Durchmesser, gesehen.

Um die räumliche Auflösung zu erhöhen und den Einlagerungsbereich dreidimensional zu charakterisieren werden deshalb im vorliegenden Konzept mehrere Beobachtungsbohrungen vorgeschlagen um z.B. „cross-hole“ Messungen anwenden zu können.

6.13.5 Nach dem Abteufen der Lagerbohrungen

In den Bohrungen die für die Einlagerung genutzt werden sollen können die gleichen Verfahren zur Charakterisierung des Untergrunds wie in den Explorationsbohrungen eingesetzt werden (Kapitel 6.12 und 6.13.3).

6.13.6 Bei der Einlagerung

Vor und während der Einlagerung jedes einzelnen Behälters sollten folgende Messungen und Verfahren eingesetzt werden.

- Fluidprobennahmen vor, während und nach Einlagerung in allen Bohrungen (vor Verschluss)
- Tracer-Überwachung solange das Bohrloch offen ist, anschließend über Beobachtungsbohrungen möglich
- Geophysikalische Überwachung (Temperatur, Seismizität, über Beobachtungsbohrungen bzw. behind casing mit Glasfasermethoden)
- Hydraulische Beobachtungen (über Beobachtungsbohrungen)
- Begleitendes Trinkwassermonitoring im Umfeld (als zusätzliche Absicherung)

6.13.7 Nachbetriebsphase

Ein Monitoring in der Nachbetriebsphase ist vorzusehen. Dies kann über Beobachtungsbohrungen und Messungen von übertage mit Standardmethoden erfolgen. Dieses Monitoring kann alle oben genannten Verfahren nutzen und sollte mindestens umfassen:

- Trinkwassermonitoring
- Seismisches Monitoring
- Überwachung des Bohrlochverschlusses (Kapitel 6.13.8)

6.13.8 Monitoring / Überwachung des Bohrlochverschlusses

Verschiedene Verfahren können eingesetzt werden, um die Qualität von Verschlüssen zu überprüfen. Neben Drucktests kommen auch Messsonden in Frage, welche unterschiedliche physikalische Eigenschaften untersuchen (z.B. elastische, elektrische, dielektrische Eigenschaften) oder chemische Untersuchungen erlauben (z.B. spektrales gamma-ray, Probennahmesysteme, U-tubes). Dabei muss beachtet werden, dass der Einbau spezieller Messsonden in den Verschluss (z.B. zur Gasmessung, zur Beobachtung von Änderungen physikalischer Eigenschaften im Verschlussmaterial) zu zusätzlichen Leckagepfaden führen kann. Es wird deshalb als sinnvoll erachtet, in Stufen die Bohrung zurückzubauen, um das Verhalten der einzelnen Barrieren zu überwachen (z.B. Fluidprobenanalysen, Drucktest).

Entsprechend ausgelegte Drucktests erlauben eine Charakterisierung der Verschlüsse und Qualitätssicherung. Dadurch (Druckübertragung über ein geringkompressibles Fluid) können Wegsamkeiten detektiert werden (ohne direkten Kontakt zu den Radionukliden bzw. Gasen), lange bevor Gase und Radionuklide den Einlagerungsbereich verlassen (Frühwarnsystem). Um die Barrieren zu schützen sollten solchen Verfahren der Vorrang eingeräumt werden, die die Sicherheitswirkung der verschiedenen Gebirgsbereiche nicht beeinträchtigen. Vorzugsweise sollen für die Überwachung des Einlagerungsbereichs die speziell dafür konzipierten Explorationsbohrungen genutzt werden. In diesen können über längere Zeiträume

- die Fluidbewegung im Untergrund
- Veränderung des Spannungsfelds
- Druck und Temperatur

beobachtet werden. Zudem lassen sich auch die cross-hole Verfahren wiederholen um damit eine 4D Charakterisierung zu erhalten.

In Deutschland werden Bohrungen nicht nur im Öl- und Gasbereich sondern auch in Thermalwasserbädern überwacht.

Bohrungen, die heute noch erfolgreich genutzt werden, wurden z. T. bereits vor dem zweiten Weltkrieg gebohrt. Diese Bohrungen werden aktuell noch überwacht. Dies zeigt in einer über 75 Jahre alten Bohrung (unter Produktionsbedingungen) ein erfolgreiches Monitoring.

Eine Lebensdauer von 100 Jahren für diese Beobachtungsbohrungen kann angenommen werden. Ein Zeitraum von 100 bis 500 Jahre für ein Monitoring scheint deshalb bei geeigneter Konzeption denkbar und durchführbar. Bei den Beobachtungsbohrungen kann die Monitoringsensorik dem jeweiligen Stand der Technik angepasst werden.

Dadurch sind die Barrierewirkung und die Rückhaltung der unterschiedlichen Formationen überwachbar. Als Beispiel sei genannt, dass die Druckmessungen im Reservoirhorizont (in den Beobachtungsbohrungen) aus großer Distanz Aufschlüsse über potenzielle Entgasungserscheinungen erlauben ohne dass dazu ein direkter Kontakt zwischen freigesetzten Gasen und der Beobachtungsbohrung erforderlich ist.

Fazit:

- Die Vorerkundung ist ein wesentliches Element der Standortauswahl und beinhaltet neben den klassischen geophysikalischen, geologischen und geochemischen Methoden auch die Untersuchungen mithilfe von Erkundungsbohrungen.
- Ein breites Spektrum an Messsonden wird heute zur detaillierten Charakterisierung der Formationen eingesetzt. Entsprechende Messsonden sind für Explorations- und Beobachtungsbohrungen Stand der Technik.
- Über Bohrloch- und „Cross-hole“ Verfahren können die wesentlichen geomechanischen, geochemischen etc. Parameter sowohl in der direkten Bohrlochumgebung (hochaufgelöst) als auch zwischen den Bohrungen (geringere Auflösung) erfasst werden.
- Sowohl bei der Einlagerungsphase als auch nach Beendigung der Einlagerung stehen Methoden für die Überwachung zur Verfügung.
- In Deutschland sind Standzeiten von Bohrungen für einen Zeitraum von > 75 Jahre gezeigt.
- Beim Bohrlochverschluss sollte nach dem Einsetzen der Wirksamkeit jedes Verschlussmechanismus (Zementstopfen, Salz, mechan. Barrieren) im jeweils darüber liegenden Bereich eine Überwachung erfolgen – bevor der nächste Verschluss umgesetzt wird.

- Für das Monitoring sollten vorrangig die Erkundungsbohrungen genutzt werden. Deren Sensorik kann jeweils dem aktuellen Stand der Technik angepasst werden.

6.14 Bohrlochabstand

Die einfachste Methode ist von einem Bohrplatz aus nur eine Vertikalbohrung abzuteufen. Die nächste Bohrung kann dann von einem neuen Bohrplatz aus geteuft werden. Dies wurde beispielsweise so bei der KTB-Vor- und Hauptbohrung realisiert. Der Nachteil besteht hier in einem größeren Platzbedarf und höhere Baukosten.

Wie bereits beschrieben sind von der Bohrplattform Mittelplate mit wenigen Metern Abstand zahlreiche Bohrpfade von einer Plattform aus realisiert worden. Die Bohrpfade werden hierbei aktiv gesteuert und in Echtzeit während des Bohrens überwacht. Auch in Soultz-sous-Forêts wurden von einem Bohrplatz mehrere Bohrungen abgeteuft. Dies ist inzwischen Stand der Technik. Bei KTB wurde in der Hauptbohrung eine Reihe von Ablenkungen unterhalb von 7.500 m aus einem Bohrloch heraus gebohrt. Dies war hier eine technische Notwendigkeit um bohrtechnische Schwierigkeiten zu umgehen. Zwischenzeitlich existiert die Möglichkeit von Multiateralbohrungen. Aus einer Bohrung heraus werden eine oder mehrere Bohrungen abgelenkt und separat ausgebaut. Bei dieser Technik könnten von einem zentralen Bohrloch aus - beispielsweise in 3.000 m Tiefe - ein Bohrloch nach Norden abgelenkt werden. Danach kann es befüllt und bis etwa 2.900 m verschlossen werden. Das zweite Loch kann dann nach Nordosten abgelenkt und dann verfüllt werden. Das dritte Loch kann von 2.800 m nach Osten abgelenkt, befüllt und dann verschlossen werden. Bei einer solchen Technik könnten ungefähr 8 Löcher von einer zentralen Position niedergebracht werden. Die Neigung der Bohrungen und die Entfernung von der Zentralbohrung können hierbei beliebig gewählt werden. Ein auseinanderziehen von etwa 600 m, wie in Soultz-sous-Forêts gewählt, dürfte nicht nötig sein. Ein Abstand von etwa 50 m reicht aus um sicher eine Kollision mit der Nachbarbohrung zu verhindern.

Der notwendige Abstand im Einlagerungsbereich ist nicht nur abhängig von bohrtechnischen Fragen. Dieser ist ebenfalls abhängig von Fragen wie z.B. der Wärmeentwicklung. Die Entfernung der Bohrungen untereinander ist auch abhängig vom Monitoringskonzept. Aus felsmechanischer Sicht ist zu berücksichtigen, dass die Spannungskonzentration um einen Hohlraum etwa drei Bohrlochradien beträgt. Geht

man von einem Bohrlochdurchmesser von maximal einem Meter aus, so ergibt sich ein minimal notwendiger Bohrlochabstand von einigen Metern.

In Abb. 6-28 sind die geometrischen Verhältnisse für ein Einlagerungscluster dargestellt. Auf einer Fläche von etwa 400 x 400 m können 18 Einlagerungsbohrungen und 5 Erkundungs- bzw. Überwachungsbohrungen untergebracht werden. In den Überwachungsbohrungen können beispielsweise die Temperaturentwicklung im Einlagerungsfeld per Glasfaserkabel überwacht werden. Auch eine hydrochemische Überwachung mit Probennahmen wäre in derartigen Bohrungen möglich.

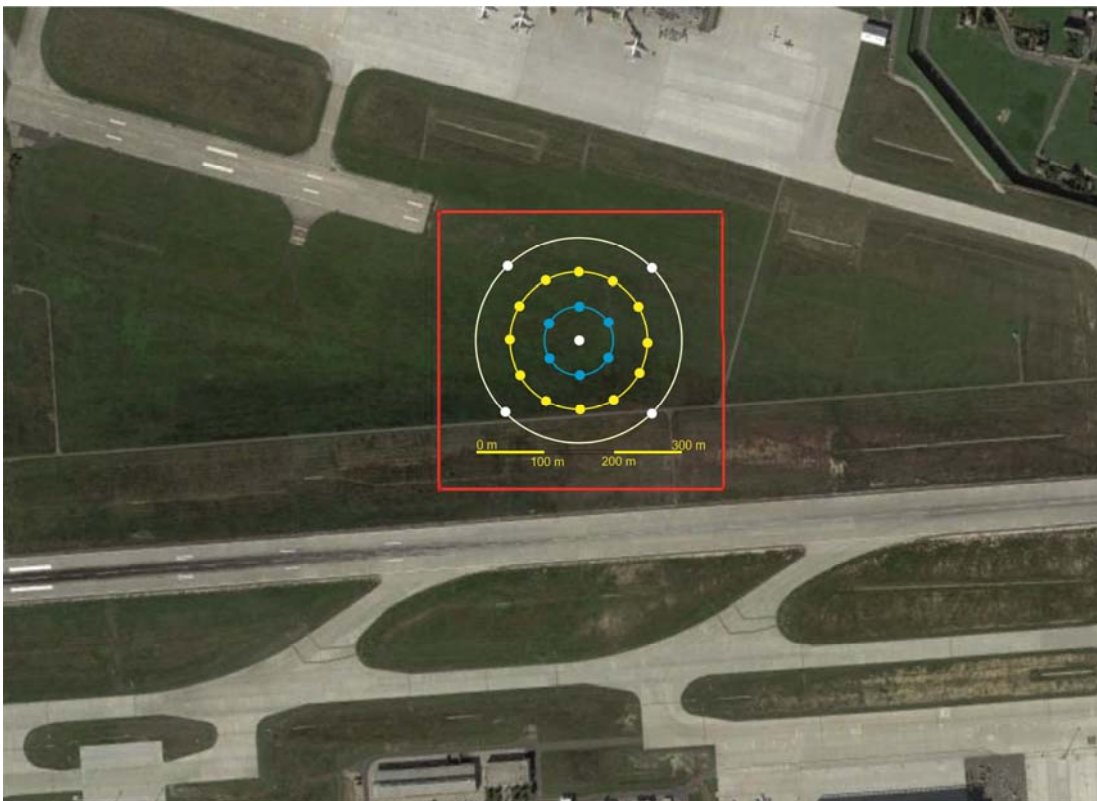


Abb. 6-28 Vorschlag für ein Bohrcluster von Vertikalbohrungen mit einem Abstand von 50 m. Um eine zentrale Erkundungsbohrung sind in einem Abstand von 50 m 6 Einlagerungsbohrungen vorgesehen (blaue Punkte). Ein weiterer Ring mit 12 Einlagerungsbohrungen ist in einem Abstand von 100 m (gelbe Punkte). Vier weitere Überwachungs- und Erkundungsbohrungen sind auf dem Kreis mit einem Radius von 150 m vorgesehen (weiße Punkte). Ein Flughafen (Google Earth) dient als Größenvergleich.

6.15 Kostenabschätzung

Nachfolgend wird eine Kostenabschätzung für eine 5 km tiefe DBD-Bohrung unter Annahme heute realisierbarer Durchmesser gegeben; diese basiert auf Erfahrungswerten aus tiefen Gas- und Geothermiebohrungen und auf folgenden Annahmen:

Als Verrohrungen werden 24 ½“ (622,3 mm), 20“ (508 mm), 16“ (406,4 mm) und 13 3/8“ (339,7 mm) angenommen, als Bohrdurchmesser ergeben sich damit 28“ (711,2 mm), 23“ (584,2 mm), 17 ½“ (444,5 mm) und 14 3/4“ (374,7 mm). Für die Absatzteufen der einzelnen Bohrphasen werden 500 m, 2.000 m, 3.500 m und 5.000 m veranschlagt. Die sonstigen getroffenen Annahmen und die daraus abgeleiteten Zeiten und Kosten sind Abb. 6-29 zu entnehmen. Zum besseren Verständnis sind nachfolgend einige Erläuterungen gegeben.

- Für den Bohrplatzbau sind 3 Millionen € veranschlagt; Damit wird den zu erwartenden erhöhten Kosten für Absperrungen und sonstigen Sicherheitseinrichtungen Rechnung getragen.
- Zusätzlich wurden 1 Mio. € nach Beendigung der Bohrung für Umbauarbeiten an der Lokation im Zuge der Errichtung des Endlagers eingeplant.
- Als Tageskosten für Bohranlage einschließlich Energiekosten, Bohrservice und Materialien (Vertikalbohrsysteme, Spülung, Feststoffkontrolle, geologische Bearbeitung und Probennahme) sind für Bohrzeiten 75.000,-€/d und sonstige Zeiten mit 60.000,-€/d veranschlagt.
- Die Bohrfortschritte (ROP-Werte) wurden moderat angenommen, können aber abhängig von den real zu teufenden Gesteinen von den Annahmen abweichen.
- Für Nachräumarbeiten in den jeweiligen Bohrlochabschnitten wurden 10% der Bohr- und Tripzeiten veranschlagt.
- Die Anzahl der Roundtrips (=Anzahl der Bohrwerkzeugwechsel) in jeder Bohrphase wurden auf Basis des Einsatzes und der zu erwartenden Lebensdauer von Rollenmeißeln kalkuliert.
- Kernbohrarbeiten sind nicht einkalkuliert, da bei den vorgesehenen Bohrdurchmessern zur Kerngewinnung Pilotbohrlöcher hergestellt werden müssten, die anschließend auf den benötigten Durchmesser zu erweitern wären. Da zudem während des Kernbohrens aus technischen Gründen keine aktive Steue-

ung des Bohrlochverlaufs möglich ist, könnte auch ein Abweichen aus der Vertikalen in den Kernstrecken auftreten, das beim Erweitern nicht korrigiert werden kann.

- Es wird davon ausgegangen, dass bereits im Vorfeld separate Erkundungsbohrungen als Kernbohrungen in kleineren Durchmessern geteuft wurden, wodurch die prinzipielle Eignung der Bohrung/des Wirtsgesteins untersucht wurde und dass alle in der Endlagerbohrung noch notwendigen Untersuchungen durch Bohrlochmessungen und Testarbeiten (Zufluss Teste) möglich sind. Die Kosten der Vorerkundungsbohrungen sind nicht einkalkuliert!
- Als Gesamtdauer für die Herstellung der Bohrung einschließlich Nebenarbeiten wie Bohrlochmessungen, Rohreinbauten, Zementationen und 30 d Testarbeiten ergeben sich unter den getroffenen Annahmen **185** Bohrtage.
- Für unvorhergesehene Maßnahmen wurden 15% Kostenzuschlag angesetzt.
- Die Gesamtkosten ergeben sich damit zu rund **30 Mio. €**.

Abschätzung zu Zeitbedarf und Kosten einer Bohrung

Beispielbohrung #1

Zeitbedarf		Durchmesser		ROP	Bohrzeit	Anzahl	v trip m/h 300 Tripzeit	BLM/RE/Zem	Räumen, HO	
Phase	von m	bis m	= m	inch	m/h	d	roundtrips	d	d	
1	0	500	500	28	5	4,17	1	0,14	3,00	0,43
2	500	2000	1500	23	3	20,83	5	2,08	3,00	2,29
3	2000	3500	1500	17 1/2	2	31,25	8	6,88	4,00	3,81
4	3500	5000	1500	14 3/4	2	31,25	8	10,63	4,00	4,19
5	5000	5000	0	14 3/4	2	0,00		1,39	5,00	0,14
6										
						87,50	22	21,11	19,00	10,86
										160,47

Kosten		sonstige Kosten		Bohrplatz	Kernen
Tagessätze (incl. Services)		Bohrwerkzeuge	800.000 €	3.000.000 €	
Bohren	75.000 €	Rohre + Zubehör	3.000.000 €	(Teil-)Rekultivierung	14,00
sonstige Zeiten	60.000 €	Zementationen	1.500.000 €	1.000.000 €	Sonstiges
	Pauschalen	Logging	1.500.000 €	Unvorhergesehenes	5,53
Mob/Demob	350.000 €	Testen	1.500.000 €	15%	
Auf-/Abbau	400.000 €				
Skidben					
		Gesamtkosten Bohrung		27.970.549 €	Gesamtdauer
					180,00

Abb. 6-29 Annahmen zur Kostenabschätzung

Das entsprechende Zeit-Teufen-Diagramm Abb. 6-29 ist in Abb. 6-30 gezeigt.

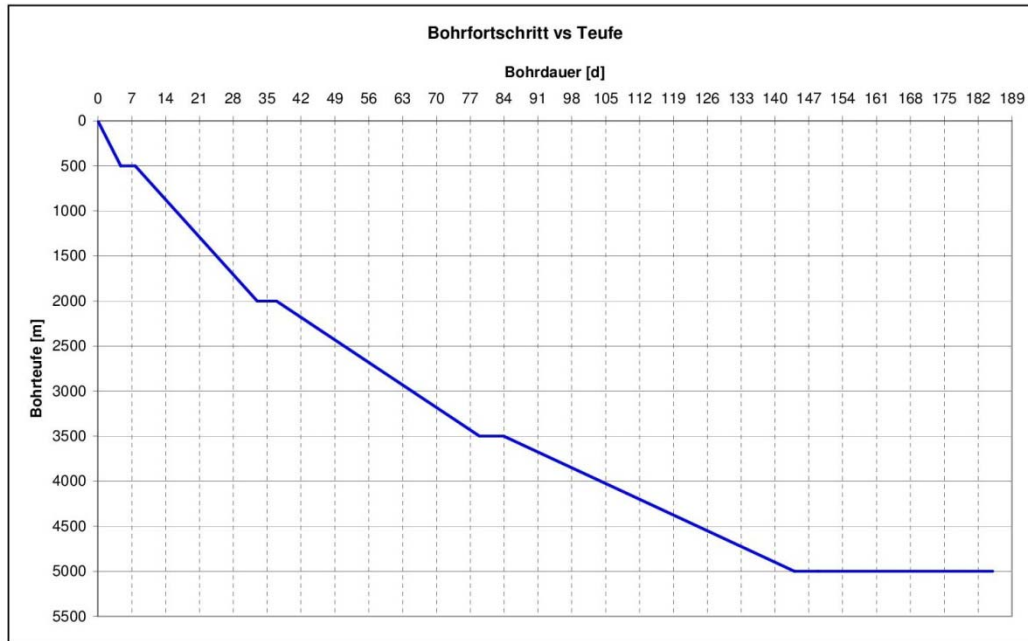


Abb. 6-30 Zeit-Teufen-Diagramm für eine 5.000 m tiefe DBD-Bohrung unter Annahme heute realisierbarer Bohrdurchmesser.

6.16 Ausblick und geschätzte Kosten für ein Großbohrloch

Wie bereits erläutert, müssten neue Bohrverfahren für die geforderten Großbohrloch-Durchmesser von > 100 cm in 5.000 m Tiefe der AG 3 der Kommission noch entwickelt und felderprobt werden. Mit Stahlrohren ausgebaute DBD-Bohrungen müssten wegen der vorherrschenden Gebirgsdrücke zwingend mit einer Flüssigkeit befüllt betrieben werden und könnten deshalb nur mit noch zu entwickelnden und entsprechend 700 bar druckdichten Behältern befüllt werden.

Im Folgenden wird eine erste grobe Kostenschätzung für Bohrlöcher mit einem Enddurchmesser von > 100 cm in 5.000 m Tiefe zur Diskussion gestellt.

Unter der Annahme, dass die Tiefbohrtechnologie sich in den kommenden Jahren entsprechend weiter entwickeln wird, so dass DBD-Bohrungen in der geforderten Dimension sicher abgeteuft betrieben werden können, müsste für ein derartiges Bohrprojekt nach erster Einschätzung eine Bauzeit von ca. 5 Jahren und mit einem Kostenrahmen von einer halben Milliarde Euro - oder mehr – für eine **trockene** Bohrung gerechnet werden /ARN 11/ (Abb. 6-31).

Es besteht zudem erheblicher Bedarf an F&E (z. B. neue Materialien), wenn das Ziel einer **trockenen** Bohrung sicher erreicht werden soll.

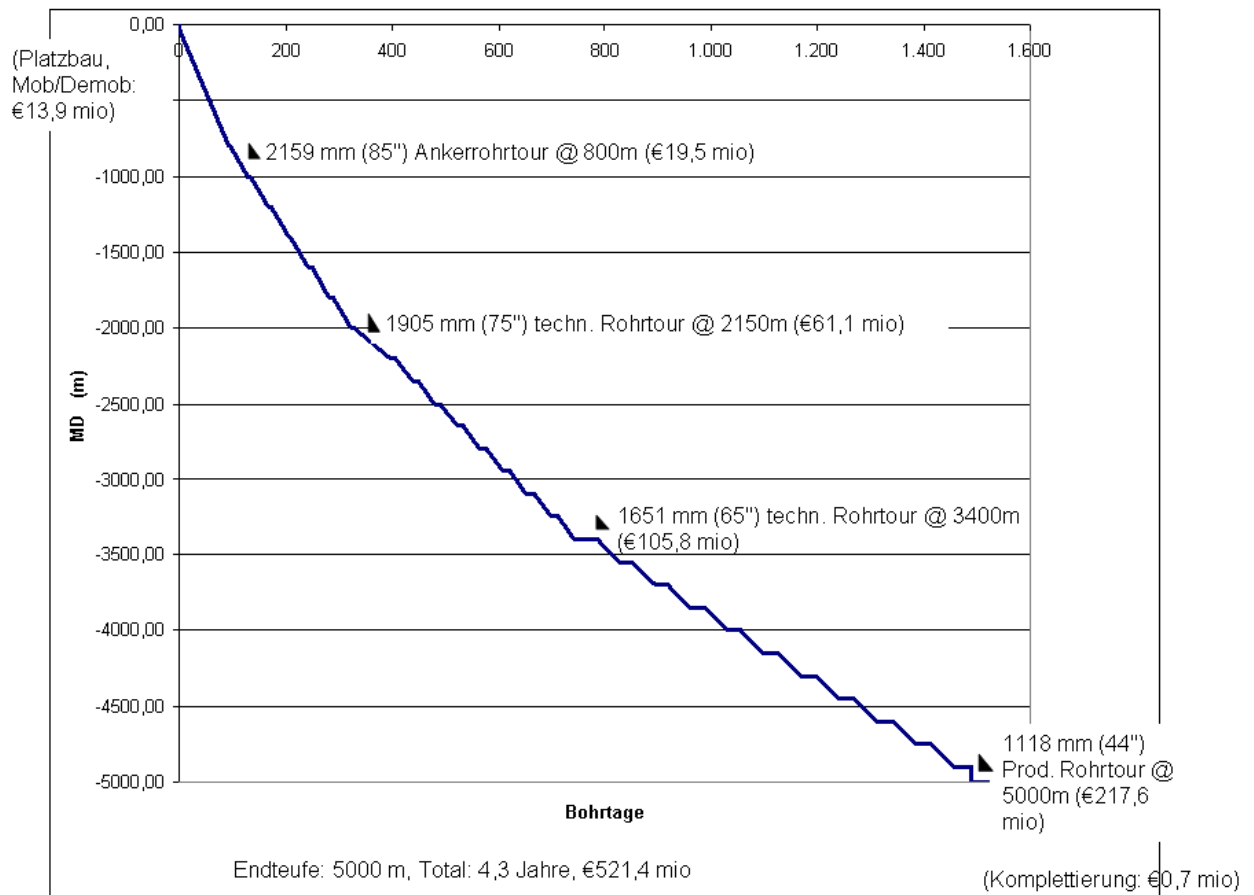


Abb. 6-31 Mögliches Leistungsdiagramm (Bohrtage vs. Teufe) für eine hypothetische großkalibrige DBD Bohrung mit einem Bohrlochenddurchmesser >1.000 mm und 44 Zoll (1117,6 mm) Endverrohrung aus Verbundwerkstoff in 5.000 m Endteufe bei trockenem Ausbau.

6.17 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Tiefe Bohrlöcher können, wie in Kapitel 6 dargestellt, mit heute gängigen Größen bis 5.000 m Teufe hergestellt werden. Bohrlochdimensionen um 100 cm und darüber sind mit herkömmlichen Bohranlagen und heute bekannten Werkstoffen in dieser Teufe nicht sicher herzustellen und zu betreiben. Die heute bekannten Ausbaumaterialien basieren auf Technologien der Öl- & Gasindustrie, welche, in Anlehnung an die durchschnittliche Produktionszeit eines Öl- oder Gasfeldes, eine Lebenserwartung für eine Tiefbohrung von max. 50-70 Jahren festlegt. Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Bezug auf tiefe Endlagerbohrungen besteht deshalb bei:

- der geologischen Erkundung des Untergrundes. Hier können geplante Tiefbohrungen bis zur Zielteufe von 5.000 m vertieft werden, um die Kenntnis des geologischen Untergrundes in Deutschland zu verbessern. Insbesondere in Süddeutschland ist die Kenntnis des tieferen Untergrundes außerhalb der Molasse spärlich.
- der Entwicklung von spezialisierten und ggf. fest installierten Bohrerüsten für die erforderliche Spülungspumpkapazität, Bohrwerkzeuglogistik und notwendigen Hakenlastkapazitäten für den Bohrungsbau und -ausbau;
- der Fertigung von großkalibrigem Bohrgestänge und Bohrlochwerkzeugen sowie die Entwicklung von Prozessen für deren sichere Handhabung im Turm und am Gestänge-Lager;
- der Entwicklung von neuen keramischen Verbundwerkstoffen, inkl. Verbindertechnologien für großkalibrige Casingrohre zum sicheren Langzeitbetrieb eines großkalibrigen und trockenen Bohrloches, und
- der Weiterentwicklung von Bohrlochverfüllmethoden und Abdichtmaterialien zum sicheren und dichten Langzeit-Verschluss von großkalibrigen Endlagerbohrlöchern /ARN 11/.

6.18 Literatur Kapitel 6

- /ABS 13/ Abschlussbericht: Coil Tubing Aufwältigung GrSBK4, GFZ intern, 2013.
- /AIR 16a/ Air drilling - Article. erreichbar unter <http://www.airdrilling.com/article/details/air-drilling>, zitiert am 13. Februar 2016.
- /AIR 16b/ Foam drilling - Article. erreichbar unter <http://www.airdrilling.com/article/details/foam-drilling>, zitiert am 13. Februar 2016.
- /AIR 16c/ Mist drilling - Article. erreichbar unter <http://www.airdrilling.com/article/details/mist-drilling>, zitiert am 13. Februar 2016.
- /ALL 65/ Alliquander Ö., Arnold W.: Das moderne Rotarybohren, ASIN B0000BFRIH, VEB Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie: Leipzig, 1965.
- /AME 00/ American Petroleum Institute: API Bulletin 5C3, Information Handling Services 2000, 2000.
- /AME 09/ American Society of Mechanical Engineers (ASME) (Hrsg.): 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, October 11–15, 2009, 2009.
- /ARN 11/ Arnold, B.W., Brady, P.V., Bauer, S.J., Herrick, C., Pye, S., Finger, J.: Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, SAND2011-6749, 67 S., Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico, 2011.
- /ARN 14/ Arnold, B.W., Brady, P.V., Sutton, M., Travis, K.P., MacKinnon, R., Gibb, F.G.F., Greenberg, H.: Deep Borehole Disposal Research: Geological Evaluation, Alternative Wasteforms, and Borehole Seals, SAND2014-17430R, Sandia National Laboratories: Alburquerque, New Mexiko, 2014.

- /BBG 09/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585). 2009.
- /BJE 06/ Bjelm, L.: Under Balanced Drilling and Possible Well Bore Damage in Low Temperature Geothermal Environments. PROCEEDINGS, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006SGP-TR-179.
- /BRA 93/ Bram, K., Draxler, J.K. (Hrsg.): KTB Report 93-1, NLFb-KTB: Hannover, 1993.
- /BRA 95/ Bram, K., Draxler, J.K. (Hrsg.): KTB-Report 94-1, NLFb-KTB: Hannover, 1995.
- /BÜC 03/ Bückner, C., Strobel, J.: Das Voelkersen Gas Feld in Norddeutschland: Anzeichen für zwei Spannungsrichtungen im Rotliegenden?, S. 125–134, DGMK Tagungsbericht 2003: Celle.
- /COO 77/ Cooper, L.W., Hook, R.A., Payne, B.R.: Air Drilling Techniques, SPE Deep Drilling and Production Symposium: Amarillo, Texas, 1977-04-17.
- /COR 03/ Cornet, F.H., Berard, T.: A case example of intergrated stress profile evaluation. In: Rock Stress '03: Proceedings of the Second International Symposium on Rock Stress, Kumamoto, Japan, 4-6 November 2003. Hrsg: Sugawara, K., Obara, Y., Sato, A., ISBN 9789058096395, Taylor & Francis, 2003.
- /COR 12/ Cornet, F.H., Röckel, T.: Vertical stress profiles and the significance of “stress decoupling”, Tectonophysics, Bd. 581, S. 193–205, 2012.
- /DEA 15/ DEA: Rekordbohrung erschließt Mittelplate-Öl, erreichbar unter <http://www.mittelplate.de/de/press-releases/rekordbohrung-erschliesst-mittelplate-ol>, zitiert am 15. Februar 2016.
- /DEU 80/ Deutag: Schachtarbeiten mit Anlage T-34, Deutag intern, 1980.

- /DIN 14/ DIN: DIN EN ISO 11960:2014-05 Erdöl- und Erdgasindustrie - Stahlrohre zur Verwendung als Futter- oder Steigrohre für Bohrungen (ISO 11960:2014), Hrsg.: Beuth Verlag, 2014.
- /ECO 98/ Economides, M.J., Watters, L.T., Dunn-Norman, S. (Hrsg.): Petroleum well construction, 622 S., ISBN 0471969389, Wiley: Chichester, 1998.
- /ENG 96/ Engeser, B.: Das kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland: KTB-Bohrtechnische Dokumentation, ISBN 3928559168, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1996.
- /FRA 03/ Frank, U., Halm, H., Kitscha, R.: Bohrtechnische Erfahrungen aus den Extended Reach Bohrungen Dieksand auf die Lagerstätte Mittelplate, S. 459–482, DGMK Tagungsbericht 2003: Celle.
- /GAB 14/ Gabolde, G., Nguyen, J.-P.: Drilling data handbook, 9. Aufl., ISBN 2710809710, Editions Technip: Paris, 2014.
- /GRA 88/ Grauer, R.: Zum chemischen Verhalten von Montmorillonit in einer Endlagerverfüllung, Technischer Bericht, Hrsg.: NAGRA, 88-24, 83 S., NAGRA, 1988, erreichbar unter [http://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%201987-1988/d_ntb88-24.pdf](http://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%201987-1988/d_ntb88-24.pdf), zitiert am 13. Februar 2016.
- /HEI 94/ Heinemann-Glutsch, B.: Results of scientific investigations at the HDR test site, Soultz-sous-Forêts, Alsace, Socomine, BP 39, Route de Kutzenhausen, F-67250 Soultz sous Forets., France, 1994.
- /HER 15/ Herrernknecht: Shaft Boring Machine (SBM), Stand vom 20. August 2015, erreichbar unter <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/kernprodukte/mining/shaft-boring-machine-sbm.html>, zitiert am 14. Februar 2016.

- /HOT 93/ Hoth, K., Mecklenburg-Vorpommern Geologisches Landesamt: Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke: Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962 - 1990 ; mit zwei Tabellen, Schriftenreihe für Geowissenschaften, Ges. für Geowissenschaften, 1993.
- /KIE 10/ Kiessling, D., Schmidt-Hattenberger, C., Schuett, H., Schilling, F., Krueger, K., Schoebel, B., Danckwardt, E., Kummerow, J.: Geoelectrical methods for monitoring geological CO₂ storage. First results from cross-hole and surface-downhole measurements from the CO₂SINK test site at Ketzin (Germany), International Journal of Greenhouse Gas Control, Bd. 4, Nr. 5, S. 816–826, DOI 10.1016/j.ijggc.2010.05.001, 2010.
- /KLE 93/ Klee, G., Rummel, F.: Hydrofrac stress data for the European HDR research project test site Soultz-Sous-Forets, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Bd. 30, Nr. 7, S. 973–976, DOI 10.1016/0148-9062(93)90054-H, 1993.
- /KOM 14/ Komoroczi, Z.: Fractures and faults in tight gas sandstones: a study using laboratory and field data, 256 S., RWTH Aachen: Aachen, 2014, erreichbar unter <http://publications.rwth-aachen.de/record/482027/files/482027.pdf>, zitiert am 14. Februar 2016.
- /KRE 09/ Kretzschmar, H.J., Schmitz, S., Schreiner, W., Lendel, U.: Salzstopfen-Versatz von CO₂-Speicherbohrungen, Erdöl, Erdgas, Kohle, Bd. 125, Nr. 11, S. 440, 2009.
- /LAN 03/ Langhans, G., Beuthan, H.-C., Wessel, E.: Erschließung und Entwicklung der Lagerstätte Mittelplate – Vom Pilot zum komplexen onshore/offshore Betrieb, S. 449–458, DGMK Tagungsbericht 2003: Celle.
- /LOW 15/ Lowry, W., Dunn, S., Coates, K.: High Performance Ceramic Plugs for Borehole Sealing, International High Level Radioactive Waste Management, S. 1–7, IHLRWM - International High Level Radioactive Waste Management: Charleston, April 12-16.

- /MIC 01/ Micon: 5 ¼“ Seilkernbohrstrang, Wartungs- und Reparaturanleitung,, GFZ intern, 2001.
- /MIN 15/ Minkley, W.: Integrität von Salzgesteinen und praktische Relevanz für die Verwahrung von Salzkavernen, 47 S., IfG - Institut für Gebirgsmechanik: Leipzig, 2015, erreichbar unter [https://www.kivi.nl/uploads/media/5677f1e176830/Integrit%C3%A4t%20von%20Salzgesteinen%20und%20praktische%20Relevanz%20f%C3%BCr%20die%20Verwahrung%20von%20Salzkav%20-%20Wolfgang%20Minkley,%20Institut%20f%C3%BCr%20Gebirgsmechanik%20GmbH%20\(IfG\).pdf](https://www.kivi.nl/uploads/media/5677f1e176830/Integrit%C3%A4t%20von%20Salzgesteinen%20und%20praktische%20Relevanz%20f%C3%BCr%20die%20Verwahrung%20von%20Salzkav%20-%20Wolfgang%20Minkley,%20Institut%20f%C3%BCr%20Gebirgsmechanik%20GmbH%20(IfG).pdf), zitiert am 15. Februar 2016.
- /MOH 90/ Mohammed N.: Drilling Hydraulics, XLS, internal, Schlumberger, 1990.
- /MOO 86/ Moore, P.L.: Drilling Practices Manual, 2. Aufl., 586 S., ISBN 0878142924, PennWell Books: Tulsa, Okla., 1986.
- /NAG 02/ NAGRA: SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg, Technischer Bericht, Hrsg.: NAGRA, 02-24, 114 S.: Wettingen, 2002, erreichbar unter [http://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202001-2010/d_ntb02-24.pdf](http://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202001-2010/d_ntb02-24.pdf), zitiert am 14. Februar 2016.
- /NAT 16/ National Oilwell Varco (NOV), erreichbar unter <https://www.nov.com/>, zitiert am 15. Februar 2016.
- /NWTRB 13/ NWTRB: Deep Borehole Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste, Hrsg.: Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), 4 S., Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), August 2013, erreichbar unter <http://www.nwtrb.gov/facts/deepborehole.pdf>, zitiert am 14. Februar 2016.
- /OBA 88/ Clausthal-Zellerfeld, Oberbergamt.: Richtlinie des Oberbergamts Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen auflässiger Bohrungen. Ref.: 20.1 - 3/98 - B III d 1.2 – IV - Rölleke, 29.07.1998, 1988.

- /PRE 08/ Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Henniges, J., Krüger, K., Norden, B., Förster, A.: The CO2 SINK Boreholes for Geological Storage Testing, Scientific Drilling, 6, July 2008, DOI 10.2204/iodp.sd.6.04.2008, 2008.
- /PRE 85/ Prevedel, B.: Ablenken der vertikal angesetzten Bohrung Berkhöpen 2001 bis in die Horizontale unter Anwendung modifizierter konventioneller Tiefbohrtechnik : [Abschlußbericht, Abschlußdatum: Februar 1985, Contract 03-E-6193-C], BMFT-FB-T-86-242, 03E6193C, 31 S., Abteilung Services, Preussag AG Erdöl und Erdgas, Peine, 1985.
- /RÖC 03/ Röckel, T., Lempp, C.: Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken, Erdöl Erdgas Kohle, Bd. 119, Nr. 2, S. 73–80, 2003.
- /RÖC 06/ Röckel, T., Wonik Th.: Strukturauswertungen von Bohrlochmessungen der Forschungsbohrung Lindau 1 (Bayreuth), Geol. Bavarica, Nr. 109, S. 151–183, 2006.
- /RÖC 08/ Röckel, T.: Arbeitsbericht der Piewak & Partner GmbH zum BMU Projekt Kennziffer 0327594: Untersuchungen zur Bohrlochstabilität in Tonsteinen des Oberrheingrabens – Spannungsrichtungen, Hrsg.: Piewak & Partner GmbH, 2008.
- /RUM 91/ Rummel, F., Baumgärtner, J.: Hydraulic-fracturing stress measurements in the GPK 1 borehole, Soultz sous Forets, Geotherm. Sci. & Tech, Bd. 1991, Nr. 3, S. 119–148.
- /SCH 04/ Schlumberger: Large Openhole Logging, Schlumberger Bulletin, FE_04_024_0, 2004.
- /SCH 16/ Schlumberger: The Oilfield Glossary - Schlumberger Oilfield Glossary, erreichbar unter <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>, zitiert am 15. Februar 2016.
- /SCH 90/ Schöffmann, F.: Grundlagen der Tiefbohrtechnik. Vorlesungsskript, Hrsg.: MU Leoben: Leoben, Österreich, 1990.

- /SPE 05/ Sperber, A., Wundes, B.: Leitfaden „Geothermie am Oberrheingraben“. Kapitel 4.2.3 „Bohrtechnik zur Erschließung tiefer Geothermie“, Hrsg.: fesa e.V.: Freiburg, 2005.
- /SPE 15/ Sperber, A.: „Verrohrungsschema und -design für die Erkundungsbohrungen der Etappe 3 der Nagra Sondierkampagne unter besonderer Berücksichtigung der Seilkerntechnik“, Technischer Bericht, Hrsg.: NAGRA, NAB 15-40, NAGRA, 2015.
- /SPE 16/ Spektrum: Lufthebeverfahren - Lexikon der Geowissenschaften, erreichbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/lufthebeverfahren/9782>, zitiert am 13. Februar 2016.
- /TIS 06/ Tischner, T., Pfender, M., Teza, D.: Hot Dry Rock Projekt Soultz: Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage.- , 85. S. Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben, Nr. 0327097, 2006.
- /TÜV 99/ TÜV: Langzeitsicherheit bei der Verfüllung von Bohrungen mit radionuklid- und quecksilberhaltigen Produktionsrückständen, Hrsg.: TÜV Hannover/Sachsen-Anhalt e.V., Bereich Energie- und Systemtechnik, 1999.
- /VAL 07/ Valley, B., Evans, K.F.: Stress State at Soultz-Sous-Forêts to 5 Km Depth from Wellbore Failure and Hydraulic Observations. Stanford University, Proceedings, 32nd workshop on geothermal reservoir engineering, S. 17481-17469, 2007.
- /WIK 16a/ Wikipedia: Bohrplattform, Stand vom 14. Januar 2016, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=146485080>, zitiert am 15. Februar 2016.
- /WIK 16b/ Wikipedia (Hrsg.): Rotary-Bohrverfahren, Stand vom 11. Februar 2016, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=150064064>, zitiert am 13. Februar 2016.

- /WIR 06/ Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V.: Leitfaden Futterrohrberechnung, Technische Regel, 1-88, 2006, zitiert am 14. Februar 2016.
- /WOL 81/ Wolff, C.J., Wardt, J.P. de: Borehole position uncertainty-analysis of measuring methods and derivation of systematic error model, Journal of Petroleum Technology, Bd. 33, Nr. 12, S. 2,338, 1981.

7 Verfahren zur sicheren Einlagerung

In den folgenden Unterkapiteln werden die o.g. Antworten zur Konzeptionierung der Behälter und zum sicheren Einbringen der Behälter hergeleitet und begründet.

7.1 Behälter

Der zu entwerfende Abfallbehälter wird im weiteren Verlauf abgekürzt beschrieben mit dem Akronym **DBC-R: Deep Borehole Container – Retrievable**.

7.1.1 Anforderungen an die Abfallbehälter

Für die Konzeption des Abfallbehälters sind die folgenden Parameter zu berücksichtigen:

- Art und Umfang der endzulagernden Abfälle
- Geometrie der endzulagernden Abfälle
- Massen der endzulagernden Abfälle
- Nutzbarer Querschnitte im Bohrloch
- Design und Materialwahl des Abfallbehälters
- Temperaturfeld im Einlagerungsbereich
- Medium, in dem eingelagert werden soll

Vorgesehen für die Endlagerung sind abgebrannte Brennelemente und Wiederaufbereitungsabfälle. Die Anzahl der Brennelemente sowie Wiederaufbereitungsabfälle sind den Tab. 7-1 und Tab. 7-2 zu entnehmen.

Tab. 7-1 Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente. (WWER: Druckwasserreaktor russischer Bauart; KGR: Greifswald, KKR: Rheinsberg) /PEI 11/

Anlage	Brennelementtyp	
	UO ₂	MOX
SWR	14.350	1.250
DWR	12.450	1.530
WWER	5.050	-

Tab. 7-2 Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden Wiederaufarbeitungsabfälle /PEI 11/

Abfallstrom: Wiederaufarbeitungsabfälle		Anzahl Kokillen
CSD-V (HAW-Kokillen)	AREVA NC (F)	3.025
	Sellafield Ltd. (UK)	570
	VEK (D)	140
	Summe	3.735
CSD-B	AREVA NC (F)	308
CSD-C	AREVA NC (F)	4.104

Bei der Herleitung des nutzbaren Raumes des neu zu konzipierenden Abfallbehälters ist die Länge von gezogenen Brennstäben auslegungsbestimmend. Für den Durchmesser sind die bereits konditionierten Wiederaufbereitungsabfälle in Kokillen auslegungsbestimmend.

Es ergibt sich eine Höhe des nutzbaren Raumes des Abfallbehälters von 4,8 m bei einem inneren Durchmesser von 0,435 m (Abb. 7-1).



Abb. 7-1 HAW-Kokille nach /THO 09/ und Brennelementmuster (eigene Aufnahme)

Für den Fall, dass Brennelement-Kugeln, die derzeit in „Kannen“ konditioniert sind, für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, zu berücksichtigen sind, wären diese noch zu konditionieren. Für die Kalkulation der benötigten Anzahl von Abfallbehältern sind diese Abfälle nicht berücksichtigt.

7.1.2 Behälterauslegung

Die oben hergeleiteten Maße sind vergleichbar mit den Maßen des für die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) von der nse GmbH entworfenen Abfallbehälters BSK-R (Abb. 7-2). Dies vorausgesetzt, kann der für die tiefe Bohrlochlagerung zu konzipierende Abfallbehälter jeweils

- - Brennstäbe von 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE (ca. 2900 kg) oder
- - 3 HAW-Kokillen (CSD-V), 3 CSD-B oder 3 CSD-C (3x ca. 400 kg = 1200 kg)

aufnehmen.

Summiert man die in Tab. 7-3 aufgelisteten und zu berücksichtigenden Abfallbehälter, so sind für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern rund 11.000 Abfallbehälter zu berücksichtigen.

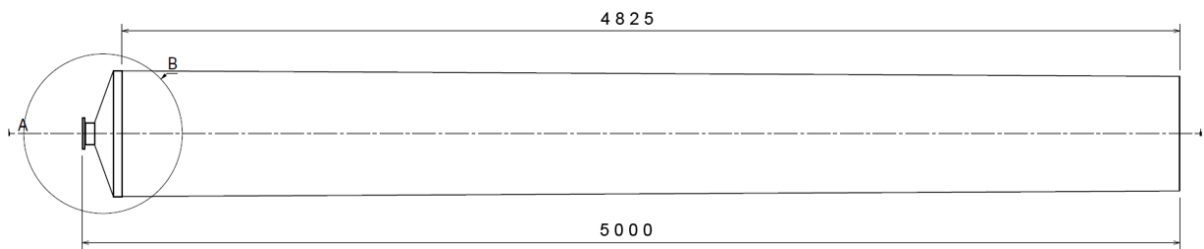


Abb. 7-2 Konzept der rückholbaren Brennstabkille BSK-R der nse GmbH

Tab. 7-3 Anzahl der BSK-R /BOL 12/ bzw. DBC-R

Abfallart		Endlagerbehälter	
		Bezeichnung	Anzahl
Ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR	BSK-R	4.660
	SWR		1.734
	WWER-DWR		674
	Summe		7.068
CSD-V	AREVA NC (F)	BSK-R	1.245
	Sellafield Ltd. (UK)		
	VEK (D)		
CSD-B	AREVA NC (F)	BSK-R	103
CSD-C	AREVA NC (F)	BSK-R	1.368
Ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-KKW's und Forschungsreaktoren	AVR	BSK-R	152
	THTR		305
	KNK II	BSK-R	5
	Otto-Hahn		
	FRM II	BSK-R	30
	BER II		26
Summe	BSK-R	290	
Brennelement-Strukturteile	Summe	BSK-R	874

Neben den auslegungsbestimmenden Parametern, die sich aus den zu berücksichtigten Abfällen herleiten, ergeben sich für die Behälterauslegung Parameter aus der Betrachtung des abzuteufenden Bohrlochs und der zu berücksichtigenden Verrohrung im Einlagerungsbereich (Casing). Die folgende Aufzählung der Tab. 7-4 fasst diese zusammen:

Tab. 7-4 Auflistung Randbedingungen / Bohrloch

Zielteufe	5000 m	Vorgabe Kommission
Bohrlochdurchmesser	1 m	Vorgabe Kommission
Nutzbare Länge Bohrloch	2000 m	Ableitung
Bohrloch ist seiger		Festlegung Projektteam
Bohrloch ist verrohrt		Festlegung Projektteam
Verrohrung nimmt den Gebirgsdruck auf		Festlegung Projektteam
Bohrlochbetriebsfluid verbleibt im Bohrloch		Festlegung Projektteam
Dichte Bohrlochbetriebsfluid	1,25 kg/l	Festlegung Projektteam
Max. Hakenlast Bohranlage	1.000 Mg	Stand der Technik

Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass das Einlagern von radioaktiven Abfällen bislang in Deutschland immer im Trockenen konzipiert wurde. Die Einlagerung in einem Fluid erfordert für die Auslegung der Verrohrung und der Abfallbehälter z. B. für Korrosionsbeständigkeit weitere Forschung und Entwicklung in hohem Umfang.

Mit diesen Randparametern wurde die entsprechende Verrohrung (Casing) der Tab. 7-5 ausgelegt.

Tab. 7-5 Auflistung Auslegung der Verrohrung

Aussendurchmesser Endverrohrung	36"	(0,9144 m)
Innendurchmesser Endverrohrung	31"	(0,7874 m)
Wandstärke Verrohrung	2,5"	(0,0635 m)
Angenommene Kollapsfestigkeit	700 bar	
Minimaler freier Ringraum	1,0"	(0,0254 m)
Korrosionsfeste austenitische Stahlrohre		

Weiterhin zu berücksichtigen und als Forschungsbedarf auszuweisen sind Korrosionsprozesse, die auf die Verrohrung wirken sowie die Auslegungstemperaturen und deren Auswirkung auf die mechanische Integrität der Verrohrung. Zu beachten sind zudem Gasbildungsprozesse, die mit Korrosionsprozessen einhergehen.

Im Weiteren wird für die Konzeption der Abfallbehälter angenommen, dass durch eine geeignete Werkstoffwahl ein langzeitstabiles System konzipiert ist, welches den Gebirgsdruck für eine etwaige Rückholung bis zum Verschluss des Bohrlochs bzw. Bergbarkeit aufnimmt.

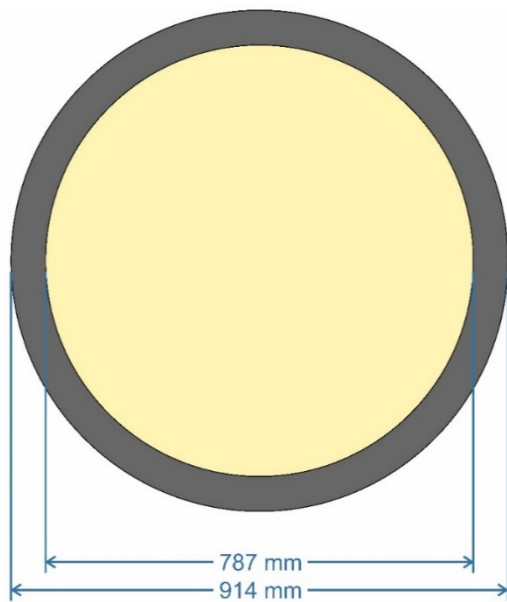


Abb. 7-3 Verrohrung des Bohrlochs

Nach Auslegung der Verrohrung, dem definierten minimalen freien Ringraum zur Einbringung der Behälter in das Bohrloch und dem bekannten minimalen Durchmesser des Abfallbehälters Innen ergibt sich eine maximale Wandstärke des Abfallbehälters von 151 mm (Abb. 7-4). Für diesen maximalen Durchmesser wird der Abfallbehälter zunächst ausgelegt (Variante A).

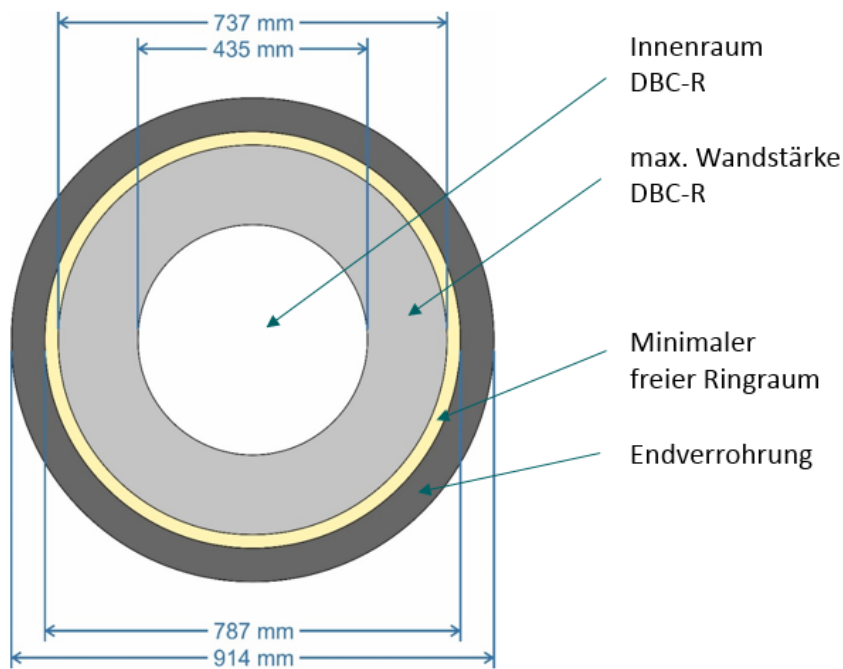


Abb. 7-4 Schnitt durch die Verrohrung mit Behälter DBC-R

7.1.2.1 Behälterabschirmung

Um den Anforderungen, die sich aus der Bohrlochgeometrie ergeben, folgen zu können, wird der Abfallbehälter DBC-R analog zum oben gezeigten Abfallbehälter BSK-R nicht selbstabschirmend konzipiert.

Mit Beginn der Einlagerung bzw. mit dem Einbringen in das verrohrte Bohrloch ist eine Abschirmung radiologisch nicht weiter erforderlich. Die Schutzfunktion wird dann durch das Gebirge und in Anteilen von der Verrohrung übernommen.

7.1.2.2 Werkstoffwahl, Korrosion

Bei der Werkstoffwahl der Verrohrung und des Behälters ist die chemische Zusammensetzung der Bohrlochbetriebsfluids sowie die Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch zu berücksichtigen. Prinzipiell bieten sich dafür korrosionsfeste austenitische Stähle mit einer hohen Kollapsfestigkeit ($\sigma_{\max} = +1.000 \text{ MPa}$) und Korrosionsfestigkeit z. B. gegen H_2S -Risskorrosion, H_2 -Versprödung und Chloride an.

Je nach Werkstoffwahl können unterschiedliche Korrosionsmechanismen auftreten. Die zur Verfügung stehenden Geometrien von Verrohrung und Abfallbehälter lassen jedoch die Aussage zu, dass durch eine geeignete Werkstoffwahl bzw. die Kombination von Werkstoffen oder Fertigungstechniken Verrohrungen und Behälter gefertigt werden können, die den Anforderungen entsprechen.

Speziell für die Bestimmung von Korrosionsraten und für Aussagen zum Langzeitverhalten von Abfallbehältern und Verrohrung (für eine etwaige Rückholung oder Bergung) besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

7.1.2.3 Weitere Anforderungen an den Behälter

Abfallbehälter müssen weiterhin folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen /BMU 10/:

In der Betriebsphase muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

Bei einer Bohrlochlagerung im Fluid ist keine Freisetzung von Aerosolen im Sinne von /BMU 10/ zu erwarten. Eine Freisetzung von Radioaktivität muss unterbunden sein.

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein /BMU 10/.

Diese Forderungen könnten durch die Auslegung des Abfallbehälters und der Verrohrung des Bohrlochs erfüllt werden.

Es gibt einen Erfahrungsschatz wie Bohrlöcher über 100 Jahre betrieben werden können. Für Extrapolationen über diesen Zeitraum hinaus werden weiterentwickelte Materialien und Materialkombinationen benötigt werden (z. B. anorganisch beschichtete Behälter, Titanbasierte Werkstoffe etc.). Daher besteht Bedarf an Forschung und Entwicklung, wenn ein Behälter gefordert wird, der die Handhabbarkeit bei einer Bergung für einen Zeitraum zwischen 100 und 500 Jahren ermöglichen soll.

7.1.3 Konzeption des Abfallbehälters DBC-R (Deep Borehole Container – Retrievable)

Mit den Parametern, die durch die Auslegung der Verrohrung ermittelt wurden, und den definierten Geometrien zur Aufnahme der Abfälle sind bereits Maße des Abfallbehälters definiert.

Zum Einbringen des Abfallbehälters wird am oberen Ende ein Element vorgesehen, an dem der Abfallbehälter gegriffen werden kann. Weiterhin wird zum Schutz dieses Elementes und um eine Stapelung zu ermöglichen die Wandstärke des Abfallbehälters über das Greifelement hinaus verlängert.

Am unteren Ende des Abfallbehälters wird ein halbkugelförmiges Element vorgesehen, um das Einbringen und Stapeln des Abfallbehälters zu erleichtern.

Es ergeben sich für eine Bohrlochteufe von 5.000 m folgende konzeptionellen Maße des Abfallbehälters:

Außendurchmesser	0,64 bis 0,74 m
Länge ca.	5,60 m
Bruttogewicht (Beladung mit Brennstäben)	bis zu 15 Mg



Abb. 7-5 DBC-R: Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für eine tiefe Bohrloch-lagerung

Mit dem gewählten Design des DBC-R und den bekannten weiteren Auslegungsparametern kann nun überprüft werden, wie viele Abfallbehälter im Bohrloch aufeinander gestapelt werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen:

- Gewichtskraft auf den untersten DBC-R durch die Auflast der übrigen DBC-Rs
- Hydrostatischer Druck auf den untersten DBC-R durch das Bohrlochbetriebsfluid
- Auftrieb der DBC-Rs im Bohrlochbetriebsfluid
- Temperatur in Auslegungsteufe und Wärmeleistung durch das Einbringen der Wärmeentwickelnden Abfälle

Die Reibungskräfte, die durch das Anlehnen der DBC-Rs an der Innenwand der Verrohrung entstehen und die Gewichtskraft auf den untersten Abfallbehälter damit reduzieren, werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

Im Vorliegenden Gutachten wurde eine Auslegungstemperatur im Bohrloch mit eingelagerten Abfällen von 250° C angenommen. Weiterführende Temperaturfeldberechnungen sind als F&E-Bedarf auszuweisen.

7.1.3.1 Variante A: Teufe 5.000 m

Für die Berechnung der Referenzvariante A wurden die Vorgaben der AG 3 der Kommission für einen Bohrllochdurchmesser von 100 cm berücksichtigt.

Für diese Variante wird das beschriebene Design der Verrohrung verwendet sowie die abgeleiteten maximalen Maße des Abfallbehälters DBC-R (Wandstärke 151 mm). Bei der Materialwahl des Abfallbehälters für die Finite-Elemente-Berechnungen wurde ein austenitischer Stahl (geglüht, nichtrostend) ausgewählt (Material-Id.: X6CrNiMoTi17-12-2). Weiterhin wurde eine Temperatur in der Behälterwandung von 250° C angenommen.

Abb. 7-6 zeigt einen Ausschnitt des für die Finite-Elemente-Berechnungen entworfenen Behälters. Für die Berechnungen der Lastfälle ist die exakte Geometrie des Abfallbehälters inkl. Boden- und Greifelement nicht erforderlich. Die Massen dieser Elemente sind jedoch berücksichtigt.

Weiterhin für die Berechnungen berücksichtigt wurde der Auftrieb, den die Abfallbehälter im Bohrlochbetriebsfluid erfahren. Dies hat eine Reduzierung der auf den untersten Behälter wirkenden Gewichtskraft zur Folge. Abb. 7-7 zeigt die Zug-Druck-Verteilung in der DBC-R (¾-Schnitt) für Referenzvariante A.

Die Ergebnisse der Auslegung des Abfallbehälters DBC-R für Variante A fassen die Tab. 7-6 und Tab. 7-7 zusammen. In einer Lagerstrecke von 3.000 – 5.000 m können 356 Behälter eingebracht werden. Es werden insgesamt 31 Bohrlöcher benötigt.

Tab. 7-6 Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante A

Variante	Bohrloch-teufe [m]	Bohrloch-durchmesser [cm]	Wandstärke Behälter [cm]	Anzahl Behälter je Bohrloch	Anzahl benötigte Bohrlöcher
A	5.000	100	15,1	356	31

Tab. 7-7 Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Variante A

Variante	Brutto-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter [Mg]	Hydrostatischer Druck auf untersten Behälter [bar]
A	14,97	42.661	4.349	613

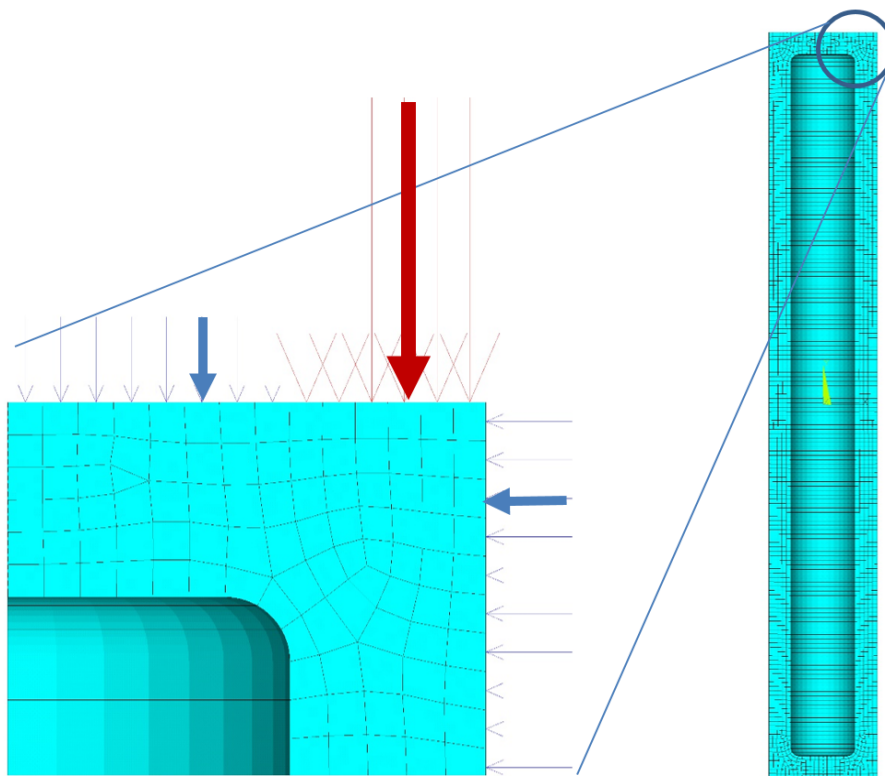


Abb. 7-6 Finite-Elemente-Netz-Darstellung der DBC-R, Referenzvariante A

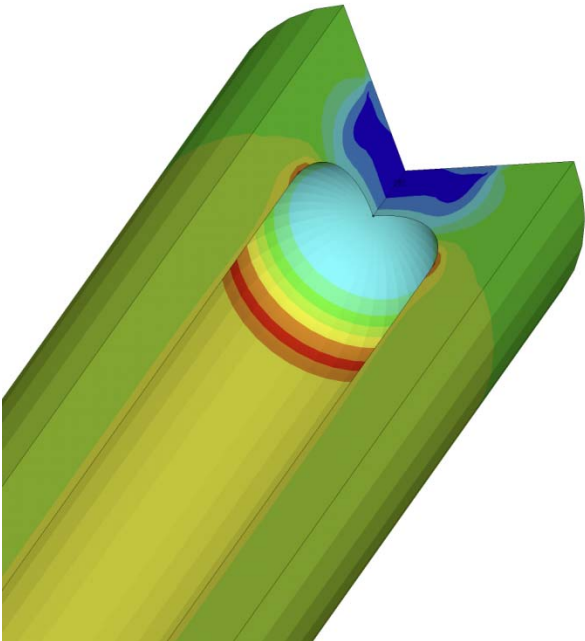


Abb. 7-7 Schema Zug-Druck-Verteilung in der DBC-R ($\frac{3}{4}$ -Schnitt), Referenzvariante A

7.1.3.2 Variante A1: Teufe 5.000 m, minimal notwendige Wandstärke

Weitere Berechnungen wurden vorgenommen, um die minimal notwendige Wandstärke des Abfallbehälters für eine Teufe von 5.000 m zu bestimmen (Variante A1). Dies erfolgt einerseits zum Systemverständnis, andererseits um zu bestimmen, welche zusätzliche Wandstärke zur Kompensation von beispielsweise Korrosionsprozessen ausgelegt werden kann. Die Berechnungen zeigen, dass die Wandstärke der DBC-R um 51 mm reduziert werden kann (Tab. 7-8, Tab. 7-9). Daraus folgt eine mögliche Reduzierung des Bohrlochdurchmessers auf ca. 90 cm.

Tab. 7-8 Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante A1

Variante	Bohrloch-teufe [m]	Bohrloch-durchmesser [cm]	Wandstärke Behälter [cm]	Anzahl Behälter je Bohrloch	Anzahl benötigte Bohrlöcher
A1, optimiert	5.000	90	10	363	31

Tab. 7-9 Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Variante A1

Variante	Brutto-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter * [Mg]	Hydrostatischer Druck auf untersten Behälter [bar]
A1, optimiert	10,31	29.600	3.017	613

Welche Geometrien von Behälter, Verrohrung und Bohrloch weiterhin möglich erscheinen, zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Berechnungen zu den Varianten B und C.

7.1.3.3 Variante B: Teufe 4200 m (reduzierte Teufe)

In der hier kalkulierten Variante B mit reduzierter Maximalteufe des Bohrlochs auf 4 200 m ist eine Reduzierung der Wandstärke der DBC-R auf 6,5 cm möglich (Tab. 7-10, Tab. 7-11). Der Bohrlochdurchmesser kann auf 80 cm reduziert werden.

Tab. 7-10 Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante B

Variante	Bohrloch-teufe [m]	Bohrloch-durchmesser [cm]	Wandstärke Behälter [cm]	Anzahl Behälter je Bohrloch	Anzahl benötigte Bohrlöcher
B	4.200	80	6,5	205	55

Tab. 7-11 Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Referenzvariante B

Variante	Brutto-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter [Mg]	Hydrostatischer Druck auf untersten Behälter [bar]
B	7,59	12.092	1.232	505

7.1.3.4 Variante C: Teufe 3600 m (reduzierte Teufe)

In den Berechnungen zu Variante C wurde die Maximalteufe des Bohrlochs weiter herabgesetzt auf 3600 m. Mit einer reduzierten Wandstärke des DBC-R von 4,5 cm ergibt sich ein erforderlicher Bohrlochdurchmesser von 75 cm (Tab. 7-12, Tab. 7-13).

Tab. 7-12 Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante C

Variante	Bohrloch-teufe [m]	Bohrloch-durchmesser [cm]	Wandstärke Behälter [cm]	Anzahl Behälter je Bohrloch	Anzahl benötigte Bohrlöcher
C	3.600	75	4,5	103	107

Tab. 7-13 Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Referenzvariante C

Variante	Brutto-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter [Mg]	Hydrostatischer Druck auf untersten Behälter [bar]
C	6,19	4.873	497	437

7.1.4 Variantenvergleich

Der Vergleich der Varianten A - C zeigt, dass die mechanische Integrität der Verrohrung und des Abfallbehälters DBC-R derart ausgelegt werden kann, dass für jede Variante die gesamte zur Verfügung stehende Bohrlochlänge mit Behältern befüllt werden kann (Tab. 7-14, Tab. 7-15).

Tab. 7-14 Vergleich Kenndaten Bohrloch und Behälter Varianten A, A1, B, C

Variante	Bohrloch- teufe [m]	Bohrloch- durchmesser [cm]	Wandstärke Behälter [cm]	Anzahl Be- hälter je Bohrloch	Anzahl be- nötigte Bohrlöcher
A	5.000	100	15,1	356	31
A1, optimiert	5.000	90	10,0	363	31
B	4.200	80	6,5	205	55
C	3.600	75	4,5	103	107

Tab. 7-15 Vergleich Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung Varianten A, A1, B, C

Variante	max. Brut- to-Masse Behälter [Mg]	Gewichtskraft auf untersten Behälter [kN]	Gewicht auf untersten Behälter [Mg]	Hydrostatischer Druck auf unters- ten Behälter [bar]
A	14,97	42.661	4.349	613
A1, optimiert	10,31	29.600	3.017	613
B	7,59	12.092	1.232	505
C	6,19	4.873	497	437

Bei einer Reduzierung der maximalen Bohrlochteufe zur Einlagerung ergeben sich nach den Auslegungsberechnungen für die Behälter deutlich geringere Bohrlochdurchmesser. Dies hat Einfluss auf die Aussage, ob eine solche Einlagerungsvariante nach heutigem Stand der Technik realisierbar erscheint und welcher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Zur Vollständigkeit zeigt Abb. 7-8 die Zug-Druck-Spannungen für Variante A und Abb. 7-9 die Varianten A1, B und C. Alle ermittelten Spannungen sind für den ausgewählten Werkstoff zulässig.

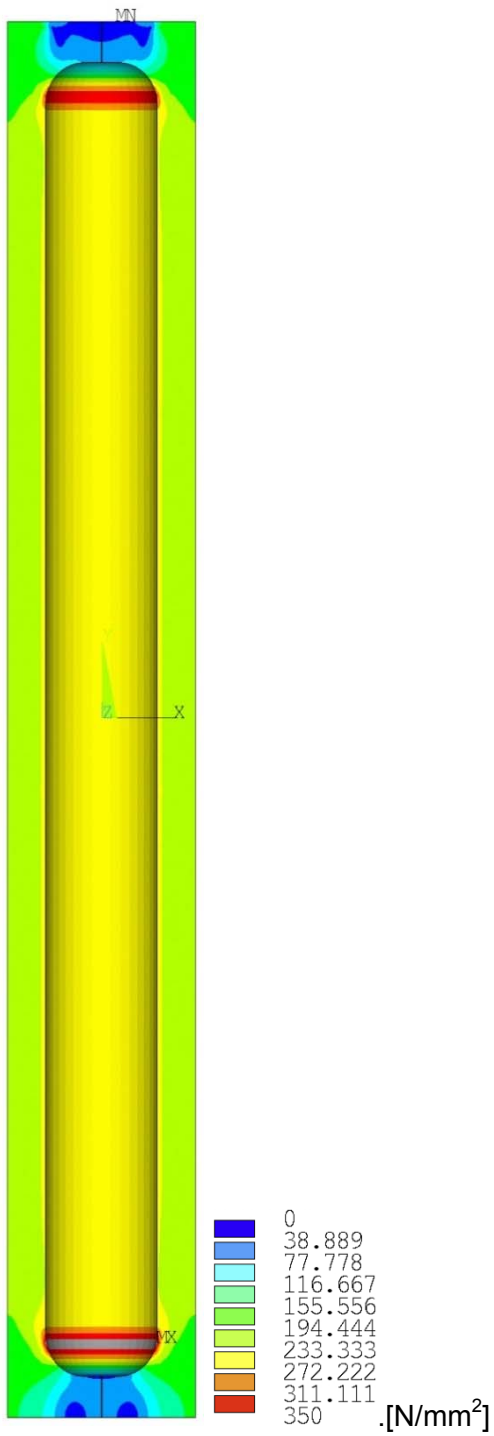


Abb. 7-8 Zug-Druck-Spannungen in der DBC-R (½ -Schnitt), Variante A

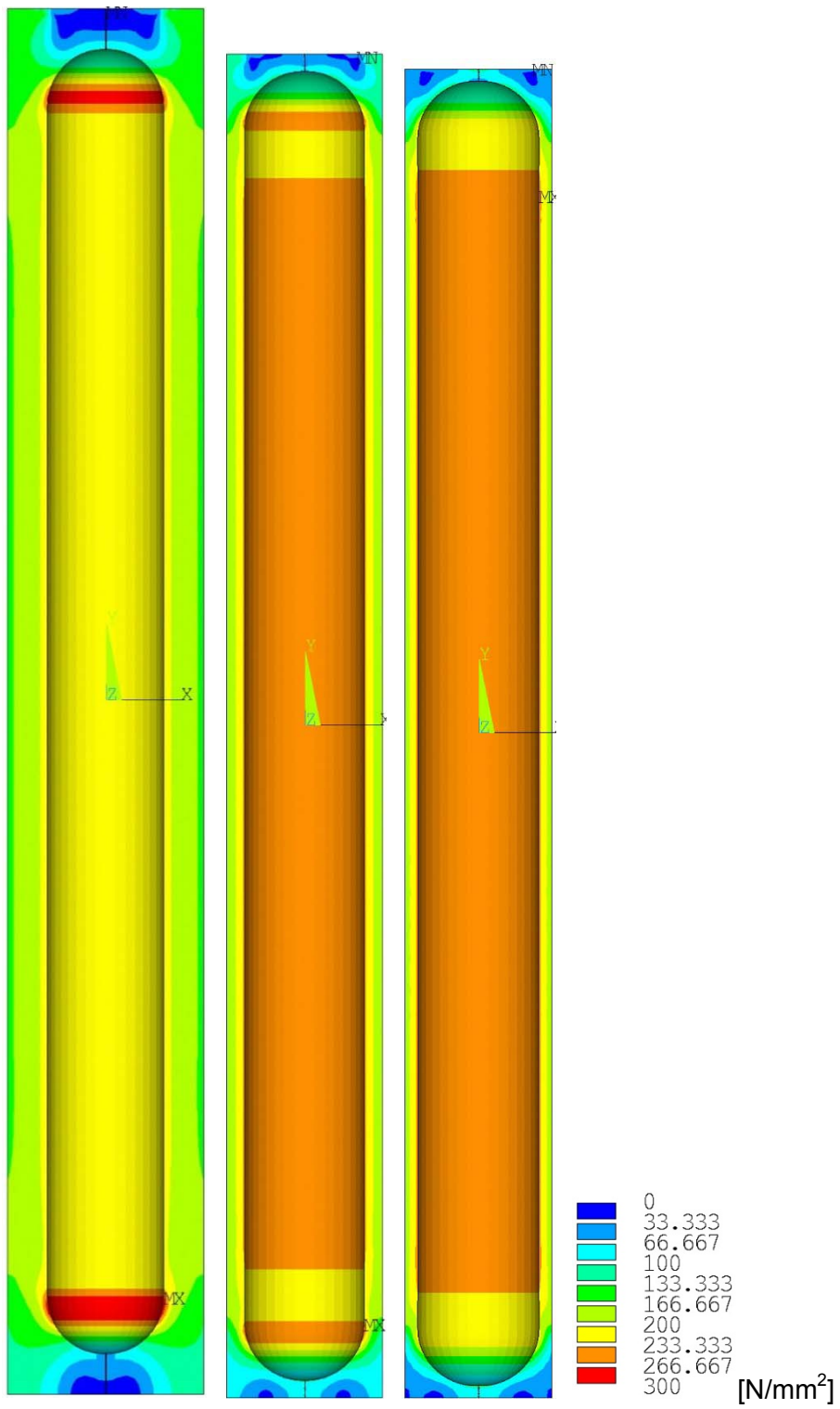


Abb. 7-9 Zug-Druck-Spannungen in der DBC-R ($\frac{1}{2}$ -Schnitt), Variante A1, B, C

7.2 Sicheres Einbringen von Behältern und Gerätschaften bis in 5.000 m Tiefe

Im vorliegenden Projekt wurden Behälter zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern konzipiert. Diese Behälter sind nicht selbstabschirmend ausgelegt. Das bedeutet, dass für das Einbringen besondere Strahlenschutzmaßnahmen für Mitarbeiter, Bevölkerung und Umwelt getroffen werden müssen. Die Einbringung mit Schutzmaßnahmen wurde von der DBE Technology GmbH /FIL 10/, /BOL 11/ für eine Bohrlochlagerung in Realversuchen mit einem Transferbehälter kalt erprobt (Einbringen und Rückholen von Kokillen; ohne Beladung der Behälter mit aktiven Abfällen).

Das nachfolgende Kapitel beschreibt den Prozess des technischen Einbringens der Abfallbehälter in großen Teufen. An Hand des Standes der Technik im konventionellen Bohrtrieb wird bewertet, ob die Einbringung der Abfallbehälter nach heutigem Stand möglich ist und ob es weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt. Dieser Bedarf an Forschung und Entwicklung wird einerseits aus konventioneller und andererseits aus kerntechnischer/radiologischer Sicht betrachtet.

7.2.1 Technik zur Einlagerung von Behältern

7.2.1.1 Anwendungen

In der Öl- und Gasindustrie, wo bis heute die größte Erfahrung mit Aufwältigungsarbeiten (Erneutes Anfassen der Bohrung) gewonnen wurde, wird üblicherweise eine temporäre Einbringung von Gerätschaften nach dem Abschluss der Bohrarbeiten und vor Beginn der Komplettierung eines Bohrloches statt. Solche Installationen können Ölförderkomponenten, wie z.B. Drosselventile, Packerelement oder Siebe sein oder auch Messinstrumente, die den Produktionsbetrieb von solchen Bohrungen untertage überwachen sollen /JOH 12/. Auch muss jedes dieser Geräte so konstruiert sein, dass es sicher nach einer gewissen Zeit zum Austausch, zur Reparatur oder Datenauslesen wieder an die Oberfläche zurückgebracht werden kann.

Der treibende Faktor für die Auswahl des Einbringungsmodus (Kabel oder Gestänge) für solche Geräte ist ihre Dimension, Komplexität und auch ihr Anschaffungswert. Eine solche Installationsarbeit kann je nach Einbringungsart wenige Stunden oder bis zu mehrere Tage

dauern und nicht selten im Kostenrahmen von dem der Herstellung der eigentlichen Bohrung liegen.

7.2.1.2 Art der Einbringung und Stand der Technik

Ein Einbringungssystem ist die technische Möglichkeit, Geräte in und aus einem Bohrloch ein- und auszubauen. In vielen Anwendungen dient dieses System auch als Stromversorgung zu den Geräten untertage sowie als „Rettungsleine“ für den Notfall. Die gebräuchlichste und einfachste Art Geräte in ein Bohrloch einzubringen ist mittels eines Stahlkabels oder Stahlseils, welches von einer Trommel abgespult wird. Der Vorteil einer Kabeleinbringung ist seine Unabhängigkeit von einem Bohrturm oder sonstiger Spezialinstallation an der Bohrstelle. Kabeleinfahrten erfordern typischerweise ein Dreibein über dem Bohrlochkopf oder im Fall von langen Gerätekombinationen einen LKW-Kran zur Hilfestellung.

Bohrlocheinfahrten mit Seil oder Stahldraht sind die einfachsten Methoden zur Aufwältigung von Bohrlochsonden und können auf großen LKW mit mehreren 1.000 m Kapazität oder an kleinen tragbaren Handwinden mit wenigen 10er bis einigen 100 m Kabel installiert sein. Diese haben jedoch keine elektrischen Leiter integriert und werden vornehmlich für die Einbringung von mechanischen oder Memory-Drucksensoren eingesetzt.

Komplexe und von Übertage mit Energie versorgte Messgeräte oder optische Sensoren können ebenfalls mit Kabel oder Seilen eingebracht werden, wobei dazugehörige Datenkabel mittels Kabelbinder in üblicherweise 15 m Abständen am Stahlseil befestigt werden. Auf diese Weise können PU-Kabelabrisse effizient vermieden werden /PRE 15/. Dennoch ist eine detaillierte Planung von solchen Installationen unter Berücksichtigung von PU-Kabelgewicht, -auftrieb und -spannung unerlässlich für eine erfolgreiche Einbringung.

Stahlarmierte elektrische Kabel wurden ursprünglich für die elektrischen Bohrlochmessungen unter Extrembedingungen in Öl- & Gasbohrungen entwickelt. Ihr Design basiert in der Regel auf zwei Lagen von gegensätzlich verdrehter Stahldrahtarmierung um ein inneres elektrisches Kabel mit mehreren oder einem isolierten elektrischen Leiter. Für Spezialanwendungen kann ein elektrischer Leiter durch ein Stahlröhrchen von gleicher Größe ersetzt werden, in dem sich bis zu 4 optische Faser befinden können /THO 85/.

Die Öl & Gasindustrie entwickelte ein Rohrmaterial, genannt Coiled Tubing (CT), welches als endloser Produktionsrohrstrang auf großen Trommeln aufgespult gelagert und in den Feldeinsatz gebracht werden kann. Dieses Rohr besteht aus einem sehr biegsamen Stahl, der

seine ursprünglichen Festigkeiten nach plastischer Verformung über die Streckgrenze wieder erreicht. Das Material besitzt aber im Gegensatz zu herkömmlichen Stahl eine deutlich reduzierte Dauerbelastung, weshalb die Anzahl der Lastwechsel begrenzt ist und im Feld sorgfältig überwacht werden muss, um einen vorzeitigen Bruch im Bohrloch zu verhindern. Darüber hinaus ist eine Bohrlöchaufwältigung mit CT auch eine aufwendige und kostspielige Feldoperation, die einem Einsatz einer mittleren Bohranlage durchaus vergleichbar sein kann /ROD 98/.

In hoch abgelenkten ($>60^\circ$) und horizontalen Bohrlöchern können Geräte mit einem Standardkabel nicht mehr eingebracht werden, so dass spezielle Gestängemethoden angewandt werden müssen, um die Reibung im Bohrloch zu überwinden. In diesen Neigungsbereichen kommt sogar CT an seine Grenzen durch eine Tendenz zum Federverdrillen (engl: Helical Buckling). Es verhält sich dann unter Verlust seiner Kompressionsfestigkeit wie ein Kabel. Unter solchen Bedingungen ist dann nur mehr der Einsatz von Bohrgestänge oder Förderrohren weiter möglich. Beispiele für CT-Anwendungen zeigt Abb. 7-10.



Abb. 7-10 Einbringungs- und Rückholungsverfahren mit Kabelwinde (links, oben), Coil Tubing Unit (mitte, unten) und Gestänge durch einen Bohrturm (rechts, oben)

7.2.1.3 Anwendung für die Einlagerung von Behältern mit radioaktiver Abfällen

Der größte Unterschied zur Öl & Gas Industrie sind die Art und Last des in ein Bohrloch einzubringenden Gerätes. Es sind i. d. R. keine Meßsonden, sondern schwere, lang gebaute und Behälter mit radioaktiven Abfällen, die an der Oberfläche am Bohrlochkopf ein völlig neu zu entwickelndes und unbemanntes Transfersystem erfordern wird, welches die Warenannahme, Inspektion, Zuführung zum Bohrloch und Einfahren zzgl. der jeweiligen Abbruchzyklen ferngesteuert und ohne jeglichen Personaleinsatz sicher bewerkstelligen muss.

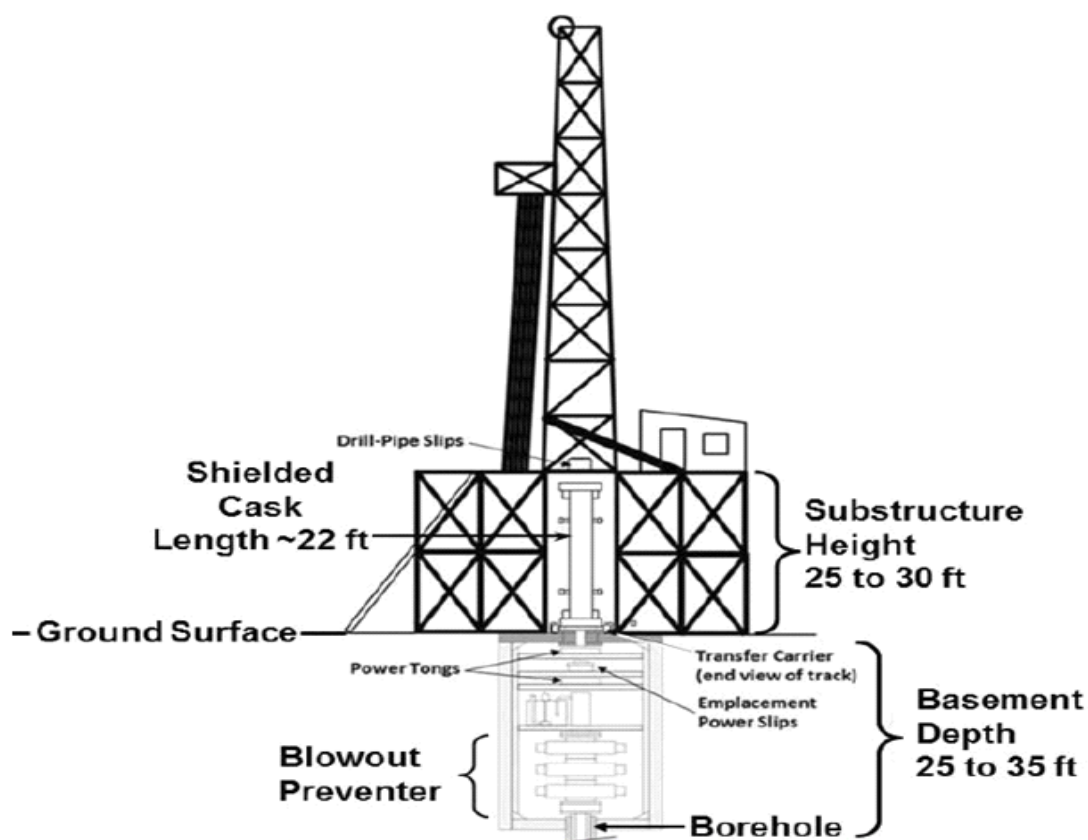


Abb. 7-11 Obertägige Transfer-Installation für die Einbringung radioaktiver Abfallbehälter in ein Bohrloch (Vorschlag aus der Technischen Evaluierung des NWTRB /BAI 00/)

Die NWTRB Studie /NWTRB 16/ beschreibt fünf Methoden zur Einbringung von Behältern in ein Bohrloch, - Kabel, Gestänge, Coil Tubing, freier Fall und Liner. Alle diese vorgeschlagenen Methoden nutzen die Schwerkraft als Einbringungsenergie und sind alle eine Abwandlung der freien-Fall-Methode, nur mit unterschiedlichen Bremsmethoden. Aktiv geschoben im Bohrloch werden die Behälter in keinem der vorgeschlagenen Verfahren.

Unter Berücksichtigung der Masse und der Strahlungsleistung der einzubringenden Behälter und den kleinen Ringräumen zur Tagesrohrtour erscheint die Freie Fall Methode ein möglicher Lösungsansatz. Man wendet diese Methode auch in der Bohrindustrie seit Jahrzehnten mit großem Erfolg bei Einwurfgeräten zur Messung der Bohrlochneigung und -richtung an.

Es wird dabei davon ausgegangen, dass das Absetzen des DBC-R mit dieser Methode zu keiner höheren mechanischen Belastung des untersten Behälters führen würde als das Absetzen der Behälter über beispielsweise ein Gestänge.

Unter der Annahme, dass außen an der Tagesrohrtour elektrische und optische Kabel, sowie Hydraulikleitungen mitgeführt und einzementiert werden, kann diese Methode nach erster Einschätzung als sicher eingestuft werden. Da der Behälter im Prinzip ein 5 m langer Zylinderkolben in einem 5.000 m langen Zylinder-Liner darstellt, kann der freie Fall hydraulisch kontrolliert gebremst und durch Umschalten der Fließrichtung des Bohrlochbetriebsfluids der Behälter im Bedarfsfall auch wieder hydraulisch zurück an die Oberfläche gehoben werden. Sensorkabel an der Außenseite des Casing können die exakte Position sowie auch den Zustand des Behälters in Echtzeit in-situ überwachen und nach Übertage melden. Kabelwinden, Coil Tubing oder Gestängemagazine können als Back-up Lösungen vorgehalten werden.

7.2.2 Technisches Einlagerungskonzept für DBC-R

Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik wird hier ein mögliches Einlagerungskonzept vorgestellt, um die notwendigen Prozessschritte zu beschreiben. Für die Einlagerung wird davon ausgegangen, dass eine Anlage für die Einlagerung genutzt wird, die vollständig eingehaust ist.

Die DBC-R werden in einem abgeschirmten Transfer- oder Transportbehältern zur Einbringanlage gebracht (siehe z.B. /FIL 10/, /NWTRB 16/), die direkt auf den Bohrlochkopf angeflanscht werden können. Die übertägige Anlage umfasst eine Bohranlage mit ausreichender Hakenlast um die Behälter an einem Bohrgestänge ablassen zu können. Zusätzlich ist eine Stahlseilsicherung vorgesehen.

Das gesamte Gestänge wird im eingehausten Bohrturm vertikal gelagert. Dabei handelt sich um eine vollständig automatisierte Anlage (diese sind z.B. bei Off-Shore Bohrungen Stand der Technik).

Ein möglicher Ablauf des Einbringens ist nachfolgend beschrieben:

1. Über eine Schleuse wird das Gestänge an den abgeschirmten Behälter gebracht und der Behälter angeflanscht.
2. Eine zusätzliche Seilsicherung wird angebracht.
3. Nach Befestigung der Behälter wird der Preventer geöffnet und der Behälter mit dem Gestänge abgelassen. Das dadurch verdrängte Schutzfluid wird in einem speziellen Auffangbecken (vollständig eingehaust) oder Tank mit zusätzlichem Auffangbecken aufgefangen. Die Fluidproben werden auf Kontamination untersucht. Dadurch wird routinemäßig die Integrität der Behälter überwacht.
4. Erreicht der Behälter den Einlagerungsbereich, wird dieser abgesetzt und das Gestänge gezogen.
5. Beim Ziehen des Bohrstranges werden die einzelnen Gestängeabschnitte und das Stahlseil auf Kontaminationen hin überwacht.

Ein ausreichend dimensionierter Bohrlochbetriebsfluidtank wird vorgehalten, um bei einer Kontamination (Havarie / Störfall) das Fluid lagern zu können (siehe Kapitel 9 bzw. 10).

Die Abb. 7-12 zeigt eine Skizze zum Einbau von Behältern in ein gesichertes Bohrloch. Bis in den Bereich der ersten geologischen Barriere ist zusätzlich zu zwei zementierten Verrohrungen eine Verrohrung (Liner-Verlängerung) eingehängt. Im Fall einer Havarie / Störfalles kann dieser zusammen mit dem Behälter geborgen werden. Eine hydraulische Schleuse ist im Bereich der Rückhalteformation in der Linerverlängerung installiert. Das Bohrlochbetriebsfluid kann so mit dem Liner geborgen werden. Für den Liner und das Bohrlochbetriebsfluid muss eine entsprechende Lagerungsmöglichkeit bei Kontamination vorgesehen werden. (siehe auch Kapitel 9).

Die Behälter werden z. B. über ein Gestänge abgelassen und zusätzlich über ein Seil gesichert. Durch die Dimensionierung der Behälter und die bremsende Wirkung des Bohrlochbetriebsfluids in der Verrohrung ist eine Beschädigung des Behälters auch bei Verlust beider Sicherungssysteme nicht zu erwarten. Durch den Einbau eines zusätzlichen „Hanging Liner“ wird die Sicherheit beim Einbau erhöht sowie eine unabhängige Rückholoption ermöglicht. Siehe dazu auch Kapitel 9.

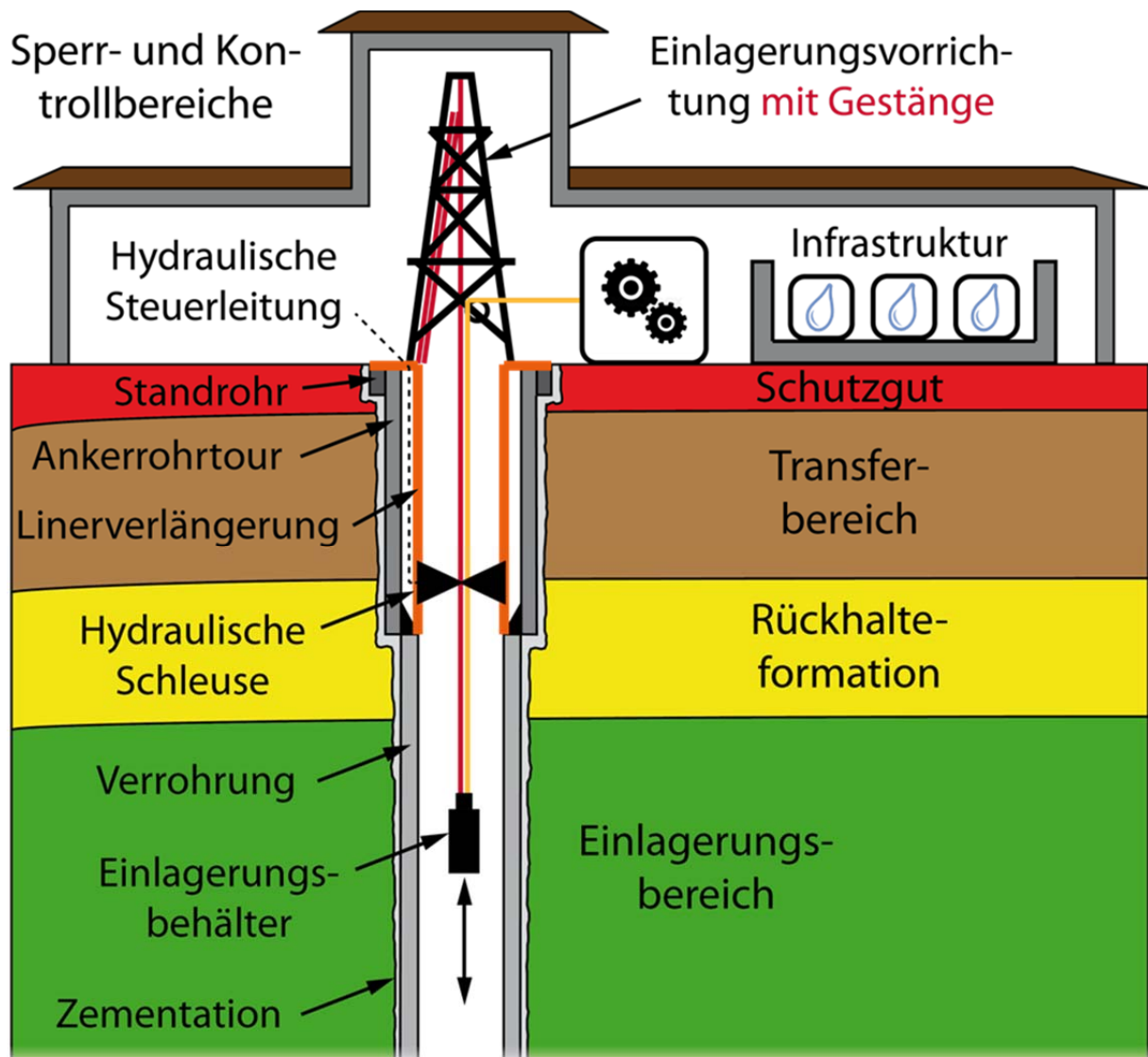


Abb. 7-12 Skizze zum Einbau von Behältern in ein gesichertes Bohrloch.

7.2.3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus technischer Sicht

Unter der Annahme, dass DBD-Bohrungen hergestellt und für den Einlagerungsbetrieb entwickelt sind, besteht mit den an diesen Betriebsstätten installierten Kransystemen kein spezieller technischer Forschungsbedarf in Richtung Sicherheit und Ladekapazität, damit zum Beispiel Behälter entweder am Kabel oder am Gestänge sicher an ihren Lagerplatz befördert werden können. Bei abgelenkten Bohrungen, wie Multilateralbohrungen mit multiplen Seitenbohrungen, sollte eine möglichst geringe Abweichung vom vertikalen Bohrlochverlauf angestrebt werden, um Reibung beim Einbau von Geräten und/oder Behältern zu vermeiden.

7.2.4 Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus kerntechnischer/radiologischer Sicht

Der Abfallbehälter DBC-R muss nach /BMU 10/ nicht selbstabschirmend jedoch aerosoldicht und handhabbar für den Zeitraum von bis zu 500 Jahren ausgeführt sein. Weiterhin müssen für das Einbringen Strahlenschutzmaßnahmen übertage für Mitarbeiter, Bevölkerung und Umwelt getroffen werden. Die DBC-R-Behälter mit hoch-radioaktiven Abfällen müssen nach der Befüllung beispielsweise in Transferbehältern transportiert werden, um eine Abschirmung sicherzustellen.

Alle übertägigen Prozesse der Einlagerung müssen unter Gewährleistung des Strahlenschutzes (inkl. des radiologischen Monitorings) ablaufen. Dies bedeutet, der Abfallbehälter muss mannos für die Einlagerung aus dem Transferbehälter entnommen werden, in die Senkrechte gedreht werden und von der Einbringanlage in das Bohrloch abgelassen werden. Ansätze für einen solchen Prozess haben Realversuche der DBE Technology /FIL 10/, /BOL 11/ erfolgreich gezeigt (Abb. 7-13).

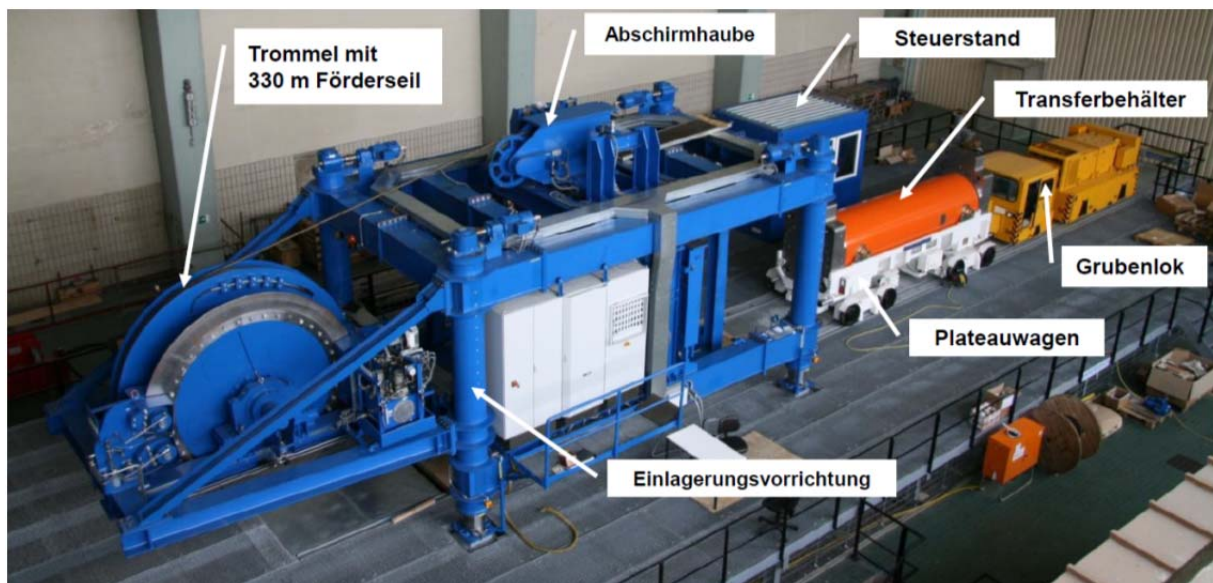


Abb. 7-13 Einlagerung und Rückholung von Kokillen aus einem Bohrloch /FIL 10/, /BOL 11/

Für die Detail-Konzeption einer solchen Anlage zur Einbringung von Behältern in tiefe Bohr- löcher sind jedoch noch erhebliche Entwicklungsarbeiten erforderlich. Dies betrifft ein Behäl- terkonzept hinsichtlich deren Handhabbarkeit für bis zu 500 Jahre und die Technologie zur Einbringung unter Strahlenschutzbedingungen.

7.3 Literatur Kapitel 7

- /BAI 00/ Bailey, W., Couët, B., Lamb, F., Simpson, G., Rose, P.: Taking a calculated risk, *Oilfield Review*, Bd. 12, Nr. 3, S. 20–35, 2000.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS, Bd. 281, 285 S., ISBN 9783939355571, Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Köln, 2012.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-48-9: Köln, 2011.
- /FIL 10/ Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M., Wehrmann, J.: Optimization of the direct disposal concept by emplacing SF canisters in boreholes. Final report, Hrsg.: DBE Technology GmbH, TEC-10-2009-AB, DOI 10.2314/GBV:638508924, 2010.
- /JOH 12/ Johnson, E., Land, J., Lee, M., Robertson, R.: Landing the Big One—The Art of Fishing, *Oilfield Review*, Bd. 2013, Nr. 24, S. 26–35, 2012.
- /NWTRB 16/ Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy, Hrsg.: Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), 70 S.: Arlington, Virginia, 2016, zitiert am 8. Februar 2016.

- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-54-0: Köln, 2011.
- /PRE 15/ Prevedel, B., Bulut, F., Bohnhoff, M., Raub, C., Kartal, R.F., Alver, F., Malin, P.E.: Downhole geophysical observatories. Best installation practices and a case history from Turkey, International Journal of Earth Sciences, Bd. 104, Nr. 6, S. 1537–1547, DOI 10.1007/s00531-015-1147-5, 2015.
- /ROD 98/ Rodriguez, A., et al.: Coiled Tubing Technology (1995-1998) DEA.67 Phase II. Project to Develop and Evaluate Coiled Tubing and Slim-hole Technology, TR 98-10, Maurer Engineering: Houston, TX, 1998.
- /THO 09/ Tholen, M.: Inventar chemotoxischer Stoffe. Forschungsvorhaben: Chemisch-toxische Stoffe in einem Endlager für hoch-radioaktive Abfälle (CHEMOTOX), APII, DBE Technology GmbH: Peine, 31. August 2009, erreichbar unter http://chemotox.oeko.info/dokumente/APII_Inventar.pdf.
- /THO 85/ Thompson, R.E.: Armored optical fiber cable, U.S. 4523804, 1985.

8 Geomechanik und Stabilität

8.1 Einleitung

Der limitierende Faktor bei der Herstellung von tiefen Untertagebauwerken, wie Tiefbohrungen, Tunneln, Stollen ist die geomechanische Stabilität. Mit zunehmender Teufe steigen die Spannungen an der Bohrlochwand an und erreichen bzw. überschreiten ab einer gewissen Tiefe die Festigkeit des Gesteins. In diesem Fall kann es zum Bruch an der Bohrlochwand führen. In der Regel ändert dies den Querschnitt der Untertageöffnung. Dies muss aber noch nicht dazu führen, dass die Stabilität des Bauwerks nicht mehr beherrschbar ist.

Für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle und die technische Realisierung eines geologischen Tiefenendlagers sind die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie das tektonische Spannungsfeld und seine räumlich-zeitliche Variation wichtige Parameter. Der gegenwärtige Spannungszustand ist beispielsweise ein wichtiger Parameter, um das Reaktivierungspotential von tektonischen Störungen /MOE 09/, /MOR 96/ und somit auch die künftige tektonische Entwicklung einer Region über längere Zeiträume zu prognostizieren. Auch für die Beurteilung der Stabilität von Untertagebauwerken und Bohrungen ist der Spannungszustand von zentraler Bedeutung /FUC 01/, /MOE 11/, /TIN 05/, /ZAN 12/, /ZOB 10/. Weitere Beispiele sind die Tiefenlage des Endlagers im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit, die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins, das Selbstabdichtungsvermögen, die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, das Auftreten von Erdbeben oder die potentielle Reaktivierung von Störungen als Migrationswege für Fluide und Radionuklide.

Entsprechend stuft beispielsweise die schweizerische Nationale Genossenschaft für die bergmännische Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) etwa 40% ihrer Standortindikatoren als maßgeblich vom Spannungszustand beeinflusst ein /NAGRA 08/. Ähnliches gilt für die Standortauswahlkriterien in Frankreich, Schweden, Belgien und den Vereinigten Staaten /BGR 15/. Die Abschätzung der rezenten Spannungsverteilung und deren zukünftige Veränderungen durch den Bau des geologischen Tiefenlagers sowie langfristig durch endogene und exogene geologische Kräfte (z.B. Plattentekto-

nik, Eisaufplast, Erosion) sind daher bereits in die frühe Aufsuchungs- bzw. Planungsphase eines potentiellen Endlagerstandortes einzubeziehen. Diese zentrale Bedeutung der Geomechanik ist in den letzten Jahren zunehmend erkannt worden. Institutionen wie etwa die schweizerische NAGRA oder die Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) berücksichtigen bei der Standortsuche und Planung, bzw. Lizenzierung von Endlagern für radioaktive Abfälle verstärkt diesen Aspekt, z.B. durch spezielle geomechanische Messprogramme und geomechanisch-numerische Modellierungen /LUN 09/, /HEI 13/, /MAR 07/, /MAR 14/.

8.2 Definitionen zum Spannungstensor

Der Spannungszustand wird durch den symmetrischen Spannungstensor mit neun Komponenten beschrieben (Abb. 8-1). Durch Hauptachsentransformation kann dieser in einem Koordinatensystem dargestellt werden, in dem nur noch in den Komponenten der Hauptdiagonalen des Spannungstensors Werte ungleich Null enthalten sind. Die drei Orientierungen und drei Magnituden dieser senkrecht zueinander stehenden drei Hauptspannungen beschreiben dann den Spannungszustand eindeutig. In den Geowissenschaften die Annahme getroffen, dass die vertikale Spannung S_v eine Hauptspannung ist. Diese Annahme ist der Regel wird oft in erster Näherung gerechtfertigt und bedeutet, dass die maximale und minimale horizontale Spannung S_{Hmax} und S_{Hmin} auch Hauptspannungen sind. Somit braucht man für die eindeutige Beschreibung des Spannungszustandes die Orientierung der beiden horizontalen Spannungen und die Magnituden von S_v , S_{Hmax} und S_{Hmin} (Abb. 8-2).

Da in der geowissenschaftlichen Literatur Begriffe zum Spannungszustand der Erdkruste unterschiedlich definiert sind, werden an dieser Stelle die Begriffe, wie sie in dem vorliegenden Gutachten verwendet werden, vorgestellt. Darüber hinaus sei hier auch angemerkt, dass die Kompression in den Geowissenschaften im Gegensatz zu den Ingenieurwissenschaften ein positives Vorzeichen hat.

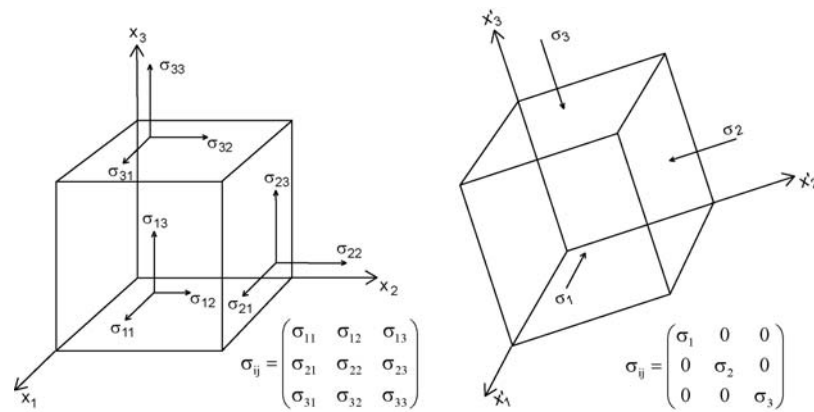


Abb. 8-1 Komponenten des Spannungstensors S_{ij} und Hauptspannungen. Der Spannungszustand wird durch die neun Komponenten des Spannungstensors S_{ij} beschrieben (linkes Bild). Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Spannungstensors ($S_{ij} = S_{ji}$ für $i \neq j$) sind nur sechs Komponenten unabhängig voneinander. D. h., jeder Spannungstensor kann durch Hauptachsentransformation in einem Koordinatensystem dargestellt werden, in dem nur noch in der Hauptdiagonalen des Spannungstensors Werte stehen (rechtes Bild). Diese sind die senkrecht zueinander stehenden Hauptspannungen. Die drei Orientierungen und drei Magnituden dieser Hauptspannungen beschreiben dann den Spannungszustand.

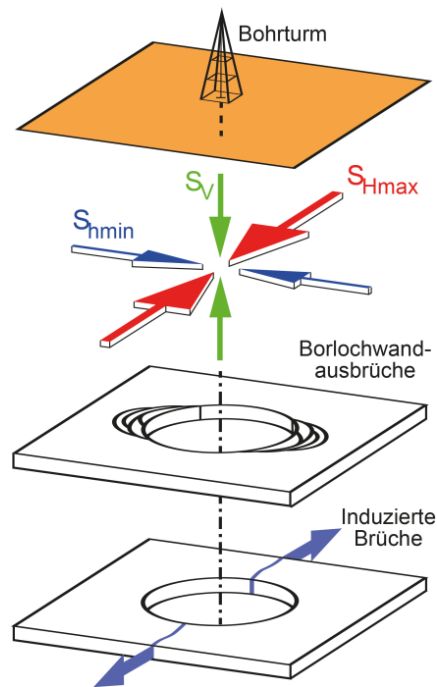


Abb. 8-2 Simplifizierte Annahme der Spannungsorientierung. Vor allem in Sedimentbecken mit geringer Topographie und lateral-homogenen Gesteinseigenschaften wird oft angenommen, dass die vertikale Spannung (S_V) eine Hauptspannung ist. Senkrecht dazu stehen die minimale und die maximale horizontalen Hauptspannung (S_{hmin} und S_{Hmax}). In einem Blattverschiebungs- oder Abschiebungsregime entwickeln sich Bohrlochwandausbrüche parallel zur S_{hmin} Orientierung, während hydraulisch induzierte Risse in der Ebene senkrecht zur S_{hmin} Orientierung aufbrechen. Im Überschiebungsregime treten hydraulisch induzierte Risse horizontal auf.

8.3 Spannungsbeiträge und Spannungsmuster

Das Spannungsfeld wird im Wesentlichen von den geodynamischen Prozessen, der Struktur (Dichte- und Festigkeitsverteilung) kontrolliert. Diese Beiträge können auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirken /LJU 03/. Die Bewegung der tektonischen Platten bestimmen beispielsweise den langwelligen Anteil des Spannungsfeldes (> 1.000 km). Dieser ist in der Regel über große Zeiträume (> 1 Ma) konstant /BER 00/, /HEI 10/, /HEI 10/, /ZOB 92/, /ZOB 89b/. Im Gegensatz dazu liefern große, aktive tektonische Störungszonen und Massenveränderungen wie Eisauflast und Vulkanismus (oder auch nicht natürlich: großmaßstäblicher Bergbau, s.u.) regionale Spannungsbeiträge, die transiente Deformationen erzeugen und somit das Spannungsfeld zeitlich

verändern (Abb. 8-3). Lokal können die Spannungsbeiträge dritter Ordnung z.B. aufgrund von lokalen Dichte- und Festigkeitskontrasten oder aktiven Störungssegmenten eine große Rolle spielen /HEI 07/. Aus der Überlagerung aller natürlichen Spannungsbeiträge resultiert dann der in situ Spannungszustand. Tab. 8-2 gibt eine Übersicht über die wesentlichen natürlichen Spannungsbeiträge und die Wellenlänge des daraus resultierenden Spannungsmusters. Eine graphische Übersicht über die Beiträge des Spannungsfeldes unter Verwendung der in Tab. 8-1 genannten Definition gibt Abb. 8-3.

Tab. 8-1 Definition von Begriffen zum Spannungstensor²⁶.

Begriff	Symbol	Definition/Kommentar
In situ Spannungszustand <i>in-situ stress state</i>	-	Summe aller natürlichen Spannungsbeiträge und aller natürlichen Prozesse, die die Spannungen an einem bestimmten Ort im ungestörten Gestein beeinflussen.
Gestörter in situ Spannungszustand <i>disturbed in-situ stress state</i>	-	Der durch den nicht-natürlichen Eingriff in den Untergrund (Staudammauflast, Bohren, Tunnel, Minen etc.) veränderte in situ Spannungszustand.
Residuale/remanente Spannungen <i>remanent/ residual stresses</i>	-	Damit werden durch frühere geologische Prozesse induzierten Spannungen beschrieben, die über lange Zeiträume als sogenannte residuale/remanente Spannungen gespeichert werden, auch wenn die verursachenden Prozesse schon abgeschlossen sind /FRI 72/, /MCG 78/, /ZAN 10/. Synonym wird auch der Begriff remanente Spannungen verwendet. In diesem Bericht wird der Begriff remanente Spannungen verwendet.
Transiente Spannungen <i>transient stresses</i>	-	Die Fernfeld-Kräfte der Plattentektonik sind in erster Näherung über große Zeiträume (< 100 ka) und große Distanzen konstant. In der Nähe von aktiven Störungen ändert sich der lokale Spannungszustand durch den seismischen Zyklus kontinuierlich. Dies sind transiente Spannungen, die auch durch Kriechprozesse zum Spannungsfeld beitragen.
Tektonische Spannungen <i>tectonic stresses</i>	-	Die tektonischen Spannungen sind nach Engelder /ENG 92/ die horizontalen Komponenten des in situ gemessenen Spannungszustandes, die von einem gegebenen Referenzspannungszustand (uniaxial, lithostatisch) abweichen. Die Definitionen sind in der Literatur jedoch uneinheitlich.
Spannungsmuster <i>stress pattern</i>	-	Betrachtung der Gleichförmigkeit bzw. Variabilität eines bestimmten Anteils des Spannungstensors wie z.B. der S_{Hmax} Orientierung.
Hauptspannungen <i>principal stresses</i>	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Spannungstensors kann dieser durch Transformation in das Hauptachsensystem derart dargestellt werden. Die drei verbleibenden Komponenten in der Hauptdiagonalen sind die Hauptspannungen für die gilt $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.
Differenz-Spannungen <i>differential stresses</i>	$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$	Differenz der größten und kleinsten Hauptspannung.
Vertikale Spannung <i>vertical stress</i>	S_v	Die Magnitude von S_v wird in erster Näherung durch das Integral über ρz , mit g der Schwerebeschleunigung, ρ der Dichte und z der Tiefe bestimmt. Nur an der Erdoberfläche muss S_v einer der drei Hauptspannungen entsprechen.
Orientierung der maximalen und minimalen horizontalen Spannung	S_{Hmax}, S_{Hmin}	Wenn die vertikale Spannung S_v eine Hauptspannung ist, dann sind auch S_{Hmax} und S_{Hmin} Hauptspannungen des Spannungstensors. Ist S_v keine Hauptspannung, so werden die Projektionen der Hauptspannungen in eine horizontale Ebene als Orientierungen von S_{Hmax} und S_{Hmin} verwendet.
Spannungsregime <i>stress regime</i>	-	Bezieht sich auf Spannungsmagnituden: Das Spannungsregime drückt das Verhältnis der Hauptspannungsmagnituden zueinander aus. Das Spannungsregime kann auch als kontinuierlicher Wert definiert werden und kann zum Beispiel über das <i>Regime Stress Ratio</i> (RSR) von Simpson /SIM 97/, das zwischen 0 und 3 liegt, dargestellt werden.
Tektonisches Regime <i>tectonic regime</i>	-	Bezieht sich primär auf die Störungskinetik unter Nutzung der Spannungsmagnituden: Aufschiebung, Abschiebung und Blattverschiebung nach Anderson /AND 05/. Streng genommen gilt: Nur wenn die Störung optimal im Spannungsfeld orientiert ist, muss das Spannungsregime dem tektonischen Regime entsprechen /CÉL 95/, /HER 11/. Abschiebung: $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$, Aufschiebung: $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$, Blattverschiebung: $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$

²⁶ Die Definitionen erheben nicht den Anspruch der Vollständigkeit, da in der geowissenschaftlichen Literatur keine einheitlichen Vorgaben existieren. Dies gilt insbesondere für den Gebrauch der formal nicht definierbaren Begriffe. Siehe zum Thema krustale Spannungen /ENG 92/, /JAE 07/, /ZAN 10/, /ZOB 10/.

Tab. 8-2 Übersicht der wichtigsten natürlichen Spannungsbeiträge der Erdkruste. Die relative Bedeutung der Beiträge zum Spannungszustand an einem bestimmten Punkt lässt sich aus der Übersicht der Wellenlänge nicht ableiten, da diese von den Magnituden, die durch den jeweiligen Beitrag am interessierenden Ort erzeugt werden, bestimmt wird.

Struktur/Prozess	Beispiele	Einflussbereich ¹
Plattenrandkräfte	Kollision (<i>collisional resistance</i>), Spreizung an Mittelozeanischen Rücken (<i>ridge push</i>)	10 ³ -10 ⁴ km
Volumenkräfte	Dichte- und Festigkeitskontraste: z.B. Gebirgszüge, Kontinentalränder, Moho und Sedimentbecken	10 ² -10 ⁴ km
Biegespannungen	Vergletscherung (auch frühere), Subduktionszonen	10 ² -10 ⁴ km
Starkbeben	Plattengrenzen, Intraplattenbeben	10-10 ² km
Entkopplungshorizonte	Evaporitschichten, Störungen mit geringem Neigungswinkel, Schichten mit hohem Porendruck	10-10 ² km
Geologische Strukturen	Störungen, Bruchsysteme, Diapire, Faltensystem	0.01-10 km
Thermische Spannungen	Magmaintrusionen, Advektion, Fluidzirkulation	0.01-10 km

¹ Die hier gemachten Angaben sind eine grobe Abschätzung der Größenordnung des räumlichen Einflussbereiches, die je nach Region stark variieren kann.

Darüber hinaus müssen zu den natürlichen Beiträgen auch lokale, anthropogene Einflüsse berücksichtigt werden, wie beispielsweise das Fluten von Staudämmen und die dabei entstehende, teils saisonal variierende Auflast, Änderungen von Porenfluiddrücken oder Bergbautätigkeiten (Minen, Tunnel, Bohrungen). Durch die Entnahme von Gesteinsmaterial (oder Auflast durch eine Wassersäule) wird der Spannungszustand lokal und in erster Näherung instantan verändert. Auf Reservoir-Skala wird durch Entnahme oder Injektion von Fluiden und Gasen der Spannungszustand räumlich und zeitlich verändert. Die dadurch ausgelösten transienten Prozesse der Fluidmigration im porösen Gestein und der Temperaturänderungen durch Wärmeleitung und Konvektion als auch chemische Umwandlungsprozesse können das Spannungsfeld lokal substantiell beeinflussen. Wie sich diese Bergbaumaßnahmen auswirken hängt maßgeblich von der Gesteinsfestigkeit und dem in situ Spannungsfeld ab. Das in situ Spannungsfeld ist hierbei der ungestörte Spannungszustand im Untergrund, der vor dem Eingriff herrscht. Bei bereits hoher differentieller Spannung des in situ Spannungsfeldes können bereits kleine Spannungsänderungen zur Initialisierung von plastischen Prozessen führen. Umgekehrt können bei geringen differentiellen Spannungen schon kleine Änderungen der Spannungsmagnituden zu einem Wechsel des Spannungsregimes und zu erheblichen Rotationen der S_H Orientierung führen /MÜL 10/, /SON 90/.

Die Änderung des Spannungszustandes durch Bergbau hängt unter anderem vom Fluidruck, von der Produktionsrate, vom Volumen und von den physikalischen Eigenschaften des Gesteins ab. Hinzu kommt, dass die Prozesse, die durch den Eingriff in den in situ Spannungszustand induziert werden, gekoppelt und nicht-linear sein können (z.B. Fluiddiffusion in der Gesteinsmatrix, Bruchausbreitung, thermo-hydro-mechanische Prozesse, thermo-chemische Reaktionen).

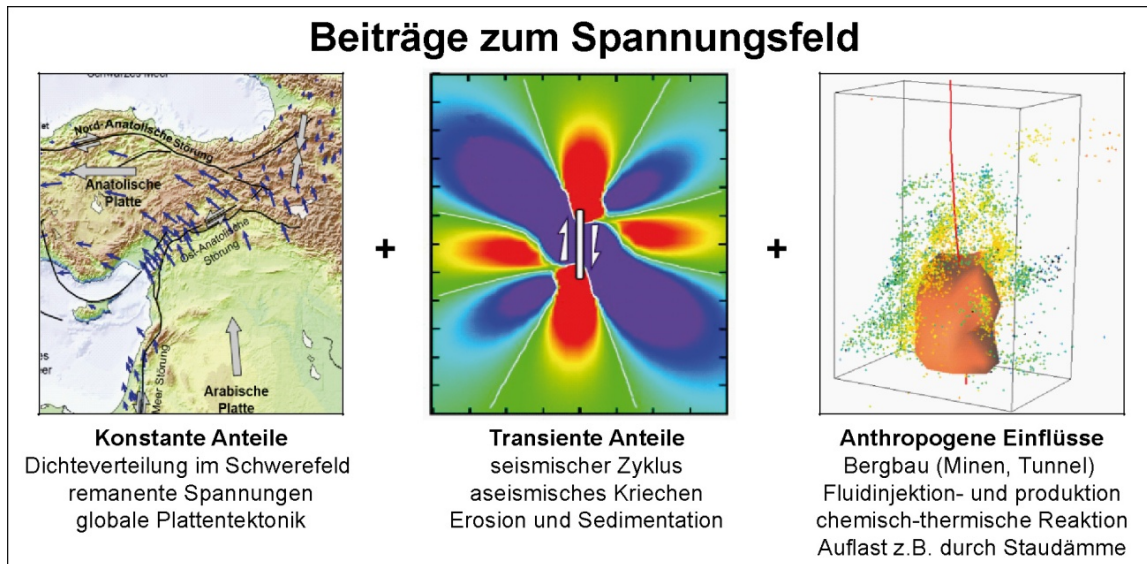


Abb. 8-3 Beiträge des Spannungsfeldes. Die Beiträge des Spannungsfeldes lassen sich in drei Anteile, die auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirken, unterteilen:

(1) Fernfeldanteil durch: Dichteverteilung im Schwerefeld, remanente Spannungen, die durch bereits abgeschlossene Prozesse noch im Gestein vorhanden sind und Plattentektonik (z.B. Subduktion und Kollision von tektonischen Platten).

(2) Transiente Anteile: Massenumlagerung (Erosion, Sedimentation, Vergletscherung, Spannungen durch post-glaziale Hebungen und nicht isostatisch kompensierte Spannungsänderungen und seismischer Zyklus.

(3) Einfluss durch anthropogene Eingriffe, die in erster Näherung zeitunabhängig (Tunnelbau) als auch zeitabhängig sein können (Fluidinjektion oder -entnahme mit variablen Fließraten).

Abb. 8-3 skizziert die Hauptanteile des krustalen Spannungszustandes. Damit wird in diesem Bericht der aktuelle dreidimensionale Spannungszustand bezeichnet, der zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem Ort herrscht, ungeachtet ob dieser durch natür-

liche Prozesse oder technische Eingriffe bestimmt ist. Der Spannungszustand kann sich je nach Region aus drei Hauptanteilen zusammensetzen (Abb. 8-3):

(1) Dem langwelligen Fernfeldanteil aufgrund inhomogener Verteilung der Gesteinsdichte und -festigkeit im Schwerfeld der Erde, den remanenten Spannungen aufgrund der geologischen Geschichte und durch die globale Plattentektonik.

(2) Transiente Spannungsanteile aufgrund von Massenumlagerung wie Erosion und Sedimentation, aktive Störungen (seismisch und aseismisches Kriechen) und das Abschmelzen der Gletscher wodurch ebenfalls transiente Prozesse durch Rückfederung ausgelöst werden.

(3) Spannungen aufgrund von anthropogenen Einflüssen z.B. durch Auflasten, Untertagebau und Fluidbergbau. Je nach betrachteter Zeit- und Raumskala können die anthropogenen Beiträge auch zeitabhängig sein.

8.4 **Spannungsindikatoren**

Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Methoden und Techniken, mit denen man den Spannungszustand in der Erdkruste bestimmen kann. Im Wesentlichen lassen sich zwei Typen von Methoden unterscheiden: diejenige, die das intakte Gesteinsverhältnis stören (z.B. Überbohrverfahren, hydraulische Rissinduzierung) und diejenige, die auf Beobachtungen des Gesteinsverhaltens basieren ohne Beeinflussung durch die Messmethode selbst (z.B. Herdflächenlösungen, Orientierung geologisch-tektonischer Strukturen, Bohrlochrandausbrüche). Mit allen Methoden lässt sich zumindest die Orientierung von S_{Hmax} bestimmen. Nur wenige Methoden haben das Potential den vollständigen Spannungstensor, der den Spannungszustand (Orientierung und Magnitude) im Raum beschreibt, zu bestimmen. Einen Überblick und eine Kategorisierung der wichtigsten Spannungsindikatoren sind in Abb. 8-4 dargestellt. Weitere Details zu den einzelnen Methoden findet man in der Literatur /z.B. /ZAN 10/, /ZOB 10/.

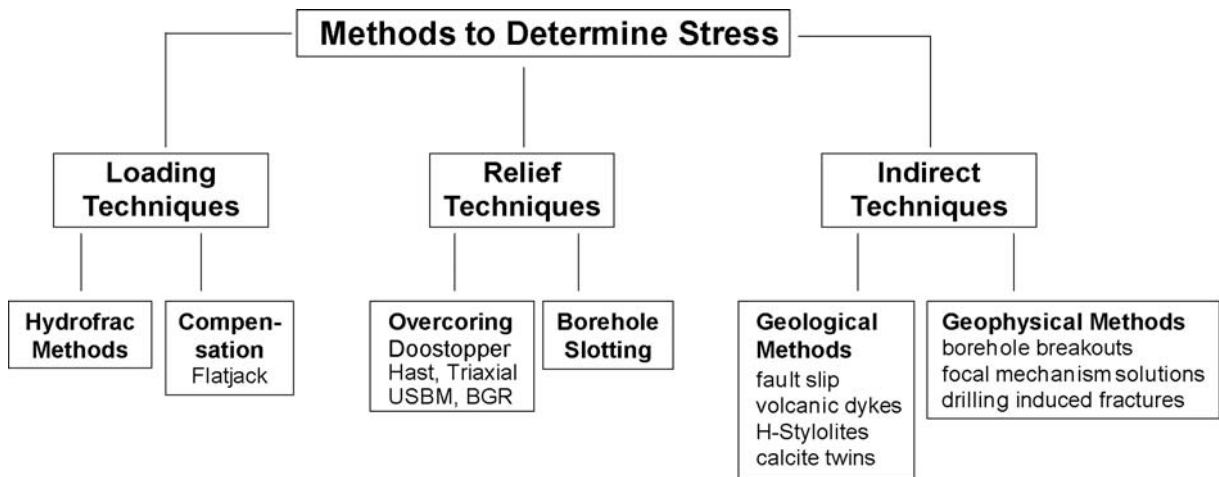


Abb. 8-4 Übersicht der Spannungsindikatoren. Übersicht der verschiedenen Methoden mit denen die S_{Hmax} Orientierung bzw. die Magnitude der kleinsten horizontalen Spannung S_{hmin} (*Loading Techniques*), oder der gesamte Spannungstensor bestimmt werden kann (*Relief Techniques*).

Die Spannungsindikatoren unterscheiden sich nicht nur methodisch, sondern insbesondere auch für welchen Zeitpunkt oder Zeitraum, für welches Volumen und für welche Tiefe die Spannungsinformation repräsentativ ist. Daten aus Bohrlochrandausbrüchen sind rezente Punktmessungen, die, wenn man von wenigen tiefen wissenschaftlichen Bohrungen wie der KTB Bohrung /BRU 97/, /ZOB 03/ absieht, nur in den oberen 6 km der Erdkruste verfügbar sind. In größeren Tiefen sind Herdflächenlösungen von Erdbeben und die daraus abgeleiteten Informationen der S_{Hmax} Orientierung und des Spannungsregimes die einzige Datenquelle. Bei den einzelnen Methoden sind äußerst unterschiedliche Gesteinsvolumina beteiligt /LJU 03/: z.B. bei den Überbohrverfahren $10^{-3} - 10^{-2} \text{ m}^3$, bei Bohrlochrandausbrüchen $10^{-2} - 100 \text{ m}^3$ und bei Herdflächenlösungen große Volumina von bis zu 10^9 m^3 . D.h., kurze Bohrlochrandausbrüche von nur wenigen Metern sind nur bedingt repräsentativ für eine größere Region, da es sich z.B. um lokale Effekte aufgrund einer durchteuften Störung oder eine lokale Dichte- oder Festigkeitsanomalie handeln kann.

8.5 World Stress Map Projekt

Die Informationen zum gegenwärtigen in situ Spannungszustand der Erdkruste werden im World Stress Map (WSM) Projekt global zusammengestellt /HEI 08/, /HEI 10/, /ZOB 91/, /ZOB 92/, /ZOB 89a/. Die WSM ist ein gemeinschaftliches Projekt von wissenschaftlichen Einrichtungen, Industriepartnern und öffentlichen Einrichtungen mit

dem Ziel das Spannungsmuster in der Erdkruste zu beschreiben und die Spannungsbeiträge zu untersuchen. Das Projekt startete 1986 im Rahmen des Internationalen Lithosphären Programms (ILP) unter der Leitung von Mary-Lou Zoback. Von 1996-2008 war die WSM eine Forschungsstelle der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Seit 2009 wird das Projekt am Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum - GFZ betrieben und weiterentwickelt. Die aktuelle WSM Datenbank 2008 hat 21.750 Datensätze /HEI 08/, /HEI 10/ und eine neue Herausgabe mit ca. 41.000 Datensätzen ist im Sommer dieses Jahres vorgesehen. Alle Daten und Informationen sind auf Website der WSM unter www.world-stress-map.org frei verfügbar.

Das Fundament für die globale Zusammenstellung der Daten aus den verschiedenen Spannungsindikatoren bildet das WSM Qualitätsschema. Es wurde während der Projektlaufzeit in Zusammenarbeit mit internationalen Experten ständig erweitert und verfeinert, um neuen Erkenntnissen und Methoden Rechnung zu tragen /HEI 10/, /SPE 03/, /ZOB 91/, /ZOB 92/. Alle Datensätze der S_{Hmax} Orientierung werden mit dem Qualitätsschema klassifiziert und in die Kategorien A bis E eingeteilt. Dabei ist A die höchste Qualitätsstufe. Erst dieses Qualitätsschema erlaubt es Spannungsinformationen, die aus völlig verschiedenen Methoden abgeleitet werden, in vergleichender Weise zusammen zu stellen. Bei der Qualitätskontrolle werden verschiedene Kriterien berücksichtigt, u.a. die Anzahl der Beobachtungen, aus denen der Mittelwert für die S_H Orientierung und dessen Standardabweichung abgeleitet wird (für A-Qualitäten muss die Standardabweichung kleiner als $< 15^\circ$ sein, für B $< 20^\circ$, für C $< 25^\circ$, und bei D $< 40^\circ$). Daten mit der Qualitätseinstufung E haben keine Aussagekraft bezüglich des Spannungsfeldes, sondern zeigen nur, dass sie schon in Bezug auf ihre Spannungsaussage untersucht worden sind.

Die vorliegenden Spannungsinformationen werden einem standardisierten Format und einer Datenqualität zugeordnet, um Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit auf einer globalen Skala zu gewährleisten. Die Visualisierung der Daten erfolgt mit Spannungskarten in denen die S_H Orientierung aus den oberen 40 km der Erdkruste und, wenn vorhanden, das Spannungsregime dargestellt wird (Abb. 8-5). Das Spannungsregime drückt dabei das Verhältnis der Hauptspannungen zueinander aus und gibt einen Hinweis auf den bevorzugten Mechanismus der Störungsreaktivierung, also auf das tektonische Regime. Streng genommen gilt jedoch: Nur wenn die Störung optimal im Spannungsfeld orientiert ist, muss das Spannungsregime auch dem tektonischen Regime entsprechen /AND 05/, /CÉL 95/, /CÉL 10/, /HER 11/.

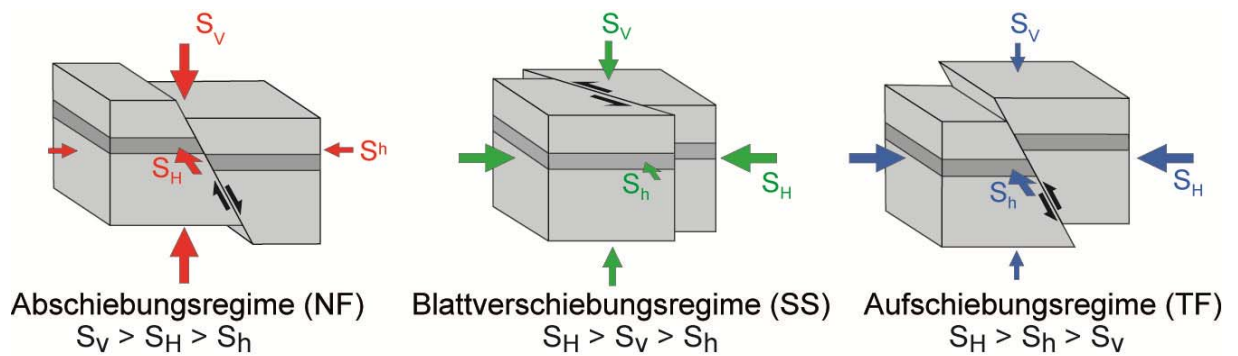


Abb. 8-5 Spannungsregime und Verhältnis der Spannungen zueinander.

Abb. 8-6 zeigt die aktuelle, neu kompilierte Spannungskarte von Deutschland aus der WSM Datenbank 2016 für Deutschland und angrenzende Gebiete (Reiter et al., 2016).

Allerdings erhält man Informationen zum Spannungsfeld immer nur punktuell und unvollständig, da für die meisten WSM Datensätze nur die Information zur S_H Orientierung und das Spannungsregime, also das relative Verhältnis der Hauptspannungen, bekannt ist. Nur für sehr wenige Datensätze sind auch die Magnituden einer oder mehrerer Hauptspannungen bekannt. Für geomechanisch-numerische Modelle sind jedoch gerade die Informationen zu den Spannungsmagnituden essentiell für die Kalibration der Modelle /HEI 13/, /HEN 10/, /HER 11/, /REI 14/; die Daten zur Orientierung sind für die Kalibration in der Regel nicht hinreichend.

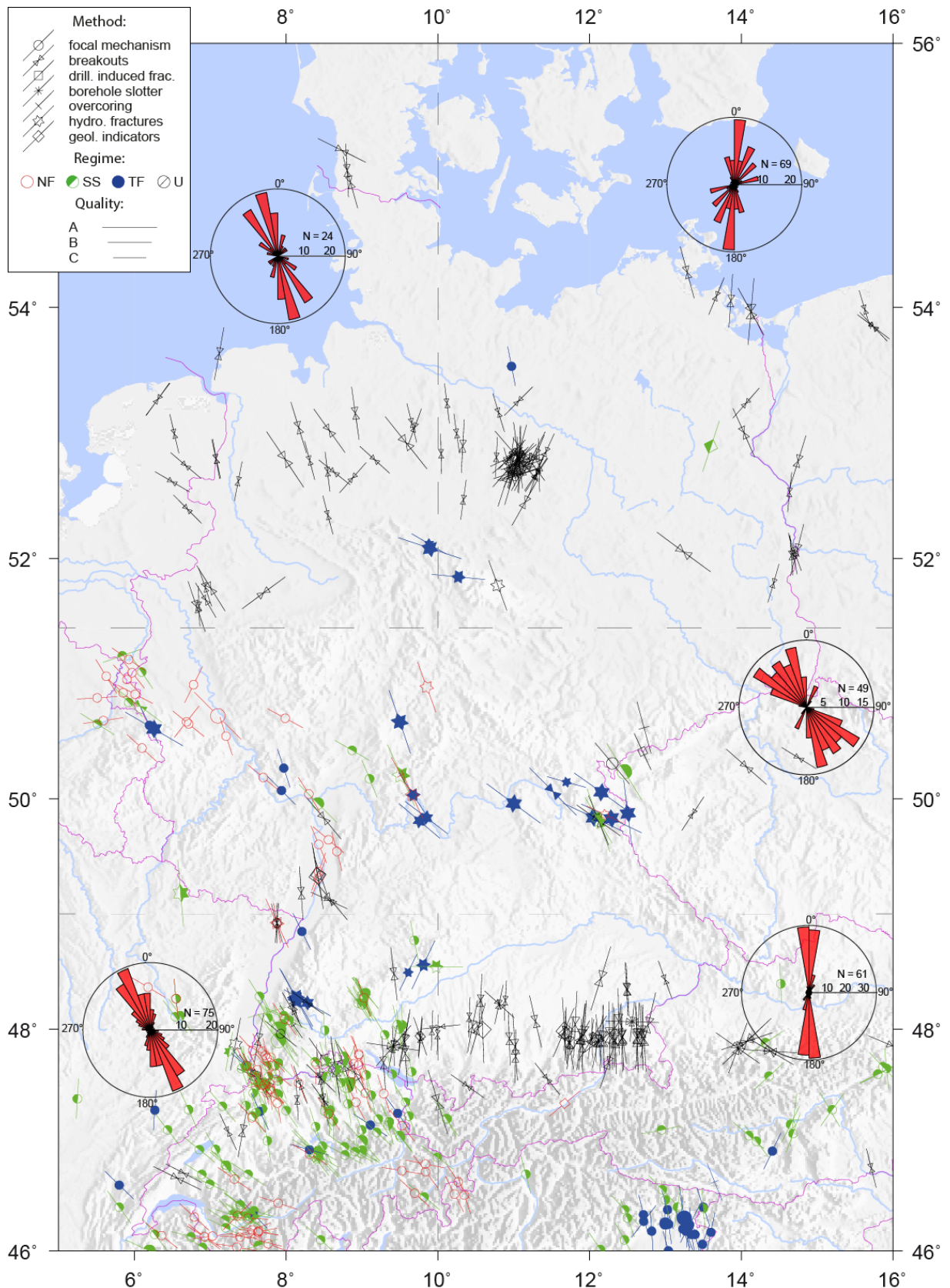


Abb. 8-6 (vorhergehende Seite) Spannungskarte Deutschland und angrenzende Gebiete (Reiter et al., 2016). Dargestellt sind Datensätze mit A-C Qualität der World Stress Map Datenbank 2016. Linien zeigen die Ori-

entierung der größten horizontalen Spannung S_{Hmax} . Die Länge der Linien entspricht der Qualität des Datensatzes. Die Farben entsprechen dem tektonischen Regime (rot = Abschiebung (NF), grün = Blattverschiebung (SS), blau = Aufschiebung (TF), schwarz = unbekannt (U)). Symbole entsprechen den verschiedenen Spannungsindikatoren.

Eine globale Kompilierung der Spannungsmagnituden mit der Projektbezeichnung Q-WSM befindet sich gerade im Aufbau /ZAN 12/. Abb. 8-7 zeigt eine globale Kompilation von Daten zu Spannungs-Magnituden dargestellt als Verhältnis der Magnitude der mittleren horizontalen Spannung und S_v . Dieser sogenannte k-Verhältnis variiert sehr stark in den oberen zwei Kilometern Daten aus der KTB Bohrung in der Oberpfalz /BRU 97/ und des SAFOD Bohrlochs an der San Andreas Plattengrenze in Kalifornien /HIC 04/ zeigen, dass das k-Verhältnis mit der Tiefe abnimmt und asymptotisch gegen eins läuft. Da SAFOD in einem tektonisch hochaktiven Gebiet liegt, sind die k-Werte hier deutlich höher als an dem KTB Standort.

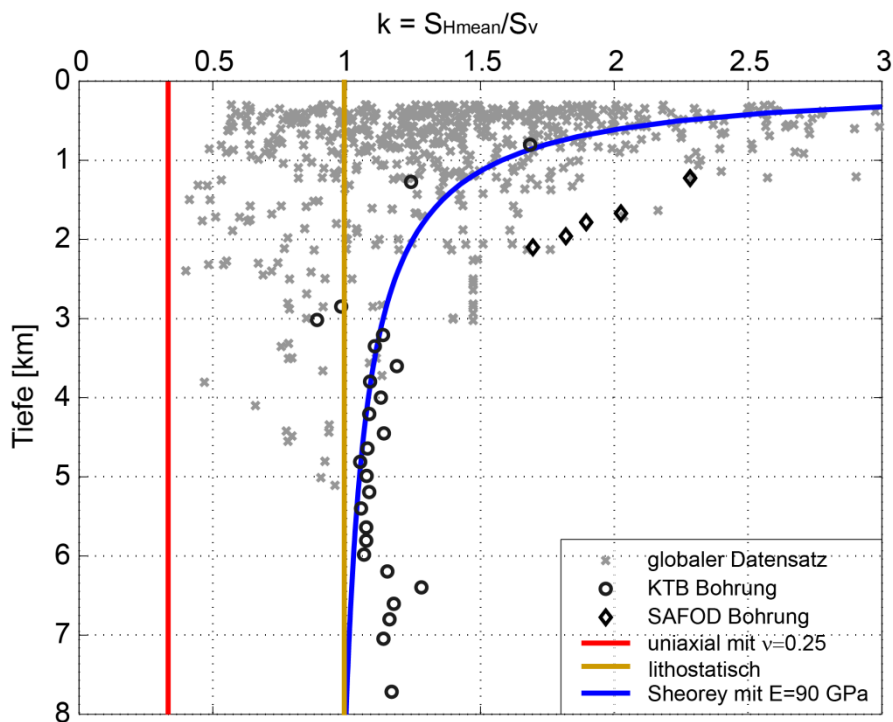


Abb. 8-7 Globale Kompilation des Verhältnis der mittleren horizontalen Spannungsmagnitude zu S_v basierend auf einer erweiterten Datenbank von /BRO 78/. Im Vergleich dazu sind verschiedene Modelle dargestellt, die den Verlauf des k-Verhältnisses mit der Tiefe beschreiben (Erläuterungen siehe Text).

Die beiden einfachsten Modelle zur Beschreibung des k-Verhältnis mit der Tiefe sind die Annahme eines lithostatischen Spannungszustandes in dem die horizontalen Spannung gleich der vertikalen Spannung ist /HEI 78/ und die eines uniaxialen Spannungszustandes, so dass bei einer Poissonzahl von $\nu=0,25$ ein k-Verhältnis von 0,33 resultiert. Dem Ansatz von Sheorey /SHE 94/ liegt ein einfaches analytisches 1D-Modell eines thermo-elastischen Schalenmodells der Erde zu Grunde mit einer Parametrisierung des thermischen Gradienten, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Temperatur, der Schwerebeschleunigung und des elastischen Young Modul E als Funktion der Tiefe. Mit dem E-Modul in den Einheiten Gigapascal (GPa) und der Tiefe H in den Einheiten Meter (m) erhält man aus folgender Gleichung die Kurve des k-Verhältnis mit der Tiefe.

$$k = 0.25 + 7E \left(0.001 + \frac{1}{H} \right) \quad (1)$$

Mit $E=90$ GPa, dem Wert für das Gestein an der KTB Bohrung /BRU 97/, konnten die dort vorliegenden Daten a priori gut angenähert werden. Für 3D geomechanisch-numerische Modellierungen des in situ krustalen Spannungsfeldes wird die entsprechende Sheorey-Kurve als Startwert angepasst bevor durch geeignete laterale Verschiebungsrandbedingungen die zusätzlichen tektonischen Spannungen aufgebracht werden /BUC 09/, /HEI 13/, /HER 11/, /REI 14/.

8.6 Modellierung des 3D Spannungszustandes

Da die Daten zum gegenwärtigen krustalen Spannungsfeld nur punktuell und unvollständig vorliegen, (siehe Abb. 8-6) muss zur Bestimmung des 3D Spannungszustandes in einer gegebenen Standortregion ein 3D geomechanisch-numerisches Modell erstellt werden. Die Spannungsdaten im Modellgebiet dienen dabei der Kalibration des Modells. Abb. 8-8 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer solchen Simulation /FIS 13/, /HEN 08/, /HEN 10/, /HER 15/, /REI 14/. Der kritische Punkt bezüglich der Belastbarkeit der Modellaussagen ist dabei die Verfügbarkeit Daten zu den Spannungsmagnituden und des Spannungsregimes.

Da in den Standortregionen a priori aufgrund der geringen Anzahl von verfügbaren Spannungsdaten kaum Daten vorhanden sind, werden in der Regel zunächst von größeren Gebieten (100 - 500 km) Modelle erstellt, um dann für kleinere Gebiete die Spannungen gegebenenfalls in höher auflösenden lokalen Modellen die Spannungsbedingungen abzuleiten.

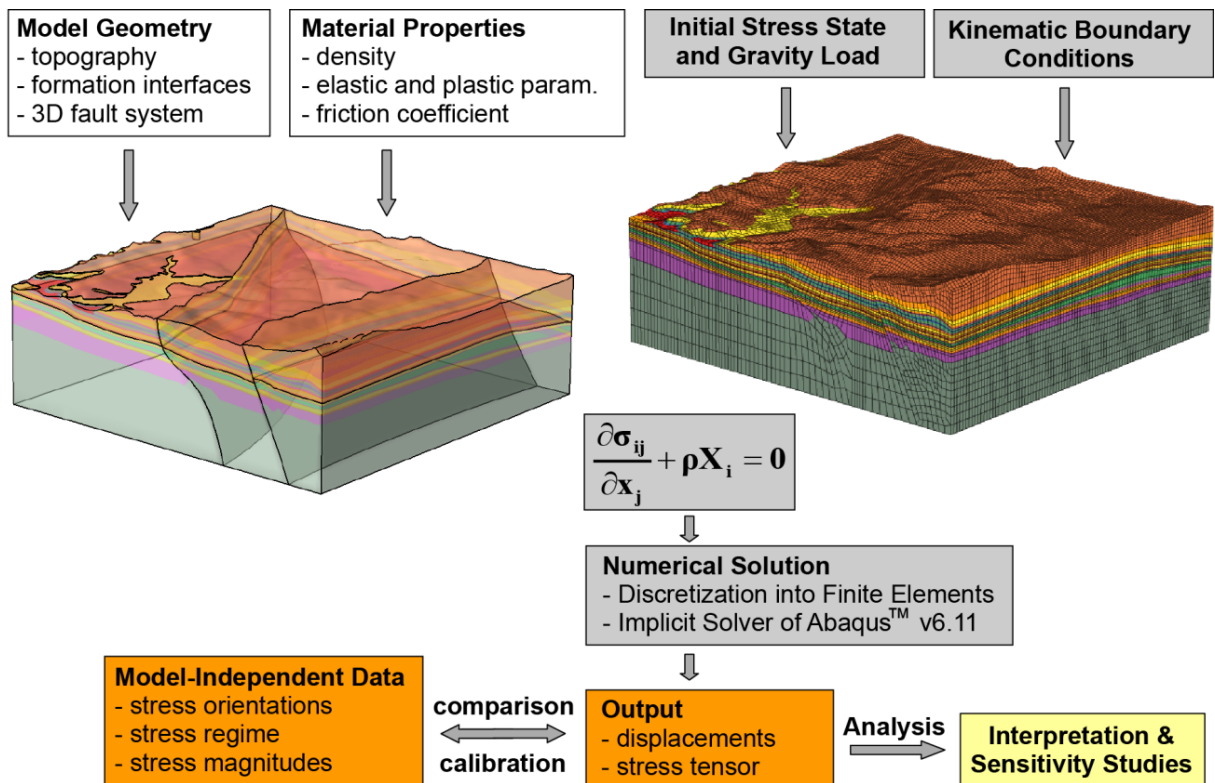


Abb. 8-8 Genereller Ablauf der geomechanisch-numerischen Modellierung des 3D Spannungstensors in einer Standortregion /FIS 13/, /HEN 08/, /HER 15/, /REI 14/. Nach Erstellen des tektonischen Modells und Zuweisung der Gesteinseigenschaften (weiße Felder) werden die initialen und kinematischen Randbedingungen so gewählt (graue Felder), dass die Lösung die modellunabhängigen Spannungsdaten optimal anpasst werden (orange Felder).

Abb. 8-9 zeigt die Modellergebnisse einer solchen Simulation aus dem in Workflow aus Abb. 8-8 dargestellten Modellgeometrie einer Region in der Nordschweiz /HER 15/. Die Ergebnisse zeigen die starke Variabilität in den unterschiedlichen Lithologien aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Weitere Quellen für die lokale Variabilität sind die tektonischen Störungen in dem Modell sowie der Einfluss der Topographie in den oberen 500 m unter Meeresspiegel. Die Ergebnisse spiegeln die generelle Tendenz aus Abb. 8-7 wieder, dass die k-Werte mit der Tiefe abnehmen. Ebenso nimmt mit der Tiefe die räumliche Variabilität aufgrund der homogeneren Lithologie unter den Sedimentschichten ab. Grundsätzlich sind die Ergebnisse von Spannungsmodellen mit relativ großen Unsicherheiten behaftet, da in der Regel nur wenige Spannungsdaten vorliegen. Dies gilt unabhängig von der Tiefenlage, so dass die Kritikalität eines Spannungszustandes sowohl bezüglich der in situ Bedingungen als auch zur

Prognose der lang-zeitlichen Entwicklungen nur mit großen Unsicherheiten zu quantifizieren sind.

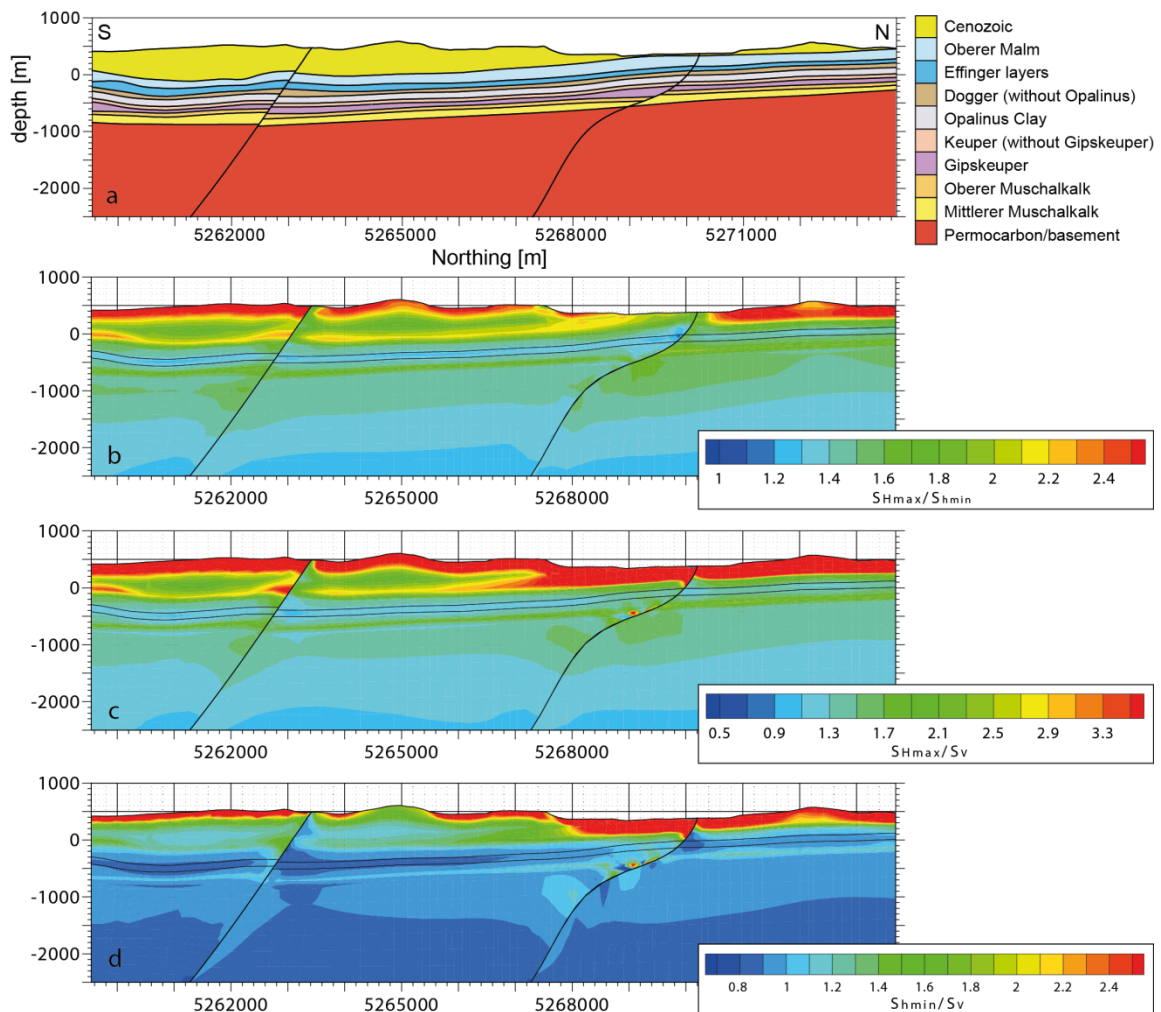


Abb. 8-9 Darstellung von verschiedenen k-Verhältnissen auf Querschnitten durch ein 3D geomechanisch-numerisches Modell eines potentiellen Standortgebietes in der Nordschweiz /HEI 13/, /HER 15/. Obere Abbildung zeigt die im Modell repräsentierte die Abfolge der Lithologie; schwarze Linien kennzeichnen Lage und Verlauf von zwei tektonischen Störungen, die im Modell implementiert sind.

8.7 Kritische Spannungszustände

Gesteine verformen sich unter der Wirkung von Spannungen. Im oberen Teil der Erdkruste verhalten sich mit Ausnahme von Salzen Gesteine bei geringen Temperaturen elastisch und beim Überschreiten der Festigkeitsgrenze versagt das Gestein plastisch (Abb. 8-10). In größeren Tiefen und bei höheren Temperaturen verformt sich das Gestein beim Überschreiten der Fließgrenze duktil.

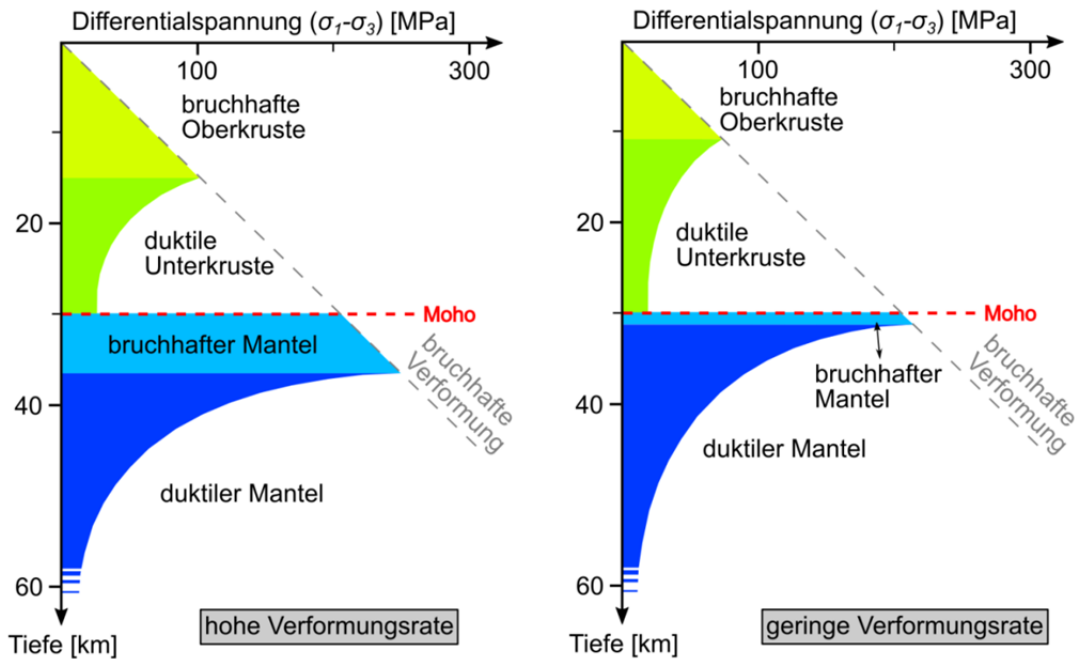


Abb. 8-10 Darstellung der elastisch-plastischen Festigkeitsgrenze (Oberkruste und gegebenenfalls Teile des oberen Mantels) bzw. elastisch-viskosen Fließgrenze (duktile Unterkruste und Mantel) bei hoher (links) und geringer Verformungsrate (rechts) als Funktion der Differenzspannung.

Bei Erdbeben handelt es sich meist nicht um neue Brüche im Gestein sondern um Versatz auf bereitsexistierenden tektonischen Störungszonen. Beides, das Gesteinsversagen (Neubruch von intaktem Gestein) und die Reaktivierung von tektonischen Störungen werden durch Versagenskriterien beschrieben. Davon gibt es mehrere Detailformen, die jedoch alle im Wesentlichen die maximale im Gestein zulässige Scherspannung (τ_{crit}) als Funktion der Normalspannungen im Gestein (σ_n) beschreiben, z. B.

$$\tau_{crit} = C + \mu \cdot \sigma_n \quad (2)$$

Dabei ist C die Kohäsion und μ eine Reibungskonstante. Für Neubrüche handelt es sich um den Koeffizienten der inneren Reibung, bei der Reaktivierung von präexistierenden Störungen um den Reibungskoeffizienten (Abb. 8-11).

Für das sogenannte Mohr-Coulombsche Versagenskriterium kann das mit Hilfe der Mohrkreise wie in Abb. 8-12 anschaulich dargestellt werden. Die Mohrkreise sind dabei eine Methode, um die Spannungszustände auf unterschiedlich orientierten Störungen

darzustellen. Die Scherspannung stellt dabei den y-Achsenabschnitt dar, die größte und kleinste Normalspannung (σ_1 und σ_3) spannen den Mohrkreis auf. Jede Position auf dem Mohrkreis stellt dabei eine potentielle Störungsorientierung dar.

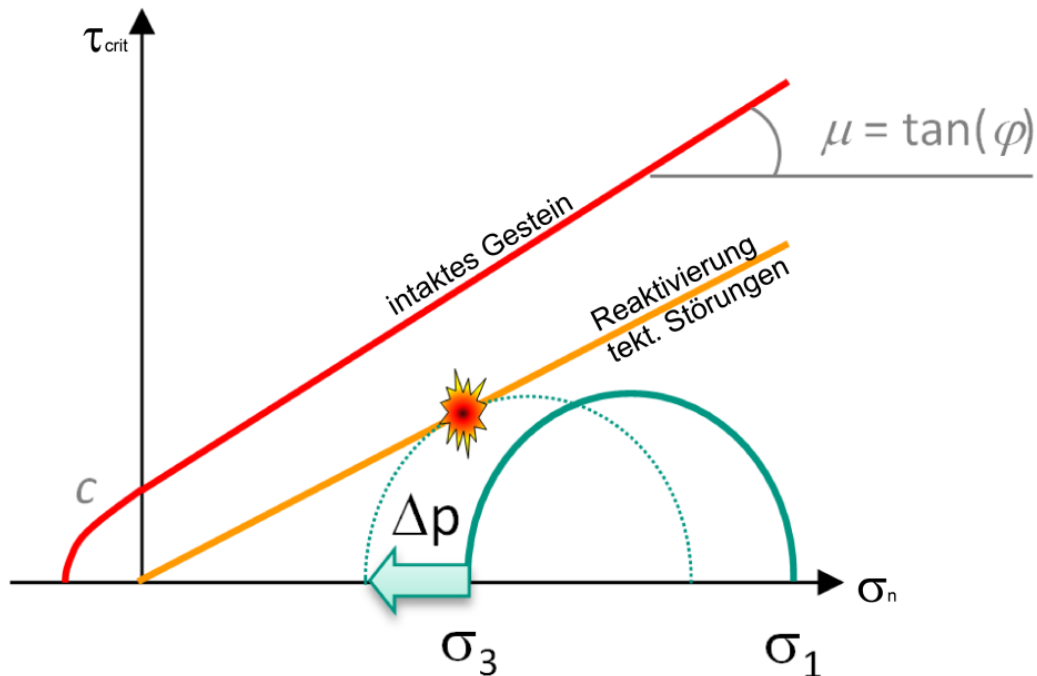


Abb. 8-11 Der Spannungszustand wird als stabil erachtet, wenn der Mohrkreis sich rechts bzw. unterhalb der sogenannten Bruchgerade. Die rote Linie zeigt die Festigkeitsgrenze für intaktes Gestein, die orange für pre-existierende tektonische Störungen. Je weiter die Spannungen von diesem kritischen Zustand entfernt sind, desto stabiler ist das System. Das Δp stellt eine Spannungsänderung oder Fluiddruckänderung aufgrund von anthropogenen Eingriffen oder natürlicher Prozesse dar.

Der Spannungszustand in der Erdkruste kann dann wie oben beschreiben über die vertikale (S_v) und beiden horizontalen Spannungen (S_{hmin} und S_{Hmax}) und den sogenannten Mohrkreis beschrieben werden. Entscheidend sind dabei die Magnituden der größten (σ_1) und kleinsten Hauptspannung (σ_3). Ob es im Gestein zu spannungsbedingtem Versagen (z.B. Erdbeben) kommt, wird über das Bruchkriterien beschrieben. Wenn die Scherspannungen die Festigkeitsgrenze überschreiten, kommt es dabei zum Gesteinsversagen.

Nach /ZOB 12/ kann aus dem Auftreten kleiner Erdbeben in der kontinentalen Kruste darauf geschlossen werden, dass sich fast überall Störungen befinden, die durch ge-

ringe Spannungsänderungen reaktiviert werden können. Vergleicht man das mit Abb. 8-12, so bedeutet dies, dass der Abstand des Mohrkreises zur Bruchgerade von pre-existierenden Störungen gering ist.

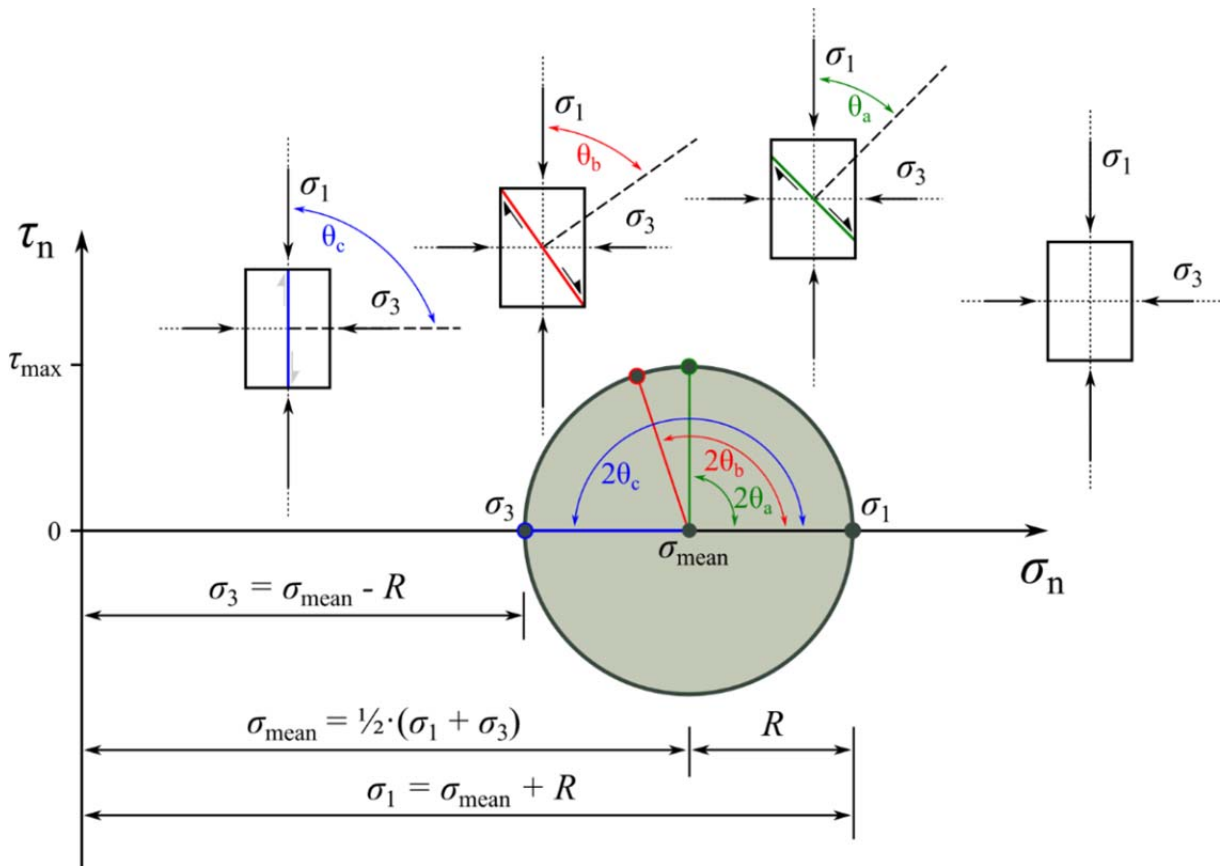


Abb. 8-12 σ_3 ist die Hauptspannung (Normalspannung), die auf eine Fläche senkrecht zu σ_1 wirkt. Ist die Fläche anders orientiert, können mit dem Mohr-Kreis die Normal- und Scherspannungen in Abhängigkeit von der Orientierung der Fläche berechnet werden.

8.8 Stabilität von Untertagebauwerken

Die Spannungsverteilungen im Untertagebauwerk sind im Wesentlichen abhängig von der Höhe der Gebirgsspannungen, des Porendrucks und des Spülgewichtes. Die Horizontalspannungen sind abhängig von der Lithologie. Gesteine mit eher duktilen Eigenschaften neigen dazu annähernd lithostatische Drücke zu entwickeln. In diesem Fall entsprechen die Horizontalspannungen in etwa dem Betrag der Auflast. Bei kristallinen Gesteinen wie z.B. Granit, der in Soultz-souz-Forêts erbohrt wurde, wirken hohe Spannungsdifferenzen.

Überschreiten die Spannungen an der Bohrlochwand die Gesteinsdruckfestigkeit bzw. werden die Zugspannungen höher als die Zugfestigkeit der Gesteine, dann kommt es in einer Bohrung zu Bohrlochinstabilitäten (Abb. 8-13, Abb. 8-14). Ausbrüche und Risse an der Bohrlochwand können mit verschiedenen Bohrlochmesswerkzeugen gemessen werden. Besonders anschaulich sind Bilder, die mit akustischen Bohrlochmessungen (Ultraschall) aufgenommen werden. Hierbei werden sowohl die Amplituden wie auch die Laufzeiten gegen Magnetisch Nord dargestellt. Abb. 8-14 ist dies für den Bereich 4.717 m bis 4.729 m der Fall. Die ausgebrochenen Bereiche erscheinen jeweils im Osten wie auch im Westen der Abbildung als schwarze Bereiche.

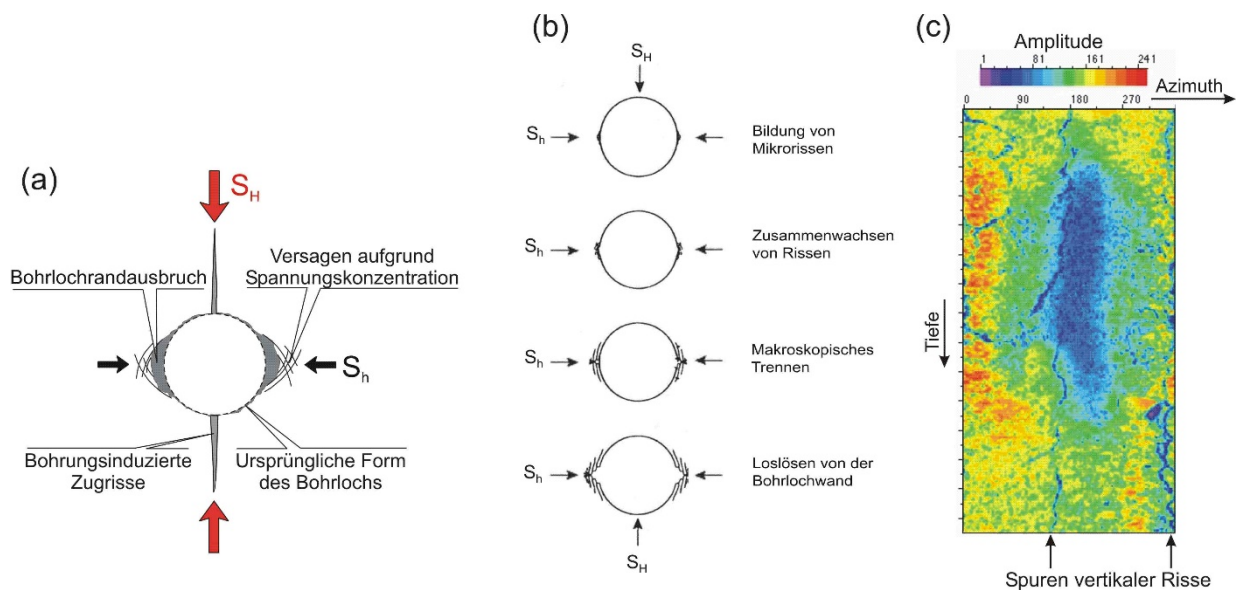


Abb. 8-13 a) In Richtung der größten horizontalen Hauptspannung S_{Hmax} können in Abhängigkeit vom Spülungsdruck in der Bohrung und vom tektonischen Spannungsfeld Zugrisse an der Bohrlochwand entstehen (Überschreiten der Zugfestigkeit).
b) Wird die Scherbruchfestigkeit überschritten kommt es zu Bohrlochrandausbrüchen in Richtung der kleineren Hauptspannung S_{hmin} .
c) Diese Bruchbildungen können mit verschiedenen Bohrlochsonden detailliert erfasst werden.

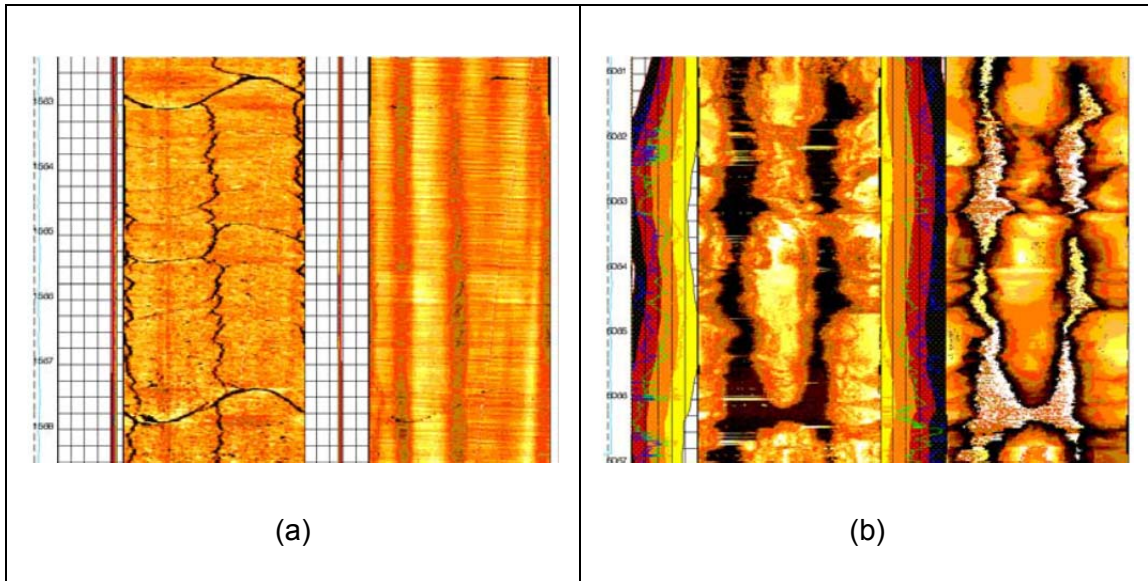


Abb. 8-14 a) Bild eines Televiewers mit bohrtechnisch induzierten Rissen an der Bohrlochwand (Tiefe ca. 1.565 m) und b) Bohrlochrandausbrüchen (Tiefe 5.066 m) aus der Bohrung Soutz-sous-Forêts GPK 4 /VAL 10/.

Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Bohrlochrandausbrüche bzw. um bohrtechnisch induzierte Zugrisse. Für Bohrungen in isotropen Gesteinen in einem anisotropen Spannungsfeld gelten die Gleichungen von /KIR 98/. Bei Bohrungen, die mit Spülung gefüllt sind, kann ein Spülungsdruck (p_{sp}) berücksichtigt werden. Dessen Wirkung ist abhängig davon, wie dicht die Bohrlochwand ist. Bei dichter Bohrlochwand lassen sich die Tangentialspannungen direkt an der Bohrlochwand wie folgt berechnen:

$$S_{\theta\theta} = S_{H_{max}} + S_{h_{min}} - 2(S_{H_{max}} - S_{h_{min}}) \cos(2\theta) - p_{sp}. \quad (3)$$

Hierbei gilt:

- $S_{H_{max}}$ = maximale horizontale Hauptspannung
- $S_{h_{min}}$ = minimale horizontale Hauptspannung
- $S_{\theta\theta}$ = Tangentialspannung an der Bohrlochwand
- p_{sp} = Spülungsdruck
- θ = Azimut (gemessen von $S_{H_{max}}$)

Für den Fall (4), dass die minimale Tangentialspannung in Richtung von S_H oder (5) die maximale Tangentialspannung in Richtung $S_{h_{min}}$ bestimmt werden sollen, vereinfacht sich die Formel wie folgt:

$$S_{\theta\theta\min} = 3 S_{h\min} - S_{H\max} - p_{sp} \quad (4)$$

$$S_{\theta\theta\max} = 3 S_{H\max} - S_{h\min} - p_{sp} \quad (5)$$

Ein bohrtechnisch induzierter Riss öffnet sich, wenn die tangentielle Zugspannung direkt an der Bohrlochwand die Zugfestigkeit des Gesteins (S_t) gerade erreicht bzw. nur geringfügig überschreitet. Für diesen Fall kann mit hinreichender Genauigkeit $S_{\theta\theta\min}$ mit $-S_t$ gleichsetzen. Damit ergibt sich aus (5):

$$S_{\theta\theta\min} = -S_t = 3S_{h\min} - S_{H\max} - p_{sp} \quad (6)$$

bzw.

$$S_{H\max} = 3S_{h\min} - p_{sp} + S_t \quad (7)$$

In isotropen und elastisch reagierenden Gesteinen entspricht die Rissrichtung in der Bohrlochwand der Richtung von $S_{H\max}$.

Bei Bohrungen in der Erdkruste spielt der Porendruck (p_0) eine wichtige Rolle. Diese beiden Parameter können in den Gleichungen von Kirsch /KIR 98/ berücksichtigt werden. Es ergibt sich dann:

$$S_{H\max} = 3S_{h\min} - p_{sp} - p_p + S_t \quad (8)$$

Ein Bohrlochrandausbruch kann entstehen, wenn die Tangentialspannung die Druckfestigkeit des Gesteins überschreitet. Dies geschieht zuerst in Richtung von $S_{h\min}$ an der Bohrlochwand.

Die maximale Tangentialspannung an der Bohrlochwand beträgt dann:

$$S_{\theta\theta\max} = 3 S_{H\max} - S_{h\min} - p_{sp} - p_p \quad (9)$$

Wenn die maximale Tangentialspannung an der Bohrlochwand die uniaxiale Druckfestigkeit σ_u überschreitet, kann die Bohrlochwand versagen. Gegebenenfalls können auch thermische Spannungen berücksichtigt werden. Abb. 8-15 zeigt die Spannungsverteilung im Vergleich mit der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit für die Bohrungen GPK 3 und GPK 4 in Soultz-sous-Forêts in verschiedenen Tiefen.

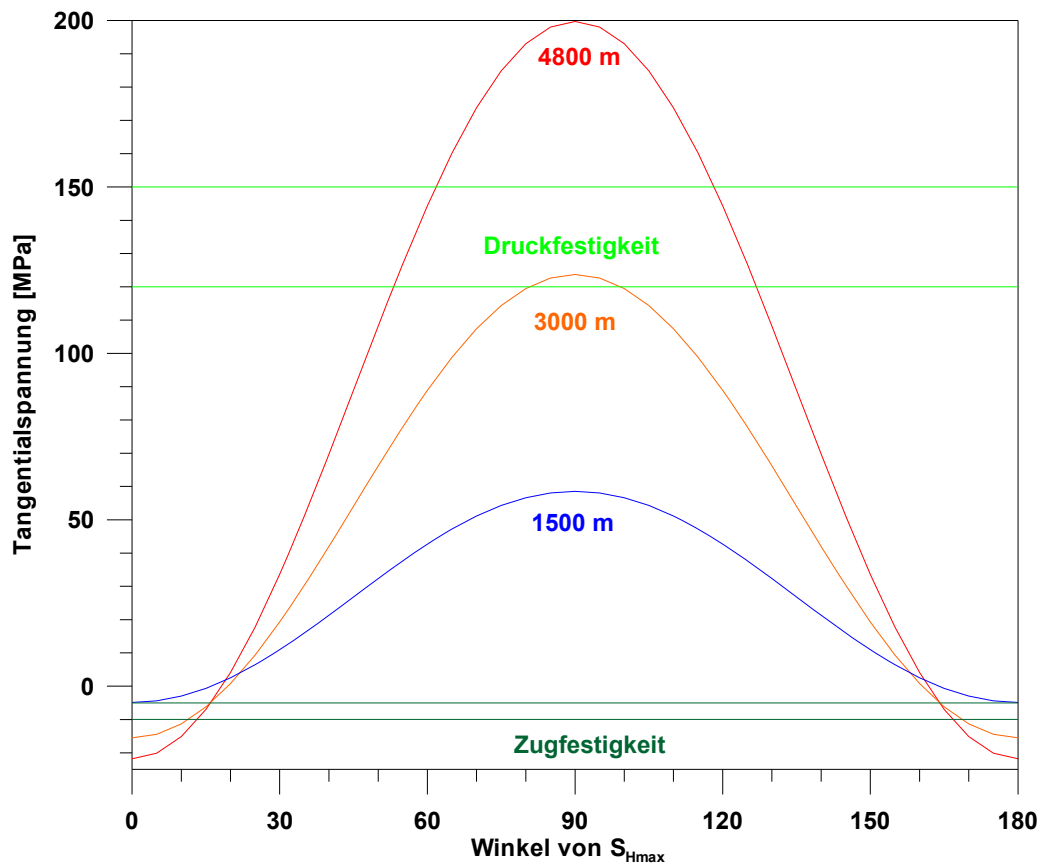


Abb. 8-15 Minimale und maximale Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in den Teufen 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m für die Bohrungen GPK 3 und GP 4 im Vergleich mit den Gebirgsfestigkeiten.

8.9 Spannungszustand um Untertageöffnung (Tunnel, Bergwerk, Bohrung)

Beim Abteufen von Bohrungen und Bau von Bergwerken werden künstliche Hohlräume geschaffen, die das Spannungsfeld aufgrund der Spannungsumlagerung ändern. Die Stabilitätsbedingungen sind für Bohrungen, die teilweise nur wenige cm Durchmesser haben bis zu Kavernen in der Größenordnung von mehreren 100 m ähnlich. Durch die Schaffung von Hohlräumen entfällt die stabilisierende Wirkung des entfernten Materials. An der Hohlraumwand ändern sich die Spannungsrandbedingungen und es kommt zu Spannungskonzentrationen (s. o.). Dadurch können um die Bohrung /Tunnel/Bergwerke Zonen mit Auflockerungen im Gebirge mit einer erhöhten Fluid-Durchlässigkeit entstehen. Generell nimmt der Einfluss des Spannungsfelds mit dem Entfernung zur Hohlraumwand ab und kann meist ab ca. drei Öffnungs-Durchmessern vernachlässigt werden. D. h. für Bohrungen mit 1 m Durchmesser ist bis zu einem Ab-

stand von 3 m, bei einem Tunnel von 10 m Durchmesser bis zu einem Abstand von 30 m mit einer signifikanten Änderung des Spannungsfelds zu rechnen (Abb. 8-16).

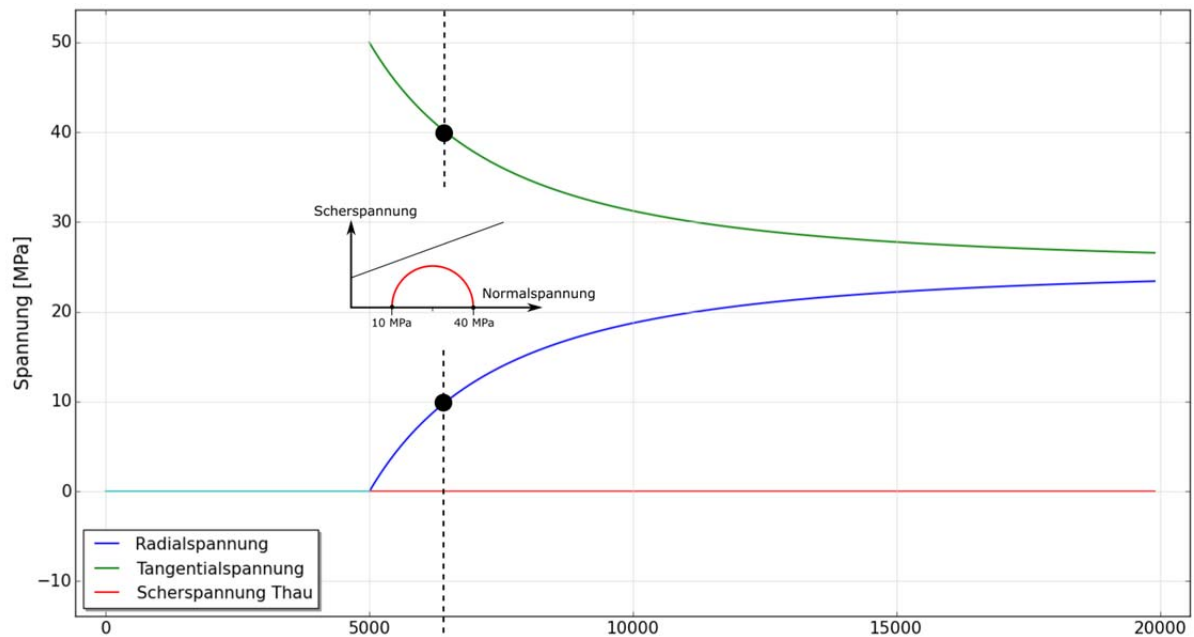


Abb. 8-16 Abhängigkeit der radialen und tangentialen Spannungen unter Annahme lithostatischer Verhältnisse (alle Hauptspannungen sind im Fernfeld gleich groß) vom Abstand zur Tunnelmitte. Der Durchmesser ist 10 m. Das Mohrdiagramm stellt den Spannungszustand in einer Entfernung von 6,5 m zur Tunnelachse dar.

Zudem können Untertageöffnungen durch Abscherungen entlang von Verwerfungsflächen gefährdet sein (Abb. 8-17). Entscheidend für die Stabilität sind die Magnituden der tektonischen Spannungen und ihre Orientierung in Bezug auf die Bohrung bzw. die Verwerfungsfläche.

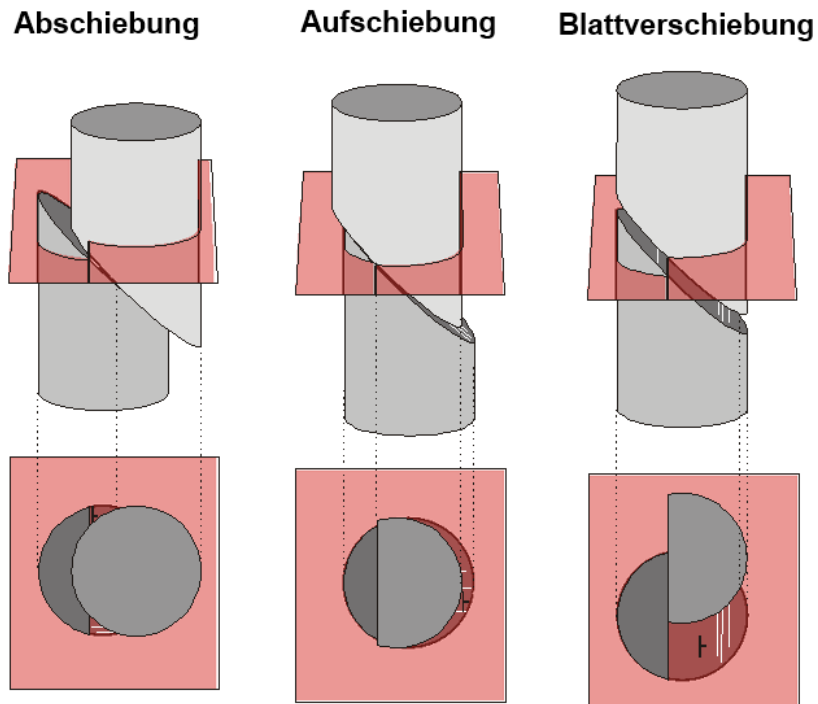


Abb. 8-17 Durchteuft eine Bohrung eine Scherzone kann durch die Veränderung des Spannungsfelds und des Drucks auf der Scherzone diese instabil werden und versetzt werde. Auch diese Phänomene können mit Bohrmesssonden im Verlauf der Bohrlocherstellung erfasst werden.

Bei vertikalen Bohrungen sind die für die Bohrlochstabilität im Wesentlichen die größte und die kleinste Horizontalspannung von Bedeutung. Verlaufen die Bohrungen nicht vertikal, muss auch die Vertikalspannung mit betrachtet werden. Die potenziellen Bohrlochinstabilitäten können durch analytische und numerische Verfahren im Vorfeld der Bohrung berechnet werden (Abb. 8-18).

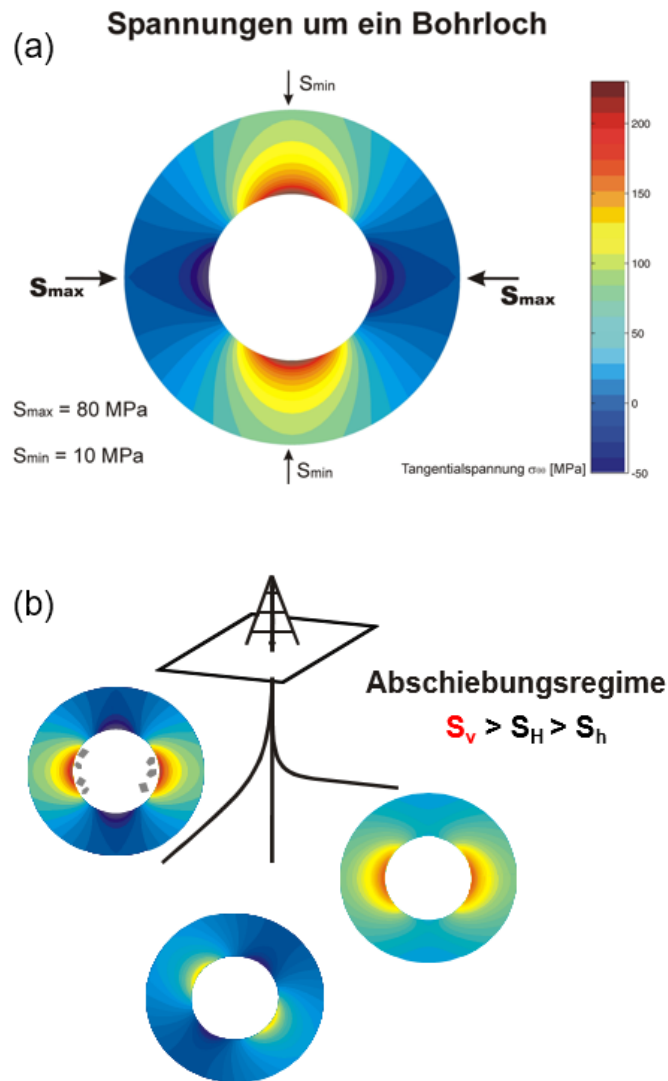


Abb. 8-18 Spannungsverteilung um eine vertikale und zwei horizontale Bohrungen, die in einem AbschiebungsSpannungsregime in unterschiedliche Richtungen verlaufen. Die Vertikalbohrung ist dabei am stabilsten während bei der Bohrung parallel zur S_{Hmax} Orientierung Bohrlochrandausbrüche an den Seiten zu erwarten sind.

Die Spannungszustände und die Stabilität von Bohrungen hängen vom umgebenden Material, der Füllung und von der Tiefe ab. Sie sind damit – zumindest im elastischen Bereich – unabhängig vom Durchmesser der Bohrung, aber abhängig von der Orientierung der Bohrung im Spannungsfeld (Abb. 8-18). Im isotropen Spannungsfeld von Salz ist die Orientierung nicht wesentlich.

Abb. 8-19 zeigt für ein Spannungsfeld mit 27 MPa/km S_{Hmax} -Gradient, der auch dem vertikalen Spannungsgradienten entsprechen soll und 15 MPa/km S_{hmin} -Gradient für Kristallin (Sediment) die kritischsten Spannungszustände an der Bohrlochwand für eine

mit Luft gefüllte Bohrung und für eine flüssigkeitsgefüllte Bohrung. Dabei wird davon ausgegangen, dass die das Gestein gegenüber Gas und Flüssigkeit undurchlässig ist und – in dieser stark vereinfachten Darstellung – elastisch reagiert. Ein Füllmedium in der Bohrung kann kritische Spannungszustände vermeiden indem es einen Stützdruck durch ein Fluid in Abhängigkeit von seiner Dichte ausbildet.

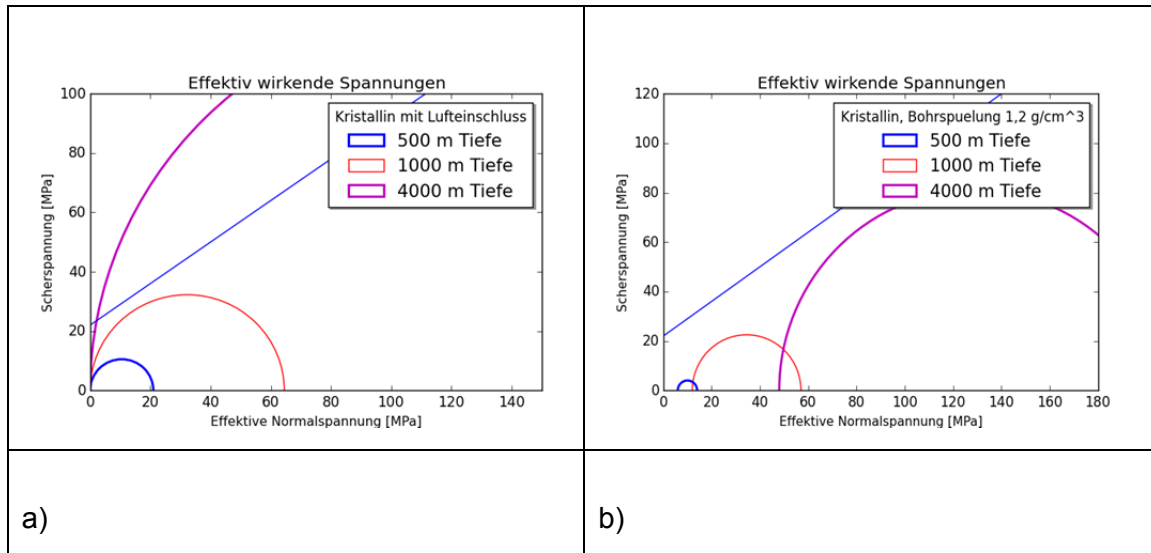


Abb. 8-19 Spannungszustand in einer Bohrung/Schacht für verschiedene Tiefen im Vergleich mit der Versagenskurve (blaue Gerade) des Gesteins.
a) Leere Bohrung/Schacht in Kristallin/Sedimentgestein. Erreicht oder überschreitet der Mohrkreis die Gerade, so kann es um die Bohrung zu Bohrlochrandausbrüchen kommen.
b) Mit Flüssigkeit gefüllte Bohrung. Eine Flüssigkeit verringert die Tendenz von Bohrlochrandausbrüchen. Die hier mit Mohrkreisen dargestellten Spannungszustände an der Bohrlochwand sind unabhängig vom Durchmesser der Bohrung (vereinfachte Annahme: elastisches Materialverhalten).

Bei Spülbohrverfahren werden die Dichte der Spülung und auch das Verrohrungsschema dem an dem Standort vorherrschenden Spannungsfeld angepasst. Je nach Dichte und dem resultierenden Fluid-Druck im Bohrloch kann es zu verschiedenen Phänomenen kommen, die die Bohrlochwand schädigen können: Ist der Druck zu klein kann es zu Bohrlochrandausbrüchen, die bei der Zementation berücksichtigt werden müssen und schlimmstenfalls zum Kollaps des Bohrlochs kommen, ist er zu groß, können Fracs entstehen (Abb. 8-20). Dies ist gut bekannt und wird mit dem Spülungsdruck und der Verrohrung kontrolliert. Jeweils nach dem Abteufen eines bestimmten Bohrab-

schnitts können Kontrollmessungen zeigen, in wieweit eine Bohrlochschädigung aufgetreten sein könnte.

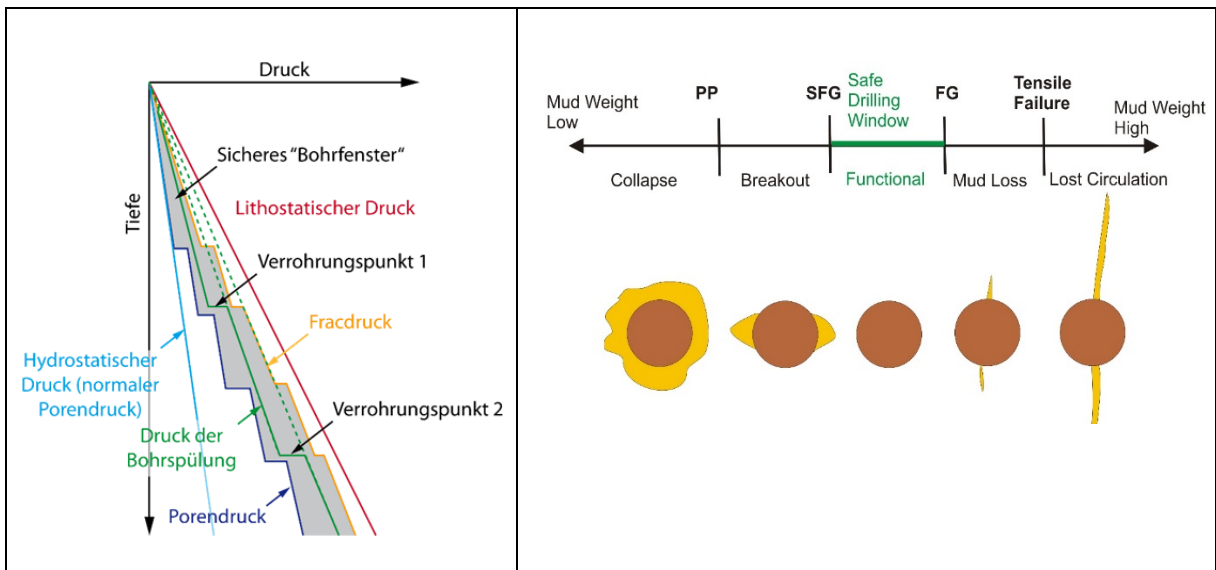


Abb. 8-20 Das „sichere Bohrlochs“ (*safe mud weight window*) ist der Spielraum für die Dichte der Spülung, bei der es weder zu Bohrlochrandausbrüchen (Druck zu klein) noch zu Fracs (Druck) zu groß an der Bohrlöchwand kommen kann. Muss aus Gründen des Spannungsfelds oder des Porendrucks im Gestein eine höhere Spülungsdichte gewählt werden, werden die druckschwachen Bereiche der Bohrung (in geringeren Tiefen) ggfs. durch eine zusätzliche Verrohrung geschützt.

8.10 Fazit

- Der in situ Zustand des Gebirges muss bei Festlegung der räumlichen Orientierung des Bauwerks berücksichtigt werden und ist ausschlaggebend für Versagen an der Bohrlöchwand.
- Bohrungen mit einem Bohrlöchfluid können auch in sehr große Tiefen sicher gebohrt werden (Stand der Technik und viel Erfahrung aus mehreren 100.000 Bohrungen aus Kohlenwasserstoffbohrungen in unterschiedlicher Geologie sind vorhanden).
- Die abschnittsweise Vermessung (Logging) gibt Aufschluss über mögliche Veränderungen an der Bohrlöchwand.

8.11 Literatur Kapitel 8

- /AND 05/ Anderson, E.M.: The dynamics of faulting, Trans. Edin. Geol. Soc., Bd. 8, S. 387–402, 1905.
- /BER 00/ Bercovici, D., Ricard, Y., Richards, M.A.: The Relation Between Mantle Dynamics and Plate Tectonics. A Primer. In: The History and Dynamics of Global Plate Motion. Hrsg: Richards, M.A., Gordon, R.G., van der Hilst, R. D., S. 5–46, American Geophysical Union: Washington, D.C., 2000.
- /BGR 15/ BGR: Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA – Kurzstudie, BGR: Hannover, 1. Januar 2015.
- /BRO 78/ Brown, E.T., Hoek, E.: Trends in the relationship between in situ stresses and depth, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Bd. 15, S. 211–225, 1978.
- /BRU 97/ Brudy, M., Zoback, M.D., Fuchs, F., Rummel, F., Baumgärtner, J.: Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes. Implications for crustal strength, J. Geophys. Res., Bd. 102, S. 18453–18457, 1997.
- /BUC 09/ Buchmann, T.: 3D multi-scale finite element analysis of the present-day crustal state of stress and the recent kinematic behaviour of the northern and central Upper Rhine Graben, Vrije University of Amsterdam & University of Karlsruhe: Karlsruhe, 01.01.2009.
- /CÉL 10/ Célérier, B.: Remarks on the relationship between the tectonic regime, the rake of the slip vectors, the dip of the nodal planes, and the plunges of the P, B, and T axes of earthquake focal mechanisms, Tectonophys., Bd. 482, S. doi: 10.1016/j.tecto.2009.03.006, 42-49, 2010.
- /CÉL 95/ Célérier, B.: Tectonic regime and slip orientation of reactivated faults, Geophys. J. Int., Bd. 121, S. 143–161, 1995.

- /ENG 92/ Engelder, T.: Stress Regimes in the Lithosphere, 457 S.: Princeton, NJ, 1992.
- /FIS 13/ Fischer, K., Henk, A.: A workflow for building and calibrating 3-D geo-mechanical models - a case study for a gas reservoir in the North German Basin, *Solid Earth*, S. doi: 10.5194/se-4-347-2013, 357-355, 2013.
- /FRI 72/ Friedmann, M.: Residual elastic strain in rocks, *Tectonophys.*, Bd. 15, S. 297–330, 1972.
- /FUC 01/ Fuchs, K., Müller, B.: World Stress Map of the Earth. a key to tectonic processes and technological applications, *Naturwissenschaften*, Bd. 88, S. 357–371, 2001.
- /HEI 07/ Heidbach, O., Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., Sperner, B., Fuchs, K., Wenzel, F.: Plate boundary forces are not enough. Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database, *Tectonics*, 26, TC6014, S. doi:10.1029/2007TC002133, 2007.
- /HEI 08/ Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B.: The World Stress Map database release 2008, S. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008, 2008.
- /HEI 10/ Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B.: Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008, *Tectonophysics*, Bd. 462, 1-4, S. doi:10.1016/j.tecto.2009.07.023, 2010.
- /HEI 13/ Heidbach, O., Hergert, T., Reiter, K., Giger, S.: Local stress field sensitivity analysis - case study Nördlich Lägern, NAGRA Arb. Ber. NAB 13-88, 50 S.: Wettingen, 1. Januar 2013.
- /HEI 78/ Heim: Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung, Anschluss an die Geologische Monographie der Tödi-Windgälen-Gruppe, B. Schwabe: Basel, 1878.
- /HEN 08/ Henk, A.: Perspectives of Geomechanical Reservoir Models - Why Stress is Important, *European Magazine*, Bd. 4, S. 1–5, 2008.

- /HEN 10/ Henk, A., Frischbutter, A., Tawengi, K.S.: Geomechanical Reservoir Models - A Case Study from the Sirte Basin/Libya, Oil Gas European Magazin, Nr. 1, S. 18–22, 2010.
- /HER 11/ Hergert, T., Heidbach, O.: Geomechanical model of the Marmara Sea region - II. 3-D contemporary background stress field, Geophys. J. Int., S. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.04992.x, 1090-1102, 2011.
- /HER 15/ Hergert, T., Heidbach, O., Reiter, K., Giger, S., Marschall, P.: Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland, Solid Earth, Bd. 6, S. 533-552, doi:10.5194/se-6-533-2015, 2015.
- /HIC 04/ Hickman, S., Zoback, M.: Stress orientations and magnitudes in the SAFOD pilot hole, Geophys. Res. Lett., Bd. 31, L15S12, S. doi: 10.1029/2004GL020043, 2004.
- /JAE 07/ Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmermann, R.W.: Fundamentals of Rock Mechanics, 4. Aufl., Blackwell Publishing: Oxford, 2007.
- /KIR 98/ Kirsch, E.G.: Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Bd. 42, S. 797–807, 1898.
- /LJU 03/ Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., Christiansson, R.: An overview of rock stress measurement methods, Int. J. Rock. Mech., Bd. 40, S. 975–989, 2003.
- /LUN 09/ Lund, B., Schmidt, P., Hieronymus, C.: Stress evolution and faults stability during the Weichselian glacial cycle, SKB Technical Report, 108 S., 1. Januar 2009.
- /MAR 07/ Martin, D.: Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark, 89 S., Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1. Januar 2007.

- /MAR 14/ Marschall, P., Giger, S.: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage - Geomechanische Unterlagen, NAGRA: Wettingen, 1. Januar 2014.
- /MCG 78/ McGarr, A., Gay, N.C.: State of Stress in the Earth's Crust, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Bd. 6, S. 405–436, 1978.
- /MOE 09/ Moeck, I., Kwiatak, G., Zimmermann, G.: Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir, *J. Struct. Geol.*, Bd. 31, S. 10.1016/j.jsg.2009.06.012, 2009.
- /MOE 11/ Moeck, I., Backers, T.: Fault reactivation potential as a critical factor during reservoir stimulation, *First Break*, Bd. 29, doi: 10.3997/1365-2397.2011014, S. 73–80, 2011.
- /MOR 96/ Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B.: Slip tendency analysis and fault reactivation, *Geology*, Bd. 24, S. 275–278, 1996.
- /MÜL 10/ Müller, B., Heidbach, O., Sperner, B., Negut, M., Buchmann, T.: Attached or not attached – evidence from crustal stress observations for a weak coupling of the Vrancea slab in Romania, *Tectonophys.*, Bd. 462, 1-4, S. doi:10.1016/j.tecto.2009.08.022, 2010.
- /NAGRA 08/ NAGRA: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, NAGRA Tech. Ber. NTB 08-05, 395 S., NAGRA: Wettingen, 1. Januar 2008.
- /REI 14/ Reiter, K., Heidbach, O.: 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada), *Solid Earth*, S. doi: 10.5194/se-5-1123-2014, 2014.
- /SHE 94/ Sheorey, P.R.: A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rocks, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Bd. 31, Nr. 1, S. 23–34, 1994.

- /SIM 97/ Simpson, R.W.: Quantifying Anderson's fault types, *J. Geophys. Res.*, Bd. 102, S. 17909–17919, 1997.
- /SON 90/ Sonder, L.J.: Effects of density contrasts on the orientation of stresses in the lithosphere. Relation to principal stress directions in the transverse ranges, California, *Tectonics*, Bd. 9, Nr. 4, S. 761–771, 1990.
- /SPE 03/ Sperner, B., Müller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J., Fuchs, K.: Tectonic stress in the Earth's crust. advances in the World Stress Map project. In: *New insights in structural interpretation and modelling. Special Publication*, Hrsg: Nieuwland, D.A., S. 101–116, Geological Society: London, 2003.
- /TIN 05/ Tingay, M., Müller, B., Reinecker, J., Heidbach, O., Wenzel, F., Fleckenstein, P.: Understanding tectonic stress in the oil patch. *The World Stress Map Project, The Leading Edge*, S. 1276–1282, 2005.
- /VAL 10/ Valley, B., Evans, K.F.: Stress heterogeneity in the granite of the Soultz EGS reservoir inferred from analysis of wellbore failure, Hrsg.: *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 12 S.: Bali Indonesia, 25. April 2010.
- /ZAN 10/ Zang, A., Stephansson, O.: *Stress in the Earth's Crust*, 1. Aufl., 323 S., Springer: Heidelberg, 2010.
- /ZAN 12/ Zang, A., Stephansson, O., Heidbach, O., Janouschkowetz, S.: World Stress Map Database as a Resource of Rock Mechanics and Rock Engineering, *Geotech. Geol. Eng.*, S. doi 10.1007/s10706-012-9505-6, 2012.
- /ZOB 12/ Zoback, M., Gorelick, S.M.: Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide, 5, 2012.
- /ZOB 03/ Zoback, M., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B., Peska, P., Ward, C.D., Wiprut, D.J.: Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, *Int. J. Rock Mech.*, Bd. 40, S. 1049–1076, 2003.

- /ZOB 10/ Zoback, M.: Reservoir Geomechanics, 2. Aufl., 449 S., Cambridge: Cambridge, 2010.
- /ZOB 89a/ Zoback, M.L., Zoback, M.: Tectonic stress field of the conterminous United States. In: Geophysical Framework of the Continental United States. Hrsg: Pakiser, L.C., Mooney, W.D., S. 523–539, Geol. Soc. Am. Mem.: Boulder, Colorado, 1989.
- /ZOB 89b/ Zoback, M.L., Zoback, M., Adams, J., Assumpção, M., Bell, S., Bergman, E.A., Blümling, P., Brereton, N.R., Denham, D., Ding, J., Fuchs, K., Gay, N., Gregersen, S., Gupta, H.K., Gvishiani, A., Jacob, K., Klein, R., Knoll, P., Magee, M., Mercier, J.L., Müller, B.C., Paquin, C., Rajendran, K., Stephansson, O., Suarez, G., Suter, M., Udías, A., Xu, Z.H., Zhizhin, M.: Global patterns of tectonic stress, Nature, Bd. 341, S. 291–298, 1989.
- /ZOB 91/ Zoback, M., Zoback, M.L.: Tectonic stress field of North America and relative plate motions. In: Neotectonics of North America. Hrsg: Slemmons, D.B., Engdahl, E.R., Zoback, M.D., Blackwell, D.D., S. 339–366, Geological Society of America: Boulder, Colorado, 1991.
- /ZOB 92/ Zoback, M.L.: First and second order patterns of stress in the lithosphere. The World Stress Map Project, J. Geophys. Res., Bd. 97, S. 11703–11728, 1992.

9 Reversibilität von Entscheidungen

Dieses Kapitel betrachtet mögliche Gründe, die eine Umkehr von Entscheidung zur Einlagerung notwendig erscheinen lassen. Weiterhin werden die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ in Bezug auf Definitionen zu Rückholbarkeit und Bergbarkeit sowie in Bezug auf das betrachtete Konzept zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern diskutiert. Technische Lösungsansätze zur Rückholung und Bergung werden beschrieben.

Es wird bei der Betrachtung der Reversibilität von Entscheidungen vorausgesetzt, dass die Erstellung eines Bohrlochs mit 1 m Durchmesser und 5.000 m Teufe, bzw. wie im Grundkonzept in Kapitel 5 beschrieben, machbar ist.

9.1 Rückholbarkeit –Verständnis im vorliegenden Projekt

Als Rückholbarkeit wird gemäß Sicherheitsanforderungen des BMUB die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet /BMU 10/.

Überträgt man die Sicherheitsanforderungen sinngemäß auf eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern ergibt sich: Die Behälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Materials folgende Sicherheitsfunktion erfüllen: In der Betriebsphase bis zum Verschluss und Verfüllung der Bohrung muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein. Es ist noch festzulegen, ob sich die Betriebsphasen, die mit dem Verschluss endet, auf einzelne Bohrlöcher, den Bohrplatz (bzw. Bohrfeld) oder alle Bohrplätze (Bohrfelder) bzw. auf den Abschluss der Einlagerung aller hoch-radioaktiven Abfälle beziehen sollen.

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Einlagerung innerhalb weniger Jahre für ein Bohrloch abgeschlossen werden kann und dann das Bohrloch verschlossen und verfüllt ist. Eine Rückholung soll demnach innerhalb eines Zeitraums von 5 Jahren für ein Bohrloch möglich sein.

9.2 Bergung –Verständnis im vorliegenden Projekt

In den Sicherheitsanforderungen ist zu Bergung definiert: Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet /BMU 10/.

Sinngemäß auf die Lagerung in tiefen Bohrlöchern übertragen erfordert die Bergung, dass für die wahrscheinlichen Entwicklungen eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter aus dem stillgelegten und verfüllten Bohrloch für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben muss. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Stoffe zu beachten /BMU 10/.

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen /BMU 10/. Diese Forderungen sollen durch die Auslegung des Abfallbehälters und der Verrohrung des Bohrlochs erfüllt werden.

Es gibt Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik, wie Bohrlöcher über 100 Jahre betrieben werden können. Für Extrapolationen über diesen Zeitraum hinaus werden voraussichtlich weiterentwickelte Materialien und Materialkombinationen benötigt werden (z.B. anorganisch beschichtete Behälter, Titanbasierte Werkstoffe etc.).

Es besteht daher erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, um eine Bergbarkeit von Abfallbehältern bzw. Bergung für einen Zeitraum bis 500 Jahre nach Einlagerung zu ermöglichen.

9.3 Welche Situationen sind vorstellbar, die eine Rückholung oder Bergung erzwingen könnten?

Grundsätzlich bedarf es bei der Entscheidung zur Rückholung oder Bergung einer Rechtfertigung, da diese Maßnahme mit potentiellen radiologischen Auswirkungen verbunden ist /ESK 11/.

9.3.1 Zwingende Gründe

Das Monitoring des Endlagers führt zu Erkenntnissen, dass das Verhalten der Abfälle, Behälter oder der Verrohrung sich anders als prognostiziert entwickelt und der Sicherheitsnachweis nicht mehr belastbar ist sondern es zu besorgen ist, dass es zu erheblichen radiologischen Beeinträchtigungen bis in den Bereich der Biosphäre kommen kann.

Die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) führt zu neuen Erkenntnissen in einem Maße, dass der Sicherheitsbewertung zugrunde liegende Features, Events, Processes neu einzuschätzen sind und die wahrscheinliche Entwicklung sich dabei soweit ändert, dass die Sicherheitsaussage nicht mehr ausreichend belastbar ist, sondern dass Freisetzungen zu erwarten sind, die so erheblich sind, dass eine Rückholung / Bergung trotz der damit verbundenen potentiellen Strahlenexposition notwendig wird bzw. rechtfertigbar ist.

9.3.2 Weitere mögliche Gründe

Die Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik führt zu neuen Optionen des Umgangs mit radioaktiven Abfällen (neue Endlagerkonzepte, Transmutationsoptionen), die eine Rückholung bzw. Bergung der radioaktiven Abfälle als zweckmäßig erscheinen lässt.

Die Nutzung der in den Abfällen vorhandenen Radionukliden wird als so wirtschaftlich bedeutend eingeschätzt, dass deren Rückholung bzw. Bergung erfolgen soll.

9.4 Technische Optionen der Rückholung und Bergung

9.4.1 Konventionelles „Fangen“

Die Rückholung von Gegenständen aus einer Bohrung wird beim Tiefbohren routinemäßig eingesetzt, z.B. zum Bergen von Messsonden. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik dargelegt, um die Anwendung auf die Bergung und Rückholung hoch-radioaktiver Abfälle einschätzen zu können.

Für eine Fang- und Rückholarbeit macht es prinzipiell keinen Unterschied, ob das zu fangende Objekt – in der Bohrtechnik als „Fisch“ bezeichnet – vorsätzlich oder unabsichtlich in diese Bohrlochposition gebracht wurde. Einen Fisch wieder sicher nach Übertage zu bringen, ist vor allem dann eine aufwändige detailliert zu planende Operation.

Die Masse eines Fisches in der gängigen Tiefbohrtechnik ist max. 50 Mg in Luft, das sind im Bohrlochbetriebsfluid etwa 45 Mg. Wichtig ist die Freiziehkraft, die der Bohrturm aufwenden muss um einen im „unverrohrten“ Bohrloch fest gegangenen Fisch wieder freizuziehen. Das kann bis zur Lastgrenze der Bohranlage gehen (> 500 Mg). In besonderen Fällen wird auch besonders starkes "Fanggestänge" eingesetzt, das niemals zum Bohren, sondern nur für Fangarbeiten zum Einsatz kommt.

Geräte, die in einem Bohrloch eingebracht und abgesetzt werden, müssen mit einem geeigneten Fangkopf ausgerüstet sein, um für ihre Rückholung eine sichere Verbindung mit einer Fangvorrichtung im Bohrloch herstellen zu können.

Gleichermaßen müssen auch die Einbring- und Fangservicegeräte dermaßen ausgelegt sein, dass im Falle einer Havarie oder Festwerden im Bohrloch, diese sich an einer vordefinierten Schwachstelle zuverlässig trennen, so dass auch diese ihrerseits von Fangwerkzeugen sicher angefahren und geborgen werden können.

Bohrlochfangwerkzeuge unterscheiden sich prinzipiell durch ihren Fangmechanismus, der entweder an der Außenseite oder im Inneren eines Fisches angreift. So genannte Overshots, die außen fangen, sind in ihrem Inneren mit einer zusammenschiebbaren Fangspirale ausgestattet, welche über den Fanghals des Fisches streift und beim Anziehen der Fanggarnitur sich am Hals mechanisch schlüssig verkeilt.

Sogenannte Tapertaps oder Grapples stellen im Prinzip übergroße Gewindeschneider dar, die sich an der Innenseite eines Fisches verkeilen. Sie stellen eine alternative Fangmethoden für den Fall dar, dass zu kurze oder beschädigte Fanghalse am Fisch eine sichere Verbindung außen nicht ermöglichen (Abb. 9-1). Sie verbinden sich mit dem Fisch durch Gestängerotation von übertage bis eine feste Schraubverbindung mit dem Fisch hergestellt wird. Durch beide Fangmethoden kann Spülung in den Fisch einzirkuliert werden um seine Chancen für Rückholbarkeit zu verbessern und bei beiden kann auch die Verbindung sicher wieder getrennt werden, für den Fall dass ein Fangversuch nicht erfolgreich ist /SCH 12/, /WEA 01/.

Bei der Übertragung der Methoden auf die Bergung bzw. Rückholung hoch-radioaktiver Behälter muss durch eine geeignete Auslegung und Dimensionierung der Fangwerkzeuge sichergestellt werden, dass die sicherheitsrelevanten Bereiche des Behälters nicht beschädigt werden können.

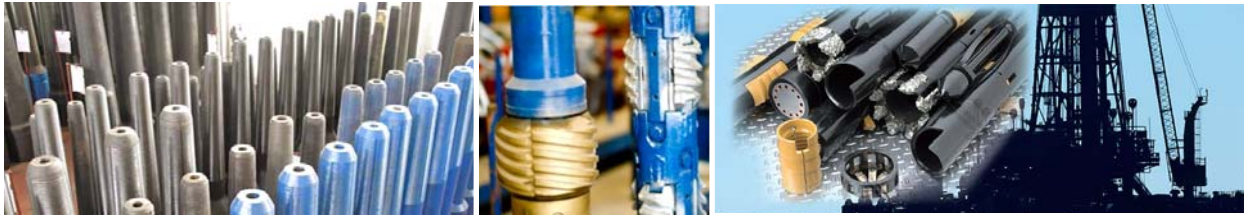


Abb. 9-1 Fangwerkzeuge aus der Tiefbohrtechnik: Taper-Tap (links), Grapple (mitte), so wie Overshot und Überbohrrohr (rechts)

In Bezug auf die Erfolgsaussicht für eine Rückholbarkeit ist die Kenntnis über die exakte Fischposition im Bohrloch von besonderer Bedeutung. Normalerweise ist das Fischen in verrohrten Bohrlöchern eine relativ einfache Operation und in der Mehrheit von Erfolg gekrönt²⁷. Fangarbeiten im offenen und unverrohrten Bohrlöchern sind eine Notsituation und stellen in jedem Fall ein Rennen gegen die Zeit dar, da die meisten geologischen Formationen die Tendenz haben, den Fisch einzuschließen, und die Erfolgsaussichten mit der Zeit abnehmen.

Weiterhin werden die erforderlichen Freiheitsbewegungen für einen Fangvorgang auf einen Fisch auf die Wahl des Fangwerkzeugen Einfluss nehmen. Planmäßig in verrohrten Bohrlöchern eingebrachte Geräte werden sehr häufig und mit guten Rückholbarkeitserfolgsrate am Kabel gefangen und geborgen. Ihr Fangvorgang erfordert mittels einer speziellen mechanischer Einrastvorrichtung in der Regel nur einen Freiheitsgrad in der zentrierten axialen Bohrlochrichtung: auf und ab. Ein elektrischer Ver- und Entriegelungsmechanismus mit Riegelpositionsübertragung nach Übertage kann für diesen Vorgang von Vorteil sein.

Unabsichtlich im Bohrloch verloren gegangene Geräte können am Fanghals auch beschädigt sein. Solche Fische werden im Vorfeld zu Fangarbeiten vorher auf deren Zustand und Position im Bohrloch mit Hilfe von Kabelmesseinfahrten (engl: Logging) im Bohrloch überprüft. Nach Ergebnis dieser Bohrlochmessungen wird üblicherweise eine

²⁷ In der Bohrtechnik besteht nicht die Notwendigkeit zwingend jedes Gerät aus dem Bohrloch zu bergen. Da ein Bergen mit erheblichen Kosten verbunden sein kann, ist es üblich eine Kosten-Nutzen-Rechnung durchzuführen.

Entscheidung über den Einsatz der einzusetzenden Fangmethode getroffen. Abhängig vom Gewicht des Fisches wird in vielen Fällen ein Fangversuch zuerst am Kabel versucht und nur bei dessen Nichterfolg dann auf Coil Tubing (CT) oder den Einsatz einer Bohranlage ausgeweitet.

Da ein Verlust von Geräten in offenen Bohrlochsektionen in der Regel immer mit Bohr- oder Komplettierungsarbeiten verbunden ist, wird die ohnehin auf Lokation stehende Bohranlage in der Regel sofort mit den Fangarbeiten im Rahmen ihres Einsatzes beginnen /JOH 12/.

9.4.2 Übertragung der Fangmöglichkeit auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R

Die oben genannten Verfahren stehen auch für die DBC-R prinzipiell zur Verfügung. Die Behälter befinden sich in einem verrohrten Bereich (Auslegung). Aufgrund der Dimension des Behälters (Länge, Durchmesser Verhältnis Verrohrung und Behälter) wird davon ausgegangen, dass der Behälter in der Verrohrung nahezu zentriert verbleibt.

Die dem Konzept zugrunde liegenden DBC-R Behälter sind so ausgelegt, dass verschiedene Fangmethoden eingesetzt werden können (Overshot oder Grapple). Vor Beginn der Fishing-Operation sollte über eine Analyse einer Fluidprobe die Kontamination im Bereich des Behälters festgestellt werden. Alle Stoffe und Geräte, die aus dem Bohrloch bei der Bergung oder Rückholung an die Oberfläche kommen, müssen dort hinsichtlich radioaktiver Kontaminationen ausgemessen werden.

9.4.3 Gefahren und Risiken während Fangarbeiten

Im Folgenden werden die in der Bohrtechnik angewandten Standardverfahren beschrieben. Die häufigsten Fangarbeiten werden in unverrohrten Bereichen durchgeführt. Meist werden nicht gezielt abgesetzte Geräte geborgen, sondern Werkzeuge die beim Bohren beschädigt wurden.

Der Vorgang des Fangens so wie auch der Rückholung eines Fisches nach über Tage kann u. U. eine erhebliche Belastung in der Form von Druckspitzen für die Bohrlochwand darstellen, welche unerwartete Reaktionen im Bohrloch zur Folge haben können. Derartige Bohrlochreaktionen sind immer unerwünscht, da sie immer eine Abänderung

der Operationsplanung bis zum Punkt der Disqualifikation der ausgewählten Fangmethode mit sich bringen kann und sie können erhebliche Gefahren für das Bohrloch und die Umwelt darstellen.

Besonders in gasführenden Formationen können Druckschwankungen im Bohrloch sehr oft neutrale Bohrung schlagartig zur Gasproduktion stimulieren, weshalb in bekannten Gasregionen von den Behörden für Fangarbeiten grundsätzlich obertägige Druckschleusen gefordert werden, um unkontrollierte Gasausbrüche zu vermeiden. Solche Schleusen sind für Bohrgestänge, CT und Kabel gleichermaßen verfügbar und müssen in die Planung einer Fangarbeit einbezogen werden.

Auch kann der Vorgang des Fangens, im Besonderen mit Gestänge, im Bohrloch und seinen Verrohrungen Schäden mit sich bringen. Wenn Fanggestänge nicht mit Vorsicht in ein Bohrloch eingefahren wird (z. B. um Zeit zu gewinnen), kann es schon durch sein Eigengewicht Schäden an zu fangenden Fisch oder auch Risse im Casing (Verrohrung) erzeugen.

Wenn es die Vorbereitungszeit für eine Fangarbeit zulässt, sollte eine Risikobewertungsmatrix (engl: RAM) im Rahmen eines Risiko-Management-Prozesses (RM) zusammen mit einem operativen Work Flow entwickelt werden und jedem Fangtrupp im Vorfeld zur Verfügung gestellt werden. Eine RAM identifiziert für alle geplanten Operationsstufen eine Risikokategorie in der Form von Wahrscheinlichkeit und Folgen. Der RM Prozess entwickelt dann für alle Risikokategorien einen Abwendungsplan, inkl. der Kosten für eine Risikoverhinderung /BAI 00/. Nach der Abwendungsstrategie sollte die restliche Projektgefährdung ohne verbleibende unakzeptable Risiken wieder definierbar sein.

So wie bei jeder Bohrlochaufwältigung besteht die Gefahr von Komplikationen auch bei der Rückholung eines Fisches, was den Einsatz von besonderen Technologien und Servicearbeiten erfordern könnte. Die häufigste Komplikation während einer solchen Operation ist die Unfähigkeit den Kopf des Fisches anzufahren oder gar mit dem Fanggerät fest zu werden, so dass dann zwei Fische im Bohrloch verbleiben. Auch ein Kollaps des Bohrloches während des Fangvorganges könnte auftreten, so dass man nicht mehr mit dem gefangenen Fisch ausfahren kann oder der Fisch geht während der Ausfahrt selbst verloren. Letzteres stellt eine der gefährlichsten Havarien dar, da sie i.d.R. immer mit einem Absturz und gewaltsamen Aufschlag des Fisches auf Sohle verbunden ist. Meistens ist der Fisch danach dann auch nicht mehr fischbar und eine Rück-

zementation der Bohrung mit Verbleib des Fisch unter Zement muss in der Folge eingeleitet werden. Deshalb muss nach erfolgreichem Fangen des Fisches in die Richtung investiert werden, diesen nicht auf dem Weg nach übertage zu verlieren.

9.4.4 Übertragung der Risikobewertung von Fangarbeiten auf die Rückholung bzw. Bergung von DBC-R

Aufgrund der Risiken bei einer Bergung aus einem nichtverrohrten Bereich (s.o.) wird hier von einer vollständig verrohrten Bohrung ausgegangen. Die Anlage muss so ausgelegt werden, dass eine Beschädigung von Casing oder Behälter ausgeschlossen wird (der Faktor Zeit/Kosten wird hier nicht wie sonst bei Bohrungen üblich als bestimmender Faktor angenommen).

Im Konzept ist beschrieben, wie der Bohrlochausbau und Einlagerung erfolgen und die Behälter gestaltet werden könnten, um ein sicheres Fangen zu gewährleisten. Daher sind die o.g. Risiken aus der konventionellen Bohrtechnik nicht direkt auf die Fangarbeiten des DBC-R übertragbar. Die Notwendigkeit des Freiziehens eines Behälters ist im stahlverrohrten Bohrloch nicht zu erwarten.

Dennoch besteht Bedarf an weiterführender Forschung und Entwicklung, um dies systematisch abzu prüfen.

9.5 Konzept zur Rückholbarkeit bei der tiefen Bohrlochlagerung

Die international betrachteten Szenarien zur Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern haben bisher die Reversibilität von Entscheidungen, insbesondere die Rückholung bzw. Bergung (eigentlich nur Bergbarkeit nach /BMU 10/) nach einer längeren Zeitspanne für die Tiefe Bohrlochlagerung, nicht ausführlich gewürdigt, da diese nicht beabsichtigt wurde bzw. als zu aufwendig oder gar unmöglich betrachtet wurde (siehe Kapitel 4).

Um den Aspekt der Reversibilität der Entscheidung einer Einlagerung in ein tiefes Bohrloch, nämlich die Rückholbarkeit, diskutieren zu können, werden verschiedene Lösungswege skizziert, welche auf dem aktuellen Stand der Bohrtechnik basieren und eine Rückholung erlauben könnten.

Ein Konzept zur Bergung (nicht gefordert) für bis zu 500 Jahre wird nicht diskutiert, da dies eine entsprechende Handhabbarkeit der Behälter voraussetzt, die mit der konzipierten DBC-R Kokille nicht angenommen werden kann.

Die Autoren gehen davon aus, dass die Bohrungen nach der Einlagerung (max. 3 – 5 Jahre²⁸) verschlossen und verfüllt werden. Die Rückholung bezieht sich deshalb auf einen Zeitraum von ca. 3- 5 Jahren.

Die Gefährdungsbeurteilung und das Risikomanagement müssen im Bergbau immer standortbezogen durchgeführt werden. Dies gilt auch für die Rückholung von Behältern, bei denen Handlungsoptionen spezifisch geprüft und ausgelegt werden müssen.

Die Verfahren für eine Rückholung (Coil Tubing, Hanging Liner, Fishing) sind im Routinebetrieb für die heutigen Bohrlochdurchmesser erprobt. Die Kombination der Verfahren wurde bisher nicht im Routinebetrieb eingesetzt und eine störungsfreie Anwendung ist zu zeigen.

Beim Einbau wird im Bereich oberhalb der Rückhalteformation zusätzlich zu den zwei zementierten Verrohrungen eine Liner-Verlängerung als „Hanging Liner“ mit einer hydraulischen Schleuse genutzt (Abb. 9-2). Die Behälter werden z. B. über ein Gestänge oder Coil Tubing abgelassen und zusätzlich über ein Seil gesichert (siehe auch Kapitel 7). Bei einem Störfall (Seil reißt oder das Gestänge bricht) ist eine zweite unabhängige Sicherheit gegeben. Aufgrund der Dimensionierung der Behälter und der bremsenden Wirkung der Spülung im Rohr ist eine Beschädigung der Behälter selbst bei Verlust beider Sicherungssysteme nicht zu erwarten.

Die „Liner-Verlängerung“ mit hydraulischer Schleuse stellt eine zusätzliche unabhängige Bergungsoption zur Verfügung für den Fall, dass der Behälter verklemmen sollte.

²⁸ Der Einlagerungsvorgang von z.B. ca. 280 Behältern in eine Bohrung mit 2 km Einlagerungsintervall in einem Tiefenbereich zwischen von 3 bis 5 km, einer Behälterlänge von 5 m und bei gegebenen Behälterabständen dauert ca. 3 Jahre, wenn man 2 Behältern pro Woche einlagert (es sind auch wesentlich schnellere Einlagerungsvorgänge denkbar). Damit erstreckt sich auch die Rückholbarkeit auf einen vergleichbaren Zeitraum. Danach steht zumindest eine Teilverfüllung der Bohrung an.

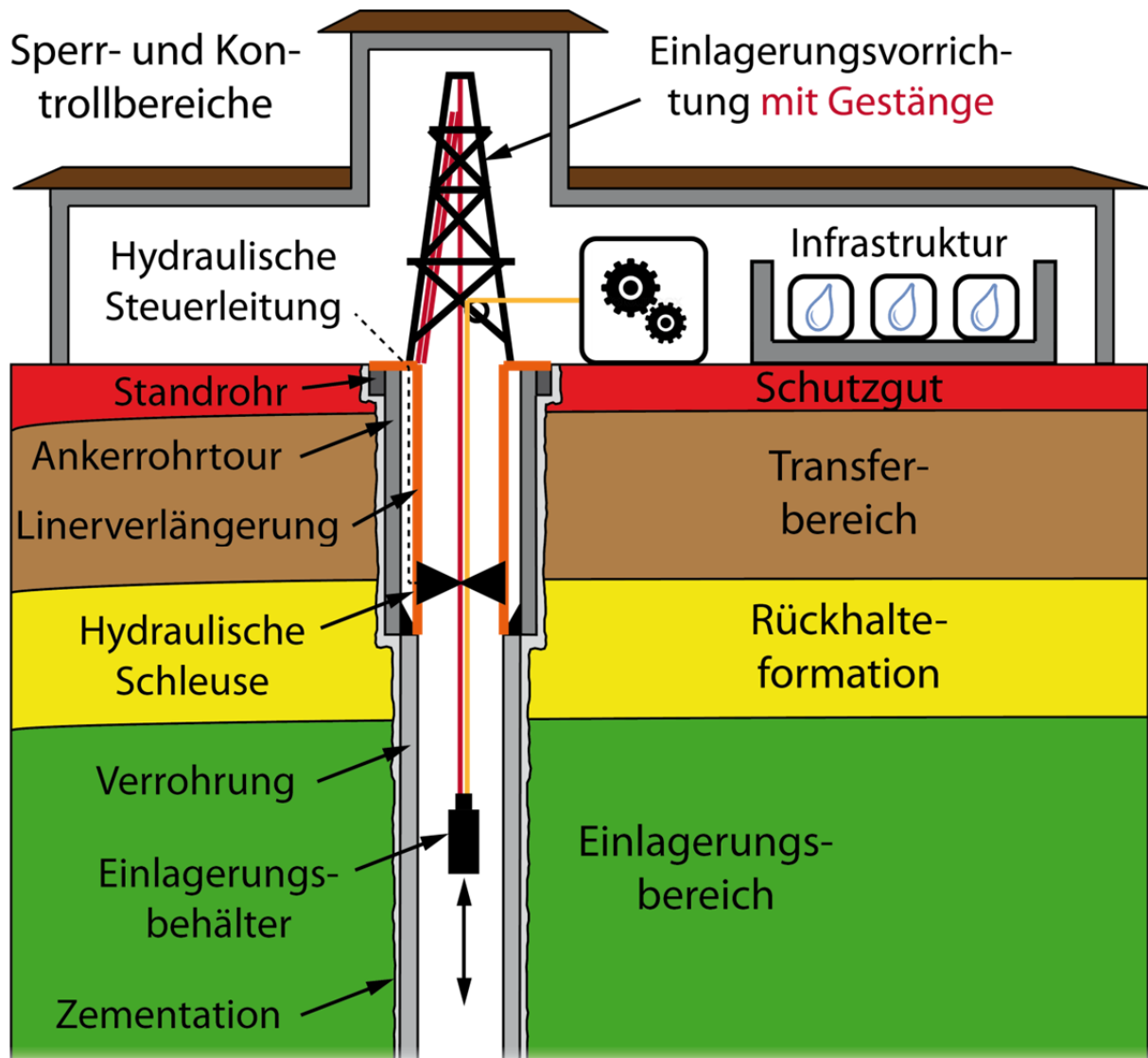


Abb. 9-2 Schematische Abbildung der Einlagerung und Rückholung. Maße nicht skaliert.

Folgende vereinfachte Szenarien werden angenommen (siehe auch Kapitel 10):

- A. Verklemmen eines Behälters während des Einlagerungsvorgangs ohne Freisetzung von Radionukliden. D.h. der Behälter an sich bleibt intakt (analog zur Rückholung von Behältern aus Bergwerken).
- B. Beschädigung des einzulagernden oder bereits eingelagerten Behälters im Verlauf eines Einlagerungsvorgangs mit Freisetzung von Radionukliden.

Eine ständige radiometrische Überwachung des Einlagerungsbetriebes und des Bohrlochs ist vorausgesetzt. Folgende Maßnahmen sind für diese Fälle denkbar:

1. Der Behälter befindet sich bereits in einer Tiefe, die zur Einlagerung geeignet ist und die geologische/physikalische Barrieren können genutzt werden (Abb. 9-2).
 - Die Rückholung erfolgt mit Fishing-Tools s.o. (Die Technologien für eine Rückholung sind in Kapitel 6 beschrieben).
Alternativ kann die Einlagerung gestoppt und die Bohrung verschlossen (verfüllt) werden. Da die Sicherheit durch die geologischen Barrieren hier ausreichend erfüllt ist, muss der Behälter aus Sicherheitsgründen nicht zwingend zurückgeholt werden.
 - Bei einem beschädigten Behälter kann das Bohrloch verschlossen werden.

2. Der Behälter befindet sich in einer Tiefe oberhalb der Rückhalteformation. In diesem Bereich wirken die geologischen Barrieren noch nicht ausreichend. Die Integrität der Behälter wird überprüft:
 - Ist der Behälter noch intakt, kann dieser zurückgeholt werden (z. B. Fishing)
 - Ist der Behälter beschädigt, ist mit der „Liner-Verlängerung“ mit hydraulischer Schleuse eine zusätzliche technische Möglichkeit vorhanden, die für eine Rückholung genutzt werden kann. Diese „Liner-Verlängerung“ ist eine nicht zementierte Rohrtour, die bei der Einlagerung als zusätzliche Führung durch den Trinkwasserhorizont und den Transferbereich dient. Ein im „Liner-Verlängerung“ feststeckender Behälter kann – unabhängig davon ob er intakt oder beschädigt ist - zusammen mit dem Liner rückgeholt (gezogen) werden (Abb. 9-2). Aufgrund der Schleuse an der Unterseite der „Liner-Verlängerung“ vorgesehen, bleibt die einzementierte Verrohrung weitestgehend von einer Kontamination verschont (ggf. muss auch diese dann ausgebaut werden). Die obertägigen Anlagen sind dabei so zu gestalten (bzw. sollte eine entsprechende Umbaumöglichkeit vorgesehen sein), dass ausreichende Lagervolumina für belastete Spülung und Rohrtour vorgehalten sind.

Darüber hinaus sind andere bergbauliche Maßnahmen oberhalb der Rückhalteformation im Transferbereich denkbar z. B. Auffahrung eines Bergwerks.

9.6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Das sichere Einbringen von Geräten und deren Rückholung in entsprechend ausgebauten Tiefbohrungen ist Stand der Technik. Für die Einlagerung von Behältern mit hoch-radioaktivem Material scheint eine Übertragung dieser Erfahrungen möglich.

Es müssen jedoch zusätzliche Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Im vorgestellten Konzept werden entsprechende Möglichkeiten hierzu skizziert. Der Bedarf an Forschung und Entwicklung liegt u. a. in der Adaption der vorhandenen Techniken sowie bei der Berücksichtigung des Strahlenschutzes.

Für eine Bergung aus einem verfüllten Bohrloch wird das Bohrloch entweder wieder aufgewältigt (wieder geöffnet/aufgefahren) oder über eine Neubohrung die Lokation der Behälter in der Tiefe von außen angefahren. Diese Verfahren sind in der Kohlenwasserstoffindustrie erprobt.

Für eine etwaige Bergung liegen keine Erfahrungen zu Behältern und Bohrlochkonzeptionen vor, um eine Aussage zuzulassen, ob nach einer Zeit von 500 Jahren sowohl die Behälter als auch der Bohrlochausbau noch ausreichend intakt sind, um die Behälter sicher bergen zu können. Daher besteht für Konzept zur Bergbarkeit von Behältern mit hoch-radioaktiven Abfällen und deren Bergung (Bergbarkeit vorausgesetzt) ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, sofern dies gefordert wird.

9.7 Fazit

Zusammenfassend erscheint die Reversibilität einer Entscheidung zur Lagerung in einem tiefen Bohrloch mittels einer Rückholung für einen definierbaren Zeitraum möglich. Für den in den Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ angedachten Zeitraum von 500 Jahren für eine Bergbarkeit der Behälter erscheint eine Bergung als eine Maßnahme der Reversibilität nicht möglich.

9.8 Literatur Kapitel 9

- /BAI 00/ Bailey, W., Couët, B., Lamb, F., Simpson, G., Rose, P.: Taking a calculated risk, Oilfield Review, Bd. 12, Nr. 3, S. 20–35, 2000.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /ESK 11/ Entsorgungskommission: „Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier“, Hrsg.: RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, 45 S., Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL), 2. September 2011, zitiert am 17. Februar 2016.
- /JOH 12/ Johnson, E., Land, J., Lee, M., Robertson, R.: Landing the Big One—The Art of Fishing, Oilfield Review, Bd. 2013, Nr. 24, S. 26–35, 2012.
- /SCH 12/ Schlumberger: Fishing Tools and Services Catalogue, Commercial advertisement, 2012.
- /WEA 01/ Weatherford Inc.: Weatherford Fishing Best Practices Training. Course Manual, Commercial advertisement, 2001.

10 Risiken-Szenarien

In diesem Kapitel werden Szenarien dargestellt, die mit Risiken für den sicheren Betrieb der Einlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöchern bzw. der Rückholung verbunden sind sowie den sicheren Einschluss der Abfälle im Endlagerungsbereich betreffen könnten. Risiken bezüglich der Stabilität eines Bohrlochs während der Erstellung bzw. technische Risiken bei der Einlagerung in tiefe Bohrlöcher wurden in Kapiteln 6 und 7 betrachtet.

Nachfolgend werden einige wichtige Szenarien mit den verbundenen bzw. abgeleiteten Risiken beschrieben:

- Freisetzung von Radionukliden während der Einlagerung aus dem Einlagerungsbehälter (z. B. wegen Beschädigung).
- Korrosion der Einlagerungsbehälter, Lösungskontakt mit den Abfällen und Mobilisierung von Radionukliden im Einlagerungsbereich.
- Natürliche und geologische Szenarien, die die Stabilität der tiefen Bohrlöcher nach einer Einlagerung langfristig beeinträchtigen können wie Vulkanismus, Erdbeben, etc.

Einige Szenarien beinhalten Vorgänge, die zu einer Radionuklidfreisetzung führen können. Eine abdeckende Betrachtung aller Szenarien im Sinne einer Szenarienanalyse verbunden mit einer FEP-Analyse wurde nicht angestrebt.

10.1 Störfälle während der Einlagerungsphase mit Radionuklidfreisetzung

Aufgrund der Tatsache, dass eine Einlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern bislang technisch nicht erprobt wurde, existieren auch keine Erfahrungen zu möglichen Schwierigkeiten bei der technischen Realisierung. In jedem Fall müssen im Rahmen von Betrachtungen der Betriebssicherheit solche Szenarien bewertet werden, die zu Störungen bei der Einlagerung führen können (siehe auch /BRA 09/). Für einen Sicherheitsnachweis sind solche Entwicklungen zu betrachten, die zu Radionuklidfreisetzung und –transport in die Biosphäre führen können.

Im Folgenden wird daher ein hypothetischer Vorgang skizziert, der zu einer Radionuklidfreisetzung führen kann:

Während der Einlagerung in tiefe Bohrlöcher kommt es zu unterschiedlich starker Beschädigung der Abfallbehälter und in der Folge zu einem Kontakt des Bohrlochbetriebsfluids mit der Abfallform und zur Freisetzung von Radionukliden. Eine Kontamination der Poren- oder Grundwässer erfordert eine beschädigte Verrohrung der Bohrung. Da hier die Einlagerung betrachtet wird, wird noch nicht von einer nennenswerten Korrosion der Bohrung ausgegangen.

Das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung und die Freisetzungsprozesse hängen entscheidend ab von der Kontaktzeit der Lösung mit der Abfallform sowie der An- bzw. Abwesenheit von Luftsauerstoff. In diesem Zusammenhang muss nochmals auf die Rolle des Bohrfluids hingewiesen werden. Behälterkorrosion und Radionuklidfreisetzung wird bei gängigen Materialien nicht auszuschließen sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn das Bohrfluid sich mit eindringenden wässrigen Lösungen mischt. Derzeit sind Aussagen zu den sich möglicherweise einstellenden Konzentrationen nur bedingt möglich. Für die nachfolgenden Betrachtungen wurde eine wässrige Lösung mit einer ungünstigen Zusammensetzung wie im Kapitel 10.8 beschrieben zugrunde gelegt.

Es werden drei mögliche Havariefälle während der Einlagerung betrachtet, wobei in allen Fällen von Beschädigungen des Behälters und einem Lösungszutritt zur Abfallform ausgegangen wird:

1. Auftreten eines lokalen Risses im Behälter bzw. Overpack, wie es durch Schweißnahtversagen möglich ist und Radionuklidfreisetzung über eine begrenzte Zeit von ca. 30 Tagen /GRA 98b/. Dabei wird nur ein Brennstab bzw. die Zylinderoberfläche eines Glasblocks mit Lösung kontaktiert. Durch den Zutritt von Lösung ins Innere des Behälters findet dort lokal Korrosion der Abfallform statt. Die Gasbildung im gesamten Bohrloch wird durch die zusätzliche Innenkorrosion nicht nennenswert erhöht.
2. Es tritt ein erheblicher Behälterdefekt durch mechanische Zerstörung des Behälters auf, wobei alle Brennstäbe bzw. die gesamte Glasoberfläche in einem DBC-R Behälter²⁹ mit Lösung im Kontakt stehen. Auch hier wird von einer relativ kurzen Periode der Radionuklidfreisetzung von 30 Tagen ausgegangen.

²⁹ Vorgesehenes Inventar eines DBC-R Behälters (siehe Kap. 7.1.2): Brennstäbe von 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE (Inhalt ca. 2.900 kg) oder 3 HAW-Glas Kokillen von Typ CSD-V Inhalt (ca. 1.500 kg)

3. Es tritt eine schwere Havarie ggfs. im Bereich eines Grundwasserleiters im oberen Bereich des Bohrlochs auf, die keine kurzfristige Korrektur oder Rückholung des defekten Behälter erlaubt (Totalverlust; „worst case“).

Fall 1)

Es resultiert folgende Radionuklidfreisetzung:

- Mit der im Anhang angegebenen Auflöserate, der geometrischen Oberfläche und der Aktivitätskonzentration in Glas ergibt sich eine Kurzzeit Umsetzung von der Glasoberfläche im Behälter von 10 g Glas/Tag, daraus kann die darin befindliche Aktivität freigesetzt werden. Dies entspricht einer β/γ -Aktivität von ca. 2×10^{11} Bq/Tag (Stand heute) und 4 mg Pu/Tag.
- Die instantane Freisetzung aus dem abgebrannten Kernbrennstoff (IRF), die innerhalb von ca. 30 Tagen stattfindet, beträgt ca. 1×10^{11} Bq β/γ -Strahler aus einen Brennstab.

Bei Verteilung dieser Aktivität auf das hypothetische Kontaktvolumen im Bohrloch (ein kontaminiertes Volumen von 20 m^3 wurde zugrunde gelegt) ergibt sich eine β/γ -Strahler Konzentration von ~ 8000 Bq/g Fluid, ein Wert, der über dem Freigabewert der /STV 08/ liegt.

Fall 2)

Eine Havarie bei der Einlagerung, die zu einem erheblichen Behälterdefekt führt, kann bei der mechanischen Zerstörung (Druckbelastung) der Behälter zustande kommen. Dabei werden alle HAW-Behälter in einem Gebinde bzw. alle Brennstäbe betroffen, wobei im Falle der HAW-Gläser die gesamte Glasoberfläche verfügbar wird.

Die freigesetzte Aktivität ist linear mit der Glasoberfläche bzw. der Anzahl der Brennstäbe im Gebinde: Beim Glas werden pro Tag entsprechend der Gesamtfläche der 3 Behälter im Overpack ca. 8 kg Glas korrodiert. Dabei können etwa 1% des Inventars einer HAW-Glaskokille korrodiert und ca. 10^{14} Bq β/γ -Strahler bzw. 10^{12} Bq α -Strahler innerhalb eines Tages mobilisiert werden.

Im Falle einer Havarie mit einem erheblichen Defekt eines Brennelementbehälters muss man davon ausgehen, dass aus den 818 Brennstäbe 4% des ^{137}Cs -Inventars

und etwa 10% des ^{129}I -Inventars innerhalb von 30 Tagen mobilisiert werden können. Bei ^{137}Cs (Stand heute) beträgt die Freisetzung dann 6×10^{14} Bq (3×10^7 Bq/g Fluid).

Derartige Ereignisse wie für Fall 1) und 2) beschrieben können anhand von Kontaminationsmessung des Einlagerungsgeräts leicht entdeckt werden. Da das Ausmaß instantaner Radionuklidfreisetzungen durch leicht detektierbare Radionuklide wie ^{137}Cs bestimmt wird, lassen sich derartige Störfälle durch Monitoring des Bohrlochfluids mit einem Durchflussdetektor leicht erkennen. Durch zusätzliche Überwachung der Gasphase im Bohrloch mit Hilfe existierender Detektorkonzepte lassen sich auch gasförmige Radionuklidfreisetzungen kontinuierlich überwachen. Beispielsweise beträgt die instantan freigesetzte ^{85}Kr Aktivität aus einem 50 Jahre alten UO_2 Brennstoff 8×10^9 Bq (Fall 1) bzw. 6×10^{12} Bq (Fall 2). Mögliche Gegenmaßnahmen sind in Kapitel 9 beschrieben.

Die Gesamtmenge an freigesetzten Radionukliden aus HAW Glas und abgebranntem Kernbrennstoff hängt von der Dauer der Maßnahmen zur Rückholung der beschädigten Gebinde bzw. den Reparaturmaßnahmen ab. Den angegebenen Schätzdaten für die Fälle 1) und 2) liegt ein Zeitraum von 30 Tagen zugrunde, in denen Radionuklide aus den Gebinden ausgetragen werden könnten. Dabei wird es sich im Wesentlichen um leicht zu mobilisierende Spalt- und Aktivierungsprodukte wie z.B. $^{137/135}\text{Cs}$, ^{14}C und ^{129}I handeln.

Für Rückhol- bzw. Reparaturmaßnahmen werden in jedem Fall Strahlenschutzvorkehrungen getroffen und müssen Infrastrukturbereiche eingerichtet sein. Alle Tätigkeiten erfolgen unter den Randbedingungen, die ein Umgang mit offener Radioaktivität mit sich bringt. Es sind Einrichtungen wie heiße Zellen mit Manipulatorausstattung vorzusehen, die die Handhabung beschädigter Behälter, ggfs. Reparatur oder Umladung erlauben. Weiterhin sind Methoden und Techniken zu entwickeln, um kontaminierte Bohrlochlösungen und Bereiche des Bohrlochs bzw. der Umgebung in der Folge der Havarie dekontaminieren zu können.

Fall 3)

Unter einem „Worst Case“ werden solche Vorgänge subsummiert, die langfristig wirksam sind, wenn z. B. beim „Verlust einer Bohrung“ keine Reparaturmaßnahmen wegen schlechter Zugänglichkeit und hohen Ortsdosisleistungen an der Stelle der Havarie gelingen und deren Langzeitauswirkungen erheblich sein können. Dies könnten z. B. Er-

eignisse sein, bei denen ein Behälter in solchen Teufen und an solchen Stellen havariert, in denen durch vorhandene Wegsamkeiten die Kontamination eines Grundwasserleiters ermöglicht wird. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten insbesondere solcher Ereignisse sind wegen signifikanter Auswirkungen auf Mensch und Umwelt durch Standortauswahl, technische Maßnahmen beim Bau und der Auslegung der Anlage zu minimieren. Dennoch wird ein solcher Fall als „worst case“ Szenario hier skizziert. Dauert die Havarie deutlich länger als einige Tage, werden neben den bereits oben angesprochenen Kurzzeitprozessen zusätzliche Freisetzungsmechanismen wirksam. Neben den Spaltprodukten können dann auch Actiniden wie Uran, Plutonium, Americium, Neptunium sowie langlebige Spaltprodukte wie ⁹⁹Tc einen wesentlichen Beitrag zur Kontamination des Bohrlochinhalts leisten und in die Umgebung des Bohrlochs gelangen, falls zusätzlich die Verrohrung beschädigt ist. Im Falle von oberflächennahen Havarien müssen oxidierende Bedingungen berücksichtigt werden, bei Havarien in größerer Tiefe können reduzierende Bedingungen vorherrschen, die die chemische Form und die maximalen Löslichkeitskonzentrationen dieser redoxsensitiven Radionuklide in erheblichem Maße beeinflussen. Folgende Annahmen werden für das geochemische Milieu getroffen:

Tab. 10-1 Definition der oberflächennahen und tiefen Havariebedingungen und verfügbare Datenbasis

	Tiefe Bohrlöcher	Systeme, für die Löslichkeitsdaten für Radionuklide vorliegen
Lösung	Salzlösung	Wasser NaCl-Lösungen MgCl ₂ -Lösungen
Feststoffanteil	?	keine
pH	?	1 ≤ pH ≤ 12
Redoxpotential	Oberflächennah: oxidierend Tief: reduzierend	Reduzierend bis oxidierend
Salzgehalt	?	Ionenstärke ≤ 15 mol/kg
Wasserstoffpartialdruck	?	0 bis 5 MPa
Temperatur	Oberflächennah: 25°C Tief: >200°C	25 °C

Daten zu maximalen Radionuklidkonzentrationen in den untersuchten Systemen für relevante pH-Bereiche sowie für oxidierende und reduzierende Bedingungen sind in /KIE 12/ im Detail dargestellt.

Die Wertigkeiten der redoxsensitiven Radionuklide und damit ihr Löslichkeitsverhalten (siehe Tab. 10-2) unterscheiden sich bei oberflächennahen und bei tiefen Havarien. Bei tiefen Havarien hängen die Wertigkeiten auch davon ab, ob frisches, luftgesättigtes Bohrlochfluid in Kontakt mit den Abfällen kommt, oder ob die Havarie solange andauert, dass der in der Spülung gelöste Sauerstoff durch Korrosionsprozesse schnell verbraucht wird sich daher reduzierende Bedingungen einstellen.

Tab. 10-2 Daten zur Ermittlung der Radionuklidfreisetzung unter Havariebedingungen

	Oberflächennahe Havarie	Kurzzeitige tiefe Havarie	Langfristige tiefe Havarie
Referenzsystem	Bohrlochfluid	Bohrlochfluid	Mischung Bohrlochfluid – Zement - Grundwasser
Sauerstoffgehalt	Luftgleichgewicht	Abhängig von Durchmischung und Zeit	Sehr gering
Carbonatgehalt	Luftgleichgewicht	Abhängig von Bohrlochfluid	Abhängig von Gestein/Grundwasser
pH _m	6 < pH _m < 9	6 < pH _m < 9	5 < pH _m < 9
Redox Zustand	Oxidierend	Redoxneutral	reduzierend
Oxidationszustand			
Americium	Am(III)	Am(III)	Am(III)
Thorium	Th(IV)	Th(IV)	Th(IV)
Uran	U(VI)	U(VI)	U(IV)
Neptunium	Np(V)	Np(IV)/Np(V)	Np(IV)
Plutonium	Pu(V)	Pu(IV)/Pu(V)	Pu(III), Pu(IV)
Technetium	Tc(VII)	Tc(VII)	Tc(IV)

Prinzipiell können mehrere Zeitabschnitte unterschieden werden, in denen spezielle Mechanismen der Radionuklidfreisetzung wirksam sein können. Folgende Zeitabschnitte können definiert werden:

- Korrosionsperiode: Korrosion des Behälterstahls und damit verbundene Gasentwicklung. Diese Periode wird im folgenden Kapitel „Korrosionsprozesse an Behälter und Casing und Wasserstoffgasbildung“ behandelt. In dieser Periode

bilden sich Gasdrücke und mechanische Drücke durch Korrosionsprozesse aus, die zu advektiven Aufwärtstransportprozessen führen können. Druckaufbau ist von untergeordneter Bedeutung solange keine Verschlüsse eingebaut wurden und das Bohrloch nach oben offen ist.

- Periode der Freisetzung von IRF im Falle des Brennstoffs und der raschen Auflösung im Falle des HAW-Glases (bereits oben beschrieben).
- Periode der langsamen, diffusionskontrollierten HAW-Glasauflösung sowie der α -radiolytisch bedingten Kernbrennstoffkorrosion. Wie oben beschrieben, spielt die α -Radiolyse des Wassers eine entscheidende Rolle bei der Korrosion von abgebranntem Kernbrennstoff. Experimentelle Arbeiten zeigten eine abnehmende Korrosionsrate mit abnehmender α -Dosis /FIN 09/, /POI 05/. Die Grenze, bis zu welcher die α -Dosis die Brennstoffkorrosion dominiert wurde zu 18 - 33 MBq g⁻¹ abgeschätzt. Dieser Aktivitätsbereich entspricht einem Alter des UO₂ Brennstoffs von 4.500 bis 15.000 Jahren und zwischen 42.000 und 55.000 Jahren für einen 60 GWd/t MOX Brennstoff.
- Periode der thermodynamisch kontrollierten Radionuklidauflösung und advektiver bzw. diffusiver Transportprozesse.

Während die weiter oben genannten Prozesse meist zur raschen Freisetzung einiger Spalt- und Aktivierungsprodukte führen, führen die langsamen Prozesse der Abfallformauflösung einerseits zur fortschreitenden Freisetzung von nicht-löslichkeitsbegrenzten Spalt- und Aktivierungsprodukte wie z.B. ^{135/137}Cs, ¹²⁹I, ³⁶Cl, ¹⁴C. Andererseits lösen sich Actinidespezies und andere Spezies typischerweise nur bis zum Erreichen der jeweils geltenden Löslichkeitsgrenzen. Sobald diese überschritten sind, bleibt ihre Lösungskonzentration im geschlossenen System bzw. bei vernachlässigbarem Lösungstransport weg von der Quelle konstant. Löslichkeitsgrenzen werden von den jeweils vorliegenden geochemischen Bedingungen abhängen. Unter oxidierenden Bedingungen in Gegenwart von Luftsauerstoff sowie in Anwesenheit komplexbildender Substanzen werden gelöste Konzentrationen an Actiniden deutlich höher liegen, als unter reduzierenden Bedingungen in großen Teufen.

Fazit:

Bedingt durch Verwendung eines Bohrlochbetriebsfluids ist aus heutiger Sicht bei defektem Behältermaterial ab dem Zeitpunkt der Einlagerung ein Kontakt der Abfallform

mit Lösung zu erwarten. Die Radionuklidmobilisierung aus HAW-Glas und abgebrannten Kernbrennstoffen kann unter dem Vorbehalt einer sehr vereinfachten Betrachtung für verschiedene Havarie-Fälle bei Einlagerung abgeschätzt werden. Bereits bei geringen Schadensausmaßen ist von erheblichen Radionuklidfreisetzungen auszugehen.

Dies erfordert die vorbereitende Planung von Rückhol- und Reparaturmaßnahmen unter den Bedingungen des Strahlenschutzes, die für den Umgang mit offenen Radionukliden maßgeblich sind, sowie die Vorhaltung technischer Einrichtungen, die eine Reparatur bzw. Umfüllung rückgeholter defekter Behälter (Einrichtung von Kontrollbereichen, Heißen Zellen etc.). Ggfs. sind Technologien zur Dekontamination in Bohrlochbereichen zu entwickeln, falls eine Rückholung wegen einer Havarie mit Behälterdefekt im Bereich des Schutzguts auftritt.

Während das Radionuklidinventar und die Temperatur als Funktion der Zeit verfügbar oder berechenbar sind, beruhen die vorgenommenen Abschätzungen auf der Datenbasis, die in salinaren Lösungen (hauptsächlich konzentrierte $MgCl_2$ -Lösung) gewonnen wurden. Das Gleiche gilt für die Mobilisierung von Radionukliden und die sich möglicherweise einstellenden Lösungskonzentrationen. Für realistischere Prognosen sind die geo-/chemischen Randbedingungen genauer abzugrenzen, bzw. Daten zu Radionuklidfreisetzung und -löslichkeiten ggf. neu zu bestimmen.

Es ist weiterhin zu prüfen, ob durch Korrosion von Behälter und Casing und der damit einhergehenden Wasserstoffgasbildung durch Zwei-Phasenfluss eine aufwärts gerichtete Wasserbewegung entstehen kann und welche Auswirkungen dies auf die Ausbreitung von Radionukliden haben wird. Solche Fälle sind bei /BRA 09/ nicht betrachtet. Ihre Berücksichtigung wird in /NWTRB 16/ gefordert. Die Relevanz und die Auswirkungen solcher Prozesse sind insbesondere für solche Störfälle bei der Einlagerung zu quantifizieren, bei denen eine Reparatur/Rückholung längere Zeit in Anspruch nehmen wird. Das Ausmaß eines Radionuklidtransports in möglicherweise gestörten Randbereichen der geologischen Barriere und im Umfeld des Einlagerungsbereichs ist zu betrachten.

10.2 Radionuklidfreisetzung bei erwarteter Entwicklung

Neben Havarieszenarien ist die Sicherheit des Endlagers nach erfolgreicher Einlagerung und nach Verschluss des Bohrlochs über einen Zeitraum von 1 Million Jahre zu bewerten /BMU 10/. Auch hier ist davon auszugehen, dass über einen langen Zeitraum

Prozesse stattfinden können, die zu einer Radionuklidausbreitung führen können. Diese sind als erwartete Entwicklung des tiefen Bohrlochs anzusehen. Im Wesentlichen sind die gleichen geo-/chemischen Vorgänge zu diskutieren, die bereits in den vorangegangenen Szenarien dargestellt wurden. Im Unterschied dazu sind bei einem ordnungsgemäßen Verschluss des Bohrlochs keine oxidierenden Bedingungen durch Anwesenheit von Luftsauerstoff zu erwarten. Damit wird man in der wahrscheinlichen Entwicklung für die meisten redoxsensitiven Radionuklide mit deutlich niedrigeren Maximalkonzentrationen rechnen können. Durch den Verschluss des Bohrlochs ist im Gegensatz zu den Havarieszenarien ein direkter Kontakt zur Biosphäre weitgehend auszuschließen. Dennoch ist davon auszugehen, dass Behältermaterialien relativ rasch korrodieren und es zur Radionuklidfreisetzung in den Bohrlochraum kommt. Die geologische Barriere trägt durch geringe Permeabilitäten für wässrige Lösungen sowie ihre geochemische Rückhalteeigenschaften die Last der Rückhaltung radiotoxischer Abfallkomponenten und ihre Isolation von der Biosphäre. Gesondert zu bewerten sind in diesem Fall Stör- und Auflockerungszonen, die möglicherweise lokal zu einem erweiterten advektivem Schadstofftransport führen.

In einer sehr vorläufigen Sicherheitsanalyse wird ein weiträumiger Transport nichtsorberender Radionuklide wie z.B. ^{129}I , ^{36}Cl aus tiefen Bohrlöchern in die Biosphäre als nicht relevant betrachtet /BRA 09/. Der Einfluss von Störungszonen, Klüften und Auflockerungszonen sollte in einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse überprüft werden.

Die Ausweisung eines von den Sicherheitsanforderungen des BMUB geforderten einschlusswirksamen Gebirgsbereich stellt eine zentrale Aufgabe im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen dar. Das Gelingen eines entsprechenden Nachweises wird davon abhängig sein, inwiefern die den Einlagerungsbereich umgebenden geologischen Schichten über eine Teufe von mehreren km die erwarteten geringen Permeabilitäten nachweisbar besitzen. Dies wird durch eine Erkundung belegt werden müssen, ebenso wie der Ausschluss eines weiträumigen Radionuklidtransports.

Fazit:

Je nach Behältermaterial ist wegen des Kontakts mit Lösungen bereits bei der Einlagerung mit einer Korrosion bereits nach wenigen Jahrzehnten zu rechnen. Eine Diskussion zur Verwendung korrosionsresistenter Werkstoffe bzw. von korrosionsinhibierenden Beschichtungen wird bei der Entwicklung von Einlagerungsbehältern für ein vollständi-

ges Endlagerkonzepts von großer Priorität sein. Die Verwendung von Stahl als Behältermaterial ist bei den bereits vorliegenden HAW-Kokillen nicht mehr zu ändern.

Im verschlossenen Bohrloch können sich bedingt durch Korrosion von Behältern und des Casings innerhalb von einigen Jahrhunderten hohe Wasserstoffgasmen gen bilden³⁰ und zu hohen Drücken führen. Hohe Innendrucke können sich auch durch die Umsetzung des Stahls in Korrosionsprodukte geringerer Dichte einstellen. Damit diese Prozesse nicht zu einer Rissbildung/Störzonen parallel zum Bohrloch führen können oder selbstbeschränkt ablaufen, Analyse müssen Gasentwicklung und die damit verbundene Druckentwicklung bei der Auslegung entsprechend berücksichtigt werden³¹. Ebenso sind mögliche Auswirkungen der Druckentwicklung und Gasmigration im Einlagerungsbereich auf die Stabilität von Verschlüssen und Barrieren zu analysieren. Die Relevanz und die Auswirkungen der Gasentwicklung auf Transportprozesse und den Radionuklidtransport sind für die Zeit nach Verschluss des Bohrlochs zu quantifizieren. Das Ausmaß eines Radionuklidtransports in möglicherweise gestörten Randbereichen des Verschlusssystem (EDZ) als auch in Störungszonen der geologischen Barriere im Umfeld des Einlagerungsbereichs ist zu betrachten.

Die vergleichsweise hohen Temperaturen und die Wärmeabgabe die von den einzulagernden Abfällen ausgeht, werden Behälterkorrosionsprozesse beschleunigen und die Auflösungsraten von HAW-Glas erhöhen. Experimentelle Daten für $T > 200^{\circ}\text{C}$, die eine bessere Aussage hierzu erlauben würden, sind nicht verfügbar. Für Brennstoff sind geringere Temperatureffekte zu erwarten. Zu beachten ist, dass die Temperaturen auch nach langen Zeiträumen aufgrund der geologischen Tiefenlage vergleichsweise hoch bleiben.

Es bestehen Wissenslücken bezüglich des detaillierten geochemischen Milieus in tiefen Bohrlöchern, die durch Zutritt von Grund- und Porenwässern³² sowie Vermischung mit Bohrfluid, deren Wechselwirkung mit Gesteinsphasen, Backfillmaterial und der Zementation zustande kommen kann. Eine weitere wichtige Größe sind relevante Lösungsvolumina, die für die Auflösung von Radionukliden verfügbar sein können.

³⁰ 1kg Stahl ergibt 24 mol H_2 entsprechen 530 l H_2 (Normalbedingungen) entsprechend 1 l bei 500 bar. Ein Behälter mit 17 Mg könnte über lange Zeiträume bis zu $17 \text{ m}^3 \text{ H}_2$ bei 500 bar produzieren.

³¹ Eine Gasentwicklung wird im Grundkonzept durch Nutzung einer ausreichend dimensionierten Rückhalteformation (physikalische Barriere als Fallenstruktur) berücksichtigt.

³² Im Bereich des Zechsteins handelt es sich hochsalinare Lösungen die nahe an der Sättigungsgrenze befinden. Zusammensetzung der Salzphase kann aus Zusammensetzung der Salzformation abgeleitet werden.

Eine Sicherheitsanalyse für eine tiefe Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder Abfälle erfordert die Analyse des vollständigen standortspezifischen Konzepts (geologische Bedingungen, die im Bohrloch verwendeten Techniken und Materialien, Bohrlochfluide, Lastabtrag zwischen den Abfallbehältern, Verschlusstechnik, etc.), um eine radiologische Konsequenzenanalyse zu ermöglichen. Bezüglich der Sicherheitsanalysen für die Einlagerungsphase ist eine „hazard database“ erforderlich und für die Langzeitsicherheitsanalyse ist die Entwicklung eines FEP Katalog erforderlich (Beispiel in /BRA 09/).

10.3 Kritikalität

Das Spaltstoffinventar in einem tiefen Bohrloch mit zahlreichen Kernbrennstoffbehältern übersteigt grundsätzlich die kritische Masse /HEI 85/.

Tab. 10-3 Spaltstoffinventare in den betrachteten Abfällen

Abfall	Verpackung	Uran-Gehalt	Pu-Gehalt
Verglaste HAW Konzentrate aus der WAA	150 l Behälter 450 kg pro Kanister	12.5 g pro kg HAW Glas	0.3 g pro kg HAW-Glas
Abgebrannte UOX LWR BE	BSK 3 1500 kg pro Behälter	936 g pro kg UO ₂	11.2 g pro kg UO ₂
Abgebrannte MOX LWR BE	BSK 3 1500 kg pro Behälter	926 g pro kg MOX	40.3 g pro kg MOX 60 kg pro Behälter

Kritikalität muss über extrem lange Zeiten bewertet werden, da ²³⁹Pu mit 24000 Jahren Halbwertszeit zu einem anderen spaltbaren Isotop ²³⁵U zerfällt. In Anwesenheit von Wasser kann eine sekundäre Aufkonzentrierung von Spaltstoffen besonders an Eisenkorrosionsprodukten auftreten /MUR 97/. Betrachtungen hierzu wurden für abgebrannten Kernbrennstoff bei Endlager im Steinsalz für einzelne Behälter angestellt (siehe /BOL 12/ und /KIE 03/).

Die Endlagerung von Brennelementen, insbesondere von MOX, in tiefen Bohrlöchern erfordert eine detaillierte Analyse der möglichen Aufkonzentrierung von Spaltstoffen, der Moderationsbedingungen und der Berechnung der entsprechenden Multiplikationsfaktoren. Vorläufige Sicherheitsanalysen für die Einlagerung von abgebranntem Kernbrennstoff in tiefen Bohrlöchern schließen Kritikalitätsereignisse weitgehend aus /BRA 09/. Die Anreicherung von spaltbarem Material wird durch die äußerst geringe

Löslichkeit und Mobilität von U(IV) begründet. Unterschiedliche Redoxreaktionen von Pu und U bedingt durch radiolytische Prozesse werden in der Analyse jedoch nicht betrachtet. Eine Minimierung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kritischer Anordnungen kann durch die hydraulische Trennung einzelner Behälter durch z. B. Bentonitbarrieren erfolgen. Dies würde die Anzahl der Behälter pro Bohrung und anderen Annahmen ändern.

Fazit:

Es muss für den Nachweiszeitraum ausgeschlossen werden, dass sich Spaltstoffakkumulationen durch natürliche Prozesse, wie sekundäre Lagerstättenbildung oder andere Effekte höherer Ordnung, entwickeln können. Während entsprechende Betrachtungen für einzelne Endlagerbehälter existieren, ist dies für eine Lagerung mehrerer Behälter in einem Bohrloch mit einem Fluid noch zu zeigen und nachzuweisen. Auch hier ist die Kenntnis chemischer/geochemischer Randbedingungen lückenhaft.

10.4 Vulkanismus

Im Hinblick auf Vulkanismus besteht bereits ein definiertes Ausschlusskriterium des AkEnd /AKE 02/, wonach in einer Endlagerregion kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen darf. Dieses Ausschlusskriterium wurde auch in /KOM 15/ übernommen. Bei den nachfolgenden Ausführungen handelt es sich um begleitende Überlegungen. Die Diskussion des Ausschlusskriteriums Vulkanismus mit Bezug zur tiefen Bohrlochlagerung erfolgt in Kap. 11.

In Deutschland gab es im Verlauf der Erdgeschichte immer wieder Phasen mit mehr oder weniger intensivem Vulkanismus /SCH 13/. Die jungen Vulkangebiete in Deutschland stammen aus den Zeiten des Oligozäns und Miozäns, bei denen im Wesentlichen die Vulkanfelder auf den alten Schilden (z.B. Rheinisches Schild oder Böhmisches Massiv) entstanden sind.

Die Krustenbereiche heben sich z.T. heute noch (Hohes Venn 1 mm/Jahr Hebung. In den letzten 500.000 Jahren waren die Vulkane des Egergrabens und in der Eifel aktiv. In der Eifel befinden sich die beiden jüngsten Vulkane: vor 12 900 Jahren entstand dadurch der Laacher See und vor nur 11.000 Jahren das Ulmener Maar. Im Egergraben ist quartärer Vulkanismus mit dem bekannten Eisenbühl und Kammerbühl bekannt. Im Jahre 2015 wurde bei Neualbenreuth eine quartäre Maarstruktur durch das Bayerische Landesamt für Umwelt erbohrt /LFU 16/. Der letzte Vulkanausbruch bei Neualbenreuth soll sich vor 150.000 bis 300.000 Jahren ereignet haben /GFZ 16/. Die Bekanntgabe des radiometrisch bestimmten Alters des Ausbruchs wird in Kürze erwartet. Das Bohrgerät für die im Frühjahr 2015 niedergebrachte Bohrung ist in Abb. 10-1 zu sehen.



Abb. 10-1 Bohrerät für die Aufschlussbohrung im quartären Maar bei Neu-albenreuth (Foto F. Nützel, Piewak & Partner GmbH).

Die Aschen, die beim Ausbruch des Laacher See-Vulkans ausgeworfen wurden sind in großen Teilen Mitteleuropas nachweisbar. Die Hauptphase der Eruption dauerte nur wenige Tage und das herausgeschleuderte Magmavolumen betrug ca. 6 km^3 . Die Glutlawinen erreichten eine Mächtigkeit von über 50 m und die riesige Ablagerungsmasse überfrachtete den Rhein derart, dass sich an der Andernacher Pforte in Damm bildete, hinter dem sich ein über 18 m tiefer See staute, als der Damm brach wurden starke Flutwellen erzeugt, die eine große Region in Mitleidenschaft zogen (Abb. 4 in /SCH 13/). Hierbei handelt es sich um zeitlich sehr schnell ablaufende Prozesse mit z. T. erheblichem Einflussbereich /JEN 01/.

Bei Mendig in der Eifel finden sich Beweise für diese gewaltigen Ereignisse. Im Bereich der Wingertswand sind hier über sind über mehrere 10er Meter mächtige Ablagerungen dieser Ereignisse aufgeschlossen. Die Wingertswand gilt als eine der eindrucksvollsten Bimssteinteilwände Europas (Abb. 10-2).



Abb. 10-2 links: Wingertswand bei Mendig mit mächtigen Tuffablagerungen und rechts: tiefer Teil mit vulkanischen Bomben (Foto Röckel).

Mit zeitlichem Versatz kann es durch thermische Spannungen zum Bruch von Gestein, Aktivierung von Störungen und ggfs. zur Öffnung von Wasser-Wegsamkeiten kommen. Nach Schätzungen von Jentzsch besteht eine 50% Wahrscheinlichkeit für das Aufleben des Eger Vulkanismus in den nächsten 400.000 Jahren mit einer Hebung auf Flächen von 500-1500 km², Bildung von 50 km² und größeren Maaren. Hierbei kann möglicherweise die Entdeckung des jüngsten Maares bei Neualbenreuth noch zu einer Änderung der Einschätzung führen.

Für die Eifel wird für den Zeitraum von 1 Million Jahre eine Wahrscheinlichkeit für den Ausbruch eines Vulkanes von 100% angenommen /JEN 01/.

Bei der Planung von Bohrlokationen ist folglich der Einfluss potenzieller vulkanischer Aktivität zu beachten. Die Ablagerungen können – je nach Windrichtung noch bis in ca. 50 km Entfernung zu erheblichen (> 1 m Mächtigkeit) Ascheablagerungen führen /SCH 03/. Deshalb wird hier davon ausgegangen, dass sich Bohransatzpunkte in einem ausreichenden Abstand um die potenziell aktiven vulkanischen Gebiete befinden. Dadurch würde Vorsorge getragen, dass durch vulkanische Tätigkeit weder bei der Einlagerung noch bei der Lagerung ein unbeherrschbares Risiko für die Schutzgüter besteht³³. Entsprechende Ausschlusskriterien sind auch vom AK End formuliert /AKE 02/.

Fazit : Vulkanismus

³³ Die Risiken durch die vulkanischen Produkte (wie z.B. Aschen, toxische Gase) werden hier nicht betrachtet.

- Im Zeitraum von 1 Million Jahren ist mit Vulkanismus in Deutschland zu rechnen
- Vulkanismus kann regional so weit eingrenzt werden, dass in Deutschland ein angemessener Sicherheitsabstand eingehalten werden kann ohne sehr gute Lageroptionen ausschließen zu müssen.

10.5 Hochwasser

Extremhochwasser sind Ereignisse, die wesentlich seltener auftreten als die 100-jährlichen Hochwässer (HQ 100), die die Bemessungsgrundlage für den Hochwasserschutz in Ortslagen bilden. Für die Sicherheitsanalyse von Stauanlagen werden beispielsweise 10.000-jährliche angenommen (DIN 19700). In der Schweiz arbeitet die ENSI (Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat) die Gefährdung für extreme Hochwasserereignisse an der Aare zu quantifizieren, die ca. alle 10.000 Jahre auftreten.

Hochwässer stellen eine Gefährdung beim Einbau der Behälter dar, insbesondere beim Handling der Behälter an der Erdoberfläche dar (z.B. Behältertransport, Umkonditionierung)³⁴. Die Bohrlokation und die damit verbundenen kerntechnischen Anlagen sollte idealerweise so gewählt werden, dass selbst bei einem Extremereignis die kerntechnischen Anlagen nicht in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

Da die Bohrungen mit entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen (z.B. Preventer) ausgerüstet sind, ist ein Eindringen von Hochwasser in die Bohrung nahezu ausgeschlossen³⁵. Bei versiegelten Bohrungen wird sowohl der Austritt aus dem Endlagerbereich als auch der Eintrag von der Oberfläche in den Endlagerbereich effektiv unterbunden.

Fazit : Extremereignisse Hochwasser

- Extreme Hochwasserereignisse sind in Deutschland denkbar.

³⁴ Extremhochwasser haben einen Vorlauf von zumindest Stunden. Diese Zeit kann auch für eine sichere Verwahrung der Materialien genutzt werden. Dies sollte in der Planung entsprechend berücksichtigt werden.

³⁵ Sollten dennoch alle obertägigen Anlagen versagen, so ist dennoch nicht von einer kritischen Durchmischung von Hochwasser und Bohrlochfluid auszugehen, da die in der Bohrung befindlichen Fluide eine höhere Dichte besitzen als die eindringenden Wässer. Selbst wenn von einer extremen Durchmischung bis in 20 m Tiefe ausgegangen wird, verbleibt die durchmischte Zone über 2.000 m vom Bereich der Einlagerung entfernt.

- Bei der Standortwahl kann dies für die Betriebssicherheit berücksichtigt werden.
- Hochwasser kann weder bei der Einlagerung noch bei versiegelten Bohrungen in den Bereich des Endlagers direkt eindringen.

10.6 Erdbeben

Ebenso wie bei Vulkanismus besteht auch hier ein definiertes Ausschlusskriterium des AkEnd /AKE 02/, wonach in einer Endlagerregion die seismischen Aktivitäten nicht höher sein dürfen als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149. Dieses Ausschlusskriterium wurde mit Bezug auf die aktuelle DIN EN 1998-1 / NA 2011-01 auch in /KOM 15/ übernommen. Bei den nachfolgenden Ausführungen handelt es sich um begleitende wissenschaftliche Überlegungen. Die Diskussion des Ausschlusskriteriums Erdbeben mit Bezug zur tiefen Bohrlochlagerung erfolgt in Kap. 11.

10.6.1 Seismizität

Im globalen bzw. europäischen Maßstab ist die Seismizität in Deutschland und in den direkten Nachbarländern die Seismizität als gering einzuschätzen. Somit gehören schadensverursachende Erdbeben eher zu den seltenen Ereignissen. Generell wird zwischen natürlichen Erdbeben, den sogenannten tektonischen Erdbeben und den induzierten Erdbeben unterschieden. Letztere werden durch den Eingriff des Menschen in das tektonische Spannungsfeld, wie z.B. durch Bergbau oder Gas- und Kohleförderung, ausgelöst. Bei den tektonischen Beben werden die durch natürliche geodynamische Prozesse (z. B. Plattentektonik) aufgebauten Spannungen beim Überschreiten der Scherfestigkeit von präexistierenden tektonischen Störungen plötzlich abgebaut und seismische Wellen angeregt.

Neben der Magnitude M als ein instrumentelles Maß für die Stärke eines Erdbebens wird auch die makroseismische Intensität I verwendet. Sie stellt eine Klassifizierung der Stärke der Bodenerschütterungen aufgrund der beobachteten Auswirkungen im Erdbebengebiet dar, wie z.B. Schäden an Gebäuden. In Abb. 10-3 sind die wichtigsten Zusammenhänge zwischen M , I , der maximalen Bodenbeschleunigung PGA , Bodenbewegung PGV , Länge der Herdfläche, dem dazugehörigen mittleren koseismischen Versatz und der relativ freigesetzten Energie dar. Hier wird deutlich, dass die Magnitu-

denskala logarithmisch ist, d.h., dass sich die freigesetzte Energie um den 32-fachen Wert bei einem Anstieg des Magnitudenwertes um eins erhöht.

PGV [cm/s]	0.01-0.02	0.03-0.09	0.07-23	0.2-0.6	0.5-1.6	1.3-4.4	3.5-11.6	9-31	25-82	66-219	176-584	> 412
PGA [cm/s ²]	0.2-1.2	0.6-3.0	1.5-7.3	4-18	9-43	21-105	51-258	126-630	310-1540	750-3540	1830-9170	> 4470
EMS Intensity	I not felt	II scarcely felt	III weakly felt	IV largely observed	V strongly felt, hair cracks	VI slight damages	VII damaging	VIII heavy damages	IX destructive	X very destructive	XI devastating	VII complete devastating
Depth [km]												
D [cm]	0.2 - 0.6	0.6 - 1.9	1.9 - 5.9	5.9 - 18.6	18.6 - 59	59 - 184	184 - 583	> 583				
L [km]	0.01 - 0.04	0.04 - 0.16	0.16 - 0.64	0.64 - 2.6	2.6 - 10	10 - 40	40 - 160	> 160				
Energy	1	× 32	× 1000	× 32,000	× 1,000,000	× 32,000,000	× 1,000,000,000	× 32,000,000,000				

Abb. 10-3 Quantitativer Vergleich von maximaler Bodenbewegung PGV, maximaler Bodenbeschleunigung PGA, Intensität I, Länge L der Herdfläche, der mittlere koseismische Versatz D und die relative freigesetzte Energie. Die beiden grünen Sterne zeigen zwei induzierte seismische Ereignisse an, die roten Sterne natürliche tektonische Ereignisse. Die Lage der Sterne kennzeichnet das Hypozentrum der seismischen Ereignisse. Die zugrundeliegenden Formeln sind in Tab. 8-1 gelistet, die Kurzbezeichnungen bei den Intensitäten stammen aus /GRÜ 98/. Die zugrundeliegenden empirischen Relationen sind von /FAE 10/, /GRÜ 99/ und /LEO 10/.

Abb. 10-4 zeigt eine Deutschlandkarte mit den tektonischen Erdbeben im Zeitraum 1000 bis 2011 von /GRÜ 11/ und Ergänzungen hierzu sowie die induzierten Ereignisse farblich aufgeschlüsselt nach Untergrundaktivität. Das größte instrumentell aufgezeichnete tektonische Erdbeben in Deutschland ist vom 16. November 1911 in der Albstadt-Scherzone auf der Schwäbischen Alb mit einer Momentenmagnitude von $M_w = 5,7$ (entspricht einer Lokalmagnitude von $M_L = 6,1$). Abb. 10-5 zeigt für die in Abb. 10-4 dargestellten Daten die (kumulative) jährliche Häufigkeits-Magnituden Verteilung

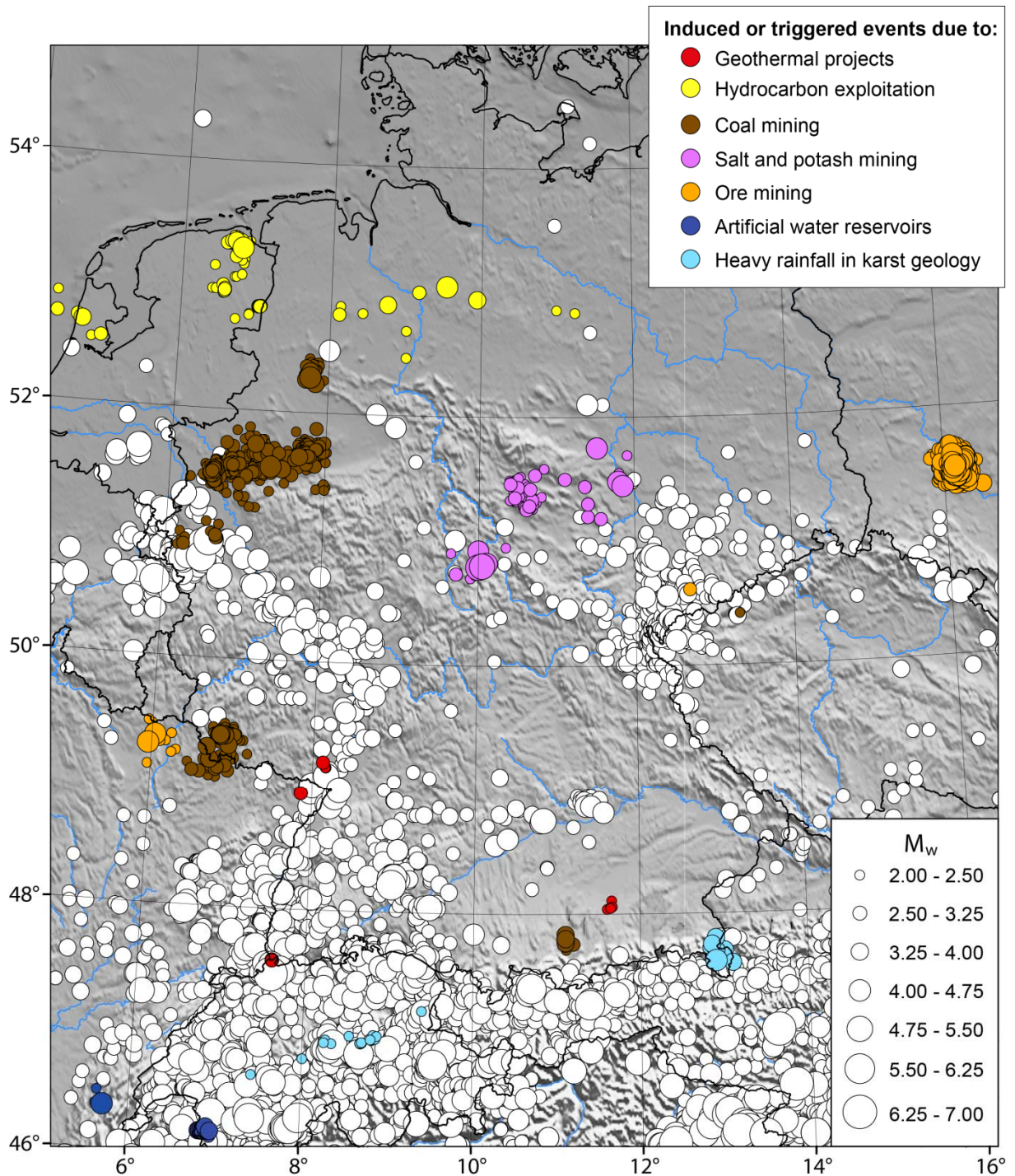


Abb. 10-4 Die Karte zeigt die Verteilung der natürlichen tektonischen Erdbeben in Deutschland und Umgebung für $M_w \geq 2.5$ (weiße Kreise) aus dem Zeitraum 1000 AD bis 2011 aus dem Erdbebenkatalog EMEC /GRÜ 11/ und Ergänzungen sowie die induzierten seismischen Ereignisse für $M_w \geq 2.0$ farblich kodiert nach Untertageaktivität bzw. regen-induzierte Ereignisse (farbige Kreise).

Die natürlichen Erdbeben in Deutschland ereignen sich hauptsächlich in einem Tiefenbereich zwischen 5-20 km mit einem Maximum der Energiefreisetzung bei etwa 10 km Tiefe. Eine besondere Bedeutung in der Erstellung des Erdbebenkataloges kommt den historischen Erdbeben zu, da Ereignisse mit großen Magnituden in Deutschland und Umgebung sehr selten vorkommen und der instrumentell abgedeckte Zeitraum nur einen Bruchteil des seismischen Zyklus dieser Ereignisse erfasst. Eines der stärksten Erdbeben im vergangenen Jahrtausend in Deutschland und naher Umgebung war das Erdbeben von Basel aus dem Jahr 1356 mit einer Momentenmagnitude $M_w=6,6$ und einer Intensität von $I=IX$. Mit paläoseismologischen Untersuchungen ist es möglich noch weiter in die Historie zu schauen. Hierbei wurden Erdbeben mit Magnituden bis M_w 6,7 aufgefunden mit jedoch erheblichen Fehlern bei der Magnitudenangabe /PET 07/.

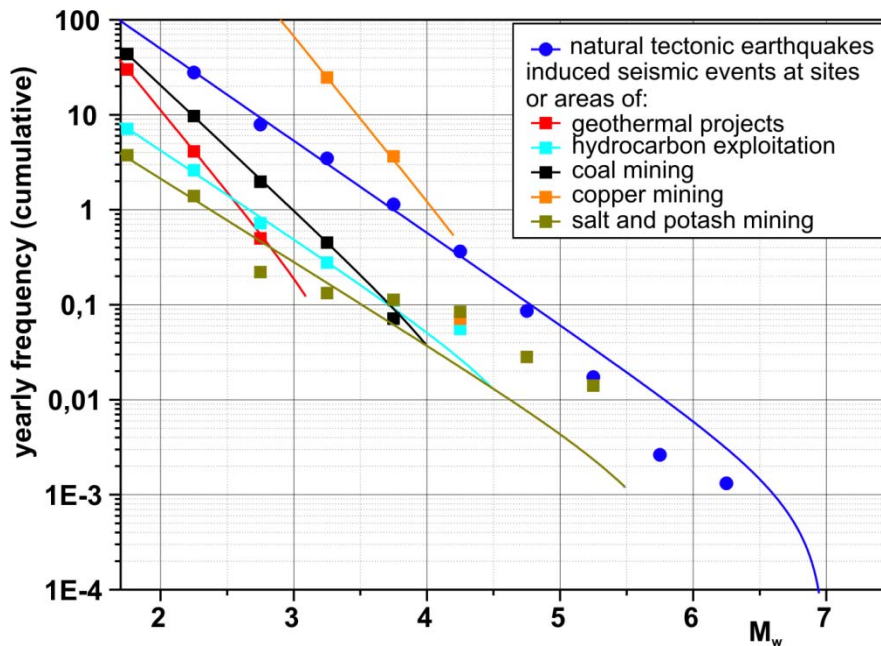


Abb. 10-5 Häufigkeits-Magnituden Verteilung (kumulativ) der natürlichen Erdbeben in Deutschland und induzierter Ereignisse für die in Abb. 10-4 gezeigten Ereignisse nach /GRÜ 14/. Eine maximal zu erwartende Magnitude von $M_{max} = 7.0$ wird für den *maximum likelihood fit* für natürliche Erdbeben angewendet.

Die in der Abb. 10-4 gezeigten induzierten seismischen Ereignisse werden beispielsweise durch die Injektion großer Mengen an Wasser, die die Fließwege in den Reservoiren über Scherung der Formation erhöhen sollen, erzeugt. Eines der größten Fluid induzierten Ereignis mit $M_w = 3,2$ ereignete sich in einem Geothermiereservoir in Basel

2006 aufgrund eines Injektionsexperimentes /DEI 09/. Strukturelle Schäden durch fluid-induzierte Ereignisse sind konnten in Mitteleuropa nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei großvolumigen Injektionen in sedimentären Gesteinen wird in der Regel eine solche Seismizität nicht verspürt. Bei Injektionen in den Forschungsbohrungen Großschönebeck (GFZ) und Großbuchholz (Genesys, BGR) wurden trotz intensiver Messungen kaum messbare Ereignisse aufgezeichnet /KWI 08/. Während bei Bergbauaktivität deutliche induzierte Ereignisse berichtet werden (z.B. die Kupferminen in Polen, Abb. 10-4), liegen nach unseren Erkenntnissen keinerlei Berichte oder Beobachtungen von induzierter Seismizität während eines Bohrvorgangs vor. Das ist physikalisch plausibel, da das gestörte Gesteinsvolumen klein ist. Eine seismische Überwachung im Rahmen von Tiefbohrprojekten zur Endlagerung sollte grundsätzlich vorgesehen werden, um Änderungen der Rate natürlicher seismischer Aktivität in Standortregionen zu detektieren.

10.6.2 Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzung

Unter dem Begriff der seismischen Gefährdung wird die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Bodenbeschleunigung (oder Intensität oder Bodenbewegung) an einem bestimmten Ort in einem bestimmten Zeitraum verstanden. Entsprechend der seismischen Gefährdung werden Kriterien für erdbebengerechtes Bauen festgelegt. Die Darstellung der seismischen Gefährdung erfolgt u. a. in Karten und liefert eine wesentliche Grundlage für das erdbebengerechte Bauen. Der Begriff der seismischen Gefährdung grenzt sich von dem Begriff des seismischen Risikos ab, da letzteres ein Maß für den Schaden ist, die Beben erzeugen können in Abhängigkeit von den im Bebengebiet vorhandenen Werten der Infrastruktur ab.

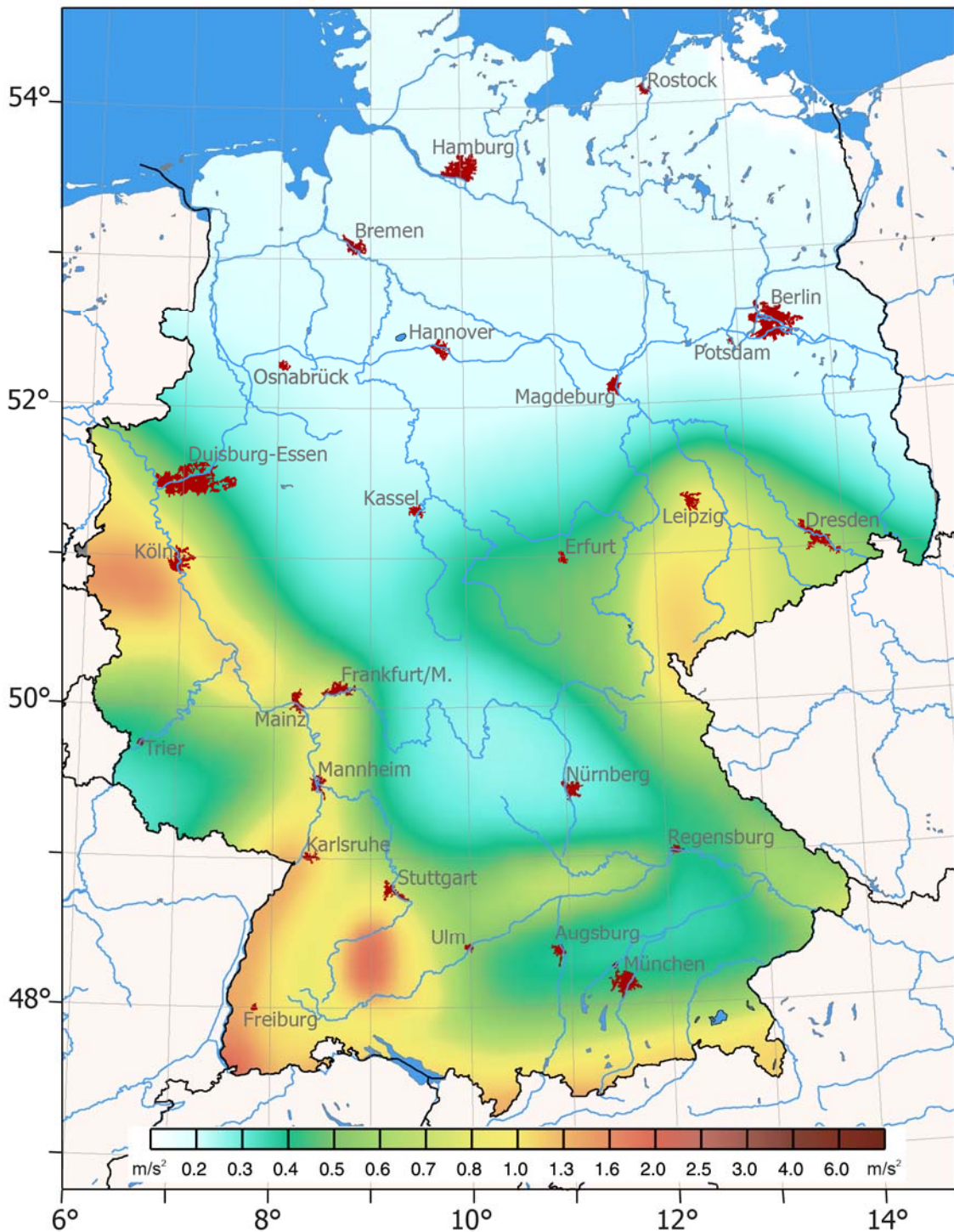


Abb. 10-6 Seismische Gefährdungskarte Deutschland von Grünthal et al. /GRÜ 09/. Die Karte zeigt die Spitzenbeschleunigungen PGA [m/s²] für 4% Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit $P = 0,0004$. Dem entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode $T = 2.500$ Jahre.

Die Erstellung der Gefährdungskarten (Abb. 10-6) ist das Ergebnis der probabilistischen seismischen Gefährdungsabschätzung (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA). Grundlage dieser statistischen Methode zur Abschätzung der Gefährdung durch natürliche Seismizität ist ein harmonisierter seismischer Katalog der zu untersuchenden Region. Hierzu liegen in Deutschland sowohl grundlegende Daten als auch international etablierte Methoden vor, um für Regionen, aber auch für spezifische Standorte, Aussagen treffen zu können /GRÜ 09a/, /GRÜ 14b/, /GRÜ 09b/. Auch für die Abschätzung der induzierten seismischen Gefährdung existieren theoretische Ansätze und Tests anhand synthetischer Daten, um in Kombination mit physikalisch basierten deterministischen Modellen induzierte Seismizität vorherzusagen und Vermeidungsstrategien zu entwickeln /HAK 14a/, /HAK 14b/. Entsprechende Ausschlusskriterien wurden vom AK End benannt /AKE 02/.

Fazit : Seismizität

- Deutschland weist in vielen Gebieten eine moderate bis geringe seismische Gefährdung im Vergleich zu aktiven tektonischen Regionen (Plattenrandzonen) auf.
- Beben mit Magnituden deutlich über M_w 7 können praktisch ausgeschlossen werden.
- Methoden als auch Daten sind in Deutschland verfügbar, um standortbezogene seismische Gefährdungsabschätzungen auch für große Zeiträume für die Auslegung zu rechnen.

10.7 Vergletscherung

Kaltzeiten können im Zeitraum über 1 Million Jahre mehrfach mit Eisdicken über 3 km und globalen Meeresspiegelschwankungen von über 100 m auftreten.

Tab. 10-4 Kaltzeiten in Deutschland innerhalb der letzten Millionen Jahre.

Alpine Kaltzeiten	Norddeutschland	Zeitraum [Jahren]
Würm	Weichsel	12.000 – 71.000
Riss	Saale	130.000 – 200.000
Mindel	Elster	424.000 – 478.000
Günz	Elbe	621.000– 676.000

Nach /KEL 09/ ergeben sich für das hypothetische Klimabild im Zeitrahmen der nächsten Million Jahre ca. 10 weitere Kaltzeiten, von denen einige auch das Ausmaß der in Tab. 10-1 aufgelisteten Kaltzeiten erreichen können und große Teile Deutschlands eine Überdeckung mit Eis zu erwarten haben.

Die Tiefenlage von Endlagerformationen soll möglichst unbeeinflusst von Kaltzeiten sein. Dabei gilt es einerseits die direkte Auswirkung von Kaltzeiten auf das Deckgebirge (wie die Ausbildung von kaltzeitlichen Rinnen) zu betrachten, andererseits aber auch die indirekten Veränderungen (wie z.B. die Veränderung der Spannungen aufgrund der Auflast-bzw. späteren Entlastung durch die Eisdecke) zu betrachten. Das Deckgebirge des Wirtsgesteins ist lt. /KEL 09/i.d.R. kein Bestandteil des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs und ihm kommt keine maßgebliche Barriererelevanz zu. Allerdings kann es eine Schutzfunktion für das Wirtsgestein erfüllen.

10.7.1 Kaltzeitliche Rinnen

Durch den Abfluss großer Schmelzwassermengen können Rinnen unterhalb des Eises (subglazial) oder vor dem Eisrand entstehen, häufig im Zusammenhang mit Eisstauseen. Die subglazial entstandenen Rinnensysteme der Elster-Kaltzeit erreichten nicht selten eine Tiefe von 400-500 m (Reeßelner Rinne 502 m, entspricht 434 m unter NN), Breiten von mehreren Kilometern und Längen von einigen zehner bis über 100 Kilometern /KUS 79/, /KEL 09/. Nach /KEL 09/ sind zumindest für die Elster-Kaltzeit bevorzugte Orte für die Rinnenbildung nicht zu erkennen. Dagegen verlaufen tiefe Rinnen lt. /KUS 79/ durch sämtliche Randsenken, die noch im Jungtertiär mobil waren „Salzstöcke in Niveaus zwischen 50-250 m unter NN scheinen besondere Anziehungspunkte für Rinnen gewesen zu sein. So wurden z.B. die Strukturen Bramel, Hamwiede, Soltau, Dethlingen, Sülze, Lutterloh und Bokel von Rinnen durchquert, die jeweils bis in den Gipshut eingetieft sind“. In Gorleben /BOR 08/ erodierte eine subglaziale Rinne der Elster Kaltzeit so tief, dass Rinnensedimente z.T. auf Salzgestein abgelagert wurden. Bei diesem Schmelzwasserabfluss entstanden offensichtlich hohe hydraulische Drücke, da Teile des Hutgesteins oberhalb des Salzspiegels brekziiert wurden. Tongesteine in Norddeutschland sind durch Rinnenbildung besonders beeinträchtigt, da sie in geringen Tiefen häufig recht weich sind, sofern sie nicht durch harte, kalkige und gering durchlässige Oberkreidesteine geschützt sind. Diese Beobachtungen zeigen, dass in Deckgebirgen erosiv zukünftige Rinnenbildungen erfolgen können.

Die oben genannten tiefsten Rinnen von ca. 500 m stammen aus dem Beobachtungszeitraum der vergangenen 700.000 Jahre. Für größere Zeiträume sind somit auch tiefere Rinnen denkbar, so dass für die langzeitsichere Lagerung ein Sicherheitszuschlag notwendig ist. Für Bohrungen mit Tiefen über 1 km in einem Multibarriersystem muss dann gewährleistet sein, dass der Bohrlochverschluss mindestens bis in Tiefen von 500 m reicht. Das eigentliche Wirtsgestein in über 2,5 km Tiefe und auch die direkt darüber liegenden Barriere-Formationen sind von Erosion dann mit großer Sicherheit nicht mehr von kaltzeitlichen Rinnenbildungen betroffen.

10.7.2 Spannungsänderungen durch das Auftreten und Verschwinden von Gletscherbedeckungen.

Hier werden explizit nicht die temperaturbedingten Änderungen im Gestein aufgrund von Vergletscherung betrachtet, sondern Aspekte, die von der kaltzeitlich bedingten Veränderung des Spannungsfelds herrühren und z.B. in den Arbeiten von /BRA 15/, /BRA 15/, /BRA 12/, /KLE 98/ für Norddeutschland und z.B. bei /KLE 98/ bzw. /LUN 09b/ für die Weichsel-Kaltzeit in Skandinavien.

Aufgrund von einer zukünftigen Gletscherauflast kommt es zudem zu einer Veränderung des Spannungsfelds im Bereich des Endlagers durch Biegespannungen in der Erdkruste (so hat in den letzten 2-3 Millionen Jahren die Nordsee mehrmals eine Absenkung und danach eine Wiederanhebung von ca. 400 m aufgrund verschiedener Eisauflasten erfahren). Diese hängt vom Abstand zur Eisdecke, der Dicke der Eisdecke, der Tiefe und den Materialeigenschaften des Gesteins ab. Die postglazialen Ausgleichsbewegungen können auch heute noch beobachtet werden (Hebungs- und Senkungsraten im cm-Bereich).

Veränderungen des Spannungsfelds führen auch zu Veränderungen der Materialeigenschaften, insbesondere der Permeabilität der Gesteine /NEU 12/. In einem Gestein, das sich unter allseitigem Druck (aufgrund von Auflast) befindet sind die dort vorliegenden Mikrorisse geschlossen, wird das Gestein entlastet, so können sich bevorzugt die Mikrorisse, die senkrecht zur Entlastungsrichtung ausgerichtet sind wieder öffnen, was zu einer Erhöhung der Permeabilität des Gesteins führt (und zudem zu einer Anisotropie in der Permeabilität in Richtung der Schutzgüter, Abb. 10-7). Verstärkt wird der Effekt, wenn gleichzeitig senkrecht zur Entlastung noch eine weitere Belastung erfolgt. Je nach zeitlicher Änderung des Spannungsfeldes kann so eine Pumpwirkung für eine vertikale Fluidbewegung in spröden Gesteinen erzielt werden.

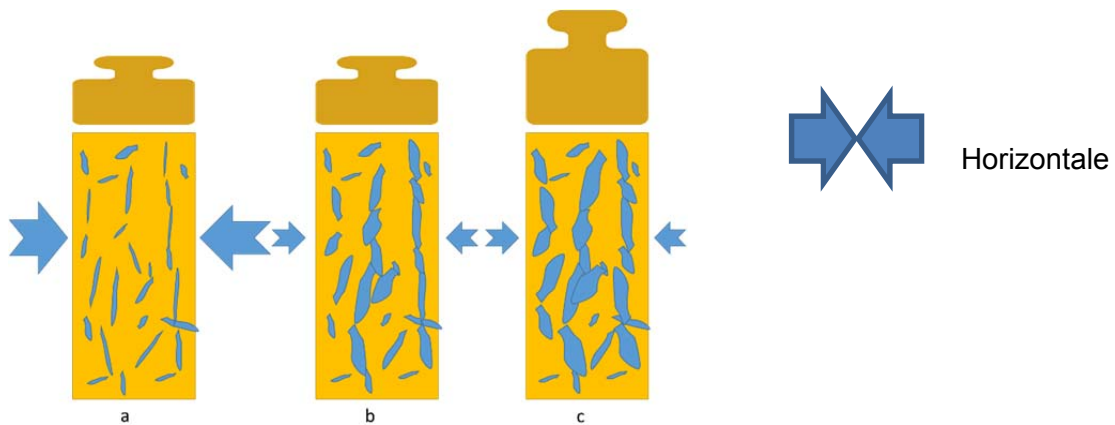


Abb. 10-7 Veränderung der Permeabilität im Gestein aufgrund von Laständerungen. Bei hohen horizontalen Spannungen sind die vertikalen Mikrorisse weitgehend geschlossen und kaum verbunden. Durch Verringerung der horizontalen Spannungen bzw. Vergrößerung der vertikalen Spannung können sich die vertikalen Mikrorisse weiten und zur durchlässigen Zonen ausbilden Abb. 10-9.

Die Festigkeit in der Erdkruste verändert sich mit der Tiefe. Die obersten 10-15 km können je nach Region als spröd reagierend angesehen werden. Unterhalb der sogenannten Spröd-Duktil-Grenze „brittle-ductile transition“ reagiert die Kruste aufgrund zunehmender Temperatur nicht mehr elastisch und Spannungen werden durch plastische Prozesse abgebaut (Abb. 10-8).

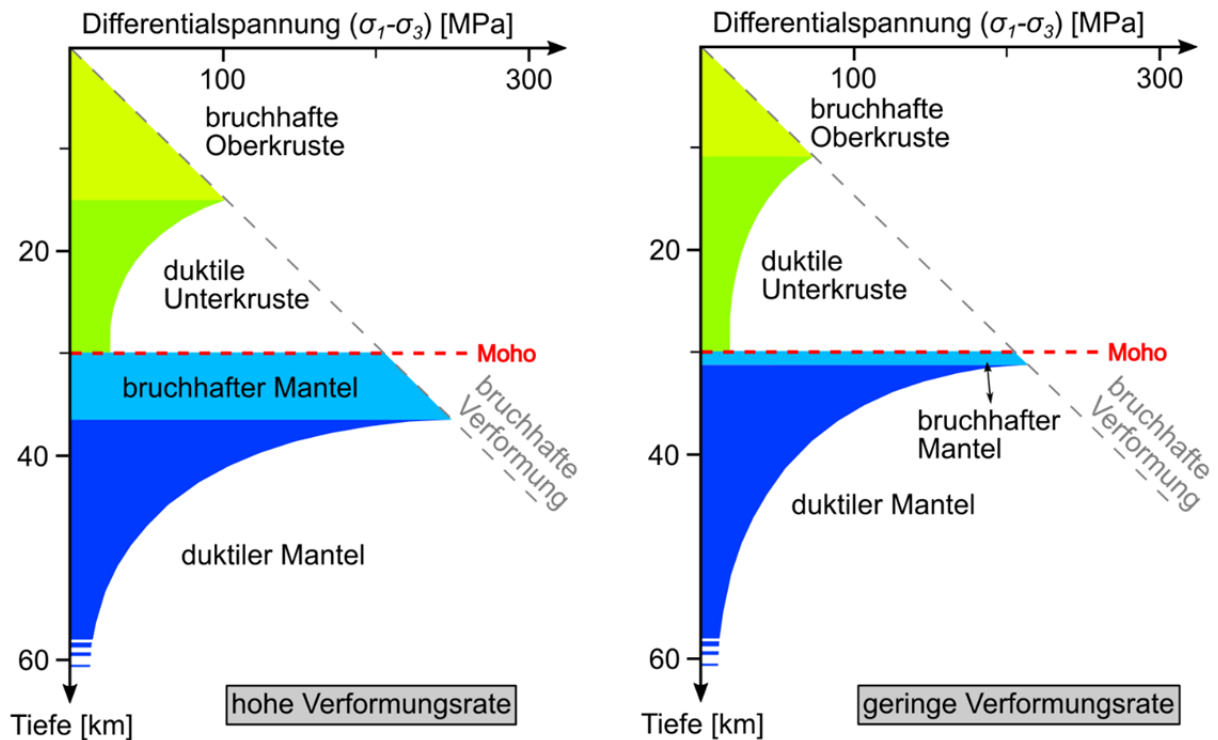


Abb. 10-8 Vereinfachte Darstellung der vertikalen Verteilung der Festigkeit in der Erde

Wird die Erdkruste durch zusätzliches Gewicht (z.B. Gletscher) belastet, biegt sich diese an den Rändern der Auflast und es entstehen Biegespannungen in der gesamten Kruste in Abhängigkeit von den elasto-plastischen Eigenschaften sowie den viskosen Eigenschaften der unteren Kruste und des oberen Mantel die die Wirkung der Auflast zeitlich verzögern. Zusätzlich sind die Auswirkungen tiefenabhängig. In der Plattenmitte befindet sich eine Region mit nur geringen Spannungsänderungen, die sogenannte neutrale Zone. Die größten Spannungsänderungen aufgrund von Biegeeffekten entstehen nahe der Erdoberfläche, mit der Tiefe nehmen die Biege-Spannungen bis zur neutralen Faser ab. Durch die Eisauflast wird im plastischen Bereich der Kruste und dem darunter liegenden Erdmantel ein viskoses fließen stattfinden. In der Summe führen die Prozesse bei einer Vergletscherung zu einer Aufwölbung vor dem Rand des Gletschers (Abb. 10-9).

Vergleicht man die Spannungssituation in unterschiedlichen Tiefen vor der Vergletscherung, so sind sowohl für eine flache als auch eine tiefe Lagerung insbesondere der s. g. „Peripheral Bulge“ zu betrachten, in dem keine zusätzliche Vertikale Last entsteht aber ein Abbau der horizontalen Spannungen, die oberflächennah dazu führen können, dass das Versagenskriterium des Gesteins erreicht werden kann.

Für die Weichsel-Kaltzeit wurden von /LUN 05/, /LUN 06/ und /LUN 09a/ Modellrechnungen zur Spannungsverteilung durchgeführt. Unterhalb der Eisdecke war in 500 m Tiefe die Spannungsänderung zu gering für die Reaktivierung von Störungszonen (Abb. 2.5 aus /LUN 09b/. Zudem wurden in diesen Untersuchungen auch die Veränderungen des Porendrucks untersucht. Die größten Spannungsänderungen treten allerdings im Bereich vor dem Gletscher (in Abb. 2.5 in /LUN 09b/) in einer Entfernung von bis zu 300 km vor der Gletscherfront auf.

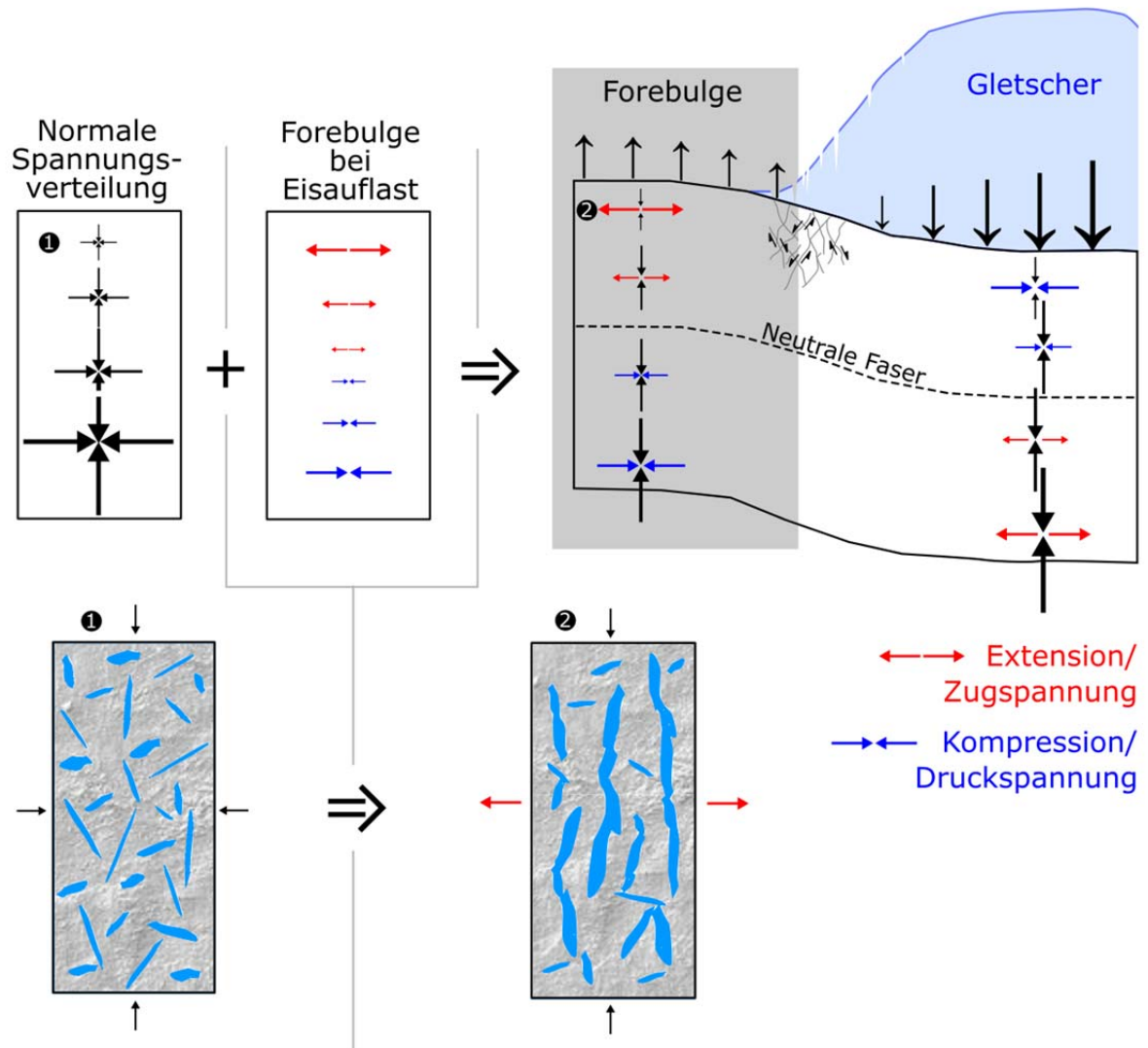


Abb. 10-9 Spannungsänderungen aufgrund von Vergletscherung. In Teufen oberhalb der neutralen Faser, die sich in der Plattenmitte befindet entstehen unter dem Gletscher zusätzliche Kompression und im Bereich zwischen der Gletscherfront und dem Forebulge Extension. Letztere kann zur Ausbildung von vertikalen Mikrorissen führen.

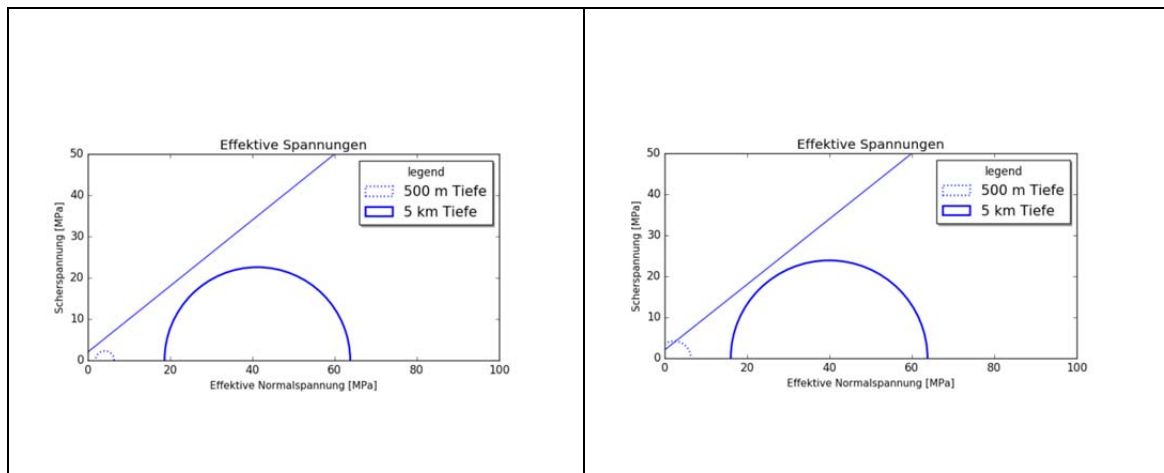


Abb. 10-10 Schematische Darstellung der Spannungsverhältnisse im Bereich zwischen Gletscherfront und Peripheral Bulge (Forebulge) einer Vergletscherung, d.h. vor der Gletscherfront (Einfaches Mohr Coulomb-Kriterium für Störungen mit Koeffizient der inneren Reibung = 0.8 und Kohäsion 2 MPa). Links: während der Warmzeit, rechts: während der Kaltzeit. Als Randbedingung gewählt wurde ein Abschiebungsregime mit einem Vertikalspannungsgradienten von 22.5 MPa/km und einem horizontal Spannungsgradienten von 13.5 MPa/km (Werte angelehnt an Norddeutsche Tiefebene /BOR 89/, /RÖC 03/). Angenommen wird ein linearer Verlauf der Biegespannungen von -4 MPa an der Oberfläche bis 4 MPa in 15 km Tiefe. In 500 m Tiefe (kleiner gepunkteter Halbkreis) können in der Kaltzeit auch Zugspannungen auftreten.

Fazit

- Kaltzeitliche Rinnen haben in den vergangenen 700.000 Jahren Tiefen bis 500 m erreicht. Bei der definierten Mindestteufe einer Lagerung von 1500 m kann ein glazialer Einfluss ausgeschlossen werden. Für Bohrungen muss der Bohrlochverschluss in einem Multibarriersystem mindestens bis in Tiefen von 500 m reichen.
- Kaltzeiten rufen starke, tiefenabhängige Spannungsänderungen hervor.
- Diese sind nicht auf die vergletscherte Region beschränkt, sondern können insbesondere vor der Gletscherfront sehr hohe Magnituden aufweisen.
- Die glazial induzierten Spannungsänderungen können Veränderungen in der Permeabilität generieren und Störungen kritisch bringen.

10.8 Anhang: Randbedingungen für die Störfallbetrachtungen mit Radionuklidfreisetzungen

Im Folgenden werden einige Rand- und Anfangsbedingungen definiert und der hierfür bekannte Kenntnisstand bezüglich der endzulagernden Abfälle und Behälter und ihrem möglichen Verhalten in einem Endlager in einem tiefen Bohrloch dargelegt. Der Beitrag erstreckt sich ausschließlich auf die wärmeentwickelnden Abfälle. Die grundsätzlich für den Bau tiefer Bohrlöcher anzuwendenden Bohrtechniken sehen die Anwendung von Bohrspülungen vor, so dass neben den möglicherweise in den Wirtsgesteinen anzutreffenden Grund-/Porenwässern in jedem Fall bereits während der Einlagerung mit der Anwesenheit wässriger Lösungen zu rechnen ist. Szenarien, die zu Behälterkorrosion und Wasserkontakt mit Abfallformen und damit zu einer möglichen Radionuklidfreisetzung führen, sind daher zu analysieren. Generell ist zu vermerken, dass der Kenntnisstand zu Prozessen, die zu einer Radionuklidfreisetzung bei der Endlagerung in „Tiefen Bohrlöchern“ führen können, sehr begrenzt ist. Im vorliegenden Beitrag wurde auf Rechenverfahren und Daten, die im Bericht „Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste)“ zur „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)“ im Detail dargestellt und abgeleitet sind, zurückgegriffen /KIE 12/. Für exemplarisch skizzierte Szenarien erfolgen vorläufige Abschätzungen zu Korrosionsvorgängen und Radionuklidfreisetzungen aus Wärme entwickelnden, hoch-radioaktiven Abfällen, die in einem generischen tiefen Bohrloch eingelagert wurden.

10.8.1 Bohrlochcharakteristik

Für die Analysen von Havarie und „Worst Case“ Zustände sowie für die Beschreibung der zu erwartenden Entwicklung des Abfalls in den tiefen Bohrlöchern werden folgende Festlegungen bzw. Randbedingungen getroffen.

Tab. 10-5 Unterstellte bzw. verfügbare charakteristische Daten eines tiefen Bohrlochs

Größen / Eigenschaften	Unterstellte / verfügbare charakteristische Daten
Tiefe	Bis 5000 m
Bohrloch	Verrohrtes Bohrloch, Zementation des Ringspaltes zwischen Verrohrung und Gestein
Druck	Bis 60 MPa
Bohrlochfluid	Salzlösung, Dichte 1,3 kg/l
Gebirgstemperatur	180-200°C
Bohrlochdurchmesser	Nutzdurchmesser 500 mm
Puffermaterial	Material zum Lastabtrag zwischen den Behältern
Betrachtetes hypothetisches Kontaktvolumen zur Abschätzung einer Kontamination	Säule mit 20 m ³ (entspricht Säule von ca. 100 m ohne Behälter)
Betriebsdauer	1 Jahr
Abfallformen	Nur Glas oder abgebrannte Kernbrennstoffe Es werden keine Sonderabfälle wie BE aus Forschungs- und Pilotreaktoren etc. betrachtet.

Das in der Tab. 10-5 angegebene Kontaktvolumen zur Abschätzung einer Radionuklidkontamination wird benötigt, um Radionuklidkonzentrationen berechnen zu können, die zur Konzeption radiologischer Überwachungsstrategien erforderlich sind. Hierzu wird unterstellt, dass bei der Einlagerung ein gewisser Bereich des mit Lösungen gefüllten Bohrlochs durchmischt wird. Dies wird auch für den Fall einer Havarie bei nachfolgender Rückholung eines oder mehrerer Abfallbehälter angenommen. Bei einem Einlagerungskonzept, bei der die Behälter mit Bentonitbarrieren voneinander getrennt eingebracht werden, wie in /BRA 09/ vorgeschlagen, sind die Kontaktvolumina deutlich niedriger und die berechneten Radionuklidkonzentrationen werden bei eingeschränkter Migration entsprechend höher sein.

Die Zusammensetzung eines Bohrfluids hoher Dichte ist derzeit nicht festgelegt. Zur Abschätzung von Behälter- und Abfallkorrosionsraten sowie Radionuklidlöslichkeiten wird ansatzweise abdeckend eine MgCl₂ Lösung angenommen, mit der die Dichte von 1,3 g/cm³ erreicht werden kann. Wegen der stark korrosiven Eigenschaften solcher Lö-

sungen sind die unter diesen Voraussetzungen abgeschätzten Daten als konservative Betrachtungen zu sehen.

10.8.2 Abfall

10.8.2.1 HAW-Glas

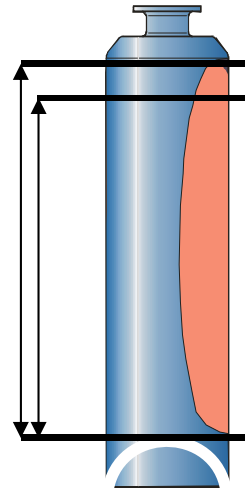
Folgende HAW-Glasprodukte müssen endgelagert werden:

- CSD-V Gläser aus der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague, Korrosions- und Radionuklidfreisetzungsuntersuchungen liegen hierfür vor an inaktivem Glas SON-68 und aktiv simuliertem mit Actiniden dotiertem Glas CEA-R7T7
- Abfälle mit einer Glaszusammensetzung BNFL Blend 1 aus der britischen Verglasungsanlage Sellafield und
- Gläser aus dem Betrieb der VEK Anlage zur Verfestigung der WAK Abfälle sowie
- CSD-B Gläser aus der Verglasung von mittelaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague.

Gesamtvolumen: ca. 660 m³ entsprechend 4.400 Gebinde à 150 Liter (nur HAW-Glasprodukte). Diese Abfälle existieren und es wird nicht erwartet, dass diese in ihrer Größe und Verpackung verändert werden. Lediglich ein zusätzlicher Overpack, wie der DBC-R Behälter, ist möglich. Für die folgenden Analysen werden die kompaktierten CSD-C Abfälle nicht berücksichtigt.

Tab. 10-6 Parameter der HAW-Glas Behälter

Parameter der Glasbehälter (VEK)	Garantie Werte	Einheit
Höhe	1.34	M
Durchmesser	0.43	M
Abfalloxidbeladung	≤ 19	%
α Aktivität (gesamt)	≤ 10 ¹⁴	Bq
β/γ Aktivität (gesamt)	≤ 10 ¹⁶	Bq
Masse U	≤ 7200	g
Masse Pu	≤ 190	g
Zerfallswärme (heute)	≤ 734	W



10.8.2.2 Abgebrannter Kernbrennstoff

Abgebrannter Kernbrennstoff besteht aus einer heterogenen zerbrochenen Keramik aus UO_2 oder MOX in Pellets, die in Hüllrohren zu Brennstäben zusammengefasst sind. Die Hüllrohre haben einen Durchmesser von rund 1 cm und eine Länge von über 4 m. Je nach Reaktortyp (DWR oder SWR) bestehen die Brennelemente aus 100 bis über 300 Brennstäben. Durch die Spaltung des Urans bzw. Plutoniums entstehen verschiedene Spaltprodukte, die in verschiedenen Mischphasen vorliegen und eine komplexe Verteilung von Spaltprodukten und Actiniden aufweisen. Ausgeprägte strukturelle Heterogenität wird durch den Abbrand, die Anfangsanreicherung, und die Wärmeleistung der Brennstäbe beeinflusst.

Folgende Mengen an abgebranntem Kernbrennstoff müssen endgelagert werden:

Tab. 10-7 Abgebrannter Kernbrennstoff

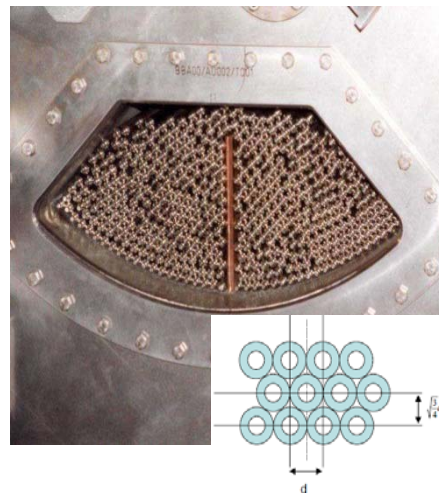
PWR	13 980 Brennelemente
BWR	15 600 Brennelemente.
Masse UO_2 Brennstoff	9 460 Mg
Masse MOX Brennstoff	985 Mg

Kernbrennstoffe aus WWER sowie Test und Pilot Reaktoren werden im Rahmen dieses Gutachtens nicht betrachtet.

Ein Brennstab enthält ca. 300 Pellets im Hüllrohr aus Zircaloy innerhalb einer Länge von $l = 3.85$ m, die Masse eines Brennstabs beträgt ca. 1.8 kg. Die Aktivität und die Wärmeleistung für jeweils eine Tonne abgebrannten Kernbrennstoff wurden mit web-KORIGEN++ (www.nucleonica.web) für einem Abbrand von 55 GWd/t in einem Druckwasserreaktor mit gleichen Betriebsbedingungen berechnet, wobei die Anfangsanreicherung im Falle des UO_2 mit 4.5% ^{235}U , bei MOX mit 4.2% $Pu_{fiss}/(Pu_{tot}+U_{nat})$ angenommen wurde. Die Wärmeleistung für abgebrannten UO_2 und MOX Kernbrennstoff sind in der Abb. 10-11 (bezogen auf 1 m^3 Abfallvolumen) dargestellt, ebenfalls eingezeichnet ist die Wärmeleistung eines aus dem UO_2 Kernbrennstoff hergestellten HAW Glases. Die Grafik zeigt, dass bei MOX eine etwa um einen Faktor 4 höhere Wärmeleistung vorliegt als bei UO_2 Brennstoff.

Tab. 10-8 Inventare (in g/Tonne) von einigen Spaltprodukten im abgebranntem Kernbrennstoff /STO 11/.

Element	DWR UO_2 55 GWd/t	DWR MOX 55 GWd/t
Se	86.9	64.8
Zr	5795.0	4136.0
Mo	5424.0	4995.0
Tc	1266.0	1282.0
Ru	4176.0	5101.0
I	339.0	459.8
Cs	4616.0	5378.0
Ba	2467.0	2365.0
La	2012.0	1887.0
Nd	6221.0	5440.0



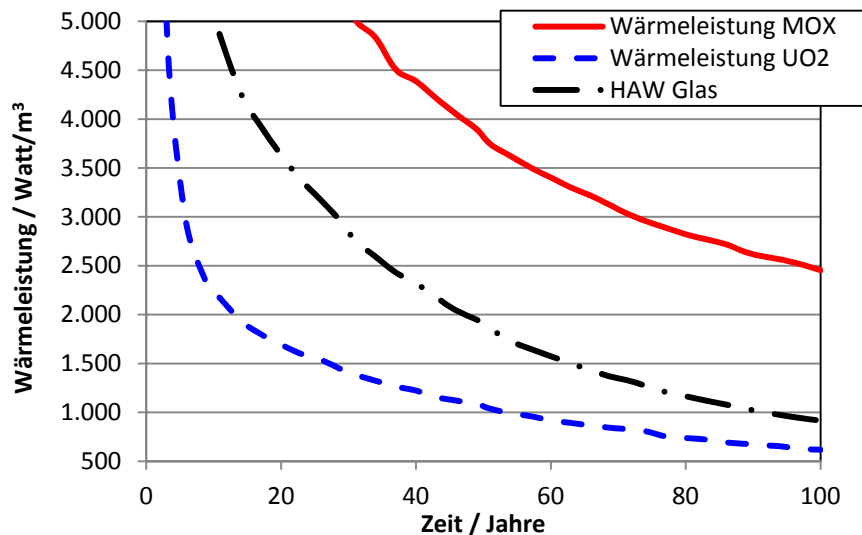


Abb. 10-11 Wärmeleistung von UO₂ und MOX Kernbrennstoff sowie von HAW Glas als Funktion der Zeit.

10.8.2.3 Behälter

Als Behältermaterialien für hoch-radioaktive Abfälle werden international unterschiedliche Konzepte diskutiert. Im Zusammenhang mit der Endlagerung in „tiefen Bohrlöchern“ scheidet dickwandige Behälter wie z.B. POLLUX (\varnothing 1.56 m) oder kupferbeschichtete KBS-3 Behälter (\varnothing 1.05 m) wegen ihrer Durchmesser aus. Das im Rahmen dieses Gutachtens entwickelte Behälterkonzept ist im Kap. 7 beschrieben. Für diese Analyse wurde ein ähnliches Behälterkonzept unterstellt. Dieses sind (1) un abgeschirmte BSK 3 Kokillen, die bei einem inneren Durchmesser von 43 cm und einer Wandstärke von 4 cm für drei abgebrannten DWR-Brennelemente oder neun SWR-Brennelementen aufnehmen können (vSG) und (2) für verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der sogenannte „triple pack“ Behälter als Overpack (innerer Durchmesser: 44,1 cm, Wandstärke: 5 mm), der drei HAW Kokillen aufnehmen kann. Hier erscheint die Wandstärke jedoch unzureichend für eine Stapellagerung in tiefen Bohrlöchern, so dass entsprechende Behälter mit größerer Wandstärke erforderlich würden. Beide Behältertypen waren für eine Bohrlochlagerung (Bohrlochtiefe: ca. 300 m) in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen konzeptioniert. Während im Fall der Brennstabkokillen sowie des „triple pack“ Behälters Flexibilität bzgl. der Materialauswahl grundsätzlich existiert, ist dies für die bereits vorliegenden HAW-Glaskokillen, die aus Cr-Ni Stahl gefertigt wurden, nicht mehr möglich. Generell sind die in Erwägung gezogenen Behälterkonzepte auf ihre mechanische Stabilität bei großen Stapelhöhen unter den vorgesehenen Einlagerungsbedingungen zu überprüfen.

In Kapitel 7 wurden korrosionsfeste austenitische Stähle vorgeschlagen. Hierzu gehören V2A (Cr-Ni) und V4A (Cr-Ni-Mo) Stähle, die bei hohen Temperaturen in Salzlösungen zur lokalen Korrosion (Lochfraß) neigten. Da die Inkubationszeit für das Auftreten der lokalen Korrosion nicht prognostizierbar war, wurden diese Stähle nicht für Endlagerbehälter berücksichtigt. Als Referenzmaterial wurden niedriglegierte aktiv korrodierende Stähle ausgewählt, deren Korrosionsverhalten prognostizierbar war.

Tab. 10-9 Charakteristik des BSK 3 Behälters

BSK 3 Behälter	
Anzahl von Brennstäben pro Behälter	818
Äußerer Durchmesser d_a	43 cm
Innerer Durchmesser d_i	35 cm
Länge des Behälters	498 cm
Masse an Stahl je Behälter	2.9 Mg
Masse an Polyethylene pro Behälter	7 kg

Experimentelle Korrosionsstudien zu Behältermaterialien wurden im KIT-INE u.a. in Salzlösungen mit 4 M $MgCl_2$ oder in gesättigten NaCl Lösungen (6 M) mit verschiedenen Metallen unter reduzierenden Bedingungen (in Autoklaven) durchgeführt (Referenzen siehe nachfolgende Tab. 10-10). Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf diese Daten zu salinaren Lösungen, da bei der Einlagerung in tiefen Bohrlöchern mit Lösungen (Grund/Porenwässer, Bohrfluid) mit hohen Salzgehalten gerechnet werden muss. Der Temperaturbereich für experimentelle Daten erstreckte sich von 35 bis 200° C. Der Druck variierte zwischen 1 und 13 MPa, im Wesentlichen im Bereich von 0.5 – 1.5 MPa. Es wurden Metallproben der Dimension 40×20×4 mm³ verwendet. Eine Reihe von Experimente wurden auch unter γ -Strahlung durchgeführt /MCM 97/, /SMA 95/, /SMA 02b/, /SMA 99/, /SMA 04/. Die Experimente umfassten Feinkornbaustahl, Hastelloy C4, Ti-Pd und Cu Ni Legierungen.

Tab. 10-10 Kenntnisstand zur Korrosion von Behältermaterialien in Salzlösungen

Behälter Material	Abgebrannter Kernbrennstoff Behälter BSK 3	Referenzmaterial: niedriglegierter Stahl (Baustahl) Korrosionsdaten sind bis 200°C verfügbar. /SMA 92/, /SMA 89/, /SMA 87/, /SMA 02a/
	HAW-Glas Behälter	Cr-Ni Stahl 1.4833 Dimension: H = 1.34 m, Ø 0.43 m, Wandstärke 5 mm Korrosionsraten bis 200 °C, Schweißnaht /GRA 98c/, /SMA 00/, reale Behälterkonzepte /SMA 02a/ Tendiert zu lokaler Korrosion, Keine Daten zur H ₂ Produktion Overpack: 3 HAW/CSD-C Kokillen pro Triple Pack Behälter, der in seinen Dimensionen den BSK 3 Behälter entspricht. Ø = 441 mm L = 5 m
Overpack	Korrosionsschutz: TiPd	Daten verfügbar für Salzlösungen /Tonwasser: Korrosionsraten bis 150 °C Wasserstoffversprödung Korrosionsraten bis 200 °C
	Ni-Legierungen (Hastelloy C4)	Korrosionsraten bis 150 °C /SCH 92/, /SMA 04/ Kontaktkorrosion
	Kupfer	Korrosionsdaten: /DAV 04/, /KUR 04/, /SMA 01/
	Nichtmetallische Werkstoffe SiC	Untersuchungen wurden in den 1980er Jahren durchgeführt, als noch keine hinreichende Technologie zur Herstellung und zum Verschluss verfügbar war. Korrosionsstudien: /SMA 87/, /SMA 83/ Neue Verfahren zum Aufbringen und Verschweißen existieren, sind aber nicht Gegenstand dieser Betrachtung

Die Zusammensetzung des Bohrlochbetriebsfluids/Spüllösung ist nicht festgelegt. Daher wird ein aggressives Medium wie MgCl₂-Lösung als Referenz verwendet. Bei KIT-INE ermittelte Korrosionsraten für verschiedene Metalle in MgCl₂-reicher Lösung sind in der folgenden Tab. 10-11 gelistet /SMA 02b/.

Tab. 10-11 Gemessene Korrosionsraten von Stählen in konzentrierter MgCl₂ Lösung

Bezeichnung	Zusammensetzung	Werkstoff Nummer	Temperatur °C	Abtragsrate µm/a	Standardabweichung ± µm/a
Feinkornbaustahl	FStE 255	1.0566	200	626	143
Feinkornbaustahl	FStE 255	1.0566	170	174	90
Cr-Ni-Stahl	Cr-Ni-Stahl	1.4833	150	0.60	0.12
Nirosta	Nirosta	1.4306	150	1.75	0.75
Titan – Palladium	Ti 99.7 - Pd EG	3.7035	150	0.10	0.11
Kupfer	Cu.99	4.0000	150	20	19
Cu-Ni 70/30	Cu-Ni 70/30	4.7000	150	20	18
Cu-Ni 90/10	Cu-Ni 90/10	4.9000	150	21	20
Hastelloy C4	Ni Mo 16 Cr 16 Ti	2.4610	170	1.6	2.7
Ni/Cu 70/30	Ni/Cu 70/30	2.4360	150	2.4	1.8

Zu den gemessenen Korrosionsraten ist anzumerken, dass die Raten in solchen Bereichen deutlich ansteigen, die durch Schweißen wärmebeeinflusst sind sowie bei Kontakt verschiedener Metalle. Die Spaltkorrosion führt mindestens zur Verdoppelung der Korrosionsraten. Zwar zeigen die Cr-Ni Stähle 1.4306 und 1.4833 sehr geringe lineare Abtragsraten. Diese Stähle neigen jedoch zu lokalen Korrosionsprozessen, wie Lochfraßkorrosion. Diese für HAW-Glaskokillen verwendeten Stähle sind deshalb nicht als langzeitwirksame Barriere nach der Einlagerung geeignet.

Korrosionsdaten für die vorgesehene Bohrlochfluide und die erwarteten Temperaturbereiche liegen nicht vor. In einem tiefen Bohrloch kann es zum Kontakt zwischen Abfallbehälter und dem metallischen Casing kommen. An diesen Kontaktstellen zwischen unterschiedlichen Metallen können erhebliche Korrosionsprozesse wirksam sein. Diese Kontakt und Spaltkorrosion muss mit den letztlich ausgewählten Materialien für Behälter, Overpack und Casing unter Bedingungen der tiefen Bohrlochlagerung untersucht werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass das spezifische Volumen der entstehenden

Korrosionsprodukte im Falle von Stahlbehältern um mindestens 60 % höher ist als das des ursprünglichen Materials.

Generell ist festzustellen, dass die Datenlage, um eine exakte Aussage zur Behälterkorrosion bei einer Einlagerung in lösungsgefüllte tiefe Bohrlöcher zu ermöglichen, unzureichend ist.

10.8.3 Zu erwartende Prozesse während und nach der Einlagerung

10.8.3.1 Temperaturerhöhung

Die im Einlagerungsbereich herrschende Temperatur wird möglicherweise die Raten der Behälterkorrosion, der Abfallkorrosion, Radionuklidlöslichkeiten und Konvektion im Einlagerungsbereich beeinflussen. Die Temperatur in mehreren km Tiefe wird durch die geogenen Bedingungen sowie durch den Wärmeeintrag durch die Wärme entwickelnden hoch-radioaktiven Abfälle bestimmt. Die geogene Temperatur nimmt mit der Tiefe mit ca. 20°C and 30°C km⁻¹ zu und kann ca. 180 °C oder höher erreichen.

Die Erhöhung der Zentraltemperatur in den Abfallgebinden gegenüber der Temperatur an der Abfalloberfläche bedingt durch Zerfallswärme ergibt sich aus:

$$\Delta T = \text{lin. power} / (4\pi \cdot \lambda)$$

Mit der Wärmeleistung verglasteter Abfälle von 735 W/Kanister (heute) und der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{irrad fuel}} = 1.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ /KIE 89/ ergibt sich eine Temperaturdifferenz zwischen Glasblockinnerem und -oberfläche von $\Delta T = 32 \text{ K}$.

Mit der Wärmeleistung der abgebrannten Brennelemente von 500 W/t nach 100 a (als Beispiel) und der Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_{\text{irrad fuel}} = 2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ /LUC 96/ liegt die Temperatur an der Oberfläche der Gebinde um etwa $\Delta T = 11 \text{ K}$ niedriger als im Zentrum des Behälters.

Maximal kann daher eine Temperaturdifferenz (innen-außen) von 32 K abgeschätzt werden, wobei mit fortschreitender Zeit Temperaturen und Temperaturgradienten bedingt durch den radioaktiven Zerfall abnehmen.

Zur Abschätzung der Temperatur mit Hilfe des FEM Codes FlexPDE 6.35 im Zentrum bzw. an der Oberfläche der Abfallprodukte wurden folgende Festlegungen getroffen (Tab. 10-12).

Tab. 10-12 Festlegungen für die Temperaturabschätzung

Geometrie	Eindimensionaler Zylinder
Wärmeleistung:	1.000 W/m ³ (50 Jahre alter UO ₂ Kernbrennstoff) 2.000 W/m ³ (30 Jahre altes HAW Glas)
Materialzone Abfall	R = 0.25 m, $\lambda = 1.3 \text{ W/m K}$ (HAW-Glas) $c_p = 1.300 \text{ J/kg K}$ $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$
Materialzone Granit	R = 10 m $\lambda = 3.5 \text{ W/m}$ $c_p = 800 \text{ J/kg K}$ $\rho = 2.800 \text{ kg/m}^3$
Randbedingung:	T (R = 10 m) = 180°C

Mit diesen Daten beträgt bei einer Wärmeleistung des Abfalls von 1.000 W/m³ die Zentraltemperatur bei 226 °C, bei einer Wärmeleistung von 2.000 W/m³ liegt die Zentraltemperatur bei 270°C. Die Temperaturerhöhung in CSD-C Gebinden ist vernachlässigbar. Die Außentemperaturen liegen daher in einem Bereich von ca. 200 – 240 °C. Für MOX Kernbrennstoff liegen die Temperaturen für ein Alter des Brennstoffs von weniger als 150 Jahren deutlich höher.

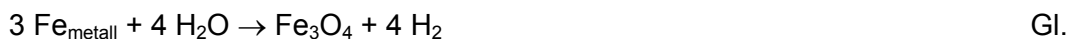
Diese Rechnungen sollen nur eine grobe Abschätzung der Randbedingungen für weitere Betrachtungen darstellen. Eine detaillierte Studie zur Temperaturentwicklung in für ein Bohrloch- und Beladungskonzept sind nicht Gegenstand dieses Beitrags. Dennoch ist festzustellen, dass insbesondere für die betrachteten Havariefälle ein relativ früher Wasserkontakt mit der Abfallform angenommen wird, bei der hohe Temperaturen > 200 °C für die Abfalloberfläche angenommen werden müssen.

10.8.3.2 Gasentwicklung

Prinzipiell können zwei Prozesse zur Gasbildung in einem tiefen Bohrloch beitragen: Radiolyse der anstehenden Lösung und Korrosionsprozesse.

Ein BSK 3 Behälter mit ca. 30 Jahren alten UO₂ Kernbrennstoff weist an der Oberfläche eine Dosisleistung von etwa 10 Gy/h auf /KIE 04/. Mit dem G-Wert für Wasserstoffbildung $G(\text{H}_2) = 0.047 \text{ } \mu\text{mol}/\text{Gy}/\text{Liter Wasser}$ ergibt sich bei Bestrahlung des Ringraums mit ca. 130 Liter pro eingelagertem Behälter eine Wasserstoffmenge $n(\text{H}_2) = 0.5 \text{ mol}/\text{Behälter}/\text{Jahr}$ (11 Liter H₂ Gas (NB)/Jahr). Die Gasmenge ist proportional zur Dosisleistung und zum bestrahlten Lösungsvolumen.

Für die Abschätzung zur Bildung von Korrosionswasserstoffgas wird von folgender Korrosionsreaktion ausgegangen:



Das Reaktionsprodukt Fe₃O₄ (Magnetit) gilt als die zu erwartende stabile Mineralphase unter den geochemischen Bedingungen der tiefen Bohrlochlagerung. Mit der o.g. mittleren Korrosionsrate von 143 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ bei Feinkornbaustahl bei 170°C beläuft sich die pro Behälter umgesetzte Eisenmenge auf ca. 1200 cm³/Jahr und die dadurch gebildete Wasserstoffgasmenge auf 3700 Liter (NB)/Jahr). Die durch Eisenkorrosion bedingte Wasserstoffmenge ist erheblich und überwiegt die durch Radiolyse generierte um ein Vielfaches.

10.8.4 Radionuklidmobilisierung

10.8.4.1 HAW-Glas

Zum Kurz- und Langzeitkorrosionsverhalten von HAW-Glasprodukten unter Bedingungen der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen liegt eine umfassende Datenbasis vor. Modelle wurden entwickelt, um das Alterationsverhalten durch die Bildung von Gelschichten und das Ablaufen von Diffusionsprozessen zu beschreiben /GRA 98a/, /GRA 01/. Generell werden verschiedene aufeinander folgende Regime der Glasalteration beobachtet:

- Hohe (initiale) Auflösungsrate.

- Kontinuierliche diffusionskontrollierte Auflösung in Abhängigkeit vom vorherrschenden pH-Wert der angreifenden Lösung
- Langzeitrate

Auch der Temperatureinfluss auf die Glaskorrosion in Salzlösungen wurde untersucht und dokumentiert /KIE 01/. Der Temperaturbereich der experimentellen Studien lag zwischen 90°C und 190°C /GRA 96/ und damit signifikant niedriger als die abgeschätzten Oberflächentemperaturen der Abfallformen (siehe oben). Die Korrosion in NaCl und MgCl₂ Lösungen unterscheidet sich signifikant in den Si Sättigungskonzentrationen, die den Übergang von initialer zur Langzeitumwandlung mitbestimmen (höher in NaCl-Lösungen). Die Freisetzungsraten für nicht löslichkeitsbegrenzte Glasbestandteile sind bei hohen Temperaturen (190 °C) in MgCl₂ Lösung um einen Faktor 2 höher als in NaCl Lösung /DGM 03/. Li und B werden dabei als Indikatoren für die Auflösung der Glasmatrix verwendet. In der NaCl Lösung lag der pH –Wert zwischen 6 und 8 bei allen Temperaturen, während in MgCl₂ Lösung der pH auf Werte zwischen 6 und 5 fiel /GRA 96/.

Zur Abschätzung der Radionuklidmobilisierung wird das „Grambow Model“ /GRA 98a/, /GRA 01/ verwendet. Die Ableitung ist in /KIE 12/ angegeben. Durch Anpassung an experimentelle Daten ergibt sich eine Formel zur Berechnung der “Kurzzeit-Korrosionsrate” für HAW-Gläser (Einheit: kg m⁻² d⁻¹) /GRA 00/:

$$r_{shorttermrate}(T) = 6.4 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{-8323}{T}\right)$$

T: Temperatur in K. Für die Langzeitauflöserate in Wasser und Salzlösungen ist ebenfalls eine Funktion verfügbar /RIC 95/ (Einheit: kg m⁻² d⁻¹):

$$r_{longtermrate}(T) = 5.6 \cdot 10^2 \cdot \exp\left(\frac{-7397}{T}\right)$$

Die geometrische Oberfläche eines Glasblocks beträgt ca. 2 m². Die durch Rissbildung beim Abkühlen des Glases entstandene Gesamtoberfläche wurde mit der 20 fachen geometrischen Oberfläche entsprechend 40 m² pro Gebinde ermittelt /KIE 89/.

Aufgrund der Volumenabnahme der Glasschmelze nach dem Abfüllen bei ca. 1100 - 1200°C und Abkühlen unter die Transformationstemperatur von ca. 520°C im Behälter, verbleibt ein unausgefülltes Restvolumen von ca. 20 Liter in jedem HAW-Glasbehälter. Dies ist insbesondere bei der Auslegung der Stapelhöhe von Abfallbehältern zu berücksichtigen.

Da Daten zur Glaskorrosions- und Auslaugraten für Bohrlochfluide nicht verfügbar sind und die exakte Mischlösungszusammensetzung aus mutmaßlich salzhaltigen Grund-/Porenwässern und Bohrfluid nicht bekannt ist, werden Kurzzeitkorrosionsdaten in MgCl₂-Lösungen zur Abschätzung der möglichen Radionuklidfreisetzung verwendet. Zu beachten ist allerdings, dass die experimentelle Datenbasis für solche Lösungen nur bis ca. 190°C reicht. Bei den abgeschätzten höheren Temperaturen sind weitere Studien erforderlich, die den Temperaturbereich > 200°C abdecken.

10.8.4.2 Abgebrannter Kernbrennstoff

Die Brennstäbe werden bei der Herstellung mit einem Heliumdruck von ca. 20 bar beaufschlagt. Das Gasvolumen je Brennstab liegt bei ca. 10 ml. Während des Abbrands im Reaktor bilden sich die Spaltgase Krypton und Xenon, die zu einem Druckerhöhung führen. Beim Defekt eines Hüllrohrs werden diese Gase instantan freigesetzt. Bis zur Endlagerung ist das Xe abgeklungen, lediglich ⁸⁵Kr (t_{1/2}= 10,756 a) liegt für einige Jahrzehnte nach Entnahme aus dem Reaktor als radioaktives Gas vor.

Die Spaltprodukte befinden sich nach dem Abbrand in unterschiedlichen, zum Teil leicht mobilisierbaren bzw. löslichen Verbindungen. In Kontakt mit wässrigen Lösungen können Radionuklide mobilisiert werden, wobei sich zwei Prozessstypen unterscheiden lassen (siehe z.B. /BRU 06/):

- Schnelle Freisetzung von Radionukliden, die innerhalb von wenigen Monaten zu einem erheblichen Anteil mobilisiert werden können /KIE 15b/, /SOC 15/. Dieser Anteil wird „instant release fraction, IRF“ genannt /JOH 05/, /JOH 12/. Details sind in /KIE 15b/ dargestellt.
- Deutlich langsamere langfristige Radionuklidfreisetzung infolge der Veränderung des Brennstoffs und der Auflösung der UO₂ Matrix.

Eine Beschreibung der Prozesse findet sich in /MET 12/.

Der dimensionslose Term *Fraktion des Inventars in der wässrigen Phase*, FIAP wurde eingeführt /HAN 04/, um die Konzentration der gelösten Radionuklide zu ihrem Gehalt im angebrannten Kernbrennstoff in Beziehung zu setzen. Die Strontium-Freisetzung wird oftmals als Maß für die Korrosion der Brennstoffmatrix verwendet. $FIAP_{Sr}$ oder "Sr-FIAP" wird folgendermaßen berechnet (Index i für Sr):

$$FIAP = \frac{[conc]_i \cdot V_{solution}}{H_i \cdot m_{spent\ fuel}} = \frac{m_{i,aq}}{m_{i(spent\ fuel)}}$$

mit $[conc]_i$ Konzentration des Elements i in der Lösung ($g \cdot mL^{-1}$), $V_{solution}$ Volumen der Lösung (mL), H_i Anteil des Elements i am Inventar (g/g), $m_{spent\ fuel}$ Masse des abgebrannten Kernbrennstoffs (g), $m_{i,aq}$ Masse des Elements i in der wässrigen Phase (g), $m_{i(spent\ fuel)}$ Masse des Elements i im Brennstoff (g). Für kurze Zeiten zu Beginn der Brennstoffkorrosion sind FIAP und IRF äquivalent.

Die IRF für Cs liegt bei ca. 4 % des betroffenen Gesamtinventars und kann innerhalb weniger Monate freigesetzt werden. Für Jod beträgt die IRF bis zu 16 %. Im Falle von MOX liegen die freigesetzten Anteile deutlich höher.

Die deutlich langsamere langfristige Radionuklidfreisetzung aus abgebranntem Kernbrennstoff geschieht nach einigen Jahrhunderten nach Zerfall der β, γ Strahlung emittierenden Spaltprodukte ^{137}Cs und ^{90}Sr infolge der α -radiolytisch bedingten Oxidation des $U^{IV}O_2$ zu U^{VI} . Diese Prozesse wurden intensiv untersucht und zeigten einen überraschend geringen Einfluss der Temperatur (Raumtemperatur bis 200°C) auf die Korrosionsrate. Ein Schwergewicht lag auf der Untersuchung des sogenannten Wasserstoffeffekts, der die Oxidation des U^{IV} verhindern kann (siehe /CAR 09/, /DGM 03/, /GRA 10/, /SPA 04/, /SPA 00a/, /SPA 00b/, /VAN 05/). In verschiedenen Salzlösungen wurde ebenfalls das Korrosions- und Auslaugverhalten von abgebranntem Kernbrennstoff untersucht /LOI 96/, /LOI 01/, /GRA 94/, /KIE 15a/, /GRA 98b/. Es existieren auch Daten zum Einfluss von Strahlung, der Anwesenheit von Wasserstoff und von bestimmten Grundwasserinhaltsstoffen, wie z.B. Bromid /LOI 07/, /SCH 15/.

Ohne Anwesenheit von Wasserstoff in den Auslauglösungen wurden Korrosionsraten von 2×10^{-5} des betroffenen Inventars pro Tag gemessen, die sich auf ca. 10^{-8} /Tag verminderten bei Anwesenheit eines H_2 -Partialdrucks von ca. 8 bar. In Salzlösungen bei

Anwesenheit von Bromid, das Radiolysereaktionen beeinflusst und den korrosionsinhibierenden Wirkungen des Wasserstoffs teilweise entgegenwirkt, stiegen die Korrosionsraten trotz Anwesenheit von Wasserstoff wieder auf ca. 10^{-5} /Tag an. Da die konkrete Zusammensetzung von Bohrfluiden nicht bekannt ist und Einflüsse durch Reaktionen wie dem „Bromideffekt“ nicht auszuschließen sind, werden in den folgenden Betrachtungen die höheren Brennstoffkorrosionsraten verwendet (2×10^{-5} des betroffenen Inventars pro Tag).

Wie bereits oben ausgeführt, handelt es sich hier um Abschätzungen. In Experimenten bis zu 190°C konnte keine signifikante Erhöhung der Brennstoffkorrosionsraten von der Temperatur festgestellt werden. Daten für Brennstoffkorrosionsprozesse in Lösungsmedien in tiefen Bohrlöchern und insbesondere bei $T > 200^\circ\text{C}$ liegen nicht vor.

10.9 Literatur Kapitel 10

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd –Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, W & S Druck GmbH: Köln, 2002.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS, Bd. 281, 285 S., ISBN 9783939355571, Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Köln, 2012.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben Teil 3, 2008.
- /BOR 89/ Borm, G., Lempp, C., Natau, O., Röckel, T.: Instabilities of borehole and drillcores in crystalline rocks, with examples from the KTB pilot hole, Scientific Drilling, Bd. 1, S. 105–114, 1989.

- /BRA 09/ Brady, P.V., Arnold, B.W., Freeze, G.A., Swift, P.N., Bauer, S.J., Kanney, J.L., Rechar, R.P., Stein, J.S.: Deep borehole disposal of high-level radioactive waste, SAND2009-4401, Hrsg.: Sandia National Laboratories, DOI 10.2172/985495, 75 S., Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico 87185, 2009, erreichbar unter <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>, zitiert am 22. Januar 2016.
- /BRA 12/ Brandes, C., Winsemann, J., Roskosch, J., Meinsen, J., Tanner, D.C., Frechen, M., Steffen, H., Wu, P.: Activity along the Osning Thrust in Central Europe during the Lateglacial. Ice-sheet and lithosphere interactions, *Quaternary Science Reviews*, Bd. 38, S. 49–62, DOI 10.1016/j.quascirev.2012.01.021, 2012.
- /BRA 15/ Brandes, C., Steffen, H., Steffen, R., Wu, P.: Intraplate seismicity in northern Central Europe is induced by the last glaciation, *Geology*, Bd. 43, Nr. 7, S. 611–614, DOI 10.1130/G36710.1, 2015.
- /BRU 06/ Bruno, J., Ewing, R.C.: Spent nuclear fuel, *Elements*, Bd. 2, S. 343–349, 2006.
- /CAR 09/ Carbol, P., Fors, P., Gouder, T., Spahiu, K.: Hydrogen suppresses UO₂ corrosion, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 73, Nr. 15, S. 4366–4375, DOI 10.1016/j.gca.2009.04.041, 2009.
- /DAV 04/ Davies, C., Kursten, B., Smailos, E., Azkarate, I., Werme, L., Smart, N.R., Marx, G., Cunado, M.A., Santarini, G. (Hrsg.): Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers: review of 15-20 years of research, *Euradwate'04*, 185-195, European Commission: Luxembourg, 29-31 March 2004, 2004.
- /DEI 09/ Deichmann, N., Giardini, D.: Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland), *Seism. Res. Lett.*, Bd. 80, Nr. 5, S. doi:10785/gssrl.80.5.784, 2009.
- /DGM 03/ DGMK (Hrsg.), DGMK Tagungsbericht 2003, 2 volumes, ISBN 3-936418-03-9, 2003.

- /FAE 10/ Faenza, L., Michelini, A.: Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap, *Geophys. J. Int.*, S. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04467.x 1138-1152, 2010.
- /FIN 09/ Finch, R.J., Bullen, N.B., Poinssot, C., Gras, J.-M. (Hrsg.): Key scientific issues related to the sustainable management of the spent nuclear fuel in the back-end of the fuel cycle, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII*, Bd. 1124, Mat. Res. Soc. Symp. Proc: Boston, USA, 2009.
- /GFZ 16/ Geoforschungszentrum Potsdam: Jüngster Vulkan Bayerns entdeckt, *GeoForschungsZeitung*, 12 S., 2016, erreichbar unter http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:1437916/component/escidoc:1437917/GFZeitung_01_2016.pdf, zitiert am 18. Februar 2016.
- /GRA 00/ Grambow, B., Loida, A., Martinez-Esparza, A., Dias-Arocas, P., Pablo, J.D., Paul, J.L., Marx, G., Glatz, J.P., Lemmens, K., Ollilia, K., Christensen, H.: Long-term safety of radioactive waste disposal: Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form. Final Report, FZKA 6420, Forschungszentrum Karlsruhe, 1. Januar 2000.
- /GRA 01/ Grambow, B., Muller, R.: First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment, *Journal of Nuclear Materials*, Bd. 298, 1-2, S. 112–124, 2001.
- /GRA 10/ Grambow, B., Bruno, J., Duro, L., Merino, J., Tamayo, A., Martin, C., Pepin, G., Schumacher, S., Smidt, O., Ferry, C., Jegou, C., Quiñones, J., Iglesias, E., Villagra, N.R., Nieto, J.M., Martínez-Esparza, A., Loida, A., Metz, V., Kienzler, B., Bracke, G., Pellegrini, D., Mathieu, G., Waselin-Trupin, V., Serres, C., Wegen, D., Jonsson, M., Johnson, L., Lemmens, K., Liu, J., Spahiu, K., Ekeröth, E., Casas, I., Pablo, J.D., Watson, C., Robinson, P., Hodgkinson, D.: Final Report of the Project MICADO: Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear waste repository, 1. Januar 2010.

- /GRA 94/ Grambow, B., Loida, A., Dressler, P., Geckeis, H., Gago, J., Casas, I., Pablo, J.D., Giménez, J., Torrero, M.E.: Long-term safety of radioactive waste disposal: Reaction of high burnup spent fuel and UO₂ in saline brines at room temperature, KfK 5377, 1. Januar 1994.
- /GRA 96/ Grambow, B., Lutze, W., Kahl, L., Geckeis, H., Bohnert, E., Loida, A., Dressler, P.: Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal. Retention of Pu, Am, Np and Tc in the Corrosion of COGEMA Glass R7T7 in Salt Solutions. Final Report, FZKA 5767, Forschungszentrum Karlsruhe, 1. Januar 1996.
- /GRA 98a/ Grambow, B.: Beschreibung der kinetischen Barrierenwirkung von HAW-Glas im integrierten Nahfeldmodell, Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement, FZK-INE 015/97, Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe: Karlsruhe, 1. Januar 1998.
- /GRA 98b/ Grambow, B., Loida, A., Smailos, E.: Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments, Nuclear Technology, Nr. 121, S. 174–188, 1998.
- /GRA 98c/ Grambow, B., Loida, A., Smailos, E.: Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments., Nuclear Technology, Nr. 121, S. 174–188, 1998.
- /GRÜ 09a/ Grünthal, G., Bosse, C., Stromeyer, D.: Neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland, Scientific Technical Report, Helmholtz Centre Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum GFZ: Potsdam, 1. Januar 2009.
- /GRÜ 09b/ Grünthal, G., Wahlström, R., Stromeyer, D.: Harmonization check of Mw within the central, northern, and northwestern European catalogue (CENEC), J. of Seism., Bd. 13, Nr. 4, S. 613–632, 2009.

- /GRÜ 11/ Grünthal, G., Wahlström, R.: The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last Millenium, J. Seismol., Bd. 16, Nr. 3, S. 535–570, 2011.
- /GRÜ 14a/ Grünthal, G.: Induced seismicity related to geothermal projects versus natrual tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe, Geothermics, S. doi: 10.1016/j.geothermics.2013.09.009 1-14, 2014.
- /GRÜ 14b/ Grünthal, G., Stromeier, D., Heidbach, O.: Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen, GFZ Journal, S. 10 pp., 2014.
- /GRÜ 98/ Grünthal, G.: European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), (Keine Angabe), 99 S., Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Luxembourg, 1998.
- /GRÜ 99/ Grünthal, G.: Seismic Hazard Assessment for Central, North and North-west Europe. GSHAP Region 3, Annali di Geofisica, Bd. 42, Nr. 6, S. 999–1011, 1999.
- /HAK 14a/ Hakimhashemi, A., Schoenball, M., Heidbach, O., Zang, A., Grünthal, G.: Forward Modelling of Seismicity Rate Changes in Georeservoirs with a Hybrid Geomechanical-Statistical Prototype Model, Geothermics, S. doi: 10.1016/j.geothermics.2014.01.001, 2014.
- /HAK 14b/ Hakimhashemi, A., Yoon, J.S., Heidbach, O., Zang, A., Grünthal, G.: Forward induced seismic hazard assessment. application to a synthetic seismicity catalogue from hydraulic stimulation modelling, J. Seism., S. doi: 10.1007/s10950-014-9439-y, 2014.
- /HAN 04/ Hanchar, J.M., Stroes-Gascoyne, S., Laurenbrowning, Hanson, B.D., Stout, R.B. (Hrsg.): Reexamining the dissolution of spent fuel: A comparison of different methods for calculating rates, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVIII, Bd. 824, 89-94, Materials Research Society: San Francisco, 2004.

- /HEI 85/ Heinicke, W., Krug, H., Thomas, W., Weber, W., Gmal, B.: Handbuch zur Kritikalität, GRS: Garching, 1. Januar 1985.
- /JEN 01/ Jentzsch, G.: Vulkanische Gefährdung in Deutschland, 48 S., Institut für Geowissenschaften, FSU - Jena, 26. Juli 2001, erreichbar unter http://www.bundestag.de/blob/388974/2c2ba4a7b069c2813de915d3cb58e30d/kmat_12-14-data.pdf, zitiert am 18. Februar 2016.
- /JOH 05/ Johnson, L., Ferry, C., Poinssot, C., Lovera, P.: Spent fuel radionuclide source-term model for assessing spent fuel performance in geological disposal. Part I: Assessment of the instant release fraction, Journal of Nuclear Materials, Bd. 346, Nr. 1, S. 56–65, DOI 10.1016/j.jnucmat.2005.04.071, 2005.
- /JOH 12/ Johnson, L., Günther-Leopold, I., J. Kobler Waldis, Linder, H.P., Low, J., Cui, D., Ekeroth, E., Spahiu, K., Evins, L.Z.: Rapid aqueous release of fission products from high burn-up LWR fuel: Experimental results and correlations with fission gas release, Journal of Nuclear Materials, Bd. 420, S. 54–62, 2012.
- /KEL 09/ Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hoch-radioaktiven Abfällen in Norddeutschland, 24 S, ISBN 978-3-9813373-3-4, BGR: Hannover, 2009.
- /KIE 01/ Kienzler, B., Loida, A.: Endlagerrelevante Eigenschaften von hoch-radioaktiven Abfallprodukten. Charakterisierung und Bewertung. Empfehlung des Arbeitskreises HAW-Produkte, FZKA-6651, Forschungszentrum Karlsruhe, 1. Januar 2001.
- /KIE 03/ Kienzler, B., Loida, A., Maschek, W., Rineiski, A.: Mobility and criticality of plutonium in a repository, Nuclear Technology, Bd. 143, Nr. 9, S. 309–321, 2003.

- /KIE 04/ Kienzler, B., Bauer, A., Loida, A., Metz, V.: Vergleich der Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase bei der Endlagerung in Salz und Ton, Vergleichenden Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (GEIST), FZK-INE 007/04, Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe, 1. Januar 2004.
- /KIE 12/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Source term for HLW glass, spent nuclear fuel, and compacted hulls and end pieces (CSD-C waste), Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (vSG), KIT Scientific Reports 7624, 1. Januar 2012, erreichbar unter <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000029420>.
- /KIE 15a/ Kienzler, B., Lemmens, K.: FIRST-Nuclides: Radionuclide release from high burnup spent fuel during corrosion in salt brine in the presence of hydrogen overpressure, International High Level Radioactive Waste Management, S. 646–652, IHLRWM - International High Level Radioactive Waste Management: Charleston, April 12-16.
- /KIE 15b/ Kienzler, B., Metz, V., Valls, A.: Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel, Euratom 7th Framework Programme Collaborative Project FIRT-Nuclides (Contract Number: FP7-295722), 1. Januar 2015.
- /KIE 89/ Kienzler, B. (Hrsg.): Cooling and Cracking of Technical HLW Glas Products: Experimental and Numerical Studies, Mat. Res. Soc. Symp, Bd. 127, 191 - 198, Materials Research Society, 1989.
- /KLE 98/ Klemann, V., Wolf, D.: Modelling of stresses in the Fennoscandian lithosphere induced by Pleistocene glaciations, Tectonophysics, Bd. 294, 3-4, S. 291–303, DOI 10.1016/S0040-1951(98)00107-3, 1998.

- /KOM 15/ Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Arbeitsgruppe 3 "Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen: Geowissenschaftliche Kriterien – Papier der Vorsitzenden der AG 3, Stand 29.12.2015, Entsprechend der Beschlusslage der 15. Sitzung der AG 3 am 17. Dezember 2015, Stand vom 29. Dezember 2016, erreichbar unter http://www.bundestag.de/blob/400560/54d57ad1d4af563835f4e2614501cdac/drs_157-data.pdf, zitiert am 20. Januar 2016.
- /KUR 04/ Kursten, B., Smailos, E., I. Azkarate, Werme, L., Smart, N.R., Marx, G., Cunado, M.A., Santarini, G.: Corrosion evaluation of metallic HLW/spent fuel disposal containers - review, EUROCORR 2004: Long term prediction and modeling of corrosion: Nice (France) 12-16 Sep 2004.
- /KUS 79/ Kuster, H., Meyer, K.-D.: Glaziäre Rinnen im mittleren und nördlichen Niedersachsen, Eiszeitalter und Gegenwart, Bd. 29, S. 135–156, 1979.
- /KWI 08/ Kwiatek, G., Bohnhoff, M., Dresen, G., Schulze, A., Schulte, T., Zimmermann, G., Huenges, E.: Microseismic event Analysis in conjunction with stimulation treatments at the geothermal resarc well GTGRSK4/05 in Groß Schönebeck/Germany, 2008.
- /LEO 10/ Leonard, M.: Earthquake Fault Scaling. Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average, Displacement, and Moment Release, bull. Seism. Soc. Am., S. doi: 10.1785/0120090189 1971-1988, 2010.
- /LFU 16/ Bayerische Landesamt für Umwelt: Jüngster Vulkan Bayerns, erreichbar unter http://www.lfu.bayern.de/geologie/vulkanausbrueche/juengster_vulkan/index.htm, zitiert am 18. Februar 2016.
- /LOI 01/ Loida, A., Grambow, B., Geckeis, H. (Hrsg.): Congruent and incongruent radionuclide release during matrix dissolution of partial oxidized high burnup spent fuel, Mat. Res. Symp. Proc. Vol. 663, 414 - 426, 2001.

- /LOI 07/ Loida, A., Kienzler, B., Metz, V. (Hrsg.): Alteration behavior of high burnup spent fuel in salt brine under hydrogen overpressure and in presence of bromide, MRS Symposium NN: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX, (in press), Materials Research Society: Boston, 2006, 2007.
- /LOI 96/ Loida, A., Grambow, B., Geckeis, H.: Anoxic corrosion of various high burnup spent fuel samples Section 2. Spent fuel studies, Journal of Nuclear Materials, Bd. 238, S. 11–22, 1996.
- /LUC 96/ Lucuta, P.G., Matzke, H., Hastings, I.J.: A pragmatic approach to modeling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: Review and recommendations, Journal of Nuclear Materials, Bd. 232, 2–3, S. 166–180, DOI 10.1016/s0022-3115(96)00404-7, 1996.
- /LUN 05/ Lund, B.: Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: A parametric study of simple Earth and ice models, SKB, 2005.
- /LUN 06/ Lund, B.: Stress variations during a glacial cycle at 500 m depth in Forsmark and Oskarshamn: Earth model effects, R-06-95, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1. Januar 2006.
- /LUN 09a/ Lund, B., Näslund, J.-O., Connor, C.B., Chapman, N.A., Connor, L.J.: Glacial isostatic adjustment: implications for glacially induced faulting and nuclear waste repositories, Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities, S. 640, 2009.
- /LUN 09b/ Lund, B., Schmidt, P., Hieronymous, C.: Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. Technical Report TR-09-14, Hrsg.: SKB, 101 S., Department of Earth Sciences Uppsala University: Stockholm, 2009, erreichbar unter www.skb.se.
- /MCM 97/ McMenamin, T., Smailos, E., Azkarate, I., Gago, J.A., van Iseghem, P., Kursten, B. (Hrsg.): Corrosion on metallic HLW container materials, Fourth European Conference on Management and Disposal of Radioactive Waste, 209-223, 1997.

- /MET 12/ Metz, V., Geckeis, H., González-Robles, E., Loida, A., Bube, C., Kienzler, B.: Radionuclide behaviour in the near-field of a geological repository for spent nuclear fuel, *Radiochim. Acta*, Bd. 100, S. 699–713, DOI 10.1524/ract.2012.1967, 2012.
- /MUR 97/ Murakami, T., Ohnuki, T., Isobe, H., Sato, T.: Mobility of uranium during weathering, *American Mineralogist*, Bd. 82, S. 888–899, 1997.
- /NEU 12/ NEUZIL, C.E.: Hydromechanical effects of continental glaciation on groundwater systems, *Geofluids*, Bd. 12, Nr. 1, S. 22–37, DOI 10.1111/j.1468-8123.2011.00347.x, 2012.
- /NWTRB 16/ Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy, Hrsg.: Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), 70 S.: Arlington, Virginia, 2016, zitiert am 8. Februar 2016.
- /PET 07/ Peters, G., van Balen, R.T.: Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany, *Global and Planetary Change*, Bd. 58, S. 310–334, 2007.
- /POI 05/ Poinssot, C., Ferry, C., Lovera, P., Jegou, C., Gras, J.-M.: Spent fuel radionuclide source term model for assessing spent fuel performance in geological disposal. Part II: Matrix alteration model and global performance, *Journal of Nuclear Materials*, Bd. 346, S. 66–77, 2005.
- /RIC 95/ Ricol, S.: Etude du gel d'altération des verres nucléaires et synthèse de gels modèles, University of Paris XI: Orsay, France, 01.01.1995.
- /RÖC 03/ Röckel, T., Lempp, C.: Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken, *Erdöl Erdgas Kohle*, Bd. 119, Nr. 2, S. 73–80, 2003.
- /SCH 03/ Schmincke, H.-U., Masse, S.B.: Als in Deutschland die Berge noch Feuer spien, *Deutscher Nationalatlas*, S. 60–63, 2003.
- /SCH 13/ Schmincke, H.-U.: Vulkanismus, 4. Aufl., 1 online resource (262, ISBN 3863129458, Primus Verlag: Darmstadt, Germany, 2013.

- /SCH 15/ Schilling F., M.B.: Multiple Barrier System for Deep Borehole Repositories for Nuclear Waste, Proceedings of the Workshop "Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety": Berlin, June 2015.
- /SCH 92/ Schwarzkopf, W., Smailos, E., Köster, R. (Hrsg.): In-Situ Corrosion Studies on Cast Steel High-Level Waste Containers Plated with Titanium/Nickel-Alloy, Mat. Res. Soc. Symp. Proc, Bd. 297, 423 S., 1992.
- /SMA 00/ Smailos, E.: Influence of welding and heat treatment on corrosion of a high-level waste container material carbon steel in disposal salt brines, Corrosion Science, Nr. 56, S. 1071–1074, 2000.
- /SMA 01/ Smailos, E. (Hrsg.): Influence of gamma radiation on corrosion of Cu-base materials in NaCl rich brine, The International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Am. Nucl. Society, American Nuclear Society: Las Vegas, 2001.
- /SMA 02a/ Smailos, E.: Influence of design of nuclear waste disposal containers on corrosion of iron-base materials in salt brines., Corrosion 2002, NACE International Denver, Colorado, 2002.
- /SMA 02b/ Smailos, E., Cunado, M.Á., Azkarate, I., Kursten, B., Marx, G.: Long-Term performance of candidate materials for HLW / spent fuel disposal containers, Second Annual Report, 49 S., European Commission, 5th Euratom Framework Programme 1998-2002, 1. Januar 2002.
- /SMA 04/ Smailos, E., Kienzler, B.: Galvanic Corrosion between the nuclear waste disposal container materials copper-nickel alloys and carbon steel in salt brines, Corrosion 2004, S. 11, Corrosion 2004: New Orleans, LA, 28.08.2003.
- /SMA 83/ Smailos, E., Storch, W., Engelke, H.: Korrosionsuntersuchungen an nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen für die Auslegung von Behältern zur Endlagerung hoch-radioaktiver Abfallprodukte, KfK 3438, 1. Januar 1983.

- /SMA 87/ Smailos, E., Schwarzkopf, W., Köster, R., Storch, W.: Untersuchungen zur keramischer Behälter als Korrosionsschutz für hoch-radioaktive Abfallprodukte bei der Endlagerung in Steinsalzformationen, KfK 4244, 1. Januar 1987.
- /SMA 89/ Smailos, E., Fiehn, B.: Korrosionsuntersuchungen an der Werkstoffkombination des POLLUX-Behälters zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Steinsalzformationen, KfK-4552, Forschungszentrum: Karlsruhe, 1. Januar 1989.
- /SMA 92/ Smailos, E., Schwarzkopf, W., Kienzler, B., R., K. (Hrsg.): Corrosion of Carbon-Steel Containers for Heat-Generating Nuclear Waste in Brine Environments Relevant for a Rock-Salt Repository, Scientific Basis for Nuclear Waste Management: Proc.of the 15th Internat.Symp, Bd. 257, 399-406, Materials Research Soc: Strasbourg, November 4-7, 1991, 1992.
- /SMA 95/ Smailos, E.: Influence of gamma radiation on the corrosion of carbon steel, heat-generating nuclear waste packaging in salt brines, Effects of Radiation and Environmental Factors on the Durability of Materials in Spent Fuel Storage and Disposal, IAEA TECDOC-1316, 131-140, IAEA: Wien, 1. Januar 1995.
- /SMA 99/ Smailos, E., Martínez-Esparza, A., Kursten, B., Marx, G., Azkarate, I.: Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers, FZKA 6285, 70 S., Karlsruhe, Forschungszentrum, 1. April 1999.
- /SOC 15/ Society, A.N., Kienzler, B., Lemmens, K. (Hrsg.): FIRST-Nuclides: Results on radionuclide release from used fuel, International High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM 2015), 646-652: Charleston, SC, April 12-16, 2015, 2015.
- /SPA 00a/ Spahiu, K., Sellin, P.: SR 97: Spent fuel alteration/dissolution and the influence of near field hydrogen, Scientific Basis for Nuclear Waste Management Xxiv, Bd. 663, S. 765–772, 2000.

- /SPA 00b/ Spahiu, K., Werme, L., Eklund, U.B.: The influence of near field hydrogen on actinide solubilities and spent fuel leaching, *Radiochimica Acta*, Bd. 88, 9-11, S. 507–511, 2000.
- /SPA 04/ Spahiu, K., Cui, D.Q., Lundstrom, M.: The fate of radiolytic oxidants during spent fuel leaching in the presence of dissolved near field hydrogen, *Radiochimica Acta*, Bd. 92, 9-11, S. 625–629, 2004.
- /STO 11/ Mc Stocker, B., Peiffer, F., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: AP3: Abfallspezifikation und Mengengerüst (Bericht für Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben): Köln, 1. Januar 2011.
- /STV 08/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793). 2008.
- /VAN 05/ van Iseghem, P., Poinssot, C., Ferry, C., Grambow, B., Kelm, M., Spahiu, K., Martinez, A., Johnson, L., Cera, E., Pablo, J.D., Quinones, J., Wegen, D., Lemmens, K., McMenamin, T. (Hrsg.): Mechanisms governing the release of radionuclides from spent nuclear fuel in geological repository: major outcomes of the European Project SFS, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX*, Bd. 932, 361-368, Materials Research Society, Warrendale, Pa. 2006: Gent, 2005.

11 Erfüllung der Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien

Das in Kapitel 5 vorgestellte Grundkonzept der Lagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern wird unter der Voraussetzung der technischen Machbarkeit anhand der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und den derzeit im Entwurf vorliegenden Standortauswahlkriterien /KOM 15/ diskutiert. Die wichtigen Forderungen zur Gewährleistung und zum Nachweis der Sicherheit sind die Ausweisung eines oder mehrerer einschlusswirksamer Gebirgsbereiche sowie die Einhaltung von Ausschlusskriterien und darüber hinaus die Erfüllung von Mindestanforderungen und Abwägungskriterien um einen Standort mit der bestmöglichen Sicherheit im Standortauswahlverfahren aufzufinden. Weitere wichtige Sicherheitsanforderungen sind in /BMU 10/ genannt.

Weitere Anforderungen zielen auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der eingelagerten hoch-radioaktiven Abfälle ab.

Im Kapitel Betriebssicherheit wird kurz eine qualitative Bewertung aus radiologischer Sicht der Havarien bzw. Identifikation möglicher betrieblicher Störfälle bei einem Verlust der Behälterintegrität und Freisetzung von radioaktivem Material diskutiert. Dazu gehören die Störfallbetrachtungen, die während der Einbringung / Rückholung von Behältern oberflächennah oder in größerer Tiefe denkbar sind und in Kapitel 10 beschrieben sind.

Im Kapitel Langzeitsicherheit wird aus radiologischer Sicht eine Einschätzung der Auswirkungen langfristig sicherheitsrelevanter Prozesse, wie Temperaturentwicklung, Behälterkorrosion, Gasentwicklung, Radionuklidfreisetzung unter Einschätzung der Einschluss- bzw. Rückhaltewirkung der technischen und geologischen Barrieren gegeben.

11.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich für ein Grundkonzept zur Lagerung in tiefen Bohrlöchern

11.1.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Nach AKEnd /AKE 02/ hat die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bei richtiger Standortwahl, d. h. bei Vorliegen einer günstigen geologischen Gesamtsituation am vorgesehenen Standort (einfacher geologisch-tektonischer Bau, Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, Fehlen rezenter Tektonik, Vorkommen gering permeabler Gesteine mit guten Rückhalteeigenschaften für Radionuklide, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation), gegenüber den anderen Beseitigungsoptionen auf der Erde folgende entscheidenden Vorteile:

- ein großer Abstand zwischen Abfällen und „Biosphäre“ (Schutzgut)
- ein gutes langfristiges Einschluss- und Isolationsvermögen für Radionuklide
- die Extrapolierbarkeit der Entwicklung eines Endlagers über lange Zeiträume auf Grund der nachweislich langsamen Veränderungen der Geologie in der Vergangenheit
- nach Verschluss und Verfüllung eines Endlagers prinzipiell keine Notwendigkeit von Reparatur- und Überwachungsmaßnahmen
- eine geringe Beeinflussbarkeit der Sicherheit durch menschliche Einwirkungen

Als Grundgedanke der Kriterienentwicklung zur Standortauswahl wurde durch den AKEnd /AKE 02/ der einschlusswirksame Gebirgsbereich (im Nachfolgenden als ewG abgekürzt) definiert als Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss. Dabei wird definitionsgemäß die Konfiguration einer günstigen geologischen Gesamtsituation aufbauenden Gesteinskörper durch deren funktional unterschiedliche Eigenschaften (einschlusswirksamer Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein) und Ausdehnung bestimmt.

In grundwasserhaltigen Formationen soll der Einschluss in einem möglichst kleinräumigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen und die Menge verunreinigten Wassers klein sein (Begrenzung auf den Anlagenbereich).

Ausgehend von diesen Gedanken wurden mehrere Konfigurationstypen definiert, die einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich darstellen können /AKE 02/.

Typ A: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Typ B: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

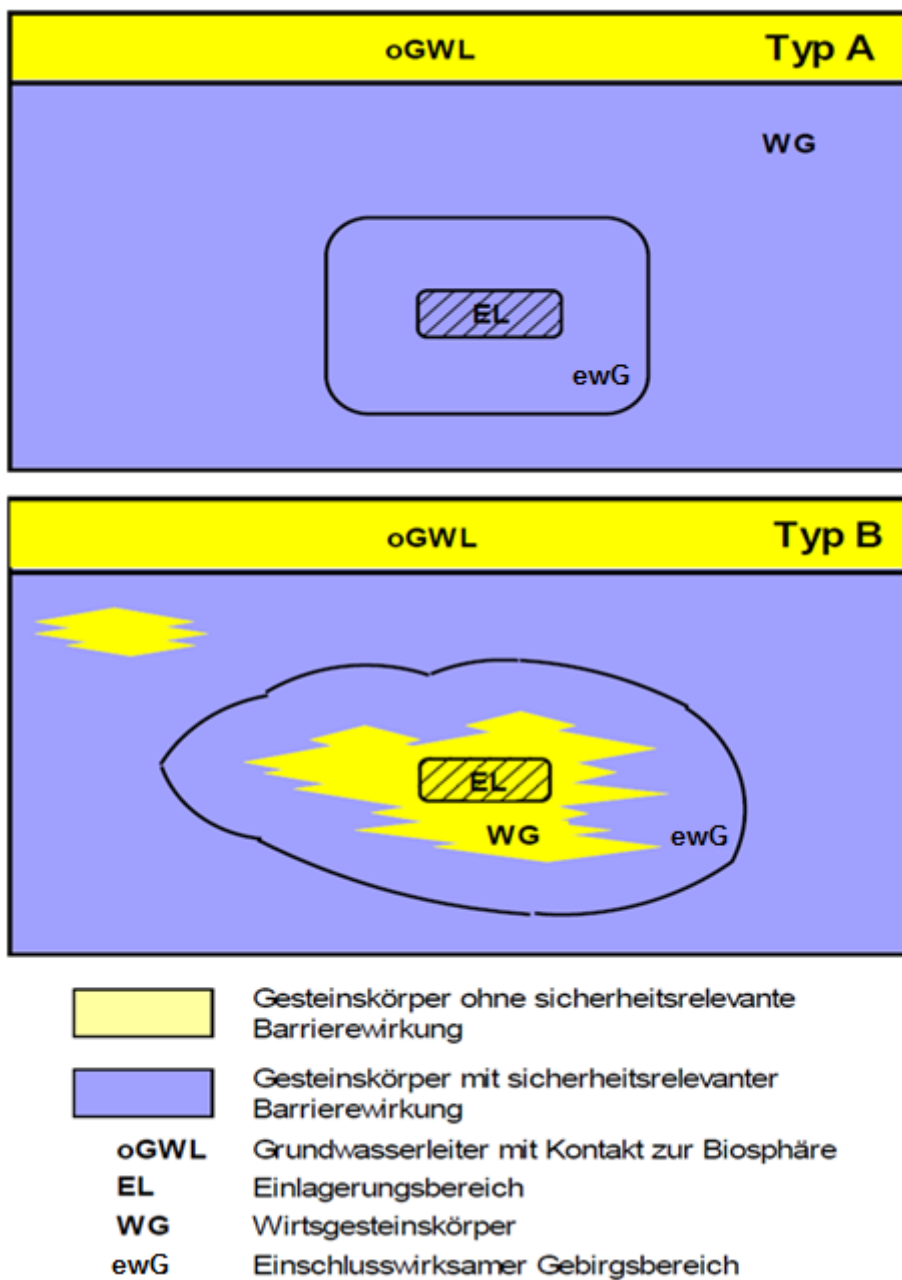


Abb. 11-1 Konfigurationstypen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nach /AKE 02/

Sofern der einschlusswirksame Gebirgsbereich das Endlager (im Wirtsgestein) nicht vollständig umschließt, sind für den Konfigurationstyp B Untertypen möglich. Die Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich kann entweder vollständig (Typ Ba, entspricht der Darstellung in Abb. 11-1 unten) oder unvollständig (Typ Bb, Varianten in Abb. 11-2) sein.

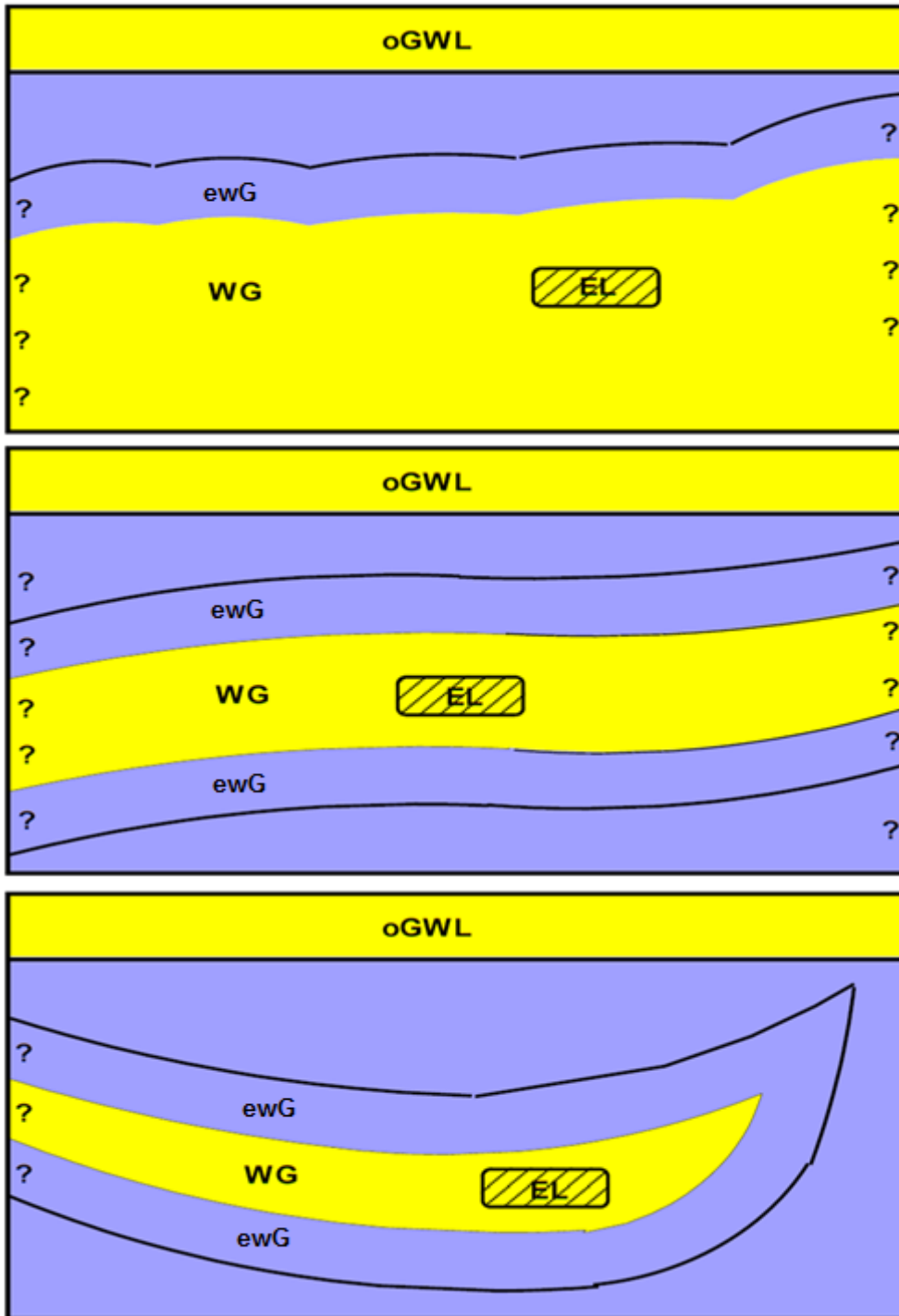


Abb. 11-2 Untertypen zu Typ B bei nicht vollständiger Umschließung des Endlagers im Wirtsgestein (Typ Bb)

Der AkEnd hat sich zu einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern geäußert /AKE 02/. Als Nachteil einer solchen Lagerung wurde angesehen, dass tiefe Bohrlöcher nach der Einlagerung nicht mehr zugänglich sind und nur von über Tage mit Abfällen befüllt werden könnten. Eine kontrollierte Einlagerung sei erheblich erschwert, wenn nicht praktisch unmöglich. Eine weitere Diskussion dieser Option erfolgte nicht.

Die Möglichkeiten des Zugangs zu eingelagerten Abfällen in tiefen Bohrlöchern nach der Einlagerung sind im Kapitel 9 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass eine kontrollierte Einlagerung und Zugänglichkeit zu den Behältern möglich sein kann, auch wenn dies mit einem sehr hohen Aufwand verbunden sein kann und der eigentliche Einlagerungsvorgang räumlich entfernt vom endgültigen Einlagerungsort kontrolliert wird.

Nachfolgend sind in Abb. 11-3 mögliche Konfigurationstypen von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern nach dem Grundkonzept in Kapitel 5 schematisch skizziert. Sofern die geologischen Gegebenheiten eine Tonformation mit einschlusswirksamen Eigenschaften am Standort vorhanden ist, lässt sich ein ewG des Typs Bb ausweisen. Ist zusätzlich eine Salzformation am Standort vorhanden, lässt sich ein kleinerer ewG des Typs Bb ausweisen. Können ausreichende einschlusswirksame Eigenschaften des kristallinen Grundgebirges am Standort nachgewiesen werden, so könnte ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich des Typs A aufgezeigt werden. Bei Erfordernis von Gassammelräumen unterhalb einer Salzschieht ist der Typ A nicht ausweisbar.

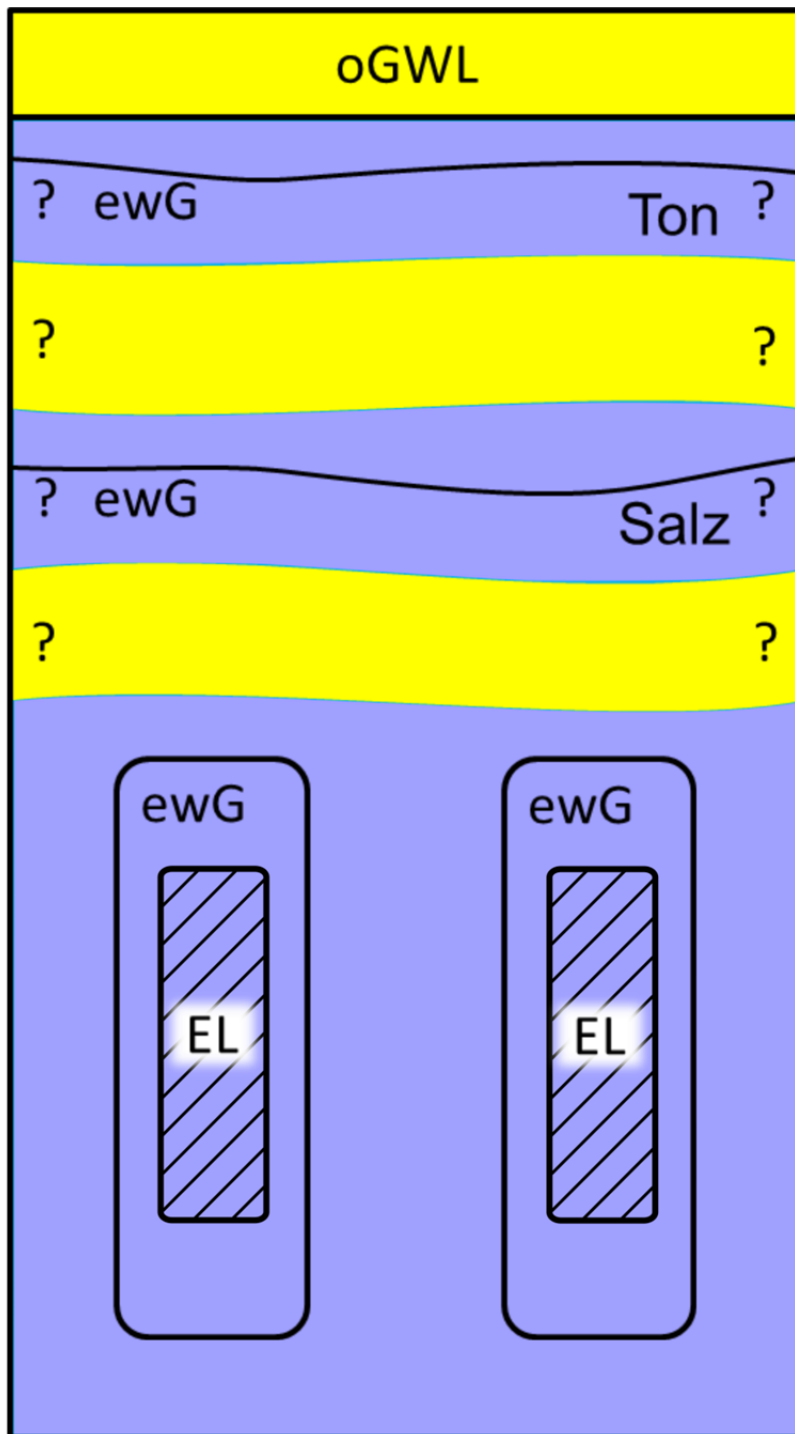


Abb. 11-3 Lage eines oder mehrerer ewGe bei einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern

Aufgrund der Teufenlage sind die Typen A, und Bb als auch die Ausweisung mehrerer, getrennter ewGe denkbar.

11.2 Geowissenschaftliche Kriterien zur Standortauswahl

Der AkEnd /AKE 02/ hat geowissenschaftliche Kriterien definiert, die voraussichtlich auch in das künftige Standortauswahlverfahren übernommen werden sollen. Diese sind für Endlagerbergwerke konzipiert. Daher ist zu prüfen, ob diese für eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern sinnvoll sind und wenn ja, ob sie gut erfüllt werden und ob sie erfüllbar sind bzw. ob sich noch andere Anforderungen ergeben.

11.2.1 Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien des AkEnd sind:

- Großräumige Vertikalbewegungen
- Aktive Störungszonen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit
- Seismische Aktivität
- Vulkanische Aktivität
- Grundwasseralter

Diese geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien sind weitgehend unabhängig vom gewählten Endlagerkonzept. Sie werden daher auch als geeignet für ein Standortauswahlverfahren für eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen, da es sich prinzipiell auch um eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen handelt. Dies ist z. B. im Kapitel 10 für seismische und vulkanische Aktivitäten gezeigt.

11.2.2 Mindestanforderungen

Auch Mindestanforderungen des AkEnd sollen in analoger Weise in ein Standortauswahlverfahren übernommen werden. In Diskussion waren die grundsätzliche bzw. wirtsgesteinsspezifische Festlegung von Parametern und deren Werten. Die aktuell diskutierten Mindestanforderungen /KOM 15/ betreffen:

- Gebirgsdurchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s, bzw. als Abstandsgeschwindigkeit definiert)

- Mächtigkeit des ewG: 100 m
- Minimale Tiefe: 300 m
- Maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs: nicht notwendig
- Fläche des Endlagers (Ausdehnung des ewG) muss gegeben sein
- Erkenntnisse zum ewG hinsichtlich des Nachweiszeitraums

Diese Mindestanforderungen werden ebenfalls als zutreffend bzw. anwendbar für ein Standortauswahlverfahren für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen. Da die Anforderung an die maximale Tiefe für die Lagerung nicht mehr vorgegeben wird, erweitert sich das Auswahlpektrum für Standorte, sofern die technischen Möglichkeiten dafür gegeben sind.

11.2.3 Abwägungskriterien

Die Abwägungskriterien des AkEnd /AKE 02/sollen ebenfalls in das Standortauswahlverfahren übernommen werden und sind für Sicherheitsbetrachtungen oder -untersuchungen, die noch einen vorläufigen Charakter haben, von Bedeutung. Die Anforderungen und Kriterien werden mit dem Wissen, dass die Abwägungskriterien vor dem gedanklichen Hintergrund eines Endlagerbergwerk entwickelt wurden, im Einzelnen im Hinblick auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern diskutiert:

Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau mit Kriterien zur Grundwasserströmung (Abstandsgeschwindigkeit < 1mm/Jahr), geringes Grundwasserangebot infolge geringer Gebirgsdurchlässigkeit und Diffusionsgeschwindigkeit (eff. Diffusionskoeff. < 10^{-11} m²/s)

Unter der Berücksichtigung der potenziellen Teufenlage zur Einlagerung von bis zu 5.000 m, wird im Grundsatz eine geringe Grundwasserströmung erwartet. Je nach Wirtsgesteinstyp und den hydrogeologischen Eigenschaften des Umgebungsgesteins, insbesondere der hangenden Schichten, ist ein geringes Grundwasserangebot nicht zwingend voraussetzbar. Sofern die Kluft- bzw. Rissbildung im kristallinen Grundgebirge gering ist oder ausgeschlossen werden kann, kann eine geringe Grundwasserströmung bzw. geringe Diffusionsgeschwindigkeit erwartet werden. In jedem Fall handelt es sich um eine Anforderung, die bei einer Bohrlochlagerung für verschiedene Standor-

te günstig bis weniger günstig vorliegen kann. Unter dem Aspekt der großen Teufe erscheint es möglich Standorte aufzufinden, die diese Anforderung günstig erfüllen. Weitere Indikatoren, z. B. die Temperaturverteilung, das Grundwasseralter oder die Zunahme der Dichte des Grundwassers, können die Annahme einer geringen Grundwasserbewegung stützen.

Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von WG und ewG

Aufgrund der Teufenlage von bis zu 5.000 m wird von einer nachweisbaren Mächtigkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgegangen, der eine Isolation der Radionuklide für eine Million Jahren bewirken könnte. Insofern ist diese Anforderung auch auf eine Bohrlochlagerung anwendbar. Die bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien /KOM 15/ zur Anforderung 2 werden nachfolgend diskutiert:

Die Teufenlage ermöglicht Konfigurationen des Gesteinskörpers mit unterschiedlichen bzw. mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen. Bei Erfüllung der Kriterien der Anforderung 1 in Verbindung mit den technischen Barrieren eines Bohrlochverschlusses können ein oder mehrere ewG des Konfigurationstyps A ausgewiesen werden. Da davon auszugehen ist, dass mehrere geologische Schichten den Einlagerungsbereich überdecken, kann auch eine Konfiguration aus ein oder mehreren Schichten den qualitativen Anforderungen an die Ausweisung eines ewG entsprechen, die allerdings aufgrund der lateralen Ausbreitung eine Konfiguration des Typs Bb entsprächen. Der Nachweis eines ewG des Typs Ba erscheint allerdings aufgrund der Teufenlage als sehr schwierig bis unwahrscheinlich. Eine Festlegung, welcher Konfigurationstyp de ewG konzeptionell zugrunde gelegt wird, kann nur im konkreten Fall, d.h. unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden geologischen Situation erfolgen.

Die Robustheit und Sicherheitsreserven werden u. a. über die Teufe der Oberfläche des ewG beurteilt. Aufgrund der im vorliegenden Grundkonzept vorgesehenen Mindestteufe größer als 1.500 m für die Einlagerung wird die Wertungsgruppe für die Lagerung in tiefen Bohrlöchern als generell als günstig eingestuft auch im Hinblick auf die Robustheit gegen natürliche Einwirkungen von außen.

Die Bewertungsgröße „Flächenhafte Ausdehnung“ für das Volumen des ewG sollte für eine günstige Wertung deutlich mehr als das 2-fache des Mindestflächenbedarfs (bei einschlägiger Lagerung) betragen. Da die Bohrlochlagerung aus technischen Gründen

vorzugsweise vertikal erfolgt, ist der horizontale Flächenbedarf für die Einlagerung vergleichsweise klein und kann für diese Bewertungsgröße als günstig bewertet werden. Jedoch wird diese Bewertungsgröße nur mit Einschränkung als sinnvoll anwendbar auf eine tiefe Bohrlochlagerung angesehen und könnte daher entfallen.

In /KOM 15/ werden weitere Indikatoren definiert, die den Anschluss von wasserführenden / wasserleitenden Schichten in Nachbarschaft zum ewG und hydraulische Druckdifferenzen betreffen. In unmittelbarer Nähe des ewG sollte kein hohes Potenzial oder keine hohe Potenzialdifferenz vorliegen sowie ein hoher hydraulischer Widerstand vorhanden sein. Abweichungen von hydrostatischen Erwartungswerten sollten deutlich und plausibel erklärbar sein. Hierfür sind Konstellationen für tiefe Bohrlöcher denkbar, die als günstig gewertet werden können. Eine konkrete Einstufung kann auch hier nur im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden geologischen Situation erfolgen.

Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Hier sind die Kriterien die Ermittelbarkeit und Übertragbarkeit zugehörig. Obwohl die Ermittelbarkeit charakteristischer Eigenschaften (geringe Variation, gleichmäßige Verteilung) aufgrund der Teufe als erschwert angesehen wird, ist eine Erkundung durch Vorbohrungen möglich (siehe Kapitel 6). Die räumliche Übertragbarkeit der ermittelten Eigenschaften des Gesteinstyps durch Extrapolation und Interpolation ist durch eine in der Regel zu erwartende geringere Variationsbreite im Grundgebirge und den Abstand von 50 m zwischen Erkundungs- und Einlagerungsbohrungen (siehe Kapitel 6) eher begünstigt. Eine Einstufung in eine günstige Wertungsgruppe ist denkbar, sofern auch die Charakterisierung der weiteren geologischen Barrieren berücksichtigt wird.

Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Aufgrund der Teufenlage spielen nur sehr langsame geologische Prozesse eine Rolle. Daher ist generell eher eine günstige Wertung hinsichtlich der Einschätzung von Veränderungen der Mächtigkeit, Ausdehnung oder Gebirgsdurchlässigkeit zu erwarten, d.

h. es sind aufgrund der großen Teufe keine wesentlichen Veränderungen der sicherheitsrelevanten Merkmale (Mächtigkeit, Ausdehnung, Gebirgsdurchlässigkeit) zu erwarten.

Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

Diese Anforderung ist vor dem Hintergrund einer Auffahrung eines Bergwerks aufgestellt. Daher ist eine sinngemäße Übertragung dieser Anforderung auf eine Bohrlochlagung zu diskutieren.

Die genannten Indikatoren für diese Anforderung sind „Gebirge als Haupttragelement“ bzw. „Keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnah entfestigten Auflockerungszone“ sind unter dem Gedanken der Auffahrung eines Bergwerkes mit vergleichsweise langer Standzeit entwickelt.

Grundsätzlich muss eine ausreichende Betriebszeit eines offenen Bohrlochs zur Einlagerung sowie zur Erstellung funktionsfähiger geotechnischer Barrieren (Bohrlochverschlüsse) möglich sein, die in analoger Weise die Gewährleistung der Langzeitsicherheit des ewG sicherstellen sollen. Aufgrund der Verrohrung und der kurzen Betriebszeiten von wenigen Jahren sind die gebirgsmechanischen Bedingungen überwiegend relevant für die Erstellung eines Bohrlochs.

Die Folgewirkungen eines Bohrlochs hinsichtlich Entfestigung und Auflockerung des Gesteinsgefüges und Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten werden aufgrund der im Vergleich zu Endlagerbergwerken kleinen Durchmesser im Einlagerungsbereich (max. 1 m) und kurzen Bau- und Betriebszeiten als gering eingeschätzt und beschränken sich auf wenige dm – m (Kapitel 6).

Daher erscheinen diese Indikatoren durch tiefe Bohrlöcher mit deutlich kürzeren Betriebszeiten in einer günstigen Weise erfüllbar (siehe auch Kapitel 8). Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb der Auflockerungszone wird bei der Erstellung von Bohrlöchern trotz höherer Teufen aufgrund der geringeren mechanischen Einwirkungen bei der Auffahrung geringer eingeschätzt als bei der Auffahrung von Strecken in einem Bergwerk.

Eine Anwendung dieser Indikatoren für ein Standortauswahlverfahren im Hinblick auf eine Einlagerung in tiefe Bohrlöcher wird daher nicht empfohlen.

Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

Die Kriterien und Bewertungsgrößen sind:

- Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit
- Barrierenwirkung aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar
- Duktilität des Gesteins
- Bewertungsgröße: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung
- Bewertungsgröße: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Riss-verheilung

Die Bewertung hier ist nur standort- bzw. formationsspezifisch möglich. Aufgrund der großen Teufe der Einlagerungsbereiche ist eine Veränderung der vorhandenen Gebirgspermeabilität eher gering ausgeprägt und größere Rückbildungsraten zu erwarten.

Diese Anforderung wird generell als anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern angesehen. Es sind Konstellationen für tiefe Bohrlöcher denkbar, die als günstig gewertet werden können.

Anforderung 7: Gute Gasverträglichkeit

Das Kriterium für diese Anforderung ist „Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein“.

Es ist davon auszugehen, dass in tiefen Bohrlöchern ein Wasserangebot aus dem Bohrlochbetriebsfluids zur Verfügung steht, das zur Korrosion der Verrohrung und Behälter mit Gasbildung führt. Zusätzlich ist der Temperaturaspekt zu beachten. Technische Maßnahmen können für eine gewisse Zeit Korrosionsprozesse minimieren aber nicht grundsätzlich ausschließen. Die Nachlieferung von Wasser zur Korrosion kann bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit begrenzt sein. Insgesamt ist eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern mit der aktuellen Konzeption hinsichtlich dieser Anforderung bisher nicht als günstig einzustufen.

Ggf. wäre ein modifiziertes Abwägungskriterium für den Verbleib eventuell gebildeter Gase (u. a. für die dem Grundkonzept zugrunde liegenden Gasspeicherräume) zu entwickeln.

Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

In der angedachten Teufenlage bis zu 5.000 m sind je nach den vorherrschenden geothermischen Gradienten Temperaturen von 170 bis 200 °C zu erwarten. Das kristalline Grundgebirge war aufgrund seiner Genese bereits höheren Temperaturen ausgesetzt. Die Temperaturerhöhung durch die Einlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle an der Bohrlochwandung (Verrohrung) entsprechend dem skizzierten Grundkonzept mit dem Einlagerungsbehälter DBC-R dürfte ca. 30 °C (an der Wandung des Behälters) betragen (siehe Kapitel 10) und beschränkt sich auf wenige dm bis m. Aufgrund der bereits hohen vorhandenen Temperaturen im umgebenden Gestein sind tiefgreifende zusätzliche Mineralumwandlungen des Gesteins durch diese zusätzliche Temperaturerhöhung nicht zu erwarten. Da die Abstände der Bohrungen ausreichend groß gewählt werden (50 m), ist auch eine gegenseitige Beeinflussung, die zu einer noch höheren, maximalen Temperatur beitragen würde, ebenfalls nicht zu erwarten. Daher wird eine gute Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins ohne Beeinträchtigung der Barrierenwirkungen durch Mineralumwandlungen angenommen. Auch die Ausdehnung der thermo-mechanisch gestörten Umgebung um die Einlagerungsbohrlöcher wird als deutlich kleiner als zehn m angesehen und sollte auf wenige cm – dm beschränkt sein. Soweit die Anwendbarkeit der Bewertungsgrößen gegeben ist, werden diese prinzipiell als günstig angesehen.

Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge gegenüber Radionukliden

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Aufgrund der tiefen Lagerung sind verschiedene Gesteine in den Deckgebirgsschichten vorhanden, die Sorptionseigenschaften aufweisen können. Eine günstige Einstufung für diese Anforderung nach diesem Kriterium ist bei der Wahl eines oder mehrerer Standorte zu erwarten.

Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Bezugnehmend auf die genannten Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, dass das tiefe Grundwasser mit einer langen Verweilzeit im Wirtsgestein / ewG sich im geochemischen Gleichgewicht befindet und ein pH-Wert von 7-8 vorliegt. Aufgrund der Teufenlage sowie der eingebrachten Materialien ist ein anoxisch-reduzierendes Milieu eingestellt und ist der Gehalt an Kolloiden, Komplexen und Carbonaten gering. Dennoch ist die Frage, ob diese Anforderung erfüllt wird, standortspezifisch zu prüfen.

Anforderung 11: Günstige Bedingungen für den Bau von Verschlussbauwerken

Diese Anforderung ist übertragbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Diese Anforderung ist ausgehend von einer Lagerung in einem Bergwerk sinngemäß anwendbar und betrifft somit Bohrlochverschlüsse, die sich in verschiedenen Horizonten und mit verschiedenen Eigenschaften errichtet werden können (siehe Kapitel 6). Aufgrund des zu erwartenden „kleinen“ Durchmessers und der kurzen Standzeit einer Bohrung von wenigen Jahren und der eingesetzten Bohrtechnik wird erwartet, dass einerseits Auflockerungszonen vergleichsweise gering ausgeprägt und andererseits selbsttragende „lange“ Verschlüsse möglich sind. Die Errichtung von geotechnischen Verschlussbauwerken ist sowohl diversitär als auch redundant qualitätsgesichert möglich (Kapitel 6) sowie standortspezifisch im Hinblick auf eine Endlagerung zu prüfen.

Die Bedingungen werden als günstig eingestuft.

Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges

Diese Anforderung ist anwendbar auf eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern.

Im dargestellten Grundkonzept zur Bohrlochlagerung werden Deckgebirgsschichten bis 1.500 m – 3.000 m Mächtigkeit teilweise als zusätzliche Barrieren (je nach Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) in Betracht gezogen. Das Deckgebirge dient somit nicht nur als Schutzschicht sondern ist Bestandteil des Grundkonzepts. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der großen Teufe des Einlagerungsbereiches Standorte gefunden werden können, bei denen das Deckgebirge in ausreichender

Mächtigkeit vorliegt um das Barrierensystem vor Eingriffen durch natürliche Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, zu schützen.

11.3 Sicherheitsanforderungen des BMU

Die Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle enthalten allgemeine Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes. Darüber hinaus enthalten sie Bewertungsmaßstäbe für die Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen eines neu zu errichtenden Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, die im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens zu beachten sind. Bei der Abfassung der Sicherheitsanforderungen wurden die aktuellen Veröffentlichungen der internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) und der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) berücksichtigt. Die Sicherheitsanforderungen des BMUB sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert, daher sind sie auch für eine Einlagerung von hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern zu berücksichtigen.

/BMU 10/ enthält Festlegungen zu folgenden Aspekten, die nachfolgend z. T. in verkürzter Form wiedergegeben sind und für eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern kommentiert werden.

11.3.1 Schutzziele

Die allgemeinen Schutzziele betreffen

- a) den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen radioaktiver Abfälle sowie
- b) die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Diese beiden Schutzziele sollen durch die Erfüllung folgender Sicherheitsprinzipien erreicht werden:

Zu a):

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich³⁶ konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.
- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.
- Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.
- Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.
- Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.

Zu b):

- Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.
- Es ist eine möglichst zügige Errichtung des Endlagers zu realisieren.
- Für Errichtung und Betrieb einschließlich Stilllegung des Endlagers müssen die finanziellen Mittel zeitgerecht zur Verfügung stehen.

Kommentar:

Die Einhaltung der oben genannten Sicherheitsprinzipien ist standortbezogen nachzuweisen. Es sind jedoch keine Aspekte erkennbar, die die tiefe Bohrlochlagerung vom Grundkonzept her grundsätzlich in Frage stellen. Insbesondere hinsichtlich der Forde-

³⁶ Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

nung nach einer zügigen Errichtung könnte sich das Konzept der tiefen Bohrlochlage-
rung in technischer Hinsicht durch die kurze Betriebsdauer der tiefen Bohrlöcher als
vorteilhaft erweisen.

11.3.2 Optimierungsziele

Nach /BMU 10/ sind folgende Optimierungsziele zu berücksichtigen:

- Strahlenschutz für die Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers
- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit

Ein weiteres Optimierungsziel, die zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im
Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten, zum Beispiel bei einem unbeab-
sichtigten Eindringen in den einschusswirksamen Gebirgsbereich, ist ebenfalls, jedoch
nachrangig zu den oben genannten Optimierungszielen zu berücksichtigen.

Die Gewährleistung des Strahlenschutzes in der Betriebsphase eines Endlagers (Ein-
lagerungs- und Stilllegungsbetrieb) für Beschäftigte und Bevölkerung wird durch die
entsprechenden Vorgaben des Atomgesetzes /ATG 15/ und die entsprechende unter-
gesetzliche Verordnungen, insbesondere die Strahlenschutzverordnung /BMU 12/ ein-
schließlich der Vorgabe entsprechender radiologischer Bewertungskriterien geregelt.
Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ konzentrieren sich daher auf die Vorgabe von
Bewertungskriterien für den Schutz zukünftiger Generationen vor ionisierender Strah-
lung in der Nachverschlussphase eines Endlagers, die die oben genannten Regelwer-
ke nicht enthalten. Grundprinzip hierbei ist, dass die in den radioaktiven Abfällen ent-
haltenen Radionuklide im einschusswirksamen Gebirgsbereich, dessen Integrität
maßgeblich für den Schutz vor den Schäden durch ionisierende Strahlung in der Nach-
verschlussphase ist, so eingeschlossen sein müssen, dass sie dort verbleiben und al-
lenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen (Geringfügigkeits-
prinzip).

Kommentar

Aufgrund der Tatsache, dass derzeit für die tiefe Bohrlochlagerung erst Grundkonzepte bestehen, ist es weder möglich noch sinnvoll, bereits jetzt Optimierungsstrategien zu entwickeln. Der Strahlenschutz wird mit der übertägigen Einrichtung von Kontroll- und Sperrbereichen in der Betriebsphase und durch die mannlose Untertageeinlagerung erreicht. Eine weitere Optimierung der Langzeitsicherheit kann durch Weiterentwicklung des Behälter- und Grundkonzepts erreicht werden. Die mehrfache Verrohrung und Einbringungstechnologien lassen eine hohe technische Betriebssicherheit des Einlagerungsvorganges für Szenarien erwarten, die in Kapitel 10 genannt sind.

11.3.3 Nachweise

Es werden auch Anforderungen an die Nachweise, die die Betriebs- und die Nachverschlussphase eines Endlagers betreffen gestellt:

a) Betriebssicherheitsnachweise:

Im Hinblick auf den unter radiologischen Gesichtspunkten sicheren Betrieb eines Endlagers während der Einlagerungs- und Stilllegungsphase wird gemäß den Sicherheitsanforderungen ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers benötigt. Dabei sind anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung definierter Auslegungstörfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen.

Kommentar

Dieser Nachweis ist für alle Anlagen standort- und endlagerkonzeptspezifisch zu führen. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand wird erwartet, dass sich dieser Nachweis auch für die Einlagerungs- und Verschlussphase der technischen Anlage zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern führen lässt, um den Strahlenschutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt gegenüber den Szenarien, die in Kapitel 10 genannt sind, zu belegen.

b) Langzeitsicherheitsnachweis:

Für die Nachverschlussphase wird der standortspezifische Nachweis der Sicherheit des Endlagersystems über einen Zeitraum von einer Million Jahre gefordert. Dieser Nachweis muss alle Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, umfassen und hat das Vertrauen in diese Bewertung zu begründen. Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen

- Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung.
- Das zugrunde liegende Endlagerkonzept und die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren.
- Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen.
- Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle.
- Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten.

Kommentar

Ansätze zur Führung dieses Nachweises sind in diesem Gutachten aufgezeigt. Die Einzelnachweise für z.B. der Umsetzbarkeit (siehe Kapitel 6), Identifizierung und Analyse von Szenarien (siehe Kapitel 10), sicherheitsrelevanter Prozesse (siehe Kapitel 10) sowie die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie betreffend Ungewissheiten sind im Rahmen dieses Gutachten nicht möglich gewesen, da es im vorliegenden Fall zunächst um die Entwicklung eines Grundkonzepts geht, zu dem noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

11.3.4 Einzelnachweise

Weiterhin werden in Bezug auf die Langzeitsicherheit in /BMU 10/ folgende Einzelnachweise gefordert:

- Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,
- radiologische Langzeitaussage,
- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems,
- Ausschluss von Kritikalität.

Kommentar

Diese Einzelnachweise sind standort- und konzeptspezifisch zu führen.

11.3.5 Langzeitsicherheit

Neben dezidierten Anforderungen an die Sicherheitsnachweise für die Betriebsphase eines Endlagers (Abschnitt 8.1) sind Anforderungen gestellt, die im Wesentlichen bei der Betriebsführung und bei der Endlagerauslegung zu berücksichtigen sind und die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase betreffen:

- Die Festlegung der Grenzen des ewG und die Forderung nach Minimierung der Durchörterung bei der Auffahrung von Einlagerungs- und Infrastrukturbereichen des Endlagerbergwerks (Abschnitte 8.2 und 8.3).
- Die Forderung nach räumlicher und zeitlicher Trennung von bergmännischen Arbeiten und radiologisch relevanten Tätigkeiten (Abschnitt 8.4).
- Die Forderung, die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche möglichst gering zu halten (Abschnitt 8.5).
- Anforderungen an die verwendeten Abfallbehälter bezüglich der Möglichkeit ihrer Rückholung während der Betriebsphase und der Möglichkeit der Bergung über einen Zeitraum von 500 Jahren, wobei die hierzu erforderlichen Maßnahmen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen (Abschnitt 8.6).
- Anforderungen an ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem welches redundant und diversitär wirkt, seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, wenn einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten (Abschnitt 8.7).
- Die Forderung nach einem umsetzbaren Stilllegungskonzept (Abschnitt 8.8).

Kommentar

Die Festlegung der Grenzen des ewG kann nur standortspezifisch erfolgen. Ein Ansatz für verschiedene Konfigurationstypen ist in Kapitel 11.1.1 gezeigt. Eine Minimierung der Durchörterung (mittels Bohrungen) ist bereits impliziter Bestandteil des Grundkonzepts.

Die räumliche und zeitliche Trennung der bergmännischen und radiologisch relevanten Tätigkeiten ist bei einem Einzelbohrloch nach Abschluss der Verrohrung mit dem Übergang zum Einlagerungsbetrieb systemimmanent gegeben, da das Abteufen eines Bohrloches und die Einlagerung von Abfallbehältern nicht gleichzeitig erfolgen können. Im Fall einer übertägigen Anlage, die zur Erstellung und Beschickung mehrerer Bohrlocher dient, kann durch administrative Maßnahmen eine räumliche und zeitliche Trennung der bergmännischen und radiologisch relevanten Tätigkeiten ebenso sichergestellt werden, wie die Minimierung der Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche.

Die Anforderung an den Abfallbehälter werden im nachfolgenden Kapitel 11.4 behandelt.

Im Grundkonzept (siehe Kapitel 5) wird mit mindestens zwei unabhängigen Barrieren und verschiedenen Verschlüssen ein gestaffeltes Barrierensystem dargestellt.

Nach Verschluss des Bohrlochs ist ein Rückbau der übertägigen Anlagen erforderlich, die gegebenenfalls unter Wiederverwendung von Anlagenteilen für weitere Bohrungen erfolgt. Ein Konzept hierfür ist noch zu erstellen.

11.3.6 Sicherheitsmanagement und Dokumentation

Anforderungen an das Sicherheitsmanagement und Dokumentation gelten generell und sind nicht spezifisch für eine Einlagerung in tiefen Bohrlöchern und werden deshalb nicht aufgeführt. Auch aufgrund des konzeptionellen Charakters des Gutachtens sind hierzu zum heutigen Stand keine Aussagen möglich.

11.4 Reversibilität / Rückholbarkeit / Bergbarkeit

Eine Reversibilität der Einlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in tiefe Bohrlöcher ist die Umkehrung des Einlagerungsvorganges bis zum Verschluss des Bohrlochs (Kapitel 9).

Dazu bestehen Anforderungen an die Abfallbehälter und deren Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit bis zu 500 Jahre nach Verschluss /BMU 10/. Die dafür vorgesehenen Maßnahmen dürfen die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

Die Einlagerung von Behältern in tiefe Bohrlöcher wird als rückholbar in der Einlagerungsphase bis zum Verschluss eines Bohrlochs ausgelegt (Kapitel 6 und 9). Eine technische Rückholbarkeit der Behälter ist somit unterstellbar. Sicherheitsanalysen haben noch zu zeigen, dass alle Anforderungen des Strahlenschutz und auch unter Störfallbetrachtungen eingehalten werden.

Die Bergbarkeit der in Kapitel 7 konzipierten Abfallbehälter aus einer Teufe bis 5.000 m kann nach heutigem Stand der Technik nicht gezeigt werden. Hierzu besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Behälterkonzepte, um deren Handhabbarkeit unter den Lagerungsbedingungen aufzuzeigen. Jedoch sind technische Weiterentwicklung denkbar, die die Bergbarkeit der Behälter für diesen Zeitraum ermöglichen könnten. Der Nachweis der Handhabbarkeit über 500 Jahre wäre durch eine Auslegung der Behälter auf die zu erwartenden Bedingungen (Temperatur, Bohrlochbetriebsfluid, Grundwasser) zu führen.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine Bergung ist eine Dokumentation der Bohr- und Lagerungsorte und der Erhalt der Dokumentation, um die eingelagerten Abfälle wiederauffinden zu können.

Jedoch ist eine wie auch immer durchzuführende Bergungsmaßnahme aus technischen und finanziellen Gründen nach heutigem Stand der Technik praktisch nicht möglich.

11.5 Betriebssicherheit (radiologisch)

Das Grundkonzept in Kapitel 5 sieht eine Umkonditionierung der hoch-radioaktiven Abfälle in die DBC-R Behälter vor. Diese Maßnahme ist nicht Bestandteil des Einlagerungs- oder Rückholungsvorganges in tiefe Bohrlöcher.

Da der DBC-R Behälter keine eigene Abschirmung besitzt, sind für den Einlagerungsvorgang und eine eventuelle Rückholung eine Abschirmungsvorrichtungen über Tage vorzusehen. Die DBC-R Behälter mit hoch-radioaktiven Abfällen dürfen nur unter Einhaltung eingelagert werden, das den Anforderungen des Strahlenschutzes genügt. Es sind Kontroll- und Sperrbereiche auf dem Betriebsgelände zu definieren.

Da ein Bohrlochbetriebsfluid verwendet wird, sind für den Fall eines defekten Behälters mit Freisetzung von Radionukliden entsprechende Maßnahmen zur radiometrischen Kontrolle des Bohrlochbetriebsfluids, Behandlung und ggfs. Lagerung vorzusehen.

Eine detaillierte Auslegung der Anlage und Modellierung potentieller Strahlenexpositionen konnte angesichts des konzeptionellen Charakters des Gutachtens nicht erfolgen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen an den Strahlenschutz in der übertragigen Anlage als kerntechnische Anlage auch gegenüber Szenarien, die in Kapitel 10 genannt sind, erfüllt werden können.

11.6 Langzeitsicherheit (radiologisch)

Für eine radiologische Konsequenzenanalyse ist neben der technischen Weiterentwicklung eines standortspezifisches Konzepts eine konzept- und standortabhängige FEP-Analyse (Features, Events and Processes) und Szenarienentwicklung sowie eine Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten nach /BMU 10/ erforderlich.

Es erscheint möglich, zumindest wichtige Szenarien, die für eine radiologische Konsequenzenanalyse relevant werden können, zu skizzieren.

Die ersten Ansätze einer systematischen Betrachtung erfolgten in /BRA 09/ auf der Basis von drei Szenarien, die den hydraulischen Transport im Bohrloch, um das Bohrloch (über 1.000 m) und im umgebenden Gestein konservativ untersuchten (keine Behälter oder Sorption). Bohrlochverschlüsse mit Barrierewirkung wurden nicht vorgesehen. Ein diffusiver Transport von Radionukliden bis zum Schutzgut („Biosphäre“) konnte innerhalb des Nachweiszeitraums aufgrund der Tiefe anhand einer Überschlagsrechnung ausgeschlossen werden.

Nicht betrachtet wurde in diesen Szenarien beispielsweise eine Gasbildung durch Korrosion inner- und außerhalb der Verrohrung, die zu veränderten Transportbedingungen für Fluide beitragen kann (Abb. 11-4).

Als erwartete Entwicklungen ist aufgrund der gegenwärtigen Wahl des Materials (Stahl) für den Behälter DBC-R und der Verrohrung eine fortschreitende Korrosion unter Wasserstoffbildung mit unbekannter Rate anzusehen. Die Korrosionsprodukte können sorbierende Eigenschaften aufweisen. Langfristig ist eine Freisetzung von wasserstoffhaltigen Gasen mit Anteilen von ^{14}C als Methan oder CO_2 am oder im Bohrloch mit eingelagerten Behältern nicht auszuschließen.

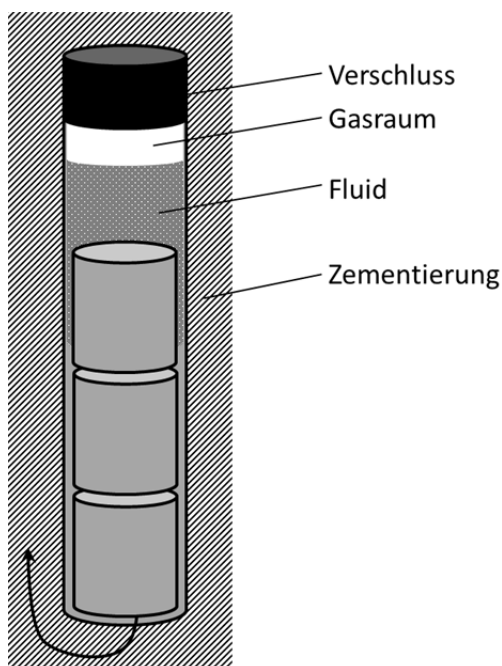


Abb. 11-4 Möglicher Effekt einer Gasbildung im verschlossenen Bohrloch auf den Fluidtransport

Die Korrosionsprodukte der Verrohrung und des Behältermaterials haben eine geringere spezifische Dichte und verdrängen das Fluid. Sie haben Sorptionseigenschaften und behindern den weiteren Fluidzu- und -abtransport.

Neben der Spannungs- und Druckbelastung der Verrohrung sind weitere Prozesse zu bedenken /ARN 14/:

- Alterungsprozesse im Allgemeinen
- Phasenstabilität

- Korrosion
- Wasserstoffversprödung
- Mikrobielle Effekte
- Abtragung

Eine Anpassung des Materials der Verrohrung an die Bedingungen im und um das Bohrloch für den Zeitraum einer Einlagerung und einer Rückholung erscheint möglich. Eine langfristige Handhabbarkeit für eine Bergung erscheint zum derzeitigen Stand von W+T als nicht darstellbar.

Im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsbetrachtung für ein generisches Konzept und Standort ist eine FEP-Analyse und Szenarienentwicklung zu empfehlen, die über die Darstellung im Kapitel 10 hinausgeht. Damit wäre eine radiologische Konsequenzenanalyse möglich, die diese Entwicklungen berücksichtigt, um die Einschluss- bzw. Rückhaltewirkung der technischen und geologischen Barrieren des Grundkonzepts besser einschätzen zu können. Eine radiologische Konsequenzenanalyse als Bestandteil einer vorläufigen Sicherheitsbetrachtung des Grundkonzepts ist im Rahmen dieses Gutachtens nicht möglich gewesen.

11.7 Literatur Kapitel 11

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd –Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, W & S Druck GmbH: Köln, 2002.
- /ARN 14/ Arnold, B.W., Brady, P.V., Sutton, M., Travis, K.P., MacKinnon, R., Gibb, F.G.F., Greenberg, H.: Deep Borehole Disposal Research: Geological Evaluation, Alternative Wasteforms, and Borehole Seals, SAND2014-17430R, Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexiko, 2014.
- /ATG 15/ Bundesrepublik Deutschland: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). vom 23. Dezember 1959; in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 17. Juli 2015 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist., Bundesgesetzblatt, I, S. 1324, 2015.
- /BMU 10/ BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 01.01.2010.
- /BMU 12/ BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen, Bundesanzeiger AT 05.09.2012, 2012.
- /BRA 09/ Brady, P.V., Arnold, B.W., Freeze, G.A., Swift, P.N., Bauer, S.J., Kanney, J.L., Rechard, R.P., Stein, J.S.: Deep borehole disposal of high-level radioactive waste, SAND2009-4401, Hrsg.: Sandia National Laboratories, DOI 10.2172/985495, 75 S., Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico 87185, 2009, erreichbar unter <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>, zitiert am 22. Januar 2016.

/KOM 15/ Kommission Lagerung hoch-radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz, Arbeitsgruppe 3 "Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen: Geowissenschaftliche Kriterien – Papier der Vorsitzenden der AG 3, Stand 29.12.2015, Entsprechend der Beschlusslage der 15. Sitzung der AG 3 am 17. Dezember 2015, Stand vom 29. Dezember 2016, erreichbar unter http://www.bundestag.de/blob/400560/54d57ad1d4af563835f4e2614501cdac/drs_157-data.pdf, zitiert am 20. Januar 2016.

12 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Nachfolgenden ist der Bedarf an Forschung und Entwicklung zusammengefasst. Eine Vollständigkeit ist nicht angestrebt. Einzelheiten und Kontext sind auch den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen.

12.1 Grundkonzept

Der erste Ansatz eines Grundkonzepts in Kapitel 5 diente als Basis für die weitere Diskussion im Gutachten. Ein konkretes und detailliertes Konzept mit Sicherheits- und auch Nachweiskonzept muss standortspezifisch entwickelt werden. Hierzu besteht Bedarf an Forschung und Entwicklung (F&E).

12.2 Bohrtechnologie und Verschlüsse

Tiefe Bohrlöcher können, wie in Kapitel 6 dargestellt, mit heute gängigen Größen bis 5000 m Teufe hergestellt werden. Bohrlochdimensionen um 100 cm sind mit herkömmlichen Bohranlagen und heute bekannten Werkstoffen in dieser Teufe nicht sicher herzustellen und zu betreiben. Die heute bekannten Ausbaumaterialien basieren auf Technologien der Öl- & Gasindustrie, welche, in Anlehnung an die durchschnittliche Produktionszeit eines Öl- oder Gasfeldes, eine Lebenserwartung für eine Tiefbohrung von max. 50-70 Jahren festlegt. Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Bezug auf tiefe Endlagerbohrungen besteht deshalb bei:

- der geologischen Erkundung des Untergrundes. Hier können geplante Tiefbohrungen bis zur Zielteufe von 5.000 m vertieft werden, um die Kenntnis des geologischen Untergrundes in Deutschland zu verbessern. Insbesondere in Süddeutschland ist die Kenntnis des tieferen Untergrundes außerhalb der Molasse spärlich.
- der Entwicklung von spezialisierten und ggf. fest installierten Bohrrüsten für die erforderliche Spülungspumpkapazität, Bohrwerkzeuglogistik und notwendigen Hakenlastkapazitäten für den Bohrungsbau und -ausbau;

- der Fertigung von großkalibrigem Bohrgestänge und Bohrlochwerkzeugen sowie die Entwicklung von Prozessen für deren sichere Handhabung im Turm und am Gestänge-Lager;
- der Entwicklung von neuen keramischen Verbundwerkstoffen, inkl. Verbindertechnologien für großkalibrige Casingrohre zum sicheren Langzeitbetrieb eines großkalibrigen und trockenen Bohrloches, und
- der Weiterentwicklung von Bohrlochverfüllmethoden und Abdichtmaterialien zum sicheren und dichten Langzeit-Verschluss von großkalibrigen Endlagerbohrlöchern.
- einer gezielten Forschungsstrategie in Bezug auf das Langzeitverhalten von Zementen, Bentonit, Bitumen, etc. inkl. der Entwicklung von zukünftigen punktuellen Schmelzprozessen von Gesteinsformationen zur sicheren Abdichtung der darüber liegenden Aquifere oder selbst-sinternde Keramikstopfen.
- Verfüllwerkzeuge, die auf Basis heute bekannter Designs modifiziert oder noch weiter entwickelt werden müssten.

12.3 Behälter

Die Einlagerung in einem Bohrlochbetriebsfluid erfordert für die Auslegung der Verrohrung und der Behälter Forschung und Entwicklung in hohem Umfang. Dies betrifft z. B. folgende Aspekte:

- das Langzeitverhalten der Behälter und Verrohrung (für eine Rückholung oder Bergbarkeit) hinsichtlich Stabilität und Beständigkeit
- Design und Materialwahl der Behälter und Verrohrung
- Korrosions- und Gasbildungsprozesse.

Bei einer Reduzierung der maximalen Bohrlochteufe zur Einlagerung ergeben sich nach den vorläufigen Auslegungsberechnungen für die Behälter in Kapitel 7 deutlich geringere Bohrllochdurchmesser.

12.4 Einlagerungsverfahren / Rückholung

Für die Detail-Konzeption einer Anlage für die Einbringung von Behältern mit hoch-radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern besteht noch erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung.

12.5 Bergbarkeit / Bergung

Für ein Konzept zur Bergbarkeit von Behältern mit hoch-radioaktiven Abfällen und deren Bergung (Bergbarkeit vorausgesetzt) besteht ein erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, sofern die Bergbarkeit bzw. Bergung über 500 Jahre gefordert wird.

12.6 Sicherheitsbetrachtungen / Sicherheitsuntersuchungen

Es sind Störfallanalysen erforderlich, um etwaige Havarien mit einer Freisetzung von Radionukliden zu bewerten.

In Langzeitsicherheitsanalyse ist zu prüfen, ob durch Zwei-Phasenfluss eine aufwärts gerichtete Wasserbewegung entstehen kann und welche Auswirkungen dies auf die Ausbreitung von Radionukliden haben wird. Das Ausmaß eines Radionuklidtransports in möglicherweise gestörten Randbereichen der geologischen Barriere und im Umfeld des Einlagerungsbereichs ist zu betrachten.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-1	Schematische Darstellung der Bohrlochlagerung von radioaktivem Abfall in den USA in Kristallingestein in Tiefen größer 4.000 m.....	25
Abb. 4-2	Das brasilianische Konzept der Endlagerung radioaktiver Quellen sieht Bohrungen im Kristallin bis ca. 300 - 400 m Tiefe mit relativ geringem Durchmesser vor.....	27
Abb. 5-1	Schema einer denkbaren Bohrlochlagerung im Kristallin unter Salz und Tongestein.	43
Abb. 6-1	Bohr- und Verrohrungsschema einer Tiefbohrung /SPE 05/.....	56
Abb. 6-2:	Meißeltechnologie (Abbildungen aus /NAT 16/).....	61
Abb. 6-3	links: Drehtisch und Mitnehmerstange („Kelly“) rechts: Kraftdrehkopf (Topdrive) (Abbildungen aus /SCH 16/).....	62
Abb. 6-4	Tool Joint mit Muffengewinde (Abbildung von OMSCO Industries 1997).....	63
Abb. 6-5	Schemazeichnung eines Bohrturms /WIK 16b/.....	64
Abb. 6-6	Downhole-Motor mit benthousing /ECO 98/.....	65
Abb. 6-7	Bohrlochverlauf mit 2 Messpunkten /ECO 98/	66
Abb. 6-8	heute übliche Bohrmeißel/Verrohrungsschema (eigene Darstellung).....	71
Abb. 6-9	Übersicht über den horizontalen Verlauf von Bohrungen von der Station Dieksand und von der Bohrplattform Mittelplate im Bereich der Öllagerstätte Mittelplate im Wattenmeer (Bild: Google). In hellblau ist der Salzstock Büsum eingezeichnet. Links oben im Bild ist die Vogelinsel Trischen. Der Gridabstand ist 1.000 m. Der Horizontalverlauf der Bohrungen Mittelplate und Dieksand ist /FRA 03/ entnommen.	78
Abb. 6-10	Oberer Teil: Bohrplattform Mittelplate/WIK 16a/. Unterer Teil Bohrfade der Bohrung Mittelplate (rot). Verlauf einer Duolateralbohrung (magenta). Hier wurde aus einer 6.100 m langen Bohrung heraus ein zweite Bohrung mit einer Länge von 1.500 m erstellt und mit Produktionsstrang versehen (nach /DEA 15/).....	79
Abb. 6-11	Bohranlage GH 1400E für die KTB-Vorbohrung	82
Abb. 6-12	links: 6“- (152,4 mm) Diamant Bohrkronen, rechts: Gneis aus einer Teufe von 3447 m mit einer offenen Kluft /ENG 96/.....	83

Abb. 6-13	Bohrturm der KTB Hauptbohrung in Windischeschenbach.....	84
Abb. 6-14	Verrohrungsschema der KTB-Hauptbohrung. Insgesamt wurden drei Rohrtouren bis über Tage geführt und zementiert. Zusätzlich wurden unterhalb von 6.000 m drei Liner eingebaut um das Bohrloch abzusichern. In Rot ist ein Bohrlochdurchmesser von 500 mm bis zum Teufenbereich von 5.000 m zum Vergleich eingezeichnet.....	85
Abb. 6-15	a) 3D-Ansicht: Trajektorien der Injektionsbohrung GPK3, der Produktionsbohrungen GPK2 und GPK4, sowie aller seismischen Observationsbohrungen. b): Aufsicht auf die Bohrlochverläufe der Bohrungen GPK2, GPK3 und GPK4 (aus /TIS 06/).	89
Abb. 6-16	Vertikalverlauf der Injektionsbohrung GPK3, der Produktionsbohrungen GPK2 und GPK4 mit Komplettierung (aus /TIS 06/).	90
Abb. 6-17	Zusammenstellung der Spannungsdaten für die die Bohrungen im Kristallin in Soultz-sous-Forêts. In Blau ist der der Porendruck dargestellt, in Schwarz und Grün die Daten zur Minimalen Horizontalspannung und in Rot die Daten zur Vertikalspannung.....	96
Abb. 6-18	Orientierung der maximalen Horizontalspannung abgeleitet aus Bohrlochinstabilitäten in den Bohrungen Soultz-sous-Forêts GPK 3 und Soultz GPK 4. Im Teufenbereich von 1.500 m bis 3.000 m dominieren bohrtechnisch induzierte Brüche, unterhalb von 3.000 m treten bevorzugt Bohrlochrandausbrüche auf.	99
Abb. 6-19	Minimale und maximale Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in den Teufen 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m für die Bohrungen GPK 3 und GP 4 im Vergleich mit den Gebirgsfestigkeiten.	99
Abb. 6-20	Breakout-Weiten in der Bohrung Lindau vor und nach den Stimulationsmaßnahmen (rot: vor Breakout-Weiten vor den Stimulationsmaßnahmen, blau: nach den Stimulationsmaßnahmen.	101
Abb. 6-21	Spannungsbeträge im Subsalinar des Norddeutschen Beckens /RÖC 03/. Die Vertikalspannungen sind als schwarze Dreiecke dargestellt, die minimalen Horizontalspannungen als orange Sterne	102
Abb. 6-22	Histogramm der einaxialen Festigkeiten gegen die Anzahl der Proben in einem Gasfeld in den Niederlanden. Es ist deutlich zu erkennen, dass so gut wie keine einaxialen Druckfestigkeiten von über 100 MPa vorhanden sind.	103

Abb. 6-23	Vorgehen zum Verschluss. Zeitlicher Verlauf der Veränderung eines Bohrlochs im Salzgestein. Die Entwicklung der Schritte a-e ist im Text erläutert.	105
Abb. 6-24	Verhältnisse von Pumprate und Pumpendruck bei Erreichen eines turbulenten Fließregimes in unterschiedlichen großen Bohrlochern (inkl. Trendlinie) /MOH 90/	106
Abb. 6-25	Gaszirkulationsanforderung beim Luftbohren in 3.660 m und 2.440 m bei unterschiedlichen Bohrdurchmessern (Exponentielle Trendlinie extrapoliert die Anforderungen für ein großkalibriges Bohrloch). Eine Luft-Massenflußrate von 1.000 kg/Std bei 1 atm absolutem Druck und 15,56°C entspricht 481 Standard Cubic Feet per Minute (SCFM) /COO 77/	108
Abb. 6-26	Rohrkollapsfestigkeiten in 5.000 m Teufe nach unterschiedlichen Wandstärken (D/t-Verhältnis) und für unterschiedliche Stahlgüte K-55 bis Q-125 /DIN 14/	112
Abb. 6-27	erwartete Stranggewichte bei unterschiedlichen Rohrgrößen mit unterschiedlichen Wandstärken (D/t 5 bis 55) in ca. 5.000 m Rohrabsetzteufe /GAB 14/	114
Abb. 6-28	Vorschlag für ein Bohrcluster von Vertikalbohrungen mit einem Abstand von 50 m. Um eine zentrale Erkundungsbohrung sind in einem Abstand von 50 m 6 Einlagerungsbohrungen vorgesehen (blaue Punkte). Ein weiterer Ring mit 12 Einlagerungsbohrungen ist in einem Abstand von 100 m (gelbe Punkte). Vier weitere Überwachungs- und Erkundungsbohrungen sind auf dem Kreis mit einem Radius von 150 m vorgesehen (weiße Punkte). Ein Flughafen (Google Earth) dient als Größenvergleich.....	131
Abb. 6-29	Annahmen zur Kostenabschätzung	133
Abb. 6-30	Zeit-Teufen-Diagramm für eine 5.000 m tiefe DBD-Bohrung unter Annahme heute realisierbarer Bohrdurchmesser.	134
Abb. 6-31	Mögliches Leistungsdiagramm (Bohrtage vs. Teufe) für eine hypothetische großkalibrige DBD Bohrung mit einem Bohrlochenddurchmesser >1.000 mm und 44 Zoll (1117,6 mm) Endverrohrung aus Verbundwerkstoff in 5.000 m Endteufe bei trockenem Ausbau.	135
Abb. 7-1	HAW-Kokille nach /THO 09/ und Brennelementmuster (eigene Aufnahme).....	147
Abb. 7-2	Konzept der rückholbaren Brennstabkokille BSK-R der nse GmbH	148

Abb. 7-3	Verrohrung des Bohrlochs	150
Abb. 7-4	Schnitt durch die Verrohrung mit Behälter DBC-R.....	150
Abb. 7-5	DBC-R: Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für eine tiefe Bohrlochlagerung	153
Abb. 7-6	Finite-Elemente-Netz-Darstellung der DBC-R, Referenzvariante A.....	155
Abb. 7-7	Schema Zug-Druck-Verteilung in der DBC-R ($\frac{3}{4}$ -Schnitt), Referenzvariante A	155
Abb. 7-8	Zug-Druck-Spannungen in der DBC-R ($\frac{1}{2}$ -Schnitt), Variante A.....	159
Abb. 7-9	Zug-Druck-Spannungen in der DBC-R ($\frac{1}{2}$ -Schnitt), Variante A1, B, C.....	160
Abb. 7-10	Einbringungs- und Rückholungsverfahren mit Kabelwinde (links, oben), Coil Tubing Unit (mitte, unten) und Gestänge durch einen Bohrturm (rechts, oben)	163
Abb. 7-11	Obertägige Transfer-Installation für die Einbringung radioaktiver Abfallbehälter in ein Bohrloch (Vorschlag aus der Technischen Evaluierung des NWTRB /BAI 00/)	164
Abb. 7-12	Skizze zum Einbau von Behältern in ein gesichertes Bohrloch.	167
Abb. 7-13	Einlagerung und Rückholung von Kokillen aus einem Bohrloch /FIL 10/, /BOL 11/.....	168
Abb. 8-1	Komponenten des Spannungstensors S_{ij} und Hauptspannungen. Der Spannungszustand wird durch die neun Komponenten des Spannungstensors S_{ij} beschrieben (linkes Bild). Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Spannungstensors ($S_{ij} = S_{ji}$ für $i \neq j$) sind nur sechs Komponenten unabhängig voneinander. D. h., jeder Spannungstensor kann durch Hauptachsentransformation in einem Koordinatensystem dargestellt werden, in dem nur noch in der Hauptdiagonalen des Spannungstensors Werte stehen (rechtes Bild). Diese sind die senkrecht zueinander stehenden Hauptspannungen. Die drei Orientierungen und drei Magnituden dieser Hauptspannungen beschreiben dann den Spannungszustand....	173
Abb. 8-2	Simplifizierte Annahme der Spannungsorientierung. Vor allem in Sedimentbecken mit geringer Topographie und lateral-homogenen Gesteinseigenschaften wird oft angenommen, dass die vertikale Spannung (S_V) eine Hauptspannung ist. Senkrecht dazu stehen die minimale und die maximale horizontalen Hauptspannung (S_{hmin} und S_{Hmax}). In einem Blattverschiebungs- oder Abschiebungsregime	

	entwickeln sich Bohrlochwandausbrüche parallel zur S_{hmin} Orientierung, während hydraulisch induzierte Risse in der Ebene senkrecht zur S_{hmin} Orientierung aufbrechen. Im Überschiebungsregime treten hydraulisch induzierte Risse horizontal auf.	174
Abb. 8-3	Beiträge des Spannungsfeldes. Die Beiträge des Spannungsfeldes lassen sich in drei Anteile, die auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirken, unterteilen: (1) Fernfeldanteil durch: Dichteverteilung im Schwerfeld, remanente Spannungen, die durch bereits abgeschlossene Prozesse noch im Gestein vorhanden sind und Plattentektonik (z.B. Subduktion und Kollision von tektonischen Platten). (2) Transiente Anteile: Massenumlagerung (Erosion, Sedimentation, Vergletscherung, Spannungen durch post-glaziale Hebungen und nicht isostatisch kompensierte Spannungsänderungen und seismischer Zyklus. (3) Einfluss durch anthropogene Eingriffe, die in erster Näherung zeitunabhängig (Tunnelbau) als auch zeitabhängig sein können (Fluidinjektion oder -entnahme mit variablen Fließraten).....	178
Abb. 8-4	Übersicht der Spannungsindikatoren. Übersicht der verschiedenen Methoden mit denen die S_{Hmax} Orientierung bzw. die Magnitude der kleinsten horizontalen Spannung S_{hmin} (<i>Loading Techniques</i>), oder der gesamte Spannungstensor bestimmt werden kann (<i>Relief Techniques</i>).	180
Abb. 8-5	Spannungsregime und Verhältnis der Spannungen zueinander.....	182
Abb. 8-6	(vorhergehende Seite) Spannungskarte Deutschland und angrenzende Gebiete (Reiter et al., 2016). Dargestellt sind Datensätze mit A-C Qualität der World Stress Map Datenbank 2016. Linien zeigen die Orientierung der größten horizontalen Spannung S_{Hmax} . Die Länge der Linien entspricht der Qualität des Datensatzes. Die Farben entsprechen dem tektonischen Regime (rot = Abschiebung (NF), grün = Blattverschiebung (SS), blau = Aufschiebung (TF), schwarz = unbekannt (U)). Symbole entsprechen den verschiedenen Spannungsindikatoren.	183
Abb. 8-7	Globale Kompilation des Verhältnis der mittleren horizontalen Spannungsmagnitude zu S_v basierend auf einer erweiterten Datenbank von /BRO 78/. Im Vergleich dazu sind verschiedene Modelle dargestellt, die den Verlauf des k-Verhältnisses mit der Tiefe beschreiben (Erläuterungen siehe Text).	184
Abb. 8-8	Genereller Ablauf der geomechanisch-numerischen Modellierung des 3D Spannungstensors in einer Standortregion /FIS 13/,	

	/HEN 08/, /HER 15/, /REI 14/. Nach Erstellen des tektonischen Modells und Zuweisung der Gesteinseigenschaften (weiße Felder) werden die initialen und kinematischen Randbedingungen so gewählt (graue Felder), dass die Lösung die modellunabhängigen Spannungsdaten optimal anpasst werden (orange Felder).	186
Abb. 8-9	Darstellung von verschiedenen k-Verhältnissen auf Querschnitten durch ein 3D geomechanisch-numerisches Modell eines potentiellen Standortgebietes in der Nordschweiz /HEI 13/, /HER 15/. Obere Abbildung zeigt die im Modell repräsentierte die Abfolge der Lithologie; schwarze Linien kennzeichnen Lage und Verlauf von zwei tektonischen Störungen, die im Modell implementiert sind.	187
Abb. 8-10	Darstellung der elastisch-plastischen Festigkeitsgrenze (Oberkruste und gegebenenfalls Teile des oberen Mantels) bzw. elastisch-viskosen Fließgrenze (duktile Unterkruste und Mantel) bei hoher (links) und geringer Verformungsrate (rechts) als Funktion der Differenzspannung.	188
Abb. 8-11	Der Spannungszustand wird als stabil erachtet, wenn der Mohrkreis sich rechts bzw. unterhalb der sogenannten Bruchgerade. Die rote Linie zeigt die Festigkeitsgrenze für intaktes Gestein, die orange für pre-existierende tektonische Störungen. Je weiter die Spannungen von diesem kritischen Zustand entfernt sind, desto stabiler ist das System. Das Δp stellt eine Spannungsänderung oder Fluiddruckänderung aufgrund von anthropogenen Eingriffen oder natürlicher Prozesse dar.	189
Abb. 8-12	σ_3 ist die Hauptspannung (Normalspannung), die auf eine Fläche senkrecht zu σ_1 wirkt. Ist die Fläche anders orientiert, können mit dem Mohrkreis die Normal- und Scherspannungen in Abhängigkeit von der Orientierung der Fläche berechnet werden.	190
Abb. 8-13	a) In Richtung der größten horizontalen Hauptspannung S_{Hmax} können in Abhängigkeit vom Spülungsdruck in der Bohrung und vom tektonischen Spannungsfeld Zugrisse an der Bohrlochwand entstehen (Unterschreiten der Zugfestigkeit). b) Wird die Scherbruchfestigkeit überschritten kommt es zu Bohrlochrandausbrüchen in Richtung der kleineren Hauptspannung S_{Hmin} . c) Diese Bruchbildungen können mit verschiedenen Bohrlochsonden detailliert erfasst werden.	191
Abb. 8-14	a) Bild eines Televiewers mit bohrtechnisch induzierten Rissen an der Bohrlochwand (Tiefe ca. 1.565 m) und b) Bohrlochrandausbrüchen (Tiefe 5.066 m) aus der Bohrung Soultz-sous-Forêts GPK 4 /VAL 10/.	192

Abb. 8-15	Minimale und maximale Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in den Teufen 1.500 m, 3.000 m und 4.800 m für die Bohrungen GPK 3 und GP 4 im Vergleich mit den Gebirgsfestigkeiten.	194
Abb. 8-16	Abhängigkeit der radialen und tangentialen Spannungen unter Annahme lithostatischer Verhältnisse (alle Hauptspannungen sind im Fernfeld gleich groß) vom Abstand zur Tunnelmitte. Der Durchmesser ist 10 m. Das Mohrdiagramm stellt den Spannungszustand in einer Entfernung von 6,5 m zur Tunnelachse dar.	195
Abb. 8-17	Durchteuft eine Bohrung eine Scherzone kann durch die Veränderung des Spannungsfelds und des Drucks auf der Scherzone diese instabil werden und versetzt werde. Auch diese Phänomene können mit Bohrlochmesssonden im Verlauf der Bohrlöcherstellung erfasst werden.	196
Abb. 8-18	Spannungsverteilung um eine vertikale und zwei horizontale Bohrungen, die in einem AbschiebungsSpannungsregime in unterschiedliche Richtungen verlaufen. Die Vertikalbohrung ist dabei am stabilsten während bei der Bohrung parallel zur S_{Hmax} Orientierung Bohrlochrandausbrüche an den Seiten zu erwarten sind.....	197
Abb. 8-19	Spannungszustand in einer Bohrung/Schacht für verschiedene Tiefen im Vergleich mit der Versagenskurve (blaue Gerade) des Gesteins. a) Leere Bohrung/Schacht in Kristallin/Sedimentgestein. Erreicht oder überschreitet der Mohrkreis die Gerade, so kann es um die Bohrung zu Bohrlochrandausbrüchen kommen. b) Mit Flüssigkeit gefüllte Bohrung. Eine Flüssigkeit verringert die Tendenz von Bohrlochrandausbrüchen. Die hier mit Mohrkreisen dargestellten Spannungszustände an der Bohrlochwand sind unabhängig vom Durchmesser der Bohrung (vereinfachte Annahme: elastisches Materialverhalten).	198
Abb. 8-20	Das „sichere Bohr Fenster“ (<i>safe mud weight window</i>) ist der Spielraum für die Dichte der Spülung, bei der es weder zu Bohrlochrandausbrüchen (Druck zu klein) noch zu Fracs (Druck) zu groß an der Bohrlochwand kommen kann. Muss aus Gründen des Spannungsfelds oder des Porendrucks im Gestein eine höhere Spüldichte gewählt werden, werden die druckschwachen Bereiche der Bohrung (in geringeren Tiefen) ggfs. durch eine zusätzliche Verrohrung geschützt.	199

Abb. 9-1	Fangwerkzeuge aus der Tiefbohrtechnik: Taper-Tap (links), Grapple (mitte), so wie Overshot und Überbohrrohr (rechts).....	210
Abb. 9-2	Schematische Abbildung der Einlagerung und Rückholung. Maße nicht skaliert.	215
Abb. 10-1	Bohrgerät für die Aufschlussbohrung im quartären Maar bei Neualbenreuth (Foto F. Nützel, Piewak & Partner GmbH).....	232
Abb. 10-2	links: Wingertswand bei Mendig mit mächtigen Tuffablagerungen und rechts: tiefer Teil mit vulkanischen Bomben (Foto Röckel).	233
Abb. 10-3	Quantitativer Vergleich von maximaler Bodenbewegung PGV, maximaler Bodenbeschleunigung PGA, Intensität I, Länge L der Herdfläche, der mittlere koseismische Versatz D und die relative freigesetzte Energie. Die beiden grünen Sterne zeigen zwei induzierte seismische Ereignisse an, die roten Sterne natürliche tektonische Ereignisse. Die Lage der Sterne kennzeichnet das Hypozentrum der seismischen Ereignisse. Die zugrundeliegenden Formeln sind in Tab. 8-1 gelistet, die Kurzbezeichnungen bei den Intensitäten stammen aus /GRÜ 98/. Die zugrundeliegenden empirischen Relationen sind von /FAE 10/, /GRÜ 99/ und /LEO 10/.	236
Abb. 10-4	Die Karte zeigt die Verteilung der natürlichen tektonischen Erdbeben in Deutschland und Umgebung für $M_w \geq 2.5$ (weiße Kreise) aus dem Zeitraum 1000 AD bis 2011 aus dem Erdbebenkatalog EMEC /GRÜ 11/ und Ergänzungen sowie die induzierten seismischen Ereignisse für $M_w \geq 2.0$ farblich kodiert nach Untertageaktivität bzw. regen-induzierte Ereignisse (farbige Kreise).	237
Abb. 10-5	Häufigkeits-Magnituden Verteilung (kumulativ) der natürlichen Erdbeben in Deutschland und induzierter Ereignisse für die in Abb. 10-4 gezeigten Ereignisse nach /GRÜ 14/. Eine maximal zu erwartende Magnitude von $M_{max} = 7.0$ wird für den <i>maximum likelihood fit</i> für natürliche Erdbeben angewendet.	238
Abb. 10-6	Seismische Gefährdungskarte Deutschland von Grünthal et al. /GRÜ 09/. Die Karte zeigt die Spitzenbeschleunigungen PGA [m/s^2] für 4% Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit $P = 0,0004$. Dem entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode $T = 2.500$ Jahre.	240
Abb. 10-7	Veränderung der Permeabilität im Gestein aufgrund von Laständerungen. Bei hohen horizontalen Spannungen sind die vertikalen Mikrorisse weitgehend geschlossen und kaum verbunden. Durch Verringerung der horizontalen Spannungen bzw.	

	Vergrößerung der vertikalen Spannung können sich die vertikalen Mikrorisse weiten und zur durchlässigen Zonen ausbilden Abb. 10-9. ...	244
Abb. 10-8	Vereinfachte Darstellung der vertikalen Verteilung der Festigkeit in der Erde	245
Abb. 10-9	Spannungsänderungen aufgrund von Vergletscherung. In Teufen oberhalb der neutralen Faser, die sich in der Plattenmitte befindet entstehen unter dem Gletscher zusätzliche Kompression und im Bereich zwischen der Gletscherfront und dem Forebulge Extension. Letztere kann zur Ausbildung von vertikalen Mikrorissen führen.	246
Abb. 10-10	Schematische Darstellung der Spannungsverhältnisse im Bereich zwischen Gletscherfront und Peripheral Bulge (Forebulge) einer Vergletscherung, d.h. vor der Gletscherfront (Einfaches Mohr Coulomb-Kriterium für Störungen mit Koeffizient der inneren Reibung = 0.8 und Kohäsion 2 MPa). Links: während der Warmzeit, rechts: während der Kaltzeit. Als Randbedingung gewählt wurde ein Abschiebungsregime mit einem Vertikalspannungsgradienten von 22.5 MPa/km und einem horizontal Spannungsgradienten von 13.5 MPa/km (Werte angelehnt an Norddeutsche Tiefebene /BOR 89/, /RÖC 03/). Angenommen wird ein linearer Verlauf der Biegespannungen von -4 MPa an der Oberfläche bis 4 MPa in 15 km Tiefe. In 500 m Tiefe (kleiner gepunkteter Halbkreis) können in der Kaltzeit auch Zugspannungen auftreten.	247
Abb. 10-11	Wärmeleistung von UO ₂ und MOX Kernbrennstoff sowie von HAW Glas als Funktion der Zeit.	253
Abb. 11-1	Konfigurationstypen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nach /AKE 02/	278
Abb. 11-2	Untertypen zu Typ B bei nicht vollständiger Umschließung des Endlagers im Wirtsgestein (Typ Bb).....	279
Abb. 11-3	Lage eines oder mehrerer ewGe bei einer Lagerung in tiefen Bohrlöchern.....	281
Abb. 11-4	Möglicher Effekt einer Gasbildung im verschlossenen Bohrloch auf den Fluidtransport	299

Tabellenverzeichnis

Tab. 6-1	Verzeichnis der verwendeten Fachbegriffe und Abkürzungen.....	53
Tab. 6-2	Forschungsbohrungen in der ehemaligen DDR mit Kurzbezeichnungen Ansatzpunkten, Endteufen und tiefstem erbohrten Horizont.	87
Tab. 6-3	Zusammenstellung der Spannungsdaten von Soultz-sous-Forêts aus älteren Hydrofrac-messungen. S_{hmin} ist die kleinste Horizontalspannung, S_V ist die Vertikalspannung, p_0 entspricht dem Porendruck. Mit dem Zusatz S_V und S_{hmin} sind effektive Spannungen.	94
Tab. 6-4	Zusammenstellung der Spannungsdaten der Bohrungen von Soultz-sous-Forêts (Abkürzungen siehe auch Tab. 6-2).	95
Tab. 6-5	Zusammenstellung der Spannungsdaten und minimalen und maximalen Tangentialspannungen an der Bohrlochwand in ausgewählten Teufen.	97
Tab. 6-6	Übersicht über die Anwendungen und Messgrößen von Loggingsonden /BRA 93/, /BRA 95/	119
Tab. 6-7	Typische Logginggeschwindigkeit von einzelnen Loggingverfahren, die Zeiten enthalten nicht den Sondenzusammenbau	121
Tab. 6-8	Spezifikation der Bohrlochdurchmesser für Großloch-Logging-Pakete /SCH 04/	126
Tab. 7-1	Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente. (WWER: Druckwasserreaktor russischer Bauart; KGR: Greifswald, KKR: Rheinsberg) /PEI 11/	146
Tab. 7-2	Prognose der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden Wiederaufarbeitungsabfälle /PEI 11/	146
Tab. 7-3	Anzahl der BSK-R /BOL 12/ bzw. DBC-R	148
Tab. 7-4	Auflistung Randbedingungen / Bohrloch	149
Tab. 7-5	Auflistung Auslegung der Verrohrung	149
Tab. 7-6	Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante A	154
Tab. 7-7	Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Variante A	154
Tab. 7-8	Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante A1	156
Tab. 7-9	Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Variante A1	156

Tab. 7-10	Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante B.....	156
Tab. 7-11	Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Referenzvariante B.....	157
Tab. 7-12	Kenndaten Bohrloch und Behälter zu Variante C.....	157
Tab. 7-13	Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung zu Referenzvariante C.....	157
Tab. 7-14	Vergleich Kenndaten Bohrloch und Behälter Varianten A, A1, B, C.....	158
Tab. 7-15	Vergleich Masse-, Gewichtskraft- und Druckverteilung Varianten A, A1, B, C.....	158
Tab. 8-1	Definition von Begriffen zum Spannungstensor.....	176
Tab. 8-2	Übersicht der wichtigsten natürlichen Spannungsbeiträge der Erdkruste. Die relative Bedeutung der Beiträge zum Spannungszustand an einem bestimmten Punkt lässt sich aus der Übersicht der Wellenlänge nicht ableiten, da diese von den Magnituden, die durch den jeweiligen Beitrag am interessierenden Ort erzeugt werden, bestimmt wird.....	177
Tab. 10-1	Definition der oberflächennahen und tiefen Havariebedingungen und verfügbare Datenbasis.....	223
Tab. 10-2	Daten zur Ermittlung der Radionuklidfreisetzung unter Havariebedingungen.....	224
Tab. 10-3	Spaltstoffinventare in den betrachteten Abfällen.....	229
Tab. 10-4	Kaltzeiten in Deutschland innerhalb der letzten Millionen Jahre.....	241
Tab. 10-5	Unterstellte bzw. verfügbare charakteristische Daten eines tiefen Bohrlochs.....	249
Tab. 10-6	Parameter der HAW-Glas Behälter.....	251
Tab. 10-7	Abgebrannter Kernbrennstoff.....	251
Tab. 10-8	Inventare (in g/Tonne) von einigen Spaltprodukten im abgebranntem Kernbrennstoff /STO 11/.....	252
Tab. 10-9	Charakteristik des BSK 3 Behälters.....	254
Tab. 10-10	Kenntnisstand zur Korrosion von Behältermaterialien in Salzlösungen.....	255
Tab. 10-11	Gemessene Korrosionsraten von Stählen in konzentrierter MgCl ₂ Lösung.....	256
Tab. 10-12	Festlegungen für die Temperaturabschätzung.....	258

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1

50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de