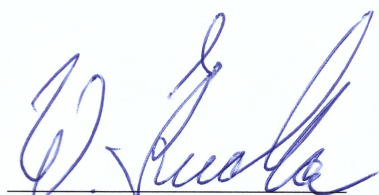



Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern „CREATIEF“

Abschlussbericht


Auftraggeber:	Projektträger Karlsruhe
Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. W. Kudla
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. W. Bollingerfehr (BGE TEC) Dr.-Ing. C. Dieterichs (TUBAF) Dipl.-Ing. M. Herold (BGE TEC) Prof. Dr.-Ing. W. Kudla (TUBAF) Prof. Dr.-Ing. M. Reich (TUBAF) Dr.-Ing. T. Rosenzweig (TUBAF)
Umfang:	182 Seiten, 3 Anhänge
Datum:	31.07.2018



Prof. Dr.-Ing. W. Kudla



Prof. Dr.-Ing. M. Reich



Dr.-Ing. T. von Berlepsch

Das diesem Bericht zugrunde liegende FuE-Vorhaben „Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern - CREATIEF“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Karlsruhe (PTKA) unter den Förderkennzeichen 02E11526A und 02E11526B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Summary	13
1 Einleitung	19
2 Zielsetzung des Vorhabens	20
3 Analyse der in der nationalen und internationalen Literatur getroffenen Annahmen und Randbedingungen	21
3.1 Aufgabenstellung	21
3.2 Existierende Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern	21
3.2.1 Allgemeines	21
3.2.2 Konzept aus Schweden von der SKB: Very Deep Holes	21
3.2.3 Konzept aus den USA von den SNL: Deep Borehole Disposal	22
3.2.4 Konzept aus Deutschland von der GRS: Tiefe Bohrlöcher	25
3.2.5 Zusammenfassung	26
3.3 Überprüfung der Konzepte auf Konformität mit dem deutschen Regelwerk	28
3.3.1 Allgemeines	28
3.3.2 Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017 (StandAG, 2017)	28
3.3.3 Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 (BMU, 2010)	30
3.3.4 Sonstige relevante Regelwerke	32
3.3.5 Zusammenfassung	34
4 Begriff - Stand der Technik	36
5 Geologie	38
5.1 Allgemeines	38
5.2 Anforderungen an die geologischen Verhältnisse an einem möglichen Standort	40
5.3 Wissensstand zu geologischen Verhältnissen im angestrebten Einlagerungshorizont	42
6 Stand der Tiefbohrtechnik	44
6.1 Einleitung	44
6.2 Erkundungsverfahren bis 5 000 m Tiefe	45
6.2.1 Kontrolle des Bohrlochverlaufes	45
6.2.2 Kontrolle der Bohrparameter	46
6.2.3 Messung von Formationsparametern	46
6.3 Stand der Technik für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe	49
6.3.1 Bohranlagen	49
6.3.2 Bohrmeißel	51
6.3.3 Konzeptionelles Bohrstrangdesign	57
6.3.4 Casings (Futterrohre)	59
6.3.5 Einbau von Casings	69
6.3.6 Einbau dichter Verrohrungen	70
6.3.7 Zementation	72
6.3.8 Rückbau / Verfüllung von Bohrungen	75
6.4 Fazit zum maximal möglichen Enddurchmesser einer nach heutigem Stand der Technik erstellten Bohrung bis in eine Tiefe von 5 000 m im Kristallin	83

7	Endlagerbehälter	85
7.1	Abfallmengengerüst.....	85
7.1.1	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren	85
7.1.2	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren	86
7.1.3	Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren.....	87
7.2	Anforderung an den Endlagerbehälter	88
7.3	Konzept eines geeigneten Endlagerbehälters.....	89
7.3.1	Materialauswahl.....	89
7.3.2	Behälterkonzept für einen Bohrlochdurchmesser von 90 cm.....	94
7.3.3	Behälterkonzept für einen Bohrlochdurchmesser von 17,5"	95
7.3.4	Fazit	101
8	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	103
8.1	Allgemeines	103
8.2	EwG bei tiefen Bohrlöchern	104
8.3	Zusammenfassung	107
9	Einschätzungen zum Sicherheits- und Nachweiskonzept	108
9.1	Einleitung	108
9.2	Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen des BMU	108
9.3	Vorgehensweise zur Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes am Beispiel des Forschungsvorhabens KOSINA	109
9.4	Sicherheitskonzept für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gemäß GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016).....	110
9.5	Technisches Endlagergrundkonzept zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes gemäß GRS-Bericht.....	111
9.6	Nachweiskonzept gemäß Sicherheitsanforderungen des BMU	113
9.7	Nachweiskonzept am Beispiel des FuE-Vorhabens KOSINA	114
9.8	Einschätzung des Nachweiskonzeptes gemäß GRS-Bericht	115
10	Endlagerkonzept	119
10.1	Einlagerungs- und Rückholungstechnik	119
10.2	Gestänge	119
10.3	Coiled Tubing.....	122
10.4	Seile	122
10.5	Rückholung.....	134
10.6	Strahlenschutzmaßnahmen im Betrieb und bei der Rückholung	135
10.7	Bergung	136

11	Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrlöchern.....	137
11.1	Allgemeines	137
11.2	Zement.....	139
11.3	Bentonit.....	139
11.4	Bitumen.....	142
11.5	Sonstige Materialien	143
11.6	Zusammenfassung	146
12	Betriebssicherheit und Havariebewältigung	147
13	Endlagermonitoring	150
14	Chancen und Risiken	152
15	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	156
16	Zusammenfassung.....	159
17	Ausblick.....	164
	Literaturverzeichnis	165
	Abkürzungsverzeichnis.....	173
	Abbildungsverzeichnis.....	179
	Tabellenverzeichnis.....	182

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1 Berechnung benötigter Volumenströme und Pumpendrucke
- Anhang 2 Werkstoffdatenblatt von Stahl - X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571
 (Deutsche Edelstahlwerke, 2015)
- Anhang 3 Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis von BSK-Behältern nach EC 3

Kurzfassung

zum Forschungsvorhaben CREATIEF:

Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern

Autoren: W. Bollingerfehr¹⁾, C. Dieterichs²⁾, M. Herold¹⁾, W. Kudla³⁾, M. Reich²⁾, T. Rosenzweig³⁾

1) BGE TECHNOLOGY GmbH

2) TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau

3) TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Mehr als 30 Länder nutzen derzeit die Kernenergie weltweit zur Stromerzeugung. In nahezu allen Ländern gibt es Überlegungen, wie radioaktive Abfälle langzeitsicher gelagert / entsorgt werden können. Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind seit Jahrzehnten in unterschiedlicher Bauweise überall auf der Welt in Betrieb. In Finnland wurde 2015 bisher als erstem und einzigen Land weltweit eine Genehmigung zum Bau eines Endlagers für wärmeentwickelnde ausgediente Brennelemente erteilt. In Deutschland wurde von Anfang an für die Entsorgung wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfallstoffe und ausgedienter Brennelemente die Endlagerung in einem Bergwerk favorisiert. Eine Bergwerkslösung wurde von den möglichen Entsorgungsoptionen unter sicherheitstechnischen und genehmigungsrechtlichen Aspekten am ehesten als umsetzbar angesehen.

Es gab im Ausland in einigen Ländern jedoch auch Überlegungen zu anderen Entsorgungsmöglichkeiten. Eine dieser Möglichkeiten zur Entsorgung ist die Endlagerung von wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in „Tiefen Bohrlöchern“. Unter „Tiefen Bohrlöchern“ werden bei der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens Bohrlöcher mit einer Tiefe von 3 000 m bis 5 000 m ab der Geländeoberfläche verstanden, bei denen der Einlagerungsbereich im Kristallingestein (kristallinen Grundgebirge) liegt.

Die Endlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen und / oder ausgedienten Brennelementen in Bohrlöchern mit einer Tiefe von 3 000 m bis 5 000 m ist eine Entsorgungsoption, die von der „Endlagerkommission“ aufgrund der in den letzten Jahren in den USA laufenden Diskussion thematisiert wurde. Zu dieser tiefen Bohrlochlagerung gibt es Vorüberlegungen bzw. Konzepte in Schweden und den USA sowie in Deutschland von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Option „Endlagerung in Tiefen Bohrlöchern“ weiter mit folgenden drei Zielen untersucht:

- 1) Analyse und Beschreibung der in vorhandenen Forschungsberichten / Studien getroffenen Annahmen und Randbedingungen,
- 2) Beschreibung der wesentlichen Eckpunkte bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern und Aufzeigen eines möglichen Verbesserungspotenzials,
- 3) konzeptionelle Gesamtbewertung von Chancen und Risiken der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Zunächst wurden die in Schweden (von der Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)), den USA (von den Sandia National Laboratories (SNL)) sowie in Deutschland (von der GRS) ausgearbeiteten Konzepte für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern dargelegt und kritisch bewertet. Des Weiteren wurden die Anforderungen in den in Deutschland derzeit relevanten rechtlichen Grundlagen (Standortauswahlgesetz 2017, Sicherheitsanforderungen 2010 des Bun-

des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Strahlenschutzverordnung 2017, usw.) aufgelistet. Es wurde dargelegt, inwieweit bei einer Endlagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöchern die Anforderungen aus diesen rechtlichen Grundlagen erfüllt werden können. Eine Prüfung, inwieweit einzelne Randbedingungen bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern die derzeitigen gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen in den Verordnungen erfüllen, ist jedoch letztlich nur eingeschränkt sinnvoll durchführbar, da die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen bisher immer im Hinblick auf eine Endlagerung in einem Bergwerk formuliert worden sind. Dementsprechend müssten die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen sinnvoll im Hinblick auf eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern um- oder neu formuliert werden.

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden zwei geologische Profile definiert, die als Referenz für mögliche geologische Verhältnisse in Deutschland bei den weiteren Überlegungen zur Einlagerung dienen. Die Einlagerung erfolgt in 3 000 m bis 5 000 m im voraussichtlich klüftigen Kristallingestein. Auch bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss nachgewiesen werden, dass Radionuklide nicht bzw. nur in ausreichend geringem Maße aus dem Einlagerungsbereich entweichen. Deshalb muss auch bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) definiert werden. Da die Einlagerung im wahrscheinlich klüftigen Kristallingestein erfolgt, kann ein ewG voraussichtlich nur in Form einer überlagernden Ton- oder Salzgesteinsschicht ausgewiesen werden (Typ Bb gemäß dem Bericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)). Die Ton- bzw. Salzschieht muss so flächig verbreitet sein, dass auch bei einer Umströmung im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren keine bzw. nur in ausreichend geringem Maße Radionuklide aus dem ewG entweichen (bzw. beim Typ Bb nach AkEnd den flächig verbreiteten ewG umströmen). Insbesondere im Bereich der Ton- bzw. Salzschieht müssen Bohrlochabdichtungen gesetzt werden.

Nach der Entwicklung der geologischen Profile wurde der Stand der Technik der konventionellen Tiefbohrtechnik der Öl- und Gasindustrie für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe mit möglichst großem Durchmesser im Kristallin untersucht. Der derzeitige Stand der Technik deckt Bohrungen bis zu einem Durchmesser von 17,5 Zoll (44,5 cm) in 5 000 m Tiefe im Kristallin ab. Für noch größere Bohrungen müssten vor allem größere Rollenmeißel entwickelt werden. Alternativ müssten Bohrverfahren im Hartgestein (z. B. das Elektroimpulsverfahren) entwickelt bzw. weiterentwickelt werden. Ein Bohrdurchmesser von etwa 35,4 Zoll (90 cm), wie er im Bericht der GRS als sinnvoll angesehen wurde, lässt erwarten, dass die Anzahl der Bohrungen auf ein akzeptables Maß beschränkt werden kann (voraussichtlich 31 Stück). Allerdings ist ein so großer Bohrdurchmesser mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht umsetzbar. Die Anpassung der tiefbohrtechnischen Ausrüstung an Bohrungen im Hartgestein und mit wesentlich größeren Durchmessern als 17,5 Zoll (44,5 cm) in 5 000 m, wie sie zur Endlagerung erforderlich wären, wäre mit erheblichen Entwicklungs- und Testarbeiten verbunden. Die besonderen Herausforderungen bestehen darin, die erforderliche Anpresskraft auf die großkalibrigen Meißel bereitzustellen (Bohrstrangdesign), das Bohrloch kontinuierlich vom Bohrklein zu reinigen (Leistungsfähigkeit der Pumpen), den schweren Bohrstrang zu handhaben (spezielle Tiefbohranlage entwickeln und bauen) und ein Bohrungsdesign zu entwickeln, welches mit einem minimalen Bohrungsdurchmesser im ersten Bohrungsabschnitt auskommt (Lean Casing oder Mono Bore Verfahren).

Zum Stand der Tiefbohrtechnik kann festgestellt werden, dass nahezu alle bisherigen Entwicklungen darauf abzielten, Öl- und Gaslagerstätten zu erschließen und zu nutzen. Öl und Gas findet man meist in den Poren von Sedimentgesteinen. Die Bohrungen werden daraufhin optimiert, die Kosten unter Berücksichtigung der hohen Sicherheitsanforderungen zu minimieren und gleichzeitig eine maximale Förderung der Rohstoffe zu ermöglichen, ohne die Lagerstätte zu beschädigen. Typische Enddurchmesser von Öl- und Gasbohrungen liegen folglich bei 4 bis 8 ½ Zoll, also ca. 10,2 cm bis 21,6 cm.

Grundsätzlich erfolgen alle Bohrarbeiten, bevor radioaktives Material zur Bohrung angeliefert wird. Die Bohrung kann damit vollständig ohne strahlenschutztechnische Einschränkungen ausgeführt und überprüft werden. Erst nachdem die Bohrung in einwandfreier Qualität hergestellt ist, wird sie für die Einlagerung freigegeben. Anschließend wird das Einlagerungsgebäude über dem Bohransatzpunkt errichtet. Erst danach werden die radioaktiven Abfälle angeliefert.

Auf Basis des einzulagernden Abfallmengengerüsts (ergibt sich aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm für das Jahr 2022) wurden Betrachtungen zum Endlagerbehälter durchgeführt. Die Anforderungen an den Endlagerbehälter bei einer Einlagerung in 3 000 m bis 5 000 m Tiefe beziehen sich insbesondere auf:

- die Dichtigkeit,
- die Festigkeit gegenüber allen auftretenden Belastungen,
- die Temperaturbeständigkeit,
- die Beständigkeit gegenüber dem Stützfluid im Bohrloch,
- die Anforderungen an die Abmaße des Behälters aufgrund des Bohrl Lochdurchmessers.

Im Einlagerungsbereich sind Temperaturen zwischen etwa 100 °C und 160 °C zu erwarten. Die derzeit im Standortauswahlgesetz geforderte Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteraußenfläche kann bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern systembedingt nicht eingehalten werden. Der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens berücksichtigte Druck auf den Behälter ergibt sich aus der Auflast der gestapelten Behälter und dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule (Bohrloch muss für den Betrieb aus Stabilitätsgründen fluiderfüllt sein). Der Gebirgsdruck ist in dem Konzept nicht berücksichtigt, da angenommen wurde, dass das Casing in Verbindung mit dem fluiderfüllten Bohrloch den Gebirgsdruck solange übernimmt, bis der Bohrlochverschluss vollständig in Funktion ist. Aus den genannten Anforderungen heraus wurden die Randbedingungen für einen Behälter abgeleitet und ein Behälter überschlägig bemessen. Danach werden die Behälter für ein 17,5 Zoll Bohrloch voraussichtlich 26,5 cm Außendurchmesser und 17,5 cm Innendurchmesser aufweisen. Für ein 35,4 Zoll Bohrloch ergeben sich der Behälteraußendurchmesser zu 63,5 cm und der Behälterinnendurchmesser zu 43,5 cm. Nach den Befunden zur Stahlkorrosion sollte als Stützfluid einer K_2CO_3 - oder einer Na_2CO_3 -Lösung der Vorzug vor chlorid- oder bromidhaltigen Flüssigkeiten gegeben werden. Als Material für den Behälter wird beispielsweise ein austenitischer Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2 empfohlen. Insgesamt wurden zwei Konzepte für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern betrachtet, die nachfolgend beschrieben werden:

➔ Konzept 1: Bohrdurchmesser 17,5 Zoll (44,5 cm) in 5 000 m Tiefe:

Setzt man einen maximalen Bohrdurchmesser von 17,5 Zoll an, ist aufgrund des notwendigen Casings und des erforderlichen Ringraums nur ein Behälteraußendurchmesser von 26,5 cm (Innendurchmesser: 17,5 cm) möglich. Die Länge des Behälters wurde zu 5,6 m angenommen. Die Anzahl der Behälter ist bei einer Ausnutzung des Innendurchmessers für die Einlagerung der Brennstäbe von 70 % bis 80 % bei etwa 23 000 bis 27 000 Behältern zu erwarten. Bei etwa 180 Behältern pro Bohrloch wären 130 bis 150 Bohrlöcher notwendig. Die beschriebenen Behälter sind dabei auf eine Stapelhöhe von ca. 1 000 m ausgelegt. Hier besteht Optimierungspotenzial. Der Vorteil des Konzeptes 1 ist es, dass keine Weiterentwicklung der Bohrtechnik notwendig ist und auf den Stand der Technik in der Tiefbohrtechnik zurückgegriffen werden kann. Das Konzept 1 hat jedoch den Nachteil, dass eine relativ große Anzahl an Bohrlöchern notwendig ist. Des Weiteren können beim Konzept 1 die schon verglasten und konditionierten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung nicht eingelagert werden, da dafür ein Innendurchmesser des Behälters von mindestens 43 cm erforderlich wäre. Somit können hier nur die Brennstäbe von ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren eingelagert werden.

➔ Konzept 2: Bohrdurchmesser 35,4 Zoll (90 cm) in 5 000 m Tiefe (Bracke, et al., 2016):

Beim Konzept 2 wurde von einem Bohrdurchmesser von 35,4 Zoll in 5 000 m Tiefe ausgegangen. Die Einlagerung erfolgt zwischen 3 000 m und 5 000 m Tiefe. Unter Berücksichtigung der Casing-Wandstärke und des notwendigen Ringraumes ist ein Behälteraußendurchmesser von 63,5 cm (Innendurchmesser: 43,5 cm) und eine Stapelhöhe von 2 000 m möglich. Die Behälterlänge beträgt 5,6 m. Unter diesen Prämissen sind insgesamt 11 000 Behälter erforderlich. Bei einer Einlagerung von 363 Behältern pro Bohrloch wären 31 Bohrlöcher notwendig. Der Vorteil des Konzeptes 2 ist, dass die Anzahl der Bohrlöcher mit 31 Stück erheblich geringer ist als im Konzept 1. Der Nachteil des Konzeptes 2 ist, dass ohne eine erhebliche Weiterentwicklung der tiefbohrtechnischen Ausrüstung eine Umsetzung nicht möglich ist.

Auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss ein ewG ausgewiesen werden. Da die Einlagerung im Kristallingestein erfolgt, das mit hoher Wahrscheinlichkeit klüftig ist, ist eine abdichtende Schicht aus Ton oder Salz oberhalb des Kristallingesteins notwendig. Der ewG entspricht damit dem Typ Bb nach AkEnd. Wie ein Nachweis eines ewGs beim Typ Bb gegenständig (rechnerisch / durch Erkundungen) erfolgen soll, ist jedoch derzeit noch unklar. Dies gilt sowohl für einen ewG vom Typ Bb bei einer Endlagerung in einem Bergwerk als auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept in Ansätzen entwickelt bzw. auf das in (Bracke, et al., 2016) dargelegte Konzept der GRS zurückgegriffen. In den Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 sind die allgemeinen Schutzziele und die Sicherheitsprinzipien dargelegt. Das Sicherheitskonzept beschreibt, wie bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern der sichere Einschluss der Abfälle für eine Million Jahre erreicht werden soll. Für einen möglichst weitgehenden Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich werden folgende Anforderungen zugrunde gelegt:

- 1) Die Abfälle müssen so eingeschlossen werden, dass allenfalls in geringem Maße Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden (Einschlusswirksamkeit).
- 2) Die geologische Barriere muss im Verbund mit den geotechnischen Barrieren den Einschluss gewährleisten.
- 3) Das Porenwasser im ewG darf nicht am hydrogeologischen Kreislauf teilnehmen.
- 4) Die Einschlusseigenschaften des ewG müssen über eine Million Jahre erhalten bleiben.

Im Nachweiskonzept wird dargelegt, wie die im Sicherheitskonzept festgeschriebenen Anforderungen überprüft werden. Nachweise sind dabei mit Bezug auf den ewG vom Typ Bb zu folgenden Punkten zu führen bzw. folgende Punkte sind zu bewerten:

- 1) die Mächtigkeit der Salz-/ Tonbarriere,
- 2) die Integrität der geologischen Barrieren,
- 3) die Integrität und Wirksamkeit der geotechnischen Verschlussbauwerke (qualifizierte Abdichtungen im Bereich der Ton- und Salzschrift),
- 4) der Kritikalitätsausschluss,
- 5) der Einschluss der Radionuklide im bzw. unterhalb des ewG,
- 6) die radiologischen Konsequenzenanalyse in der Biosphäre bei Freisetzung von Radionukliden,
- 7) Human-Intrusion-Szenarien.

Weiterhin wurde ein Einlagerungs- und Rückholungskonzept entwickelt. Nach der Fertigstellung des Bohrlochs kann der Bohrturm abtransportiert werden. Anschließend wird ein Einlagerungsbauwerk über Tage erstellt. Im Einlagerungsbauwerk muss über dem Bohrloch eine

Einlagerungsvorrichtung mit einer Abschirmvorrichtung vorgesehen werden. Das Endlagergebinde wird in einem geschlossenen Transferbehälter zum Bohrloch transportiert. Anschließend wird dieser vertikal über dem Einlagerungsbohrloch aufgestellt. Das Personal ist dabei durch Abschirmvorrichtungen permanent geschützt. Die Endlagergebinde können dann am Gestänge oder an Seilen aus Stahl oder Fasern in das Bohrloch eingelagert werden. Eine Rückholung kann seitens der Abläufe ähnlich der Einlagerung erfolgen. Während die Rückholung in der Betriebszeit einer Bohrung als möglich eingeschätzt wird, erscheint die Bergung der Endlagergebinde bei diesem Konzept nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich. Deshalb müsste dafür geprüft werden, ob diese Anforderung gesetzlich aufrecht erhalten werden muss.

Hinsichtlich des Verfüllens und Verschließens der Einlagerungsbohrlöcher wurden verschiedene Möglichkeiten zu den Materialien dargelegt. In Konzeptstudien wurden bisher Bentonit, Bitumen / Asphalt, Zement und auch Salzsuspensionen und eutektische Salzschnmelzen sowie Schwespat / Baryt als Verfüll- bzw. Verschlussmaterialien genannt. Erste Überlegungen zu Einbringtechnologien wurden vorgestellt. Sämtliche Einbringtechnologien müssen allerdings noch hinsichtlich der speziellen Bedingungen in Endlagerbohrungen entwickelt und erprobt werden. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit eines Einbaus der Verfüllmaterialien im Fluid, aber auch die Option eines Trockeneinbaus ist nach den durchgeführten Bemessungen der Casings denkbar.

Abschließend wurden die Chancen und Risiken einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern abgewogen, von denen einige nachfolgend beschrieben werden:

→ Chancen:

Die hinsichtlich der Radionuklide abschirmende und beim Ablassen der Gebinde abbremssende Wirkung des Stützfluides im Bohrloch erweist sich für die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern als voraussichtlich positiv und wird in die Kategorie Chance eingeordnet. Das aufzufahrende gesamte Hohlraumvolumen ist im Vergleich zu einem Endlagerbergwerk geringer und der Verschluss des einzelnen Bohrloches kann direkt nach dem Einbringen der Endlagergebinde erfolgen. Es besteht dabei auch eine gute Chance, den Bohrungsverschluss in einem trockenen Bohrloch einzubringen. Das Erstellen eines Bohrloches mit einem Enddurchmesser von 17,5" ist nach dem Stand der Technik der Tiefbohrtechnik machbar. Zudem ist die Entwicklung einer Technologie für das Abteufen von Bohrungen mit größerem Durchmesser bis 90 cm in Tiefen bis 5 000 m im Kristallin nicht ausgeschlossen. Allerdings müsste diese Entwicklung mit öffentlichen Mitteln gefördert werden, da innerhalb der Rohstoffindustrie kein direkter Bedarf an einer solchen Technologie besteht.

→ Risiken:

Die Bewertung von Chancen und Risiken zeigt aber auch deutliche Risiken für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern. Dazu gehört die Tatsache, dass nach heutigem Stand der Technik nicht alle wärmeentwickelnden Abfälle in ein 17,5" (44,5 cm) Bohrloch eingelagert werden können. Die Endlagerung von Kokillen (Durchmesser: 43 cm) mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B und CSD-V) ist in Tiefbohrungen nicht möglich. Dementsprechend muss zusätzlich ein Endlagerbergwerk errichtet werden. Die Einlagerung in einem Schutzfluid erfordert eine entsprechende Auswahl korrosionsresistenter Behältermaterialien und einen dichten Behälter bis das Bohrloch dauerhaft verschlossen ist. Weitere risikobehaftete Themen wie z. B. Rückholung in der Betriebsphase des Bohrloches oder Havariebewältigung erfordern einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, dessen Ergebnis offen ist. Weiterhin werden zur sicherheitstechnischen Bewertung der tiefen Bohrlochlagerung Temperatur- oder Kritikalitätsberechnungen als dringend notwendig betrachtet. Bisher wurden dazu keine Arbeiten veröffentlicht.

Derzeit kann aus der Abwägung der Chancen und Risiken heraus keine Aussage getroffen werden, ob eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern eine sinnvolle Alternative zu einer Endlagerung in einem Bergwerk ist und damit weiter untersuchungswürdig ist. Dazu sind zu viele Punkte offen, bei denen weitere, sehr umfangreiche und zeitaufwändige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgen müssen. Zudem existieren zwei Punkte, deren Lösung jeweils eine ganz erhebliche Herausforderung darstellt und deren Lösung vom Projektteam auch bei großer finanzieller Unterstützung in den nächsten Jahren eher als unwahrscheinlich angesehen wird. Diese beiden Punkte betreffen:

- ➔ Nachweis des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Fall Bb nach dem Bericht des AkEnd (flächig ausgedehnte überlagernde Salzschicht / Tonschicht):

Bei der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in 3 000 m bis 5 000 m Tiefe im kristallinen Grundgebirge muss nachgewiesen werden, dass oberhalb des kristallinen Grundgebirges flächig eine so undurchlässige Schicht (Salzgestein oder Tonstein) in ausreichendem Maße vorhanden ist, dass auch über einen Zeitraum von einer Million Jahre (Nachweiszeitraum) kein mit den Abfällen in Kontakt gekommenes Grundwasser die Biosphäre erreicht bzw. mit dem Grundwasserleiter des Deckgebirges in Kontakt kommt bzw. - sofern mit Radionukliden belastetes Grundwasser mit dem Deckgebirgsgrundwasserleiter in Kontakt kommt - so verdünnt wird, dass die Kontamination unter einem festgelegten Grenzwert bleibt. Die überlagernde Ton- bzw. Salzschicht ist damit ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich vom Typ Bb gemäß dem Bericht des AkEnd. Beim Typ Bb ist der Einlagerungsbereich nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen. Derzeit gibt es keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder auch Forschungsarbeiten, in denen ein Weg aufgezeigt wird, wie ein solcher Nachweis geführt werden könnte. Das Projektteam hat auch große Zweifel, ob ein solcher Nachweis jemals geführt werden kann, da hier großflächig um den Einlagerungsbereich der Untergrund hinsichtlich seiner Permeabilität erheblich genauer erkundet werden muss als bei einer Einlagerung in einem ewG vom Typ A (ewG umschließt den gesamten Einlagerungsbereich).

- ➔ Bergung der hochradioaktiven Abfälle bei einer Einlagerung in tiefen Bohrlöchern über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers:

Gemäß dem derzeitigen Diskussionsstand und den gesetzlichen Vorgaben sollen die Behälter mit den hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen bis zu einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers geborgen werden können. Hierfür müssten Bergungstechniken entwickelt werden, mit denen ein Behälter aus beispielsweise 4 500 m Tiefe wieder geborgen werden kann. Der Behälter hat sich dabei unter Umständen aufgrund des Gebirgsdruckes, der 500 Jahre auf den Behälter eingewirkt hat, eventuell verformt. Nach Einschätzung des Projektteams bestehen große Zweifel, ob die Entwicklung solcher Bergungstechniken auch bei erheblicher finanzieller Förderung möglich ist.

Summary

of the research project CREATIEF:

Investigations on the opportunities and risks of the disposal of heat-generating radioactive waste and spent fuel elements in deep boreholes

Authors: W. Bollingerfehr¹⁾, C. Dieterichs²⁾, M. Herold¹⁾, W. Kudla³⁾, M. Reich²⁾,
T. Rosenzweig³⁾

¹⁾ BGE TECHNOLOGY GmbH

²⁾ TU Bergakademie Freiberg, Institute of Drilling Engineering and Fluid Mining

³⁾ TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mining and Special Civil Engineering

Funded by: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

Currently, more than 30 countries throughout the world use nuclear energy to generate electricity. Almost all countries contemplate how to safely store and dispose of radioactive waste in the long term. Repositories for low- and intermediate-level waste of various designs have been in operation throughout the world for decades. In 2015, Finland was the first country, however, that obtained a license to construct a repository for spent fuel elements. In Germany, the disposal of heat-generating radioactive waste and spent fuel elements in a mine was favored from the very beginning. With regard to safety and licensing aspects, a mine solution was considered to be the most feasible of the disposal options.

However, in several other countries, other disposal options have been considered. One of these options is the disposal of heat-generating radioactive waste and spent fuel elements in "deep boreholes". Within the scope of this research project, "deep boreholes" are considered to be boreholes with a depth of 3,000 m to 5,000 m from ground level where the emplacement area is located in crystalline rock (crystalline bedrock).

The disposal of high-level heat-generating waste and / or spent fuel elements in boreholes with a depth of 3,000 m to 5,000 m is a disposal option that the "Endlagerkommission" [Commission on the Storage of High-Level Radioactive Waste] broached due to the discussion that has been underway in the USA in recent years. Preliminary considerations and / or concepts regarding this deep borehole disposal exist in Sweden and the USA and have been made in Germany by Gesellschaft fuer Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Within the scope of this research project, the option "disposal in deep boreholes" was studied further with the following three aims:

- 1) analysis and description of the assumptions made and boundary conditions used in existing research reports / studies,
- 2) description of the key aspects of deep borehole disposal and illustration of potential for improvement,
- 3) conceptual assessment of the opportunities and risks of deep borehole disposal.

First, the concepts for disposal in deep boreholes developed in Sweden (by Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)), in the USA (by Sandia National Laboratories (SNL)), and in Germany (by GRS) were described and critically assessed. Furthermore, the requirements stipulated in the relevant legal regulations in Germany were listed (Standortauswahlgesetz [Site Selection Act] 2017, Safety Requirements Governing the Final Disposal of Heat-generating Radioactive Waste 2010 issued by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Strahlenschutzverordnung [Radiation Protection Ordinance] 2017, etc.) and the extent to which disposal of radioactive waste in deep boreholes can meet these requirements was presented. However, a detailed study if and how far specific boundary conditions of disposal in deep boreholes comply with the current legal provisions

and requirements is feasible to only a limited extent as these provisions refer to disposal in a mine. Thus, these legal requirements would have to be revised or redrafted in such a way that they also apply to disposal in deep boreholes.

Within the scope of this research project, two geologic profiles were defined, which served as references for geologic conditions that may be considered as candidates for final disposal in Germany. Disposal takes place at depths between 3,000 m and 5,000 m in presumably fractured crystalline rock. Just like for disposal in mines, it has to be demonstrated that radionuclides do not migrate from the disposal area at all or only in negligible amounts. Thus, when it comes to disposal in deep boreholes, the existence of a containment providing rock zone (CRZ) has to be demonstrated as well. As disposal takes place in probably fractured, crystalline rock, a CRZ can presumably only be accounted for in the form of a superimposing clay or rock salt layer (Type Bb according to the report of the Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) [Working Group Selection Procedure for Repository Sites]). The clay or salt layer must be so widespread that even with circulation no or only negligible amounts of radionuclides can escape during the reference period of 1 million years (or, that they, in the case of Type Bb as defined by AkEnd, circulate the more flatly spread area of the CRZ). Especially in the area of the clay or salt layer, borehole seals have to be installed.

After the geologic profiles had been developed, the state of the art in the field of conventional deep drilling in the oil and gas industry for drillings to depths of 5,000 m with as wide a diameter as possible was investigated. In crystalline rock, boreholes can currently be drilled down to 5,000 m with diameters up to 17.5" (44.5 cm). For larger boreholes, larger roller bits would have to be developed. Alternatively, drilling techniques in hard rock (e.g., the electric impulse method) would have to be developed or further developed. It is assumed that a borehole diameter of about 35.4" (90 cm), as described as expedient in the GRS report, would reduce the number of boreholes to an acceptable amount (presumably 31). However, such large borehole diameters are currently not technically feasible. Adapting deep drilling equipment for drilling in hard rock and for diameters considerably larger than 17.5" (44.5 cm) as necessary for disposal boreholes with depths of 5,000 m would require considerable developmental and testing work. The particular challenges are to provide the large-sized bit with the necessary contact pressure (drill rod design), to continuously clean the cuttings from the borehole (capacity of the pumps), to manage the heavy drill string (development and engineering of a special deep drilling rig), and to develop a well design that can cope with a minimal drilling diameter in the first drilling section (lean casing or mono bore method).

As far as the state of the art in deep drilling technology is concerned, it can be said that almost all previous developments aimed at developing and exploiting oil and gas deposits. Oil and gas can usually be found in the pores of sedimentary rock. The boreholes are optimized in such a way that - taking into account the high safety requirements - the costs are kept low, while at the same time, maximum extraction of the raw materials can take place without damaging the deposit. Typical final diameters in oil and gas drilling are thus between 4" and 8 ½", i.e., approx. 10.2 cm to 21.6 cm.

On principle, all drilling work is finished before radioactive material is delivered for emplacement. Thus, the borehole can be drilled and inspected without radiation protection restrictions. Not until the quality of the borehole has been confirmed is the borehole approved for disposal. The emplacement building will then be erected above the drilling base. After this the radioactive waste will be delivered.

Based on the waste amounts to be disposed of (taken from the National Waste Management Plan 2022), the disposal containers were considered. Regarding disposal at depths between 3,000 m and 5,000 m, the particular requirements for disposal containers are related to:

- tightness,
- robustness against all possible loads,
- temperature resistance,
- resistance to the drilling fluid in the borehole,
- requirements regarding the dimensions of the container due to the borehole diameter.

In the disposal area, temperatures between approx. 100 °C and 160 °C are to be expected. On account of the system, the temperature limit of 100 °C at the container surface as currently stipulated in the Standortauswahlgesetz cannot be met in deep borehole disposal. The pressure on the container as considered in this research project is a result of the load of the stacked containers and the hydrostatic pressure of the liquid column (during operation, the borehole must be filled with fluid for stability reasons). The rock pressure is not taken into account in this concept, as it was assumed that the borehole casing together with the fluid-filled borehole will withstand the rock pressure until the borehole seal is fully functional. Based on the requirements listed above, the boundary conditions for a container were derived and used to roughly calculate the dimensions of the container. According to the calculations, the containers for a 17.5" borehole will have an outer diameter of 26.5 cm and an inner diameter of 17.5 cm. For a 35.4" borehole, the outer diameters will be 63.5 cm, the inner diameters 43.5 cm. Based on data found regarding steel corrosion, the use of K_2CO_3 or of a Na_2CO_3 solution as drilling fluid is to be preferred over fluids containing chloride or bromide. Austenitic steel type X6CrNiMoTi17-12-2 is one example of material that is recommended for the container. Two concepts were considered for the disposal in deep boreholes. They are described below:

➔ Concept 1: Borehole diameter 17.5" (44.5 cm) at a depth of 5,000 m:

Taking into account a maximum borehole diameter of 17.5", the container may only have an outer diameter of 26.5 cm (inner diameter 17.5 cm) due to the necessary borehole casing and the required annular space. The length of the container was assumed to be 5.6 m. If the inner diameter is used to 70 % to 80 % to store fuel rods, the number of containers is expected to be between 23,000 and 27,000. If one borehole is filled with 180 containers, approx. 130 to 150 boreholes would be required. The containers described above can be stacked to a height of approx. 1,000 m. Here, there is potential for optimization. The advantage of concept 1 is that a further development of the drilling technology is not necessary and that the state of the art in deep drilling technology can be used. However, concept 1 has the disadvantage that a relatively large number of boreholes is required. Furthermore, concept 1 cannot accommodate the radioactive waste from reprocessing, which is already vitrified, as this would require that the containers have an inner diameter of at least 43 cm. Thus, only the fuel rods of spent fuel elements from power reactors could be emplaced.

➔ Concept 2: Borehole diameter 35.4" (90 cm) at a depth of 5,000 m (Bracke, et al., 2016):

For concept 2, a borehole diameter of 35.4" at a depth of 5,000 m was assumed. Disposal takes place at depths between 3,000 m and 5,000 m. Taking into account the thickness of the borehole casing and the necessary annular space, the container can have an outer diameter of 63.5 cm (inner diameter: 43.5 cm) and can be stacked to a height of 2,000 m. The length of the container is 5.6 m. Based on these assumptions, a total of 11,000 containers would be required. If 363 containers were emplaced per borehole, 31 boreholes would be required. The advantage of concept 2 is that with 31 holes, the number of boreholes is considerably lower than in concept 1. The disadvantage is that without considerable further developments in the deep drilling equipment, this concept cannot be implemented.

In the case of disposal in deep boreholes, the existence of a CRZ has to be demonstrated just like in the case of disposal in a mine. As emplacement takes place in crystalline rock, which is very likely fractured, an overlying sealing layer of clay or salt is necessary. This CRZ corresponds to Type Bb according to AkEnd. How the existence of a Type Bb CRZ is to be demonstrated (mathematically / through exploration), is yet unclear. This applies to both disposal in a mine and disposal in deep boreholes.

A safety and safety demonstration concept for the disposal in deep boreholes was developed to some extent; i.e. reference was made to the concept of GRS presented in (Bracke, et al., 2016). The safety requirements issued by BMU in 2010 stipulate the general protection goals and safety principles. The safety concept describes how the safe enclosure of the radioactive waste is to be ensured for one million year in the case of disposal in deep boreholes. To ensure enclosure of the radioactive waste in a defined rock zone as far as possible, the following requirements are defined:

- 1) The radioactive waste must be contained in this rock zone in such a way that it remains in situ and, at best, only minimal quantities of substances are able to exit this rock zone (containment efficacy).
- 2) The geologic barrier in conjunction with the technical seals has to ensure enclosure of the radioactive waste.
- 3) Any pore water present in the CRZ may not participate in the hydrogeological cycle outside of the CRZ.
- 4) The integrity of the CRZ has to remain intact throughout the reference period of 1 million years.

The safety demonstration concept describes how the requirements stipulated in the safety concept are verified. Concerning Type Bb CRZ, evidence concerning the following points is to be provided or the following points are to be assessed:

- 1) thickness of the salt / clay barrier,
- 2) integrity of the geological barriers,
- 3) integrity and effectiveness of the geotechnical seals (qualified sealing in the clay and salt layer area),
- 4) exclusion of criticality,
- 5) containment of the radionuclides in and / or below the CRZ,
- 6) analysis of the radiological consequences in the biosphere in case radionuclides are released,
- 7) human intrusion scenarios.

Furthermore, an emplacement and retrieval concept was developed. After the borehole has been completed, the drilling rig can be removed. Then, an emplacement plant is assembled on the surface. The emplacement plant has to include an emplacement device with shielding feature above the borehole. The disposal container is transported to the borehole inside a transfer case. There, it is placed above the emplacement borehole in vertical position. Throughout the entire process, the shielding device protects the personnel against radiation. The disposal container can then be emplaced in the borehole by means of rods or ropes made of steel or fibers. The processes related to retrieval are similar. While retrieval during the operating period of a borehole is considered to be possible in this concept, recovery of the disposal containers does not seem possible according to current information. Thus, it should be reassessed if the recovery requirement has to be upheld in the rules and regulations.

Concerning the backfilling and closure of the emplacement boreholes, various possible materials have been listed. So far, concept studies have mentioned bentonite, bitumen / asphalt, cement as well as salt suspensions and eutectic molten salt, and barite as backfilling or sealing materials. First considerations about how to feed the material into the boreholes or voids have

been presented. However, all these technologies still need to be developed and tested with regard to the special conditions in repository boreholes. Generally, it is possible to introduce the backfill materials in fluid, but the option of dry installation should also be possible after the dimensioning of the casing has been determined.

Subsequently, the opportunities and risks of disposal in deep boreholes were assessed. Some of them are described below:

→ Opportunities:

The drilling fluid in the borehole has a shielding effect against radionuclides and a decelerating effect when the containers are emplaced, both of which are presumably positive for disposal in deep boreholes. Thus, it is allocated to the 'Chances' category. Compared with a repository mine, the total volume of voids to be excavated is lower. Furthermore, sealing of the individual boreholes can start directly after the containers have been emplaced. In this case, it may well be possible to insert the borehole seal into a dry borehole. Drilling a borehole with a final diameter of 17.5" is feasible with the state of the art of deep drilling technology. In addition, the development of a technology for the sinking of boreholes with a larger diameter of up to 90 cm at depths of up to 5,000 m in crystalline rock is not excluded. However, this development would have to be funded by public resources, as there is no direct need for such a technology within the raw materials industry.

→ Risks:

However, the assessment of the opportunities and risks shows significant risks for the disposal in deep boreholes. This includes the fact that, according to the current state of the art, not all heat-generating waste can be emplaced in a 17.5" (44.5 cm) borehole. The disposal of canisters (diameter: 43 cm) with waste from reprocessing (CSD-C, CSD-B and CSD-V) is not possible in deep boreholes. Accordingly, a repository mine must also be built. The permanent presence of the drilling fluid necessitates the choice of suitable corrosive-resistant container materials and the permanent tightness of all containers in a borehole until the borehole is sealed. Other risk topics like retrieval during the operating period or disaster management require considerable research and development effort, the result of which is open. In addition, for the safety assessment of deep borehole disposal, temperature or criticality calculations are considered to be urgently necessary. As yet, no studies have been published.

From the consideration of the opportunities and risks, no statement can currently be made as to whether a final disposal in deep boreholes is a sensible alternative to final disposal in a mine and thus remains worth further investigating. There are too many open issues that would require very extensive and time-consuming research and development work. In addition, there are two points, the solution of which represents a very considerable challenge in each case and whose solution is considered rather unlikely by the project team even with generous financial support in the coming years. These two points concern:

→ Demonstration of containment providing rock zone Type Bb according to the AkEnd report (extensive overlying salt layer / clay layer):

For the disposal of radioactive waste at depths between 3,000 m and 5,000 m in crystalline bedrock, it must be demonstrated that the bedrock is covered by an extensive, sufficiently thick salt rock or claystone layer that is impermeable enough that no groundwater that has been in contact with the waste can reach the biosphere or comes into contact with the aquifers of the cap rock or - if the latter has happened - is so diluted that the contamination remains below a fixed limit value for a period of one million years (reference period). When all these requirements are met, the overlying salt or clay layer is a containment providing rock zone Type Bb according to the AkEnd report. A characteristic of Type Bb is that the disposal area is not

completely surrounded by the containment providing rock zone. Currently, there are no scientific publications or research project that point out a way how the existence of a Type Bb could be demonstrated. The project team greatly doubts that such demonstrations may ever be carried out, as considerably more exact investigations would have to be carried out regarding the permeability of the subsoil over an extensive area around the disposal area than are required for disposal in a Type A CRZ (where the CRZ encloses the entire disposal area).

➔ Recovery of the high-level radioactive waste from deep boreholes during a period of up to 500 years after repository closure:

According to the current debate and to the legal provisions, it must be possible to recover the containers with high-level radioactive waste and spent fuel elements for a period of 500 years after repository closure. To be able to do so, recovery techniques need to be developed that are able to recover a container from a depth of, for example, 4,500 m, where the container is possibly deformed due to the rock pressure that acted on it for 500 years. The project team greatly doubts that the development of such recovery techniques may ever be possible even with generous financial support.

1 Einleitung

Mehr als 30 Länder nutzen derzeit die Kernenergie weltweit zur Stromerzeugung. In nahezu allen Ländern gibt es Überlegungen, wie radioaktive Abfälle langzeitsicher gelagert / entsorgt werden können. Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind seit Jahrzehnten in unterschiedlicher Bauweise überall auf der Welt in Betrieb. In Finnland wurde 2015 bisher als erstem und einzigen Land weltweit eine Genehmigung zum Bau eines Endlagers für wärmeentwickelnde ausgediente Brennelemente erteilt. In Deutschland wurde von Anfang an für die Entsorgung wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfallstoffe und ausgedienter Brennelemente die Endlagerung in einem Bergwerk favorisiert. Eine Bergwerkslösung wurde von den möglichen Entsorgungsoptionen unter sicherheitstechnischen und genehmigungsrechtlichen Aspekten am ehesten als umsetzbar angesehen.

Es gab im Ausland in einigen Ländern jedoch auch Überlegungen zu anderen Entsorgungsmöglichkeiten. Eine dieser Möglichkeiten zur Entsorgung ist die Endlagerung von wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in „Tiefen Bohrlöchern“. Unter „Tiefen Bohrlöchern“ werden bei der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens Bohrlöcher mit einer Tiefe von 3 000 m bis 5 000 m ab der Geländeoberfläche verstanden, bei denen der Einlagerungsbereich im Kristallingestein (kristallinen Grundgebirge) liegt.

Im Abschlussbericht der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Endlagerkommission) (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016) wird die Option einer möglichen Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern deshalb behandelt. Überlegungen und Untersuchungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern fanden in den letzten etwa zehn Jahren insbesondere in den USA statt. Im Abschlussbericht der Endlagerkommission (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016) wurde deshalb empfohlen, den Stand von Wissenschaft und Technik für diese Entsorgungsoption weiter zu beobachten, den erreichten Stand regelmäßig festzustellen und auf deutscher Seite Forschungsvorhaben (z. B. zur spezifischen Behältertechnologie und zu Sicherheitsanforderungen an die Bohrlochlagerung) zu fördern.

Das BMWi hatte entsprechende Forschungsarbeiten bereits in seinem Förderkonzept „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (2015-2018)“ initiiert. Dort wird im FuE-Bereich 3 „Endlagerkonzepte und Endlagertechnik“ das FuE-Thema „Alternative Entsorgungskonzepte zur Direkten Endlagerung“ aufgeführt, unter das auch eine Entsorgung in tiefen Bohrlöchern fällt.

In die Bearbeitung wurden u. a. auch die Ergebnisse und Erkenntnisse des Fachworkshops vom 05./06. Juni 2015 zum Thema „Endlagerung in Tiefen Bohrlöchern“ und ein von der GRS für die Endlagerkommission 2016 fertiggestelltes Gutachten (Bracke, et al., 2016) mit einbezogen. Da es bisher nahezu keine in Deutschland erarbeiteten Forschungsberichte und Fachveröffentlichungen zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gibt, sind die beiden vorgenannten Informationsquellen von erheblicher Bedeutung. Darüber hinaus wurden die im Ausland veröffentlichten Erkenntnisse ausgewertet.

2 Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens CREATIEF war es, die Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern in technischer und sicherheitstechnischer Hinsicht vertieft zu untersuchen. Dabei sollten insbesondere die bisher getroffenen Annahmen und Randbedingungen in aktuellen Studien und Forschungsvorhaben im Ausland und Inland analysiert und bewertet werden. Mögliche Defizite sollen identifiziert werden.

Im Einzelnen wurden folgende Teilziele verfolgt:

- 1) Analyse und Beschreibung der in Forschungsberichten (national und international) getroffenen Annahmen und Randbedingungen für die Option „Endlagerung radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern“. Dabei soll vor allem untersucht werden, in wieweit diese im Sinne einer soliden technisch-wissenschaftlichen Prüfung zur Bewertung der technischen und insbesondere sicherheitstechnischen Machbarkeit belastbar sind.
- 2) Die in den jeweiligen Forschungsvorhaben beschriebenen Grundkonzepte für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sollen hinsichtlich ihres Verbesserungspotenzials analysiert werden. Dazu soll eine detaillierte Analyse der beschriebenen Methoden, Verfahren und Techniken durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang sollen die Eckpunkte der Endlageroption „Tiefe Bohrlöcher“ hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen und getroffenen Annahmen hinterfragt werden. Für dabei identifizierte Wissenslücken und fehlende Lösungsansätze sollen die Ursachen ermittelt werden.

Zu den Eckpunkten zählen:

- a) Erkundungsverfahren bis 5000 m Tiefe,
 - b) „Aussagegenauigkeit“ zu den geologischen Verhältnissen,
 - c) Bohrtechnik bis 5000 m Tiefe für die Einlagerungsbohrungen,
 - d) Einbau dichter Verrohrungen mit größeren Durchmessern,
 - e) konzeptionelle Varianten bei der Einlagerung (z. B. Anzahl an Bohrungen je Fläche),
 - f) Sicherheits- und Nachweiskonzept,
 - g) Auswahl und Konzeption eines geeigneten Endlagerbehälters,
 - h) Nachweis der Behälterbeständigkeit,
 - i) Einlagerung in einem Stützfluid,
 - j) Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrlöchern,
 - k) Rückbau von Verrohrungen für den Einbau der Verschlüsse,
 - l) Rückholung und Bergung der Endlagergebinde,
 - m) Einlagerungs- und Rückholungstechnik (Sicherheit und Zuverlässigkeit des gewählten Systems),
 - n) Gewährleistung des Strahlenschutzes im Betrieb und bei Rückholung,
 - o) Betriebssicherheit und Havariebewältigung,
 - p) Endlagermonitoring.
- 3) Konzeptionelle Gesamtbewertung von Chancen und Risiken der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

3 Analyse der in der nationalen und internationalen Literatur getroffenen Annahmen und Randbedingungen

3.1 Aufgabenstellung

Es sollte im Rahmen einer Literaturrecherche überprüft werden, inwieweit getroffene Annahmen und beschriebene Randbedingungen für die in der Literatur identifizierten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit den geltenden gesetzlichen Grundlagen und Verordnungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland übereinstimmen. Identifizierte Abweichungen und Widersprüche sollten dokumentiert und zusammenfassend bewertet werden.

3.2 Existierende Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern

3.2.1 Allgemeines

Derzeit existieren drei Konzepte zur Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe in vertikalen tiefen Bohrlöchern (Tiefe: > 1 000 m) im Kristallin. Diese stammen aus den Ländern Schweden, USA und Deutschland. Keines dieser Konzepte wurde bisher detailliert geplant, getestet oder angewandt. Am weitesten wurde das Konzept in den USA entwickelt. Die Forschung wurde jedoch kurz vor Beginn eines in situ Tests beendet. Im Folgenden werden die anfänglich genannten drei Konzepte hinsichtlich getroffener Annahmen und Randbedingungen näher betrachtet. Eine Wertung hinsichtlich der Umsetzbarkeit der Konzepte bzw. einzelner Konzeptbestandteile erfolgt in den Kapiteln dabei nicht.

3.2.2 Konzept aus Schweden von der SKB: Very Deep Holes

Das Konzept „Very Deep Holes“ (VDH) wurde Ende der 80er Jahre und Anfang der 90er Jahre von der schwedischen Endlagergesellschaft Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) entwickelt. Es wurde jedoch im Vergleich zum schwedischen KSB-3-Konzept (Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe in einem Bergwerk) als teurere Endlagervariante mit größeren technologischen Unsicherheiten angesehen und daher nicht weiterverfolgt. (SKB, 2010), (SKB, 1992)

Im VDH-Konzept ist eine von der Geländeoberfläche ausgehende, vertikale, vier Kilometer tiefe Bohrung im Kristallin mit einem Enddurchmesser von 80 cm vorgesehen. Die Bohrung sollte mittels konventioneller Tiefbohrtechnik der Öl- und Gasindustrie hergestellt und mit einem perforierten Casing ausgebaut werden. Als Material für den Ausbau wurde eine Bronzelegierung präferiert, um Korrosionsprozesse zu mindern. Die Behälter sollten einen Durchmesser von 50 cm und eine Länge von etwa fünf Metern haben und aus Titan bestehen, wobei das Innere des Behälters um die radioaktiven Abfallstoffe herum mit Beton verfüllt ist (alternativ wurde auch ein Kupferbehälter betrachtet). Die Behälter sollten mittels des für die Bohrung notwendigen Bohrturmes und Bohrgestänges in eine dickflüssige Bentonitsuspension eingelagert werden. Die Bentonitsuspension sollte dabei so dickflüssig wie möglich sein und alle Zwischen- und Ringräume der Bohrung füllen. Zudem waren zwischen den Endlagerbehältern verdichtete Bentonitblöcke vorgesehen. Dabei sollte sich der Einlagerungsbereich in den unteren beiden Kilometern der Bohrung mit einem Durchmesser von 80 cm befinden, während die oberen beiden Kilometer der Bohrung mit einem Durchmesser von 100 cm als Verschlusszone dienen. Im Bereich von 1 500 m bis 500 m sollte die Verschlussstrecke ausschließlich verdichtete Bentonitblöcke enthalten. Die oberen 500 m sollten laut VDH-Konzept zunächst mit Asphalt und anschließend mit Beton verfüllt werden. Eine Rückholung bzw. Bergung der Endlagerbehälter oder ein Endlagermonitoring sind im Konzept nicht vorgesehen. In Abbildung 1 ist das schwedische VDH-Konzept bildlich zusammengefasst. (SKB, 2010), (SKB, 1992)

Nach (SKB, 2010) wird von einer Betriebszeit der laufenden Kernkraftwerke in Schweden von 50 Jahren für die Kraftwerke in Forsmark und Ringhals sowie von 60 Jahren für das Kraftwerk in Oskarshamn ausgegangen. Dies ergäbe ca. 18 000 Endlagerbehälter. Mit etwa 300 Behältern je Bohrloch müssten demnach ca. 60 Bohrlöcher hergestellt werden. Als Abstand zwischen den einzelnen Endlagerbohrungen wurden 500 m als ausreichend angesehen. (SKB, 2010), (SKB, 1992)

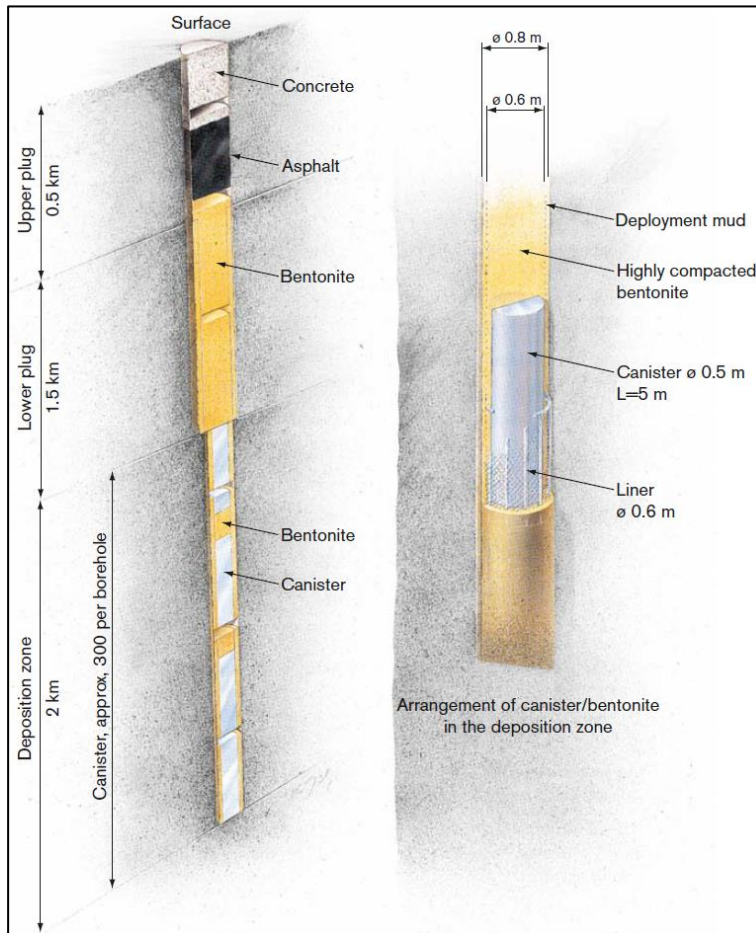


Abbildung 1: Konzept aus Schweden von der SKB: Very Deep Holes (SKB, 2010 S. 38)

3.2.3 Konzept aus den USA von den SNL: Deep Borehole Disposal

Das Konzept „Deep Borehole Disposal“ (DBD) wurde in den USA insbesondere von den Sandia National Laboratories (SNL) in den letzten ca. 10 Jahren bis hin zur Reife eines in situ Tests entwickelt, der jedoch kurz vor Beginn der Herstellung des Bohrloches eingestellt wurde.

Im DBD-Konzept ist eine von der Geländeoberfläche ausgehende, vertikale, fünf Kilometer tiefe Bohrung im Kristallin mit einem Enddurchmesser von 17 Zoll (43,2 cm) vorgesehen (siehe Abbildung 2). Die Bohrung soll mit konventioneller Tiefbohrtechnik der Öl- und Gasindustrie hergestellt und mit Linern und Casings ausgebaut werden. Im Einlagerungsbereich wird dabei ein perforiertes Casing verwendet, damit sich das Einlagerungsfluid bei der Erwärmung durch die hochradioaktiven Abfälle thermisch ausdehnen kann und es zu keinem Druckaufbau kommt (siehe Abbildung 3 auf Seite 24). Der Einbau eines Liners oberhalb des Einlagerungsbereiches soll den Vorteil bieten, dass dieser nach der Einlagerung entfernt werden und der Verschluss unmittelbar an das Gebirge erfolgen kann. Die Behälter sollen einen Durchmesser von maximal 11 Zoll (27,9 cm) und eine Länge von maximal 18,5 Fuß (5,64 m) haben. Sie

sollen aus Stahl bestehen und eine Lebenszeit von zehn Jahren besitzen. Aufgrund der Behälterabmessungen mit einem Durchmesser von maximal ca. 28 cm und einer Länge von maximal ca. 5,6 m (Innenlänge: ca. 5 m) lassen sich in diesen verschiedene Abfallformen unterbringen. So könnte der Behälter beispielsweise 367 Druckwasser-Reaktor Brennstäbe von amerikanischen Leistungsreaktoren fassen (entspricht 137 % eines Standard 17 x 17 Druckwasser-Reaktor Brennelementes mit 268 Brennstäben). Zudem ließen sich verglaste Abfälle im Behälter unterbringen, sofern diese zuvor in die richtige Form gebracht werden (bereits bestehende amerikanische, verglaste Abfälle passen nicht in diesen Behälter). Dabei ist das DBD-Konzept besonders für kleinere Abfallformen geeignet, sodass hierfür Cäsium-Kapseln (1 335 Kapseln - CsCl) und Strontium-Kapseln (601 Kapseln - SrF₂ - maximale Länge: 55,5 cm und maximaler Durchmesser: 8,3 cm) sowie kalzinierte Abfälle (granularer Feststoff) für dieses Konzept in Frage kommen. Der Behälter (siehe Abbildung 4 auf Seite 25) besitzt an der Oberseite ein Innengewinde, in das ein Adapter mit Pilzkopfkonstruktion zum Greifen des Behälters geschraubt werden kann. An der Unterseite ist ein Außengewinde vorgesehen, an dem ein Impact-Limiter (zusammendrückbare Zylinderkonstruktion aus energieabsorbierendem Material) angebracht werden kann, der im Falle eines Behälterabsturzes den Aufprall abbremst. Zudem können durch die vorhandene Innen- und Außengewindekonstruktion mehrere Behälter zu einem Strang zusammengefügt werden. Das Konzept „Deep Borehole Disposal“ sieht eine einzelne Einlagerung der Behälter mittels eines aufgetrommelten Seils über ein Ständerwerk in eine Salzlösung als Einlagerungsfluid vor. Als Alternative wird die Einlagerung mittels Gestänge aufgeführt, bei der zugleich 40 Behälter im Strang abgelassen werden könnten. Diese Einlagerungsoption soll über einen speziellen Einlagerungsturm, der als vereinfachter Bohrturm verstanden werden kann, oder den Bohrturm selbst erfolgen. (Arnold, et al., 2011), (Arnold, et al., 2012), (SNL, 2015), (SNL, 2016)



Abbildung 2: Konzept aus den USA von den SNL: Deep Borehole Disposal (SNL, 2015 S. 1-2)

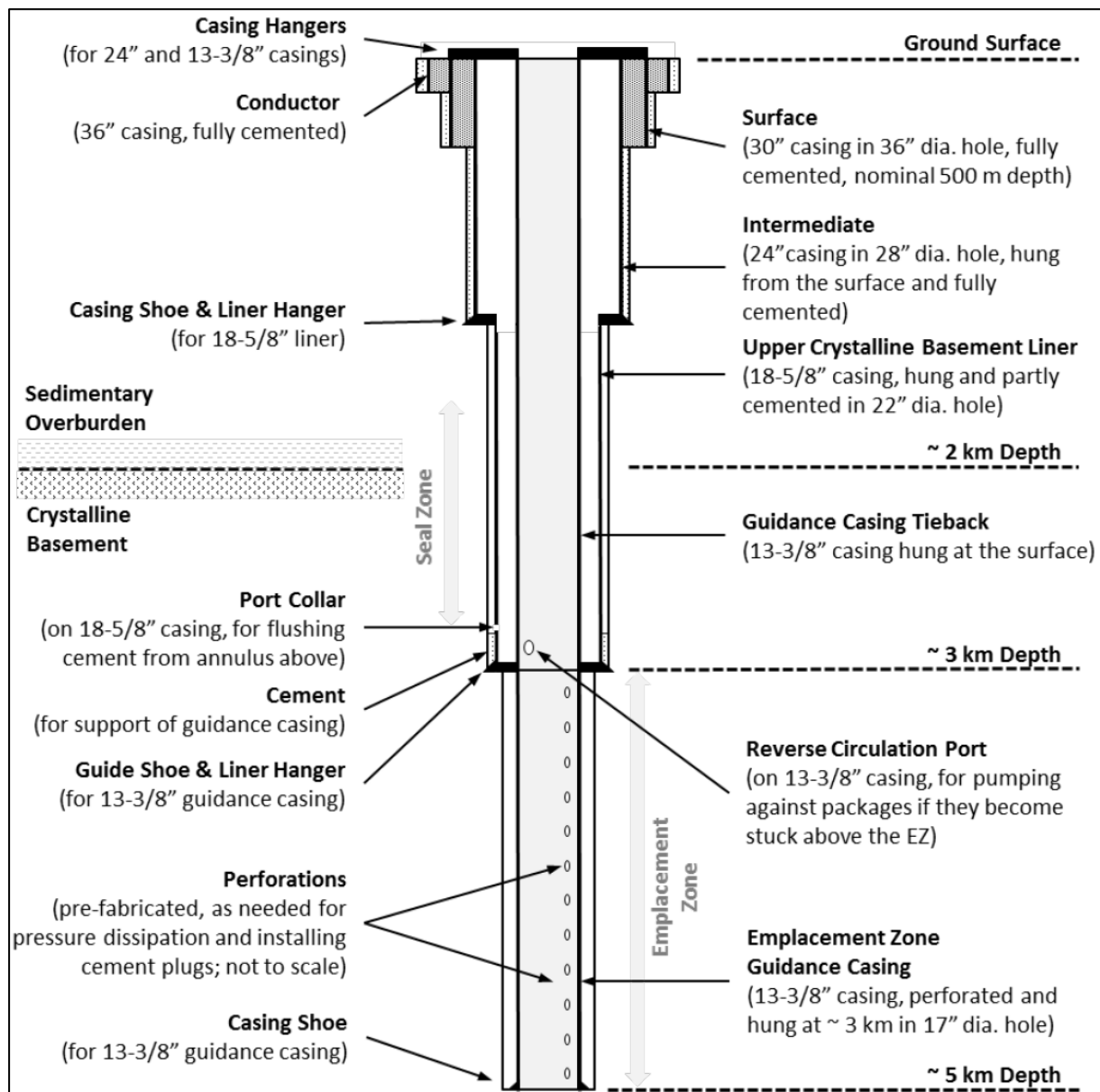


Abbildung 3: Verrohrungsschema des amerikanischen DBD-Konzeptes (SNL, 2016 S. 3-4)

Nach Abschluss der Einlagerung soll das Bohrloch auf den oberen 3 000 m verfüllt und verschlossen werden. Als Kriterium für den Verschluss wird im Konzept eine erforderliche Gesamtdurchlässigkeit (Permeabilität) von weniger als 10^{-16} m^2 angegeben. Für das Bohrlochabdichtungssystem werden abwechselnde Schichten von verdichtetem Bentonit, Zement und Sand-Schotter-Verfüllung vorgeschlagen, wie dies in Abbildung 2 auf Seite 23 dargestellt ist. Dabei wird die Verschlussstrecke in zwei Bereiche eingeteilt: in den ersten 1 000 m über dem Einlagerungsbereich (Tiefe: 2 000 m bis 3 000 m) werden die Liner gezogen, sodass die Verschlussmaterialien unmittelbar in Kontakt mit dem Gebirge stehen. Im Bereich von der Geländeoberfläche bis in 2 000 m Tiefe werden die Casings und deren Zementationen erhalten und nur der Bereich innerhalb der Bohrung mit Verschlusselementen versehen. Eine Rückholung der Endlagerbehälter und ein Endlagermonitoring werden im Konzept als realisierbar ausgewiesen. Eine Bergung der Endlagerbehälter ist nicht vorgesehen. Für eine Rückholung oder zur Havariebewältigung (beispielsweise Feststecken eines Behälters oder Reißen des Seiles) besitzt der Behälter am oberen Adapter „Fishing Overshoot Latch Points“ (siehe Abbildung 4), an denen der Behälter aus dem Bohrloch gezogen werden kann. (Arnold, et al., 2011), (Arnold, et al., 2012), (SNL, 2015), (SNL, 2016)

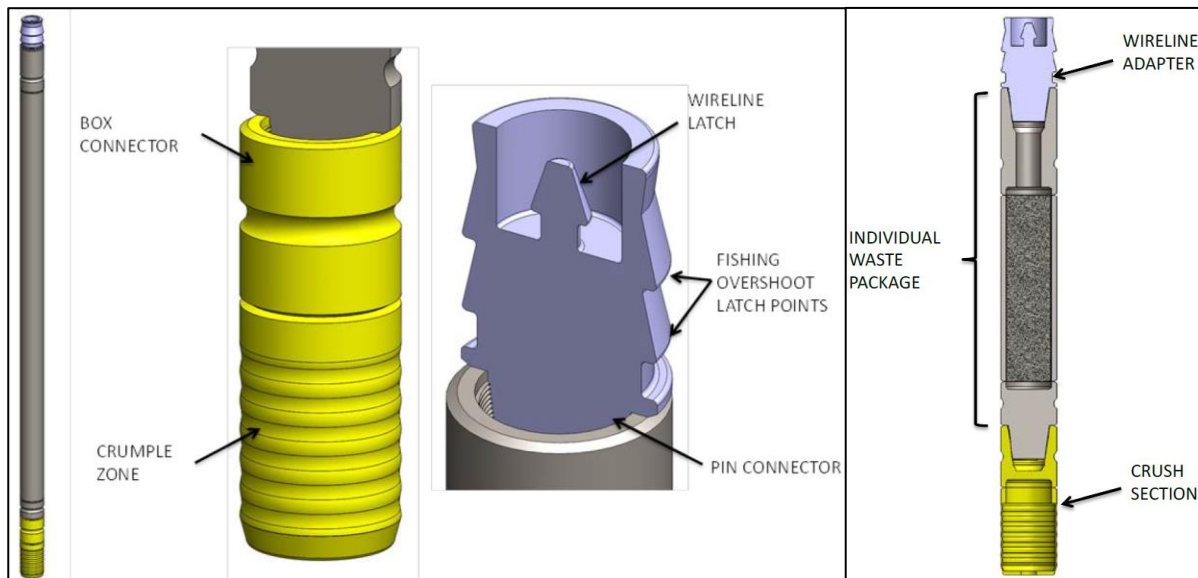


Abbildung 4: Behälter des amerikanischen DBD-Konzeptes mit zugehörigen Adaptern (nicht maßstäblich) (SNL, 2015 S. 2-58 und 2-59)

Auf Basis der im Jahr 2011 in den USA existenten Kernreaktorflotte wurde das zu entsorgende Abfallinventar abgeschätzt. Damit ergeben sich für das Konzept „Deep Borehole Disposal“ ca. 280 000 Endlagerbehälter. Mit etwa 400 Behältern je Bohrloch müssten demnach ca. 700 Bohrlöcher hergestellt werden. Als Abstand zwischen den einzelnen Endlagerbohrungen werden 50 m im Bohrlochtiefsen als ausreichend angesehen. (Arnold, et al., 2011)

3.2.4 Konzept aus Deutschland von der GRS: Tiefe Bohrlöcher

In Deutschland wurde ein Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung hochradioaktiver Abfallstoffe („Tiefe Bohrlöcher“) von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Jahr 2016 im Auftrag der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ erstellt (siehe (Bracke, et al., 2016)) und im Folgejahr erweitert (siehe (Bracke, 2017)). In Deutschland wird die Endlagerung hochradioaktiver Abfallstoffe in einem Endlagerbergwerk favorisiert. Dennoch soll die Idee der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gemäß der Empfehlung der Endlagerkommission im Ausland weiter beobachtet werden. (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016)

Im Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ ist wie im amerikanischen DBD-Konzept eine von der Geländeoberfläche ausgehende, vertikale, fünf Kilometer tiefe Bohrung im Kristallin vorgesehen, jedoch mit einem Enddurchmesser von 90 cm, wobei Abwandlungen des Konzeptes eine maximale Einlagerungsteufe von etwa 3 500 m mit einem Enddurchmesser von ca. 75 cm vorsehen. Zudem existieren Überlegungen zu Zwischenstufen. Für die Herstellung der Bohrung soll zunächst konventionelle Tiefbohrtechnik der Öl- und Gasindustrie angewendet werden. Die Bohrung soll mittels Casing und Linern ausgebaut werden. Als Endlagerbehälter wurde der nicht selbstabschirmende Behälter DBC-R (Deep Borehole Container - Retrievable) entwickelt. Die Durchmesser des DBC-R variieren je nach Tiefe des Einlagerungskonzeptes aufgrund unterschiedlicher Belastung und folglich unterschiedlicher Wandstärke zwischen etwa 75 cm (für die Einlagerungsteufe bis 5 000 m) und ca. 55 cm (für die Einlagerungsteufe bis 3 500 m). Als geeignete Werkstoffe für den Behälter werden austenitische Stähle mit einer hohen Kollaps- und Korrosionsfestigkeit angesehen. Die Länge des Behälters von etwa 5,6 m und der zur Befüllung zur Verfügung stehende Innendurchmesser von 43,5 cm ist für alle Einlagerungstiefen identisch. Für die Behälterlänge war die Länge der Brennstäbe auslegungsbestimmend. Damit ist eine Befüllung mit Brennstäben von drei Druckwasser-Reaktor Brenn-

elementen (DWR-BE), neun Siedewasser-Reaktor Brennelementen (SWR-BE) oder 7,5 Wasser-Wasser-Energie-Reaktor Brennelementen (WWER-BE) möglich. Weiterhin eignet sich der Behälter für eine Befüllung mit drei HAW-Kokillen vom Typ CSD-V, CSD-B oder CSD-C, so dass die wesentlichen hochradioaktiven Abfallstoffe in diesem Behältertyp endgelagert werden könnten. Der Entwurf des Behälters sieht am oberen Ende eine Pilzkopfkonstruktion vor, mit der der Behälter gegriffen werden kann. Die Pilzkopfkonstruktion ist für die Einlagerung sowie eine mögliche Rückholung vorgesehen. Das Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ sieht eine Einlagerung der Behälter über den Bohrturm oder eine Dreibeinstruktur mittels Gestänge und gleichzeitiger Seilsicherung in ein Schutzfluid vor. Für den gesamten Einlagerungsprozess wird dabei von einer kompletten Einhausung der Einlagerungstechnik ausgegangen. (Bracke, et al., 2016), (Bracke, 2017)

Nach Abschluss der Einlagerung soll das Bohrloch verschlossen werden. Die Länge der Verschlussstrecke hängt vom Einlagerungskonzept (Einlagerungshorizont) ab und beträgt 1 500 m bis 3 000 m. Hinsichtlich des Verschlusses wird darauf verwiesen, dass die zur Anwendung kommenden Materialien auf die lokale Lithologie und das Abdichtkonzept angepasst sein müssen. Dabei kann der Aufbau des Verschlusses ähnlich konzipiert sein wie ein Schachtverschluss bei einem Bergwerk, unter Beachtung der längeren Verschlussstrecke und dem geringeren Durchmesser. Besonderes Augenmerk kommt beim Verschluss des Bohrloches den Schlüsselzonen (Salz- und Tonformationen im Hangenden) und den Verschlussmaterialien Zement, Bentonit und Bitumen zu. Eine Rückholung der Endlagerbehälter und ein Endlagermonitoring werden im Konzept der GRS als realisierbar angesehen. Eine Bergbarkeit der Endlagerbehälter erscheint hingegen nicht möglich. (Bracke, et al., 2016), (Bracke, 2017)

Aufgrund der politischen Entscheidung in Deutschland, auf die Stromerzeugung mittels Kernenergie nach dem Jahr 2022 zu verzichten, ist das Inventar des endzulagernden hochradioaktiven Abfalls und der ausgedienten Brennelemente bekannt. Damit ergeben sich für das Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ nach GRS (Bracke, et al., 2016) ca. 11 000 Endlagergebinde vom Typ DBC-R. Mit etwa 360 Behältern innerhalb jedes 2 000 m langen Einlagerungsbereiches müssten demnach ca. 35 Bohrlöcher hergestellt werden. Als Abstand zwischen den einzelnen Endlagerbohrungen werden 50 m an der Geländeoberfläche als ausreichend angesehen. (Bracke, et al., 2016), (Bracke, 2017)

3.2.5 Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle 1 sollen die in den Kapiteln 3.2.2, 3.2.4 und 3.2.3 vorgestellten Konzepte kurz zusammenfassend gegenübergestellt werden. Es ist zu beachten, dass einige Zahlenwerte Circa-Angaben sind, da es sich bei den drei gegenübergestellten Konzepten zur tiefen Bohrlochendlagerung nicht um detaillierte Planungen handelt. Insbesondere das endzulagernde Inventar ist nicht bei allen Konzepten exakt bekannt, weshalb die Behälteranzahl und damit die Bohrlochanzahl Abschätzungen sind.

Tabelle 1: Zusammenfassende Gegenüberstellung der betrachteten Endlagerkonzepte

Konzept	„Very Deep Holes“ aus Schweden	„Deep Borehole Disposal“ aus den USA	„Tiefe Bohrlöcher“ aus Deutschland
Grundgedanke	vertikale Bohrung im Kristallin von Geländeoberfläche aus		
Untersuchungsgremium	SKB	SNL	GRS
Untersuchungszeitraum	80er / 90er Jahre	letzte ca. 10 Jahre	2016 / 2017
Tiefe Bohrung	4 000 m	5 000 m	3 500 bzw. 5 000 m
Enddurchmesser Bohrung	80 cm	43,2 cm (17 in)	75 bzw. 90 cm
Länge Einlagerungsbe- reich	2 000 m	2 000 m	2 000 m
Einlagerungsmedium	Bentonitsuspension	Salzlösung	Schutzfluid
Einlagerungstechnik	Gestänge	Seil	Gestänge
Werkstoff Behälter	Titan (Betonfüllung)	Stahl	austenitischer Stahl
Länge Behälter	5,0 m	max. 5,6 m (18,5 ft)	5,6 m
Durchmesser Behälter	50 cm	max. 28 cm (11 in)	55 bzw. 75 cm
Anzahl Behälter	18 000	280 000	11 000
Anzahl Bohrungen	60	700	35
Behälter je Bohrung	300	400	360
Mindestabstand Bohrun- gen	500 m	50 m	50 m
Verschlussmaterialien	Bentonit, Asphalt, Beton	Bentonit, Beton, Sand / Schotter	standortspezifisch
Rückholung	nicht vorgesehen	möglich	möglich
Bergung	nicht vorgesehen	nicht vorgesehen	nicht möglich
Endlagermonitoring	nicht vorgesehen	möglich	möglich

In allen Konzepten sind einzelne Konzeptbestandteile enthalten deren Realisierung bzw. fachgerechte Umsetzung von den Autoren dieses Berichtes bezweifelt wird (beispielsweise der fachgerechte Einbau verdichteter Bentonitblöcke in Tiefen von 1 500 m wie im VDH-Konzept aus Schweden von der SKB oder die Herstellung großkalibriger Bohrungen mit einem Durchmesser von 90 cm in 5 000 m Tiefe wie Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ aus Deutschland von der GRS).

3.3 Überprüfung der Konzepte auf Konformität mit dem deutschen Regelwerk

3.3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die drei in Kapitel 3.2 (ab Seite 21) betrachteten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern dahingehend untersucht, ob die darin getroffenen Annahmen und Randbedingungen gemäß den derzeit geltenden gesetzlichen Grundlagen und Verordnungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland zulässig sind.

Hierzu werden insbesondere das Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017 (siehe Kapitel 3.3.2), die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU aus dem Jahr 2010 (siehe Kapitel 3.3.3) sowie sonstige relevante Regelwerke (siehe Kapitel 3.3.4) betrachtet.

Bei einer Erörterung, ob die Konzepte für die tiefe Bohrlochlagerung von der SKB aus Schweden, den SNL aus den USA und der GRS aus Deutschland mit den in Deutschland geltenden gesetzlichen Regelungen und Anforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente konform sind, muss als erstes beachtet werden, dass die gesetzlichen Regelungen (Atomgesetz, Standortauswahlgesetz) und die Sicherheitsanforderungen des BMU alle von einer Endlagerung in einem Bergwerk ausgehen. Dementsprechend sind viele Anforderungen und Vorgaben dahingehend formuliert. Eine andere Endlageroption wird nicht betrachtet. Wenn jedoch mit der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern eine andere Endlageroption zur Diskussion steht, dann muss überprüft werden, ob die bisherigen gesetzlichen Regelungen und Anforderungen überhaupt technisch für die neue Option sinnvoll sind. Insofern müsste an sich nicht die Frage erörtert werden, inwieweit eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit den derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen und Vorgaben in Verordnungen konform ist, sondern besser die Frage, wie sinnvolle gesetzliche Regelungen und Verordnungen für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern aussehen müssten. Neueren technischen Entwicklungen (hier: Endlagerung in tiefen Bohrlöchern) folgen die gesetzlichen Regelungen nach und nicht umgekehrt. Trotzdem wird hier auftragsgemäß erst einmal erörtert, inwieweit technische Konzepte der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern von der SKB aus Schweden, den SNL aus den USA und der GRS aus Deutschland mit den derzeitigen gesetzlichen Regelungen und Anforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland konform sind.

3.3.2 Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017 (StandAG, 2017)

Im Jahr 2017 wurde auf Grundlage der Ergebnisse der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (siehe (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016)) das Standortauswahlgesetz in geänderter Fassung verabschiedet. Darin wird das Standortauswahlverfahren neu geregelt. In Deutschland kommen danach *„grundsätzlich für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht.“* (StandAG, 2017 § 1 Abs. 3)

Nach § 1 Abs. 4 des Standortauswahlgesetzes *„soll die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses erfolgen. Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.“* (StandAG, 2017 § 1 Abs. 4) Die in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sind mit dem Standortauswahlgesetz dahingehend vereinbar, dass es sich um eine Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin in tiefen geologischen Formationen handelt. Diese soll laut Gesetz jedoch in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk erfolgen. Da es sich bei einem tiefen Bohrloch nicht um ein Endlagerbergwerk handelt, ist diese Endlagerung nicht mit dem Standortauswahlgesetz vereinbar. Weiterhin fordert das Gesetz, eine Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers sowie die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem

Verschluss des Endlagers vorzusehen. Beides ist im schwedischen VDH-Konzept nicht vorgesehen und daher nicht mit den derzeit geltenden Bestimmungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland konform. Im amerikanischen DBD-Konzept und im deutschen Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ wird eine Rückholung als möglich angesehen. Die Behälterkonzepte weisen hierfür konstruktive Elemente auf, die eine Rückholung ermöglichen sollen. Eine Bergung der Endlagergebinde aus dem verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren wird jedoch auch in diesen beiden Konzepten als nicht möglich angesehen. Damit sind auch das amerikanische DBD-Konzept und das deutsche Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ nicht mit den derzeit geltenden Bestimmungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland konform.

In Kapitel 3 des Teiles 3 des Standortauswahlgesetzes sind die Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl geregelt. Hierin sind nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen zu geowissenschaftlichen Kriterien enthalten. Es wird zunächst in Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23), geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24) und planungswissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 25) unterschieden. Weiterhin sind in den Paragraphen 26 und 27 Sicherheitsanforderungen sowie Anforderungen an vorläufige Sicherheitsuntersuchungen aufgeführt. (StandAG, 2017)

Nach dem Standortauswahlgesetz ist ein Gebiet „*nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien*“ (StandAG, 2017 § 22 Abs. 1) erfüllt ist. Zu den Ausschlusskriterien zählen großräumige geogene Vertikalbewegungen (Hebung von mehr als 1 mm/a über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre), aktive Störungszonen (Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste mit Bewegungen innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre), Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit, seismische Aktivität (mit Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1), vulkanische Aktivität (zukünftig zu erwarten oder quartären Ursprungs) und der Nachweis junger Grundwässer im ewG. (StandAG, 2017)

Da sich die Ausschlusskriterien auf den Endlagerstandort beziehen und nicht konzeptspezifisch sind, widersprechen die in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepte hinsichtlich der Ausschlusskriterien der derzeitigen Gesetzeslage nicht.

Nach § 23 des Standortauswahlgesetzes werden folgende Mindestanforderungen verlangt:

- 1) eine Gebirgsdurchlässigkeit k_f von weniger als 10^{-10} m/s (wobei die Erfüllung dieses Kriteriums auch mit Hilfe überlagernder Schichten nachgewiesen werden kann),
- 2) eine Mächtigkeit des ewGs von mindestens 100 m,
- 3) eine minimale Teufe des ewGs von mindestens 300 m (bzw. tieferliegend als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkung exogener Prozesse),
- 4) eine ausreichende horizontale Ausdehnung des ewGs und der Erhalt der Barrierewirkung über eine Million Jahre, wobei keine Erkenntnisse vorliegen dürfen, die die Integrität des ewGs über einen Zeitraum von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen. (StandAG, 2017)

Da sich die Mindestanforderungen auf den Endlagerstandort beziehen und nicht konzeptspezifisch sind, kann davon ausgegangen werden, dass die in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern hinsichtlich der Mindestanforderungen gesetzeskonform sind. Die Anforderungen an die Mächtigkeit und die minimale Teufe des ewGs sind bereits konzeptbedingt in allen drei betrachteten Konzepten umgesetzt, da die Einlagerungsteufe in mindestens 1 500 m Tiefe liegt.

Anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 des Standortauswahlgesetzes) soll bewertet werden, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Dazu sind im Standortauswahlgesetz Parameter mit Grenzwerten enthalten, anhand derer die Situation von günstig bis ungünstig (bzw. weniger günstig) eingestuft werden kann. Die verschiedenen Parameter können in den folgenden elf Themenkomplexen zusammengefasst werden: Kriterium zur Bewertung:

- 1) des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG,
- 2) der Konfiguration der Gesteinskörper,
- 3) der räumlichen Charakterisierbarkeit,
- 4) der langfristigen Stabilität der günstigen geologischen Verhältnisse,
- 5) der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften,
- 6) der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten,
- 7) der Gasbildung,
- 8) der Temperaturverträglichkeit,
- 9) des Rückhaltevermögens im ewG,
- 10) der hydrochemischen Verhältnisse,
- 11) des Schutzes des ewGs durch das Deckgebirge. (StandAG, 2017)

Da es bei den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien um eine Einstufung hinsichtlich einer günstigen bzw. weniger günstigen geologischen Gesamtsituation bei einer Endlagerung in einem Bergwerk geht, müssten alle diese Kriterien erst einmal auf ihre Übertragbarkeit bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern überprüft werden. Im Rahmen einer solchen Überprüfung könnten auch neue standortspezifische Kriterien festgelegt werden, die bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sinnvoll erscheinen.

Bei den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 25), den Sicherheitsanforderungen (§ 26) sowie den Anforderungen an vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (§ 27) lassen sich keine Gesichtspunkte erkennen, die den in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepten bezüglich der Konformität mit dem derzeitigen Standortauswahlgesetz entgegenstehen. Ausnahmen stellen hierbei nur die Themen „Rückholung“ und „Bergung“ (bereits zu Beginn dieses Kapitels diskutiert) sowie die Grenztemperatur dar. Zu letzterem heißt es im Standortauswahlgesetz: *„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“* (StandAG, 2017 § 27 Abs. 4) Da bei der tiefen Bohrlochlagerung in allen drei zuvor betrachteten Konzepten die Temperatur im Einlagerungsbereich bereits infolge des geothermischen Gradienten (Annahme: 3 K / 100 m) höher als 100 °C ist, kann eine Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche des Behälters nicht eingehalten werden. Damit sind die Endlagerkonzepte zur tiefen Bohrlochlagerung aus Schweden, den USA und Deutschland streng genommen nicht gesetzeskonform mit dem derzeitigen Standortauswahlgesetz. Dies ist solange der Fall, bis durch weitere Forschungsarbeiten eine höhere Grenztemperatur im Kristallingestein zugelassen werden kann. Die neue Grenztemperatur müsste dazu deutlich über der Temperatur liegen, die natürlich an der tiefsten Stelle des Einlagerungsbereiches vorliegt. Die natürliche Temperatur in einer Tiefe von 5 000 m beträgt bereits etwa 160 °C bei einem angenommenen geothermischen Gradienten von 3 K / 100 m und einer Ausgangstemperatur an der Geländeoberfläche von ca. 10 °C.

3.3.3 Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 (BMU, 2010)

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU aus dem Jahr 2010 *„gehen von einem Endlagerkonzept aus, bei dem die radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen endgelagert werden.“* (BMU, 2010 S. 3) Dabei werden zwei wesentliche Schutzziele verfolgt. Dies ist zum einen der dauerhafte *„Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen“* (BMU, 2010 S. 8) der radioaktiven Abfälle und zum anderen die *„Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen“* (BMU, 2010 S. 9). Für beide Schutzziele wurden zudem Sicherheitsprinzipien formuliert.

Diese lassen keine Gesichtspunkte erkennen, die den in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepten zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern entgegenstehen. Der sichere Einschluss der Abfälle muss jedoch standortspezifisch nachgewiesen werden. (BMU, 2010)

Nach den Sicherheitsanforderungen sind ein „*umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen*“ (BMU, 2010 S. 12) sowie ein Nachweis der Langzeitsicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahre zu führen. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss zudem eine Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, eine radiologische Langzeitaussage, einen Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems (siehe Details hierzu in Kapitel 3.3.4 ab Seite 32) und eine Aussage zum Ausschluss von Kritikalität enthalten. Die Nachweise sind standortspezifisch für das Konzept der tiefen Bohrlochlagerung zu führen. Im deutschen und amerikanischen Konzept sind Ansätze hierfür enthalten. (BMU, 2010)

Hinsichtlich der Endlagerauslegung sind nach Kapitel 8 der Sicherheitsanforderungen die folgenden acht Punkte relevant:

- 1) *„Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen.“* (BMU, 2010 S. 17)
- 2) *„Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 3) *„Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohrlöchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 4) *„Die Handhabung von Abfallgebinden ist möglichst vollständig von den z. B. für Erhalt, Auffahrung oder Versatz von Stollen erforderlichen bergmännischen Arbeiten zu trennen.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 5) *„Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 6) *„Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten. In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 7) *„Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen.“* (BMU, 2010 S. 18)
- 8) *„Vor Inbetriebnahme des Endlagers muss ein umsetzbares und geprüftes Stilllegungskonzept vorliegen.“* (BMU, 2010 S. 19)

Für alle in Kapitel 3.2 betrachteten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern stellt die Forderung unter Punkt 2 eine Herausforderung für das Konzept dar, weil es anders als bei einem Bergwerk nicht zwei (bei einer 2-Schachthanlage), sondern mehrere Durchörterungen der dichten überlagernden Schichten gibt. Es besteht jedoch die Möglichkeit Erkundungsbohrungen zu einer Einlagerungsbohrung aufzuwältigen und damit die Anzahl der Durchörterung des ewGs zu minimieren. Zudem hat das Konzept der tiefen Bohrlochlagerung den Vorteil,

dass die Abfälle wesentlich weiter von der Biosphäre entfernt und die Bohrlochverschlüsse prinzipiell länger sind als bei einem Schachtverschluss bei einem Bergwerk sind.

Die Forderung von Punkt 3 hinsichtlich der Tiefenlage des ewGs wird mit der tiefen Bohrlochlagerung konzeptbedingt sehr gut erfüllt.

Die Forderungen unter Punkt 4 ist bereits konzeptbedingt umgesetzt, da die Herstellung der Bohrung zeitlich vor der Einlagerung der Abfallgebinde erfolgen muss, sodass tiefbohrtechnische / bergmännische Arbeiten und Einlagerungsarbeiten am selben Bohrloch nicht gleichzeitig möglich sind. Ebenso kann der Verschluss des Bohrloches erst erfolgen, nachdem die Einlagerung an einem Bohrloch vollständig abgeschlossen ist. Damit sind die Arbeiten, die in Verbindung mit der Handhabung von Abfallgebinden einhergehen und Arbeiten, die mit dem Abteufen und dem Verschluss des Bohrloches im Zusammenhang stehen, bezogen auf das selbe Bohrloch stets voneinander getrennt. Die Einlagerung an einem Bohrloch bei gleichzeitiger Herstellung einer anderen Einlagerungsbohrung ist jedoch möglich.

Auch die Forderung von Punkt 5 ist bereits konzeptbedingt eingehalten, da in allen drei Konzepten mehrere Einlagerungsbohrungen notwendig sind, wodurch jede Bohrung einzeln nach dem Beladen verfüllt und verschlossen werden kann.

Hinsichtlich des Punktes 6, welcher die Rückholung und die Bergung betrifft, lässt sich wie bereits beim Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017 feststellen, dass die Endlagerkonzepte zur tiefen Bohrlochlagerung aus Schweden (bezüglich Rückholung und Bergung), den USA (bezüglich Bergung) und Deutschland (bezüglich Bergung) nicht gesetzeskonform sind (bereits im vorherigen Kapitel ausführlich diskutiert - siehe Kapitel 3.3.2 ab Seite 28).

Die Forderung unter Punkt 7 zielt auf die Redundanz und Diversität der geologischen und geotechnischen Barrieren ab. Die geologischen Barrieren sind dabei standortspezifisch, während die geotechnischen Barrieren vom jeweiligen Konzept vorgegeben werden. Der Bohrlochverschluss im schwedischen VDH-Konzept ist diversitär, aber nicht redundant aufgebaut und damit nicht mit der Forderung nach Redundanz und Diversität gemäß den Sicherheitsanforderungen konform. Der Bohrlochverschluss des amerikanischen DBD-Konzeptes (siehe Abbildung 2 auf Seite 23) kann von der Konzeption als redundant und diversitär betrachtet werden. Der Aufbau des Bohrlochverschlusses im deutschen Konzept „Tiefe Bohrlöcher“ ist nicht detailliert dargelegt. Dieser soll an die lokale Lithologie angepasst und redundant und diversitär ausgebildet sein. Somit kann er mit den derzeit geltenden Bestimmungen in den Sicherheitsanforderungen des BMU in Übereinstimmung gebracht werden.

3.3.4 Sonstige relevante Regelwerke

Strahlenschutzverordnung (StrlSchV, 2017) i. V. m. Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010)

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU aus dem Jahr 2010 weisen auf die Beachtung weiterer Regelwerke hin. In Kapitel 6 der Sicherheitsanforderungen heißt es dazu: *„Für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen bei Einlagerungsbetrieb und Stilllegung des Endlagers gelten die einschlägigen Vorschriften des Atomgesetzes mit seinen Verordnungen. Dabei ist das jeweils gültige kerntechnische Regelwerk sinngemäß anzuwenden.“* (BMU, 2010 S. 11) Hiernach ist in der Betriebsphase des Endlagers der Strahlenschutz für die Beschäftigten und die Bevölkerung zu gewährleisten. Dazu sind die Vorgaben des Atomgesetzes (siehe (AtG, 2017)) und insbesondere der Strahlenschutzverordnung (siehe (StrlSchV, 2017)) zu beachten. Nach der Strahlenschutzverordnung sind beispielsweise für die *„Errichtung und den Betrieb von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“* (StrlSchV, 2017 § 2 Abs. 1 Nr. 1 Buchstabe c) Strahlenschutzbereiche einzurichten. Diese untergliedern sich in Überwachungsbereiche, Kontrollbereiche und Sperrbereiche (als Teil des Kontrollbereiches). Die entsprechenden Dosisgrenzwerte der Strahlenschutzverordnung sind zu beachten. (StrlSchV, 2017)

Die in Kapitel 3.2 analysierten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern enthalten hinsichtlich dieser Thematik keine detaillierten Betrachtungen. Im deutschen Konzept wird lediglich darauf verwiesen, dass Kontroll- und Sperrbereiche auf dem Betriebsgelände zu definieren sind. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Planungstiefe in keinem der Konzepte derart weit vorangeschritten war, dass eine gesicherte Aussage (weder positiv noch negativ) zur Einhaltung der Vorgaben der Strahlenschutzverordnung bei einer Anlage zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen Bohrlöchern möglich ist.

Sicherheitstechnische Regel KTA 3902 (KTA, 2012)

Die Sicherheitstechnische Regel KTA 3902 zur Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken schreibt vor, dass „Hubwerke entweder mit einer doppelten Triebwerkskette oder mit einer Triebwerkskette mit Sicherheitsbremse auszurüsten“ (KTA, 2012 S. 12) sind. Dies wurde in (Peiffer, et al., 2012) derart interpretiert, dass bei der Einlagerung von Abfallgebinden in vertikale Bohrlöcher eines Endlagerbergwerkes (beispielsweise Brennstabkokille (BSK-3) am Seil) eine zweite Sicherung (beispielsweise ein zweites Seil) vorhanden sein muss, um im Versagensfall einen Absturz des Endlagergebundes zu verhindern. Dies ist jedoch nur im Konzept aus Deutschland von der GRS explizit berücksichtigt, sodass die beiden Konzepte aus Schweden und den USA nicht mit den derzeit geltenden Bestimmungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland in Übereinstimmung gebracht werden können. Im schwedischen Konzept soll die Einlagerung in eine Bentonitsuspension erfolgen, die so dickflüssig wie möglich ist. Unterstellt man hier, dass die Suspension derart dickflüssig ist, dass ein Absturz eines Endlagergebundes überhaupt nicht möglich ist, wäre keine zweite Sicherung notwendig und das schwedische VDH-Konzept damit „regelkonform“. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in Schweden und in den USA derartige Regelungen, wie die des KTA, nicht existieren, weshalb in den Konzepten auch keine zweite Sicherung enthalten ist. Diese könnte jedoch in beiden Konzepten vorgesehen werden.

Sicherheitskriterien (BMI, 1983) i. V. m. Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010)

In den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk des BMI aus dem Jahr 1983 heißt es: „Bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers sind die anerkannten Regeln der Technik anzuwenden. Der Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik ist dabei ausreichend Spielraum zu geben.“ (BMI, 1983 S. 221) Zudem wird in den Sicherheitsanforderungen des BMU für technische Komponenten des Endlagersystems der Nachweis der Robustheit wie folgt gefordert (siehe auch Kapitel 3.3.3 ab Seite 30): „Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. Falls technische Barrieren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bedeutsame Sicherheitsfunktionen übernehmen und besonderen Anforderungen unterliegen und hierfür keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein. Diese Erprobung muss eine nach Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführte Qualitätssicherung beinhalten. Diese Erprobung kann entfallen, falls die Robustheit dieser Bauwerke, d.h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, anderweitig nachgewiesen werden kann oder falls Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben.“ (BMU, 2010 S. 15) Aus dem Wortlaut der Sicherheitskriterien des BMI und den Sicherheitsanforderungen des BMU lässt sich ableiten, dass für die Errichtung eines Endlagers und damit eines tiefen Bohrloches für die Endlagerung mindestens der Stand der Technik (siehe Kapitel 4 ab Seite 36) nachzuweisen ist. (BMI, 1983), (BMU, 2010)

Der Stand der Technik kann als erwiesen betrachtet werden, wenn ein Produkt bzw. ein Verfahren am Markt erworben werden kann. Weiterhin kann nach (DBE, 1994) der Stand der Technik eines Produktes bzw. eines Verfahrens nachgewiesen werden, indem eine Ausfallwahrscheinlichkeit von weniger als 0,002 (Konfidenzniveau: 90 %) belegt wird. Damit sind

1 900 Versuche mit nur einer Betriebsstörung oder 1 100 Versuche ohne Betriebsstörung hinreichend. (DBE, 1994)

Die Herstellung einer Bohrung mit einem großen Durchmesser von 75 cm bis 90 cm bis in eine Tiefe von mehreren Kilometern, wie im schwedischen VDH-Konzept oder im deutschen Konzept „Tiefe Bohrlöcher“, ist im Hartgestein nicht Stand der Technik. Dies betrifft nahezu die gesamte hierzu notwendige Bohrtechnik (Meißeldurchmesser, Verrohrungsdurchmesser, Volumenstrom der Bohrspülung, Hakenlast des Bohrturmes, ...). Im amerikanischen Konzept hingegen, mit einem geplanten Bohrlochdurchmesser von 17 Zoll, kann die Herstellung der Bohrung weitestgehend mittels technischen Komponenten und Verfahren abgedeckt werden, welche als Stand der Technik betrachtet werden können. Lediglich das Verrohrungsschema (siehe Abbildung 3 auf Seite 24) entspricht nicht der Durchmesserreihe des API-Standards, welcher als Stand der Technik betrachtet wird.

Weiterhin entspricht der gesamte Einlagerungsprozess in allen in Kapitel 3.2 analysierten Konzepten nicht dem Stand der Technik. Sämtliche übertägigen Prozesse (beispielsweise die Handhabung der Endlagergebinde oder die Einbringung der Endlagergebinde in das Bohrloch) sowie die untertägigen Abläufe (beispielsweise das Ablassen der Endlagergebinde im Bohrloch oder das Absetzen und Entkoppeln der Endlagergebinde im Bohrlochtiefsten) sind bisher nicht für den Fall der tiefen Bohrlochlagerung ausgelegt und getestet worden. In Deutschland wurde bisher lediglich eine Einlagerungsmaschine für die Einlagerung in 300 m tiefe Bohrlöcher erfolgreich in einer übertägigen Versuchsanlage getestet. (Filbert, et al., 2010) Die Einlagerungstechnik des amerikanischen DBD-Konzeptes sollte im geplanten in situ Test, dessen Programm im Jahr 2017 eingestellt wurde, erprobt werden. Damit entsprechen zahlreiche Prozesse, wie sie im schwedischen, deutschen und amerikanischen Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung nötig sind (Herstellung der Bohrung, Einlagerung der Endlagergebinde, ...), nicht dem derzeitigen Stand der Technik. Da alle drei Konzepte bisher nicht umgesetzt oder erprobt wurden, existieren zahlreiche weitere Prozesse, die ebenfalls nicht den derzeitigen Stand der Technik erfüllen, wie beispielsweise die Rückholungstechnik oder der Einbau dichter Verschlüsse in großen Tiefen in einem Fluid.

3.3.5 Zusammenfassung

Im Ergebnis der Betrachtung lässt sich feststellen, dass die derzeit geltenden gesetzlichen Grundlagen und Verordnungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland im Hinblick auf eine Endlagerung in einem Bergwerk formuliert sind. Alle in Kapitel 3.2 aufgeführten Konzepte zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern enthalten auch Annahmen und Randbedingungen, die nicht mit den derzeit geltenden gesetzlichen Grundlagen und Verordnungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Deutschland im Einklang stehen, da die gesetzlichen Grundlagen und Verordnungen nicht im Hinblick auf eine tiefe Bohrlochlagerung formuliert sind. Die Themenkomplexe, bei denen dies in mindestens einem Konzept der Fall ist, sind in der folgenden Tabelle 2 aufgeführt. Dabei lässt sich anhand des Kreuzes erkennen, bei welchem Themenbereich keine Übereinstimmung mit den Anforderungen in den derzeit geltenden Gesetzen und Verordnungen in Deutschland besteht bzw. anhand des Hakens, welcher Themenbereich im jeweiligen Konzept die Anforderungen aus den derzeit geltenden Gesetzen und Verordnungen in Deutschland erfüllt.

Tabelle 2: Themen, die in mindestens einem Konzept nicht rechtskonform sind

Konzept	„Very Deep Holes“ aus Schweden	„Deep Borehole Disposal“ aus den USA	„Tiefe Bohrlöcher“ aus Deutschland
Rückholung	x ¹⁾	✓	✓
Bergung	x ¹⁾	x	x
Verschlusskonzept	x	✓	✓
Grenztemperatur	x	x	x
Einlagerung (2. Sicherung)	x	x	✓
Stand der Technik	x	x	x
✓...rechtskonform x...derzeit nicht rechtskonform ¹⁾ ...im Konzept keine Aussage			

Insgesamt muss jedoch festgestellt werden, dass eine Prüfung, inwieweit einzelne Randbedingungen in den Konzepten die derzeitigen gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen in den Verordnungen erfüllen, nur eingeschränkt sinnvoll durchführbar ist. Dies liegt - wie bereits ausgeführt - daran, dass die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen in den Verordnungen im Hinblick auf eine Endlagerung in einem Bergwerk formuliert worden sind. Dementsprechend müssten erst einmal die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen in den Verordnungen sinnvoll im Hinblick auf eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern umformuliert / angepasst werden. Auch hinsichtlich des geforderten Standes der Technik wird angemerkt, dass dieser bei einem neuen, bisher weltweit noch nie getesteten Verfahren (Endlagerung in einem tiefen Bohrloch) natürlich noch nicht erfüllt sein kann, aber die Möglichkeit dazu durch erste und weitere Tests / Versuche / Bohrlöcher erreicht werden könnte.

4 Begriff - Stand der Technik

Im Bundesberggesetz fordert der Gesetzgeber bei der Festlegung von Mindestanforderungen vielfach die allgemein anerkannten Regeln der Technik. In der Allgemeinen Bundesbergverordnung hingegen wird bei den Themen Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten sowie bei der Entsorgung bergbaulicher Abfälle auf die Einhaltung des Standes der Technik verwiesen. (BBergG, 2017), (ABergV, 2016), (Rauche, 2015)

„Der Begriff Stand der Technik erlangt seine juristische Dimension als Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von technischen Methoden, Verfahren und Anlagen oder Betriebsweisen insbesondere im Umweltrecht. Die deutsche Rechtsordnung verlangt für jegliche Tätigkeiten und Handlungen die Beachtung jeweils angemessener Sorgfalts- oder Verkehrssicherungspflichten. Diese allgemeine Sorgfaltspflicht wurde 1903 durch das Reichsgericht in Leipzig als eine erste Auslegung des ab 01. Januar 1900 in Kraft getretenen Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) verabschiedet. Sie ist eine Pflicht zum Handeln oder zum Unterlassen, zum Vermeiden oder zum Vermindern von abwendbaren Gefahren für Benutzer oder Dritte.“ (Rauche, 2015 S. 22)

Für Ingenieurtätigkeiten leitet sich aus dieser Sorgfalts- und Verkehrssicherungspflicht folgendes ab: *„Wer eine Gefahrenquelle schafft, erkennt oder hätte erkennen können, hat die zum Schutze der Benutzer und unbeteiligter Dritter notwendigen und erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, um Gefahren aller Art bei bestimmungsgemäßer Verwendung vorbeugend sicher zu vermeiden.“* (Bauer, 2000 S. 1)

Zur Beschreibung der technisch notwendigen und erforderlichen Maßnahmen wird in der Bundesrepublik Deutschland in der Rechtsprechung zur Technik nach der Dreistufentheorie unterschieden in:

- 1) Allgemein anerkannte Regeln der Technik,
- 2) Stand der Technik,
- 3) Stand von Wissenschaft und Technik.

„Wer allgemein anerkannte Regeln der Technik einhält, hat die - im Einzelfall widerlegbare - Vermutung für sich, dass er das technisch Notwendige in seinem Handeln - oder Unterlassen - erfüllt hat.“ (Bauer, 2000 S. 1) Für den Einzelfall spezifizieren somit die allgemein anerkannten Regeln der Technik das technisch Notwendige. Das technisch Erforderliche wird jedoch durch den stets darüberhinausgehenden Stand der Technik differenziert. (Bauer, 2000) Damit ist zum Erfüllen der Anforderungen an die Sorgfalts- und Verkehrssicherungspflicht das Einhalten der allgemein anerkannten Regeln der Technik notwendig, aber nicht ausreichend. *„Vielmehr gilt es zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht nachzuweisen, dass der gegenwärtige Stand der Technik Berücksichtigung gefunden hat.“* (Rauche, 2015 S. 23)

Die rechtlich bindende Definition zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik hat das Bundesverfassungsgericht (BVG) in seinem grundlegenden Urteil zur Genehmigungsfähigkeit des Schnellen Brüters in Kalkar 1978 festgelegt: *„Von der Mehrheit der Fachleute anerkannte, wissenschaftlich begründete, praktisch erprobte und ausreichend bewährte Regeln zum Lösen technischer Aufgaben.“* (Bauer, 2000 S. 1)

„Nach der Definition durch das BVG geht der Stand der Technik stets über den in allgemein anerkannten Regeln der Technik ausgewiesenen hinaus und enthält das Fachleuten verfügbare Fachwissen wissenschaftlich begründet, praktisch erprobt und ausreichend bewährt.“ (Bauer, 2000 S. 1)

Der Stand der Technik wird zudem auch in Gesetzen der Bundesrepublik Deutschland definiert, wie beispielsweise im Bundes-Immissionsschutzgesetz, im Wasserhaushaltsgesetz und im Kreislaufwirtschaftsgesetz. Die Definitionen sind dabei speziell an die jeweiligen Gesetze angepasst und unterscheiden sich daher geringfügig. Im Bundes-Immissionsschutzgesetz wird der Stand der Technik wie folgt definiert: *„Stand der Technik im Sinne dieses Gesetzes ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der*

die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere die in der Anlage aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen.“ (BImSchG, 2017 § 3 Abs. 6)

Die höchste Stufe der Auswertung von externem Wissen ist der Stand von Wissenschaft und Technik. Ein derart hohes Maß der Sorgfalts- und Verkehrssicherungspflicht wird von der Rechtsordnung in der Bundesrepublik Deutschland nur für Arbeiten nach dem Atomgesetz, der Strahlenschutzverordnung und seit kurzem dem Standortauswahlgesetz gefordert. (Rauche, 2015), (Bauer, 2000), (AtG, 2017), (StrlSchV, 2017), (StandAG, 2017) „Für alle anderen Ingenieur Tätigkeiten geht dies über die üblichen Sorgfaltspflichten hinaus. Die Definition nach dem BVG: Der neueste Stand von Wissenschaft und Technik wissenschaftlich begründet, technisch als durchführbar erwiesen, ohne praktische Bewährung, öffentlich zugänglich, ohne räumliche Grenzen - weltweit.“ (Bauer, 2000 S. 1)

In Tabelle 3 sind die Definitionen des BVG zur Dreistufentheorie in der Rechtsprechung zur Technik zusammengestellt.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Dreistufentheorie in der Rechtsprechung zur Technik

	Allgemein anerkannte Regeln der Technik	Stand der Technik	Stand von Wissenschaft und Technik
von der Mehrheit der Fachleute anerkannt	✓	(x)	(x)
von Fachleuten verfügbares Fachwissen	(✓)	✓	(x)
von wenigen Fachleuten / Wissenschaftlern verfügbares Fachwissen	(x)	(x)	(✓)
wissenschaftlich begründet	✓	✓	✓
technisch durchführbar	(✓)	(✓)	✓
praktisch erprobt	✓	✓	x
ausreichend bewährt	✓	✓	x
öffentlich zugänglich	(✓)	(✓)	✓
ohne räumliche Grenzen - weltweit	(✓)	(✓)	✓
✓...trifft zu x...trifft nicht zu ()...in Definition nicht genannt, ergibt sich aber daraus			

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die allgemein anerkannten Regeln der Technik auf der untersten Stufe anzusiedeln sind. Da diese allgemein anerkannt sein müssen und hierzu ein breiter fachlicher Konsens notwendig ist, sind in diesen erst spät Neuerungen und technische Fortschritte enthalten. Dynamischer hingegen ist der Stand der Technik, welcher sich auf der zweiten Stufe befindet. Da hierbei auf eine solche Anerkennung verzichtet wird, wird technischen Neuerungen schneller zur Durchsetzung verholfen. Der Stand von Wissenschaft und Technik, der die neuesten technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse umfasst und nicht durch das gegenwärtig Realisierte bzw. Machbare begrenzt wird, ist der höchste Standard. Damit ist dieser zwar am schwierigsten zu ermitteln, dient aber dem bestmöglichen Grundrechtsschutz, weshalb dieser für Arbeiten im Zusammenhang mit der Kernenergie gefordert wird. (Wikipedia, 2017)

5 Geologie

5.1 Allgemeines

Zu den potentiellen Wirtsgesteinen für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und radioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Gesteinsformationen in Deutschland zählen Salzgesteine, Tongesteine und Kristallingesteine. Als Kristallin werden im Allgemeinen magmatische und metamorphe Gesteine beschrieben, sie zeichnen sich im Sinne der Endlagerung im unverwitterten oder angewitterten Zustand durch eine hohe Festigkeit sowie durch geringe Temperaturempfindlichkeit aus. Aufgefahrene Hohlräume sind bei geringer Klüftigkeit des Gebirges weitgehend stabil und auch über lange Zeit standfest. Der Einlagerungsbereich in tiefen Bohrlöchern für die Endlagerung der radioaktiven Abfallstoffe soll in kristallinem, standfestem Grundgebirge liegen. Eine Gliederung des Gebirges in Stockwerke (Grundgebirge, Deckgebirge und quartäre Lockersedimente) ist typisch, da diese jeweils deutlich unterschiedliche petrophysikalische und lithologische Eigenschaften besitzen. (Reinhold, et al., 2013) Als Grundgebirge werden aus Gebirgsbildungen (Orogenesen) hervorgegangene, daher gefaltete und zum Teil metamorphe und magmatische Gesteinskomplexe, meist präkambrischen bis paläozoischen Alters (4600 bis 225 Millionen Jahre alt) bezeichnet, die von sedimentären Schichten (Deckgebirge) diskordant (über und unter der Diskordanzfläche lagernde Schichten liegen nicht parallel zueinander) überlagert werden. (Press, et al., 2003) Über dem Grundgebirge lagert das Deckgebirge mit weniger stark deformierten und nicht metamorph überprägten Sedimenten. Das Deckgebirge kann eine Mächtigkeit von mehreren tausend Metern aufweisen. Der Aufbau des Deckgebirges variiert durch die im Laufe der geologischen Zeiträume aufgetretenen Hebungen und Senkungen und damit verbundene Abtragung und Auftragung unterschiedlicher Sedimente. (Meschede, 2015)

„Das Grundgebirge zwischen alpidischer und variszischer Deformationsfront ist durch die variszische Orogenese letztmalig gefaltet und teilweise metamorphosiert worden. Nördlich der variszischen Deformationsfront (siehe Abbildung 5) besteht nur ein geringer Kenntnisstand über das Grundgebirge bzw. den tieferen geologischen Stockwerksbau. Nur im nördlichen Schleswig-Holstein und in der vorpommerschen Küstenregion wurde mittels Bohrungen kaledonisch deformiertes Grundgebirge unter devonischem und postdevonischem Deckgebirge nachgewiesen. Die Charakterisierung der Grundgebirgseinheiten erfolgt nach der klassischen Zonengliederung des Variszikums, die aus der unterschiedlichen tektonostratigraphischen Entwicklung abgeleitet wurde. Die unterschiedliche geologische Entwicklung führte dazu, dass die Grundgebirgsoberfläche des Moldanubikums und der Mitteldeutsche Kristallinzonen besonders durch das Vorkommen von hochmetamorphen und magmatischen Einheiten gekennzeichnet ist. Das Grundgebirgsstockwerk des Saxothuringikums wird dagegen durch eine breite Gesteinspalette (Magmatite, unterschiedlich stark beanspruchte Metamorphite, intensiv gefaltete und geschieferte Ablagerungen des Präkambriums bis Unterdevons) aufgebaut. Das Rhenoharzynikum ist gekennzeichnet durch gefaltete, geschieferte und z. T. sehr schwach metamorphosierte Gesteine.“

Durch Bohrungen konnte die Tiefenlage des verdeckten Grundgebirges von Deutschland fixiert werden. Ausgehend von diesen Fixpunkten erfolgte die Konstruktion der Grundgebirgsoberfläche unter Berücksichtigung bedeutender Störungszonen und Strukturen. In Gebieten mit geringen bzw. fehlenden Informationen zur Tiefenlage der „Kristallin - Oberfläche“ (z. B. Norddeutsches Becken) sind Arbeiten mit indirekter Ableitung (z. B. Potentialfeldmessungen) verwendet worden. Den Anforderungen an kristalline Endlager-Wirtsgesteine werden von den Gesteinen des Grundgebirges prinzipiell besonders Plutonite und hochmetamorphe Gesteine gerecht. Sie sind neben den anstehenden Vorkommen besonders aus dem verdeckten Moldanubikum und der Mitteldeutschen Kristallinzonen bekannt. Weiterhin kommen Intrusivgesteine im Bereich der verdeckten Grundgebirgsoberfläche vom Saxothuringikum und Rhenoharzynikum vor. In Norddeutschland verdeutlicht ein Modell zur Tiefenlage des „magnetisch wirksamen Kristallins“ die hier zu erwartende extrem große Tiefenlage der „Kristallin - Oberfläche“. Die „Kristallin - Oberfläche“ wird, neben lokal auftretenden permokarbonen Ablagerungen, durch die klastischen Sedimente des Buntsandsteins bedeckt. Südlich der Verbreitungsgrenze

des Buntsandsteins wird das Grundgebirge sukzessive von Ablagerungen des Muschelkalkes bis zum Malm bedeckt.“ (Reinhold, 2005 S. 75 - 76)

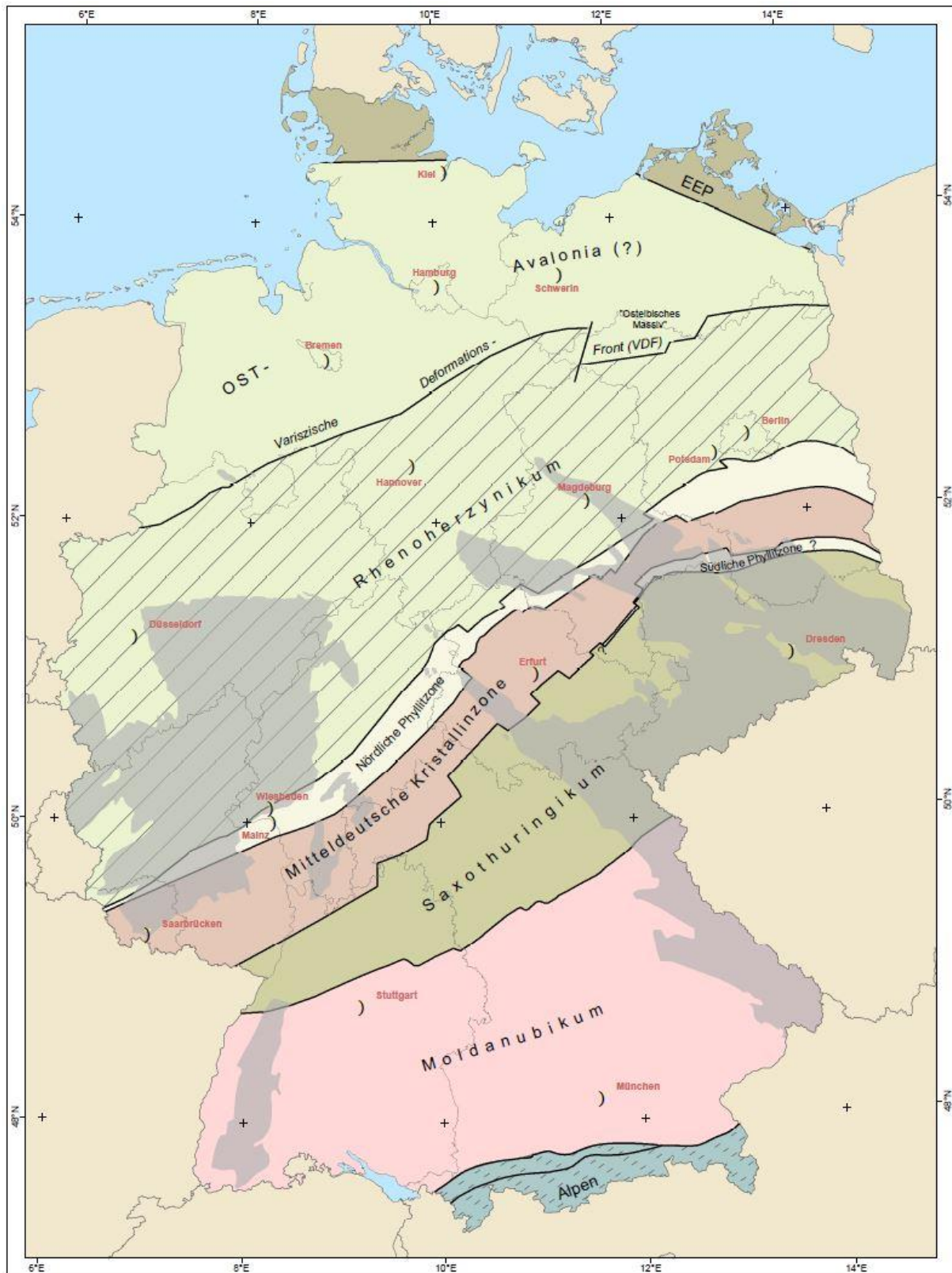


Abbildung 5: Übersicht der tektonostratigraphischen Einheiten des Grundgebirges in Deutschland, in grau dargestellte Flächen zeigen anstehendes Grundgebirge inklusive anstehendem Rotliegend (Reinhold, 2005)

Die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges ist in Deutschland demnach in unterschiedlichen Teufen anzutreffen. Teilweise streicht es zu Oberfläche hin aus (z. B. Erzgebirge, Bayerischer Wald, Schwarzwald) und in anderen Bereichen (norddeutsches Becken) taucht es so weit ab, dass es bisher durch Bohrungen nicht flächendeckend erschlossen wurde und die Darstellung der Oberfläche mit Hilfe indirekter Ableitung erstellt wurde. Weiterhin hat auch die Entstehung des Grundgebirges je nach Region eine andere Historie. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Parameter des Grundgebirges je nach Standort unterscheiden und individuell bewertet werden müssen. Auch der Aufbau des Deckgebirges unterscheidet sich je nach Standort und muss auf eine Eignung für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfallstoffen geprüft werden. Um die Eignung einer Geologie bewerten zu können, müssen entsprechende Anforderungen formuliert werden.

5.2 Anforderungen an die geologischen Verhältnisse an einem möglichen Standort

Für die Option einer Einlagerung radioaktiver Abfallstoffe in tiefen Bohrlöchern wird das Grundgebirge ab einer Teufe von 3 000 m angenommen. Den für die Einlagerung günstigen Eigenschaften (siehe Kapitel 5.1 Allgemeines ab Seite 38) steht die Durchlässigkeit der Gesteine durch Klüfte entgegen. Ein sicherer Einschluss kann demnach nur durch entsprechende überlagernde abdichtende Schichten gewährleistet werden. Die Bohrungen, die die abdichtenden Schichten durchörtern, müssen durch technische Barrieren (dichte Bohrlochverschlüsse) abgedichtet werden. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird folglich nicht vordergründig durch das Grundgebirge gebildet, in welchem die Endlagerung stattfindet, sondern durch die überlagernden Schichten des Deckgebirges. Um einen ausreichend sicheren Einschluss zu gewährleisten, wird zu diesem Zeitpunkt davon ausgegangen, dass es abdichtende Schichten über dem Einlagerungshorizont in hinreichender lateraler Ausdehnung geben muss. Dazu zählen mindestens eine ausreichend mächtige Tongesteinsformation und auch mindestens eine ausreichend mächtige Salzgesteinsformation. Das Vorkommen von Tongestein- und Salzgesteinsformationen verbindet die Vorteile der beiden Gesteine wie geringe Permeabilität, Verformungsverhalten und Sorptionsvermögen.

Die Deckgebirgsschichten stammen aus den unterschiedlichen Erdzeitaltern und sind in Deutschland unterschiedlich ausgeprägt.

Für die Abschätzung eines möglichen Aufbaus eines Einlagerungsbohrloches sowie für ein Verschlusskonzept für ein tiefes Bohrloch wurden aus der Fachliteratur (unter anderem (BGR, 2014), (BGR, 2007), (Prof. Schreiber, et al., 2015), (Reinhold, 2005), (Reinhold, et al., 2014), (Reinhold, et al., 2013), (SGD, 2012), (Heunisch, et al., 2017)) beispielhafte geologische Verhältnisse als Referenz (generische „Referenzgeologie“) angenommen (geologisches Profil 1 - Abbildung 6), wie sie für die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern bevorzugt würden und deren Ausprägung in ähnlicher Weise in Teilen Deutschlands wahrscheinlich ist. Die anstehenden geologischen Verhältnisse müssen jedoch standortspezifisch erkundet werden und mit den als Referenz angenommen geologischen Verhältnissen verglichen werden.

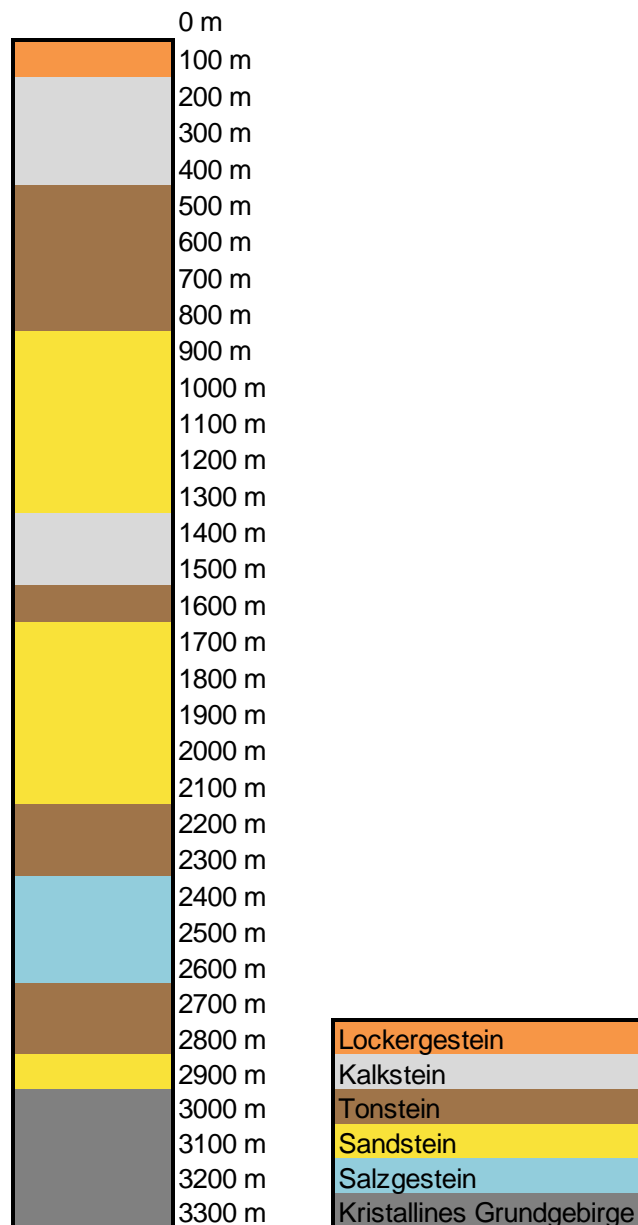


Abbildung 6: Geologisches Profil 1: Generische Referenzgeologie für die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern

Alternativ dazu wurde eine stark vereinfachte geologische Situation betrachtet (generisches geologisches Profil 2 - Abbildung 7), wie sie in Deutschland angetroffen werden könnte.

Im Deckgebirge des geologischen Profils 2 kommen keine mächtigen Tonsteinschichten vor. Allerdings gibt es ausreichend mächtige Salzfolgen, die sich in flacher Lagerung erstrecken. Auf die Zechsteinschicht des geologischen Profils 2 folgen mächtige Sandsteine und Schieferferte des Buntsandsteins. Darauf folgen die Ablagerungen des Muschelkalks, der recht gleichmäßig verbreitet ist. Auf die Ablagerungen des Muschelkalks folgen zumeist erdneuzeitliche Sedimente. Das kristalline Grundgebirge steht im geologischen Profil 2 in Teufen von ca. 1 000 m bis 2 500 m an.

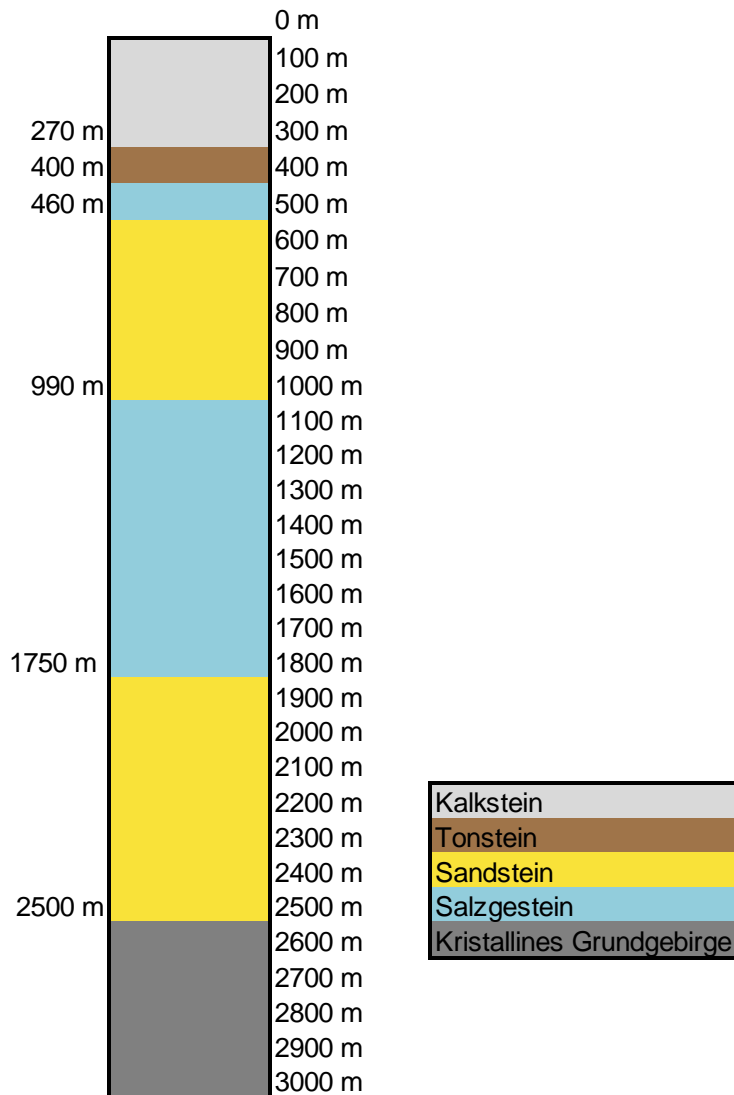


Abbildung 7: Geologisches Profil 2: Stark vereinfachtes generisches Profil aus einer Region in Deutschland

Standorte, an denen das Grundgebirge bereits zwischen 1 000 m bis 1 500 m Teufe ansteht, sollten für die Betrachtung der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ausgeschlossen werden, da hier auch durchaus die Errichtung eines Endlagerbergwerkes möglich und sinnvoll wäre.

5.3 Wissensstand zu geologischen Verhältnissen im angestrebten Einlagerungshorizont

Die Informationen über den tiefen Untergrund setzen sich aus Kartierungen von Tiefbohrungen sowie geowissenschaftlichen Erkundungsdaten von der Erdoberfläche zusammen. Deutschland ist lückenlos kartiert, allerdings ist die Informationsdichte und -qualität für eine Untersuchung für bestimmte Nutzungsvarianten insgesamt „*selektiv, inhomogen, unscharf, inkonsequent und unzureichend*“ (SGD, 2012). Nur wenige Bohrungen erreichen Tiefen von mehr als 800 m und die meisten der Tiefbohrungen sind mehrere Jahrzehnte alt. Durch den begrenzten wirtschaftlichen Nutzen einer Untersuchung des tieferen kristallinen Grundgebirges ist der Wissensstand gerade des kristallinen Grundgebirges limitiert und differenzierte Informationen

liegen nur aus begrenzten Gebieten vor. Unter Anwendung geologischer Mindestanforderungen kann jedoch durchaus eine Standortauswahl getroffen werden, die je nach Region und Informationsgrad die Anwendung differenzierter Kriterien erlaubt oder weitere Erkundungen erforderlich macht. (BGR, 2014)

Bisher wurden insbesondere zur Endlagerung geeignete kristalline Wirtsgesteine mit einer sedimentären Überdeckung kleiner 1 000 m ermittelt, welche für ein Endlagerbergwerk in Frage kommen würden. Ob geeignete Standorte für tiefe Bohrungen, welche die gestellten Anforderungen (siehe Kapitel 5.2 Anforderungen an die geologischen Verhältnisse an einem möglichen Standort ab Seite 40) erfüllen, vorhanden sind, wurde bisher nicht eingehender untersucht.

6 Stand der Tiefbohrtechnik

6.1 Einleitung

Bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts wird nach Öl und Gas gebohrt. Seit dieser Zeit kann von der Tiefbohrtechnik als eigenständiges technisches Arbeitsgebiet gesprochen werden. Als Tiefbohrung werden generell Bohrungen bezeichnet, bei denen das Antreffen von Kohlenwasserstoffen nicht ausgeschlossen werden kann. Auch tiefe Geothermiebohrungen werden deshalb als „Tiefbohrungen“ niedergebracht, das heißt, dass sowohl die Bohrmannschaft als auch die eingesetzte Technologie jederzeit auf das Antreffen unerwarteter Kohlenwasserstoffe vorbereitet ist. Eine generelle Definition für Tiefbohrungen, welche die Teufe oder den Durchmesser einbezieht, gibt es nicht.

In der Tiefbohrtechnik hat sich das Rotary-Bohren als meist verbreitetes Verfahren durchgesetzt. Die dabei eingesetzten Technologien wurden 1901 immer an die speziellen Verhältnisse und Zielstellungen einer Bohroperation angepasst und stetig weiterentwickelt. Dies geschah oftmals durch ein Zusammenspiel aus Erfindungsgeist und Erfahrung direkt auf der Bohrlokation. Die existierenden und meistzitierten Standards in der Tiefbohrtechnik sind die Richtlinien des American Petroleum Institute (API). Diese fassen das standardisierte Equipment und die Verfahren für das Abteufen von Tiefbohrungen zusammen. Die API-Richtlinien wurden nicht unter streng wissenschaftlichen Gesichtspunkten erarbeitet, sie sind eher als ein bewährter Erfahrungsschatz entstanden und zu verstehen und können daher als Stand der Technik angesehen werden. Heutzutage wird in der Branche viel Wert auf wissenschaftliche Forschung und Entwicklung gelegt und viele eingesetzte Technologien gehen deutlich über den API-Standard hinaus.

Der Stand der Technik ist in der Tiefbohrtechnik gegeben, wenn ein Werkzeug oder Verfahren kommerziell eingesetzt wird und verfügbar ist. Steht ein Service oder Equipment kommerziell zur Verfügung, so ist davon auszugehen, dass die Technologie in ausführlichen vorangehenden Prototyp- und Pilotserien bereits umfangreich erprobt ist und sich bewährt hat.

Das Abteufen einer Tiefbohrung ist ein sehr komplexer Vorgang, an dem viele verschiedene Firmen beteiligt sind. Große Ölkonzerne, wie Exxon Mobil oder BP, investieren in ein Bohrvorhaben und überwachen die Arbeiten. Die Bohranlage samt Bohrgestänge und Bohrmannschaft werden von den Ölkonzernen von einem Bohrkonzern gemietet. Alle weiteren Services und Aufgaben rund um die Bohrung werden von verschiedenen Service Firmen durchgeführt. Sie verfügen über High-Tech Equipment für diese Aufgaben. Sie entwickeln die Technologien, fertigen die Werkzeuge und bedienen und warten sie im Einsatz. Das Servicepersonal wird dafür in speziellen Schulungszentren ausgebildet. Im Fall von Bohrlochmessungen übernimmt die Servicefirma auch die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten. Zu den Aufgaben, die bei der Herstellung einer Tiefbohrung von Service Firmen übernommen werden, gehören zum Beispiel:

- Auswahl und Bereitstellung von Bohrspülung,
- Durchführung von Zementationsarbeiten,
- Einbau/Absetzen von Casings,
- Perforation von Casings,
- Bohrungsstimulation,
- Einbau von Packern u. ä.,
- Mud Logging (Überwachung des Bohrprozesses),
- Richtbohren,
- Logging while Drilling (Formationseigenschaften bestimmen),
- Coiled Tubing / Wireline-Services,

- Fishing Services,
- Fräsarbeiten.

Auch heute liegt das primäre Aufgabenfeld der Tiefbohrtechnik im Aufsuchen und in der Entwicklung und Förderung von Erdöl- und Erdgasfeldern. Da sich diese Lagerstätten in porösen und permeablen Sedimentgesteinen befinden, wurden die Bohrwerkzeuge (Meißel) für die Zerstörung solcher Formationen entwickelt und optimiert. Die Öl- und Gasbohrtechnik war und ist immer darauf bedacht Kosten zu senken, um bei sicherem Betrieb einen maximalen finanziellen Gewinn aus dem Verkauf der produzierten Kohlenwasserstoffe zu erzielen. Deshalb wird die Herstellung von Bohrungen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Förderrate mit möglichst geringen Durchmessern angestrebt (geringe Bohr- und Materialkosten) und die Lebensdauer auf die zu erwartende Nutzungsdauer angepasst. Üblich sind Bohrungsdurchmesser im Zielbereich der Bohrung von ca. 4 ¾“ bis 8 ½“ (ca. 120 mm bis 165 mm).

Die Zielrichtung der Tiefbohrtechnik, Lagerstätten im Sedimentgestein möglichst kostengünstig zu erreichen, deckt sich nicht mit den Anforderungen bei der Option einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, für die möglichst großkalibrige Bohrungen im kompakten Kristallin benötigt werden. Für Endlager-Bohrungen müssen die Verschlüsse der Bohrungen im Bereich der Dichtschichten zudem Jahrtausende lang dicht sein. Aus diesen neuen Anforderungen ergibt sich ein signifikanter Forschungsbedarf. Viele weiter unten beschriebene Forschungs- und Entwicklungsziele erscheinen durchaus lösbar, wurden aber aufgrund der bisher völlig anderen Zielrichtung der Tiefbohrtechnik von der einschlägigen Industrie noch gar nicht adressiert - weil bisher einfach kein Markt dafür vorhanden ist.

Die Tiefbohrtechnik stellt ein sehr komplexes Arbeits- und Forschungsfeld dar, welches immer offen für Weiterentwicklung und Innovation war und ist. Das Studium des Erdöl-Ingenieurs (Petroleum Engineering) wird weltweit nur an wenigen spezialisierten Universitäten angeboten. Danach findet in den Firmen eine weitere Ausbildung statt, in denen sich der Kandidat in strukturierten Trainee-Programmen von teilweise mehrjähriger Dauer als zum Beispiel Tiefbohr-, Lagerstätten- oder Produktionsingenieur spezialisieren kann. Es ist nicht möglich den Stand der Tiefbohrtechnik auf 30 Seiten umfassend zu umreißen. Im vorliegenden Bericht wird deshalb nur auf Aspekte bei der Erstellung von Tiefbohrungen eingegangen, welche für die Herstellung einer Tiefbohrung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle von Bedeutung sind. Weitere Informationen sind in der Fachliteratur zu finden.

6.2 Erkundungsverfahren bis 5 000 m Tiefe

In der Tiefbohrtechnik wurden diverse Messverfahren entwickelt, um den Bohrungsverlauf und die Gesteinseigenschaften während der laufenden Bohrarbeiten zu überprüfen, sowie die umliegende Formation zu erkunden. Im Folgenden werden die wichtigsten Messverfahren kurz vorgestellt.

6.2.1 Kontrolle des Bohrlochverlaufes

Im sogenannten **MWD (Measurement while Drilling)-Tool**, welches in Meißelnähe im Bohrstrang integriert ist, sind ein elektronischer **Kompass** und ein elektronisches **Lot** installiert, um die aktuelle Neigung und Himmelsrichtung (den Azimut) der Bohrung kontinuierlich zu bestimmen. Zusammen mit der Länge des Bohrgestänges wird aus diesen Messungen der Bohrungsverlauf berechnet.

6.2.2 Kontrolle der Bohrparameter

Zur Bestimmung der Bohrbedingungen am Bohrmeißel können verschiedene Messgeräte verwendet werden. **Drucksensoren** sind sowohl im Bohrstrang als auch im obertägigen Equipment angebracht, um die Drücke innerhalb des Bohrstranges und des Ringraumes zu überwachen. **Dehnmessstreifen** und **Beschleunigungsaufnehmer** in der Bohrgarnitur messen die Belastungen durch Axiallasten und Torsion, Vibrationen und Biegung des Bohrstranges. Außerdem ist es möglich, das Halten des Kalibers und den Durchmesser des Bohrloches mit einem **Ultraschall-Kaliber Log** zu kontrollieren.

6.2.3 Messung von Formationsparametern

Die Vermessung der Formationsparameter **während des Bohrens** wird mit sogenannten **LWD (Logging while drilling)-Tools** durchgeführt. Die Messungen erlauben es, die Bohrung anhand geologischer und geophysischer Information, die beim Bohren gewonnen wird, präzise in die erfolversprechenden Bereiche der Lagerstätte zu führen. Eine genaue Aussage über die Eigenschaften der durchbohrten Formation ermöglicht es, die Bohrung innerhalb der Lagerstätte so zu positionieren, dass eine nachhaltige und effektive Förderung der Rohstoffe gesichert wird. Dazu werden verschiedene Messgeräte verwendet. Die aufgenommenen Messkurven werden kombiniert ausgewertet, um Aussagen zum umliegenden Gestein und über die Formationsfluide machen zu können.

Die Messverfahren, welche in der Tiefbohrtechnik angewendet werden, sind speziell für die Suche nach Öl und Gas entwickelt worden und für das Abteufen einer Tiefbohrung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle nur bedingt geeignet. Dennoch werden die Verfahren im nächsten Abschnitt kurz vorgestellt.

Ein **Gamma-Detektor** misst die natürliche Radioaktivität der Umgebung. Er wird genutzt, um zwischen tonhaltigem und nicht tonhaltigem Gestein zu unterscheiden. Diese Unterscheidung ist sinnvoll, denn Tonschichten decken konventionelle Öl- und Gaslagerstätten häufig nach oben hin ab. Die Gamma Messung macht somit die obere Abdeckung der Lagerstätte sichtbar. Die Wirkungstiefe beträgt einige Dezimeter. Der Einsatz einer Gamma-Sonde könnte zur Bestimmung von Tonschichten dienen, die als Dichtschicht genutzt werden könnten.

Mit einer **Neutronensonde** (bestehend aus Emitter und Detektor) wird die Porosität des Gesteins bestimmt. Die Eindringtiefe beträgt nur wenige Dezimeter. Die Schwächung der Strahlung auf dem Weg vom Sender zum Empfänger ist ein Maß für die Porosität des Gesteins. In Verbindung mit einer **Gamma-Gamma-Sonde**, welche zur Bestimmung der Dichte der umliegenden Medien eingesetzt wird, ist es möglich, zu unterscheiden, ob die Poren mit Gas oder mit Flüssigkeit gefüllt sind. Die Wirkungstiefe des Messverfahrens ist von der Dichte der umliegenden Formation abhängig und liegt im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich. Je höher die Dichte, desto geringer die Wirkungstiefe.

Die Messung des spezifischen Widerstandes der Formation mittels **Resistivity Log** ermöglicht die Unterscheidung, ob die Poren des Gesteins Wasser oder Öl enthalten. Die Eindringtiefe dieses Verfahrens hängt von der verwendeten Frequenz der elektromagnetischen Wellen ab, welche in die Formation emittiert werden. Je höher die Frequenz, desto stärker wird das Signal gedämpft. Die Verwendung von geringen Frequenzen wirkt sich jedoch nachteilig auf die Auflösung des Verfahrens aus. Hier muss also ein Kompromiss aus einer hinreichend guten Auflösung der Messdaten und einer ausreichenden Eindringtiefe gefunden werden. Typische Eindringtiefen betragen bis zu zwei Meter. Die Gamma-Gamma-Sonde und/oder ein Resistivity Log könnte Aufschluss darüber geben, ob eventuell im bohrlochnahen Bereich befindliche Klüfte mit Gas oder Wasser gefüllt sind. (Baker Hughes, 2017). Meist werden sie aber zur Bestimmung des Öl-Wasser-Kontaktes, also zur Lokalisierung der Unterkante der Lagerstätte, verwendet.

Die Permeabilität der Formation und der Formationsporendruck können direkt mit einem **Formationsporendruckmessgerät** bestimmt werden. Dazu wird eine Saugvorrichtung vom

Bohrstrang an die Bohrlochwand gefahren und über eine Saugpumpe der Lagerstättendruck ermittelt.

Mit einer **NMR-Sonde** (nuclear magnetic resonance) ist es möglich, die bisher genannten Informationen mit einem Messgerät zu erhalten, welches ohne die radioaktiven Quellen auskommt, die in eine Neutronen- oder Gamma-Gamma-Sonde eingesetzt werden müssen. Außerdem liefert eine NMR-Messung zusätzlich die exakte Porenradienverteilung der Formation und lässt Rückschlüsse auf die Permeabilität und den Porenhalt zu. Dafür ist dieses Messgerät jedoch wesentlich teurer als die vorher genannten Sonden.

Die Reichweite der Messverfahren hängt von vielen Parametern (Bauart der Sonde, Quellstärken, Formationsparameter) ab und kann nicht pauschal angegeben werden. Die Energie für die Sensoren wird unter Tage durch im Bohrstrang integrierte Generatoren erzeugt. Die Generatoren und Sensoren sind in der Bohrung Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen sowie extremen Vibrationen und Schlägen ausgesetzt. Die Sonden müssen also hinreichend robust sein, um vor Ausfällen geschützt zu sein. Die Quellstärken der Sensoren sind der unter extremen Bedingungen bereitzustellenden Energiemenge anzupassen. Eine gute Auflösung der Messverfahren wirkt sich zudem nachteilig auf die Reichweite aus. Daher liegen die Eindringtiefen vieler Sonden im Bereich von Zentimetern bis Dezimetern.

Bei einer Tiefbohrung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle könnte mittels Bohrlochmessungen vor allem geprüft werden, ob die umliegende Formation frei von Wegsamkeiten und Klüften ist. Allerdings soll bei diesem Ansatz aber davon ausgegangen werden, dass die überlagernden Salz- und Tonschichten die Dichtschichten bzw. den ewG darstellen.

Der bohrlochnahe Bereich kann sehr genau mit dem **Georadar-Verfahren** untersucht werden. Das Georadar sendet elektromagnetische Wellen mit Frequenzen im Megahertz- bis Gigahertz-Bereich in die Formation, welche an Störungen reflektiert und durch einen Detektor wieder erfasst werden. Aufgrund der hohen Frequenzen wird eine sehr hohe Auflösung erreicht, die Eindringtiefe dieses Verfahrens beträgt allerdings nur ca. 1 m bis 2 m. Es können Klüfte mit einer Größe im Millimeter-Bereich erfasst werden. Das weitere Umfeld der Bohrung kann mit **akustischen / seismischen Messungen** untersucht werden. Diese Verfahren arbeiten mit Frequenzen von 100 Hz bis zu mehreren Kilohertz und können Reichweiten von bis zu 100 m erreichen. Auch hier muss beachtet werden, dass für eine hohe Reichweite niedrige Frequenzen benötigt werden und damit die Auflösung schlechter wird, wie es in Abbildung 8 verdeutlicht ist. Die Auflösung von akustischen / seismischen Messverfahren liegt im Bereich von mehreren Zentimetern bis einigen Metern. Durch das Platzieren von Sender und Empfänger in zwei Bohrungen, deren Abstand innerhalb der Reichweite der Sonden liegt, kann die Aussagegenauigkeit dieser Systeme durch tomographische Abbildung des zwischen den Bohrungen liegenden Bereichs erhöht werden. Falls ein noch weiter entfernt liegender Bereich um die Bohrung auf Klüftigkeit untersucht werden soll, müsste auf geeignete Verfahren der **Oberflächenseismik** zurückgegriffen werden. (Prof. Buske, 2017)

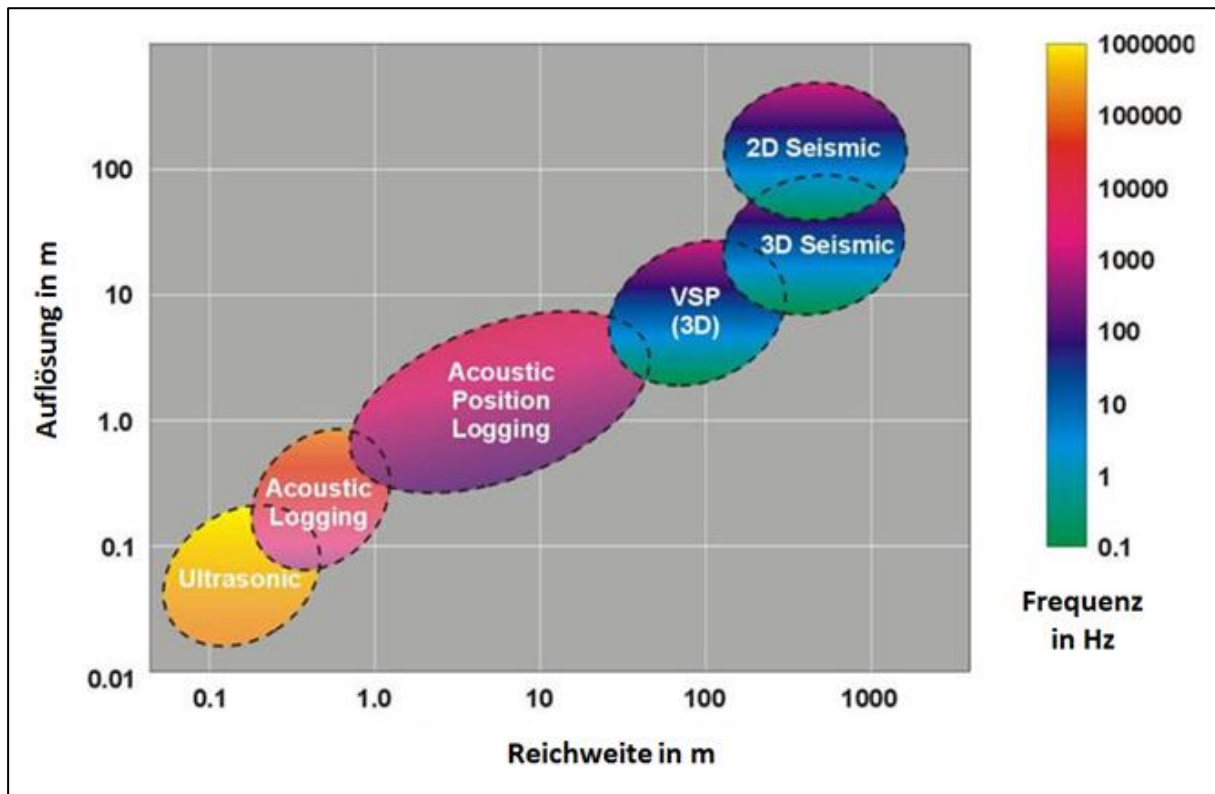


Abbildung 8: Auflösung, Reichweite und Frequenz (Bohrloch-) geophysikalischer Messverfahren (Baker Hughes, 2017)

Zu den Firmen mit der größten Kompetenz bezüglich des Einsatzes von MWD/LWD Systemen gehören die weltweit agierenden Service-Firmen der Erdöl- und Erdgasindustrie, wie z. B. Baker Hughes, Halliburton oder Schlumberger. Die am Markt erhältlichen Systeme sind für Erdöl-/Erdgasbohrungen konzipiert. Sie sind für hohe Temperaturen (Standard bis 150 °C und spezielle „High-Temp-Elektroniken“ bis 180 °C oder sogar 200 °C) und Drücken weit über 100 MPa stand. Der Außendurchmesser der Messsysteme sind an die Durchmesser üblicher Bohrstrangkomponten angepasst und liegt meist um 3“ bis 9“. (Schlumberger, 2017), (Halliburton, 2017).

Viele Service Firmen bieten auch Wireline Logging an. Hier wird das Bohrloch im Anschluss an die Bohrarbeiten mit Messgeräten befahren, die an einem Kabel ins Bohrloch eingefahren werden. Diese Messgeräte erlauben zum Teil eine noch bessere Auflösung als die Systeme, die in den Bohrstrang integriert sind. Dafür sind die Messwerte aber erst nach den Bohrarbeiten verfügbar und können nicht zur Optimierung des Bohrpfades verwendet werden. Außerdem messen Wireline-Systeme nicht im frisch aufgefahrenen Bohrloch, sondern erst einige Tage nach Beendigung der Bohrarbeiten, wenn sich an der Bohrlochwand bereits ein Filterkuchen gebildet hat und ein Fluidaustausch zwischen der Bohrung und den Poren des Gesteins erfolgt ist.

6.3 Stand der Technik für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe

6.3.1 Bohranlagen

Die für die tiefe Bohrlochlagerung vorgesehenen Bohrungen für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente müssen mit entsprechenden Bohranlagen abgeteuft werden. Bohranlage und Bohrplatz umfassen verschiedene Maschinen und Einrichtungen (u. a. Bohrturm, Gestängelager, Spülungskreislauf, Motoren- und Generatorblöcke, Büro- und Laborcontainer) sowie den dafür benötigten Stellplatz. Der Platzbedarf für den Bohrplatz beträgt ungefähr ein Hektar (Exxon Mobil Cooperation, 2017), (DTE Drilling, 2014).

Die allgemeinen Aufgaben einer Bohranlage sind das Heben und Senken von Lasten (meist Flaschenzugsystem), der rotierende Antrieb des Bohrstranges (durch Drehtisch oder Top Drive), die Bereitstellung eines Spülungsumlaufes (Bohrlochkontrolle und Bohrkleinaustrag) und die Eruptionssicherung durch den Blow-out Preventer. Der generelle Aufbau einer Bohranlage ist in Abbildung 9 dargestellt.

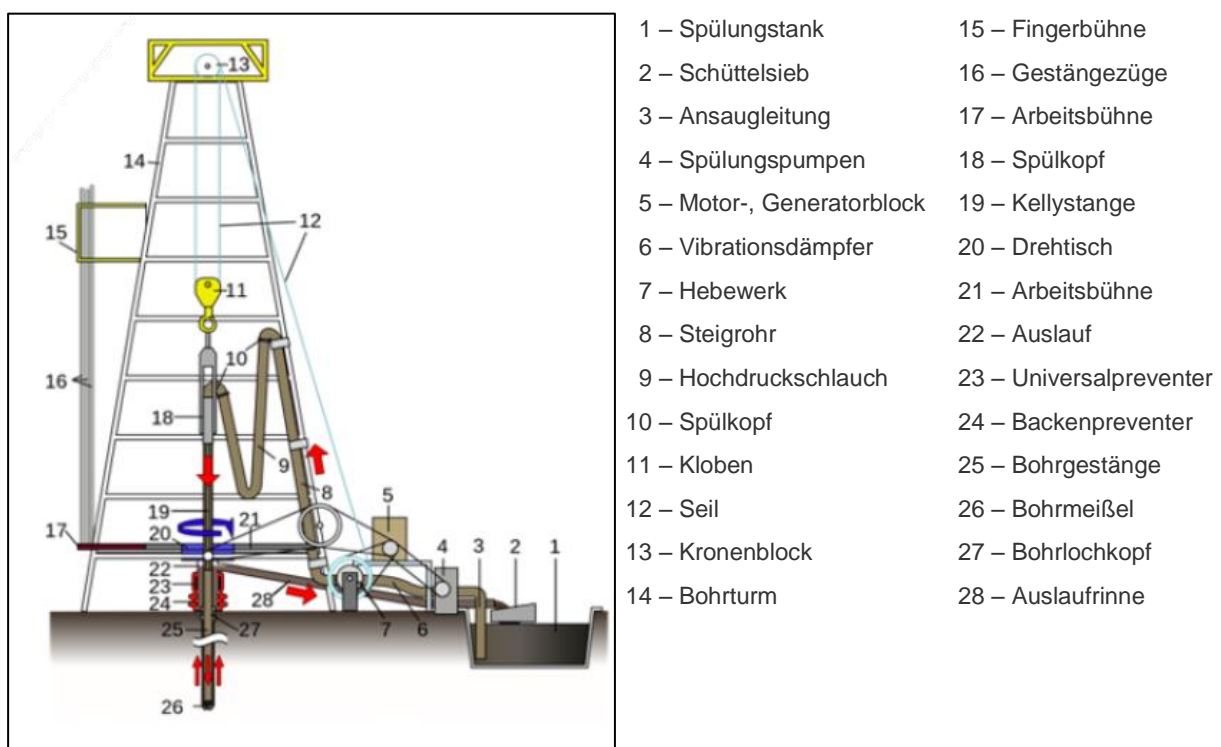


Abbildung 9: Aufbau einer Bohranlage (DTE Drilling, 2014)

In der Tiefbohrtechnik wird zuerst das Bohrungsdesign geplant, das auf der Endteufe, dem Enddurchmesser der Bohrung und dem vorhandenen geologischen Profil basiert. Damit wird die Bohrlochkonstruktion erstellt, die unter anderem den detaillierten Aufbau aller Bohrstränge, die einzubauenden Rohre und die damit verbundenen Zementationsarbeiten umfasst. Aus der Bohrlochkonstruktion ergeben sich alle zu bewältigenden Lasten, die die Bohranlage bewältigen muss. Es wird dann eine entsprechende Bohranlage ausgesucht und gemietet. Bei einer Bohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sind sehr hohe Lasten durch das Gewicht der bis zu 5 000 m langen Casingstränge mit großen Durchmessern zu erwarten. Daher müssen bei der Dimensionierung der Bohranlage vor allem die Hakenlast (Gewicht des Casingstranges muss gehalten werden) und der Drehtischdurchgang beachtet werden.

Typische Landbohranlagen für die Tiefbohrtechnik besitzen Hakenlasten von 250 t bis 350 t. Besonders große Anlagen weisen Hakenlasten von bis zu 1 000 t auf. In der folgenden Tabelle 4 sind die Parameter von drei der zurzeit größten Landbohranlagen gegenübergestellt.

Tabelle 4: Hakenlast, Tragkraft und Drehtischdurchgang verschiedener „großer“ Bohranlagen

		Rig 27 (ITAG Tiefbohr GmbH, 2017)	T-47 (KCA Deutag, 2015)	KTB (Engeser, 1996)
Masthöhe	[m]	46,3	49	83
Hakenlast	[t]	685	907	560
Top Drive Tragkraft (statisch)	[t]	454	680	-
Drehtischtragkraft (statisch)	[t]	-	-	724
Drehtischdurchgang	[“]	37 ½	37 ½	49 ½
	[m]	0,953	0,953	1,257
Mobilität		mobil	mobil	ortsgebunden

Ein weiterer begrenzender Faktor der Bohranlage hinsichtlich des Durchmessers einer Bohrung ist die Pumpenleistung der Spülpumpen. Die Bohrspülung wird kontinuierlich durch das Bohrgestänge und den Meißel zur Bohrlochsohle gepumpt. Dort nimmt sie das vom Meißel erbohrte Bohrklein auf und transportiert es bei seinem Aufstieg durch den Ringraum zur Oberfläche. Für einen ausreichenden Bohrkleinaustrag ist eine Ringraumfließgeschwindigkeit von mindestens 0,5 m/s nötig (Stober, et al., 2014). In einem großkalibrigen Bohrloch ist dafür ein erheblicher Volumenstrom und Pumpendruck erforderlich. Eine moderne und hochleistungsfähige Spülpumpe ist die TPK 2 200 von der Firma Wirth (mh wirth, 2017). Diese ist für den Einsatz auf besonders tiefen Land- und Offshore-Bohrungen konzipiert und erreicht bei einem maximalen Volumenstrom von 3 350 l/min einen Pumpendruck von 69 MPa. Es ist auf großen Bohranlagen üblich, mehrere Spülpumpen in Reihe oder parallel zu schalten, um den Druck oder Volumenstrom zu steigern. In Tabelle 5 sind die benötigten Volumenströme und Pumpendrucke zu sehen, welche zum Abteufen einer 5 000 m tiefen Bohrung mit einem Durchmesser von 42“ (106,68 cm) bzw. 17 ½“ (44,45 cm) Enddurchmesser nötig wären (für Berechnungsdetails siehe Anhang 1). Im GRS-Gutachten (Bracke, et al., 2016) wurde der Durchmesser der letzten zementierten Rohrtour im Einlagerungshorizont mit 36“ angesetzt. Um eine sichere Zementation zu gewährleisten, sollte dazu nach der API-Standard Durchmesserreihe ein 42“ Bohrabschnitt gebohrt werden.

Nach heutigem Stand der Technik kann im Hartgestein ein Bohrungsdurchmesser von 17 ½“ gebohrt werden.

Es wird von einem Bohrstrang mit einem Gestängeaußendurchmesser von 5“ ausgegangen (siehe Abbildung 17 auf Seite 59).

Tabelle 5: Volumenströme und Pumpendrucke für eine 5 000 m tiefe Bohrung mit verschiedenen Durchmessern

Bohrungsdurchmesser	42“ (106,68 cm)	17 ½“ (44,45 cm)
benötigter Volumenstrom in m³/h	1 587,6	259,2
benötigte Pumpendrucke in MPa	1 201,7	54,3

Für eine 17 ½“ Bohrung wäre der maximale Pumpendruck der TPK 2 200 ausreichend. Der benötigte Volumenstrom könnte mit einer parallel geschalteten zweiten Pumpe bereitgestellt werden. Die extrem hohen Pumpendrucke und Volumenströme, welche zur Realisierung einer 42“ Bohrung nötig wären, wären nur durch Parallelschaltung einer Vielzahl (ca. 15 bis 20 !!) von Hochleistungsspülpumpen zu erreichen.

6.3.2 Bohrmeißel

Im Folgenden wird abgeschätzt, welche Durchmesser nach dem aktuellen Stand der Tiefbohrtechnik maximal im Hartgestein gebohrt werden könnten.

Allgemeines

Die Meißel werden generell durch einen IADC-Code (**I**nternational **A**ssociation of **D**rilling **C**ontractors) gekennzeichnet, welcher Informationen über Bauart und Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich der Formation gibt.

Man unterscheidet zwischen Rollen- und PDC (**P**olycrystalline-**D**iamond-**C**ompact)-Meißeln. Rollenmeißel zerdrücken das Gestein mit ihren Zähnen, PDC-Meißel scheren das Gestein mit ihren Schneidplatten.

Zum Bohren von Hartgesteinen wie Granit kommen derzeit praktisch nur drückende Bohrmeißel, also Rollenmeißel zum Einsatz.

IADC Meißel-Klassifikation für Rollenmeißel (Gabolde, et al., 2006)

Rollenmeißel werden durch einen 4-stelligen Code gekennzeichnet. Im Folgenden werden die Bedeutungen der einzelnen Stellen (Digits) im Code erläutert.

1. Digit (Ziffer): Die erste Stelle des IADC-Codes gibt Aufschluss darüber, ob der Meißel mit Zähnen oder Warzen ausgestattet ist, sowie über die mit ihm bohrbare Formation.

Tabelle 6: IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 1

Kennziffer	Zähne oder Warzen	Formationseigenschaften
1	Stahlzähne	weiche Formationen, geringe Festigkeit, gut bohrbar
2		mittelharte Formationen, hohe Festigkeit
3		harte, abrasive Formationen
4	Wolframkarbid-Warzen	weiche Formationen, geringe Festigkeit, gut bohrbar
5		weiche bis mittelharte Formationen, geringe Festigkeit
6		mittelharte Formationen, hohe Festigkeit
7		harte, abrasive Formationen
8		extrem harte und abrasive Formationen

2. Digit (Ziffer): Die zweite Stelle im IADC-Code dient zur weiteren Differenzierung der mit dem ersten Digit beschriebenen Formation.

Tabelle 7: IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 2

Kennziffer	Differenzierung der Formation
1	sehr weiche Ausprägung der entsprechenden Formation
2	weiche bis mittelharte Ausprägung der entsprechenden Formation
3	mittelharte bis harte Ausprägung der entsprechenden Formation

3. Digit (Ziffer): Die dritte Ziffer im IADC-Code gibt Informationen zu Lager und Kaliberschutz.

Tabelle 8: IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 3

Kennziffer	Lager und Kaliberschutz
1	Standard Rollenlager
2	Luftgekühltes Rollenlager
3	Rollenlager mit Kaliberschutz
4	Geschlossenes Rollenlager
5	Druckgekapseltes Rollenlager mit Kaliberschutz
6	Geschlossenes Gleitlager
7	Druckgekapseltes Gleitlager mit Kaliberschutz

4. Digit (Buchstabe): Die vierte Stelle im IADC-Code ist optional und wird nur angegeben, wenn beim Gebrauch des Meißels Besonderheiten zu beachten sind oder eine besondere Bauweise vorliegt. Dabei wird üblicherweise nur die wichtigste Besonderheit angegeben.

Ein Beispiel für die Charakterisierung von Rollenmeißeln anhand des IADC-Codes ist in Abbildung 10 dargestellt. Rechts im Bild ist ein Rollenmeißel mit Wolframkarbid-Warzen für weiche, gut bohrbare Formationen mit geringer Festigkeit (Digit 1 = 4 und Digit 2 = 2) dargestellt. Die Rollen sind mit einem druckgekapselten Gleitlager versehen. Der Meißel ist mit Kaliberschutz ausgestattet. (Digit 3 = 7). Das „Y“ als vierter Digit steht für die konische Form der Warzen. Auf der linken Seite handelt es sich um einen Rollenmeißel mit Wolframkarbid-Warzen für mittelharte bis harte Formationen mit hoher Festigkeit (Digit 1 = 6 und Digit 2 = 3). Auch dieser Meißel besitzt ein geschlossenes Gleitlager für die Rollen und einen Kaliberschutz (Digit 3 = 7). Die Warzen sind konisch geformt (Digit 4 = Y).



Abbildung 10: Vergleich: Rollenmeißel für weichere (rechts) und härtere (links) Formationen

Welche Meißel kommen für Hartgestein in Frage?

Rollenmeißel mit IADC-Codes, bei denen der erste Digit den Kennziffern 3, (6), 7, 8 entspricht

In Tabelle 9 sind die bei verschiedenen Meißelherstellern verfügbaren **Rollenmeißel** für Hartgestein inklusive maximal erhältlichem Meißeldurchmesser und empfohlenem Andruck aufgeführt.

Tabelle 9: Rollenmeißel einiger Hersteller für Hartgestein mit max. erhältlichem Durchmesser und benötigtem Andruck

Hersteller	IADC-Code	Durchmesser		empfohlener Andruck	
		"	m	lb/inch	t
Bellwether Resources International, Inc. (Bellwether Resources International Inc., 2017)	347	12 ¼	0,311		
	837				
	737	14 ¾	0,375		
Drilbits International Pvt. Ltd. (Drilbits International Pvt. Ltd., 2017)	316	12 ¼	0,311	4 000 - 9 000	22 - 50
	317				
	326				
	327				
	737			3 000 - 6 000	17 - 33
	314	17 ½	0,445	4 000 - 9 000	32 - 71
	315				
	324				
	325				
	311				
	313				
	321				
	323				
Baker Hughes (Baker Hughes, 2017)		17 ½	0,445		

PDC-Meißel mit IADC-Codes, bei denen der erste Digit den Kennziffern 6 bis 8 entspricht

PDC-Meißel gehören im Granit noch nicht zum Stand der Technik, Hartgesteins-PDC-Meißel sind aber bei mehreren Meißelherstellern in der Entwicklung. Sie benötigen ein wesentlich höheres Drehmoment als Rollenmeißel, um einen vergleichbaren Bohrfortschritt zu erzielen. Zur Gesteinszerstörung werden bei diesem Meißeltyp Diamant-Schneidplatten genutzt. Daher sind PDC-Meißel mit großen Durchmessern vergleichsweise teuer. Andererseits besitzen sie aber keine beweglichen Teile und sind deshalb zuverlässiger und langlebiger. Ihre Anwendung im kristallinen Hartgestein wird jedoch intensiv erforscht und die Entwicklung der Meißel in diese Richtung vorangetrieben.



Abbildung 11: PDC-Meißel (Baker Hughes, 2017)

Es gibt bereits PDC-Meißel, die laut Herstellerangabe in kristallinem Grundgebirge (Hartgestein) eingesetzt werden können. Tabelle 10 zeigt ein Beispiel dafür. Die bisher realisierten Durchmesser sind aber relativ klein und entsprechen nicht den Anforderungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Tabelle 10: Durchmesser eines PDC-Meißels für Hartgestein der Firma Schlumberger

Hersteller	Durchmesser		Beschreibung
	“	m	
Schlumberger (Schlumberger, 2017)	8 ½	0,216	SHARC® für hartes, stark abrasives Gestein

Imprägnierte Diamantmeißel

In hochgradig abrasivem Gestein werden oft imprägnierte Meißel eingesetzt. Die Matrix dieses Meißeltyps (oberer, goldener Teil des Meißels in Abbildung 12) besteht aus Wolframkarbid und ist mit kleinen Diamantsplittern durchsetzt. Beim Bohrprozess werden durch Abschleifen immer wieder neue Diamantsplitter freigelegt. Der Meißel schärft sich also kontinuierlich von selbst. Bisher wurden diese Meißel nur mit Durchmessern bis 12 ¼“ hergestellt, größere Durchmesser werden in der Tiefbohrtechnik nach Öl und Gas nicht benötigt. Für Bohrungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle müssten entsprechend größere Meißel hergestellt werden.



Abbildung 12: Imprägnierter Diamantmeißel (Schlumberger, 2017)

Andere Meißelarten und alternative Bohrverfahren (noch) nicht Stand der Tiefbohrtechnik

Hybridmeißel: Hybridmeißel sind eine Kombination aus Rollen und PDC-Meißel und wurden bisher vor allem in stark inhomogenen Formationen, in denen weiche und harte Gesteine zusammen vorliegen (z. B. Faltengebirge), eingesetzt. (National Oilwell Varco, 2017), (Miao, et al., 2016)

In Abbildung 13 ist der Hybridmeißel *Kymera*® von Baker Hughes für harte Formationen dargestellt.



Abbildung 13: Hybridmeißel Kymera® von Baker Hughes (Baker Hughes, 2017)

Bohrhämmer: Bohrhämmer (siehe Abbildung 14) werden mit Durchmessern von bis zu 48“ (1,22 m) hergestellt und entweder pneumatisch oder hydraulisch angetrieben. Der Einsatz von Bohrhämmern eignet sich besonders im Hartgestein, da sich solche Formationen wesentlich effektiver durch Schläge zerstören lassen als durch Druck oder Scherung. Der Antrieb mit Pressluft setzt ein trockenes Bohrloch voraus. Hydraulische Bohrhämmer vertragen keine feststoffbeladene Bohrspülung. Sie werden deshalb bisher mit Frischwasser angetrieben, was unter Umständen die Standfestigkeit des Bohrlochs während des Bohrprozesses beeinträchtigen kann. Dies gilt insbesondere auch für Salz- und Tonformationen, in denen der Einsatz von Frischwasser zu Auswaschungen, Hineinkriechen der Formation in die Bohrung, Bohrlochinstabilitäten oder Tonquellung führen kann. An Bohrhämmern, die mit feststoffhaltiger Bohrspülung arbeiten, wird zurzeit zum Beispiel an der TU Bergakademie Freiberg geforscht.

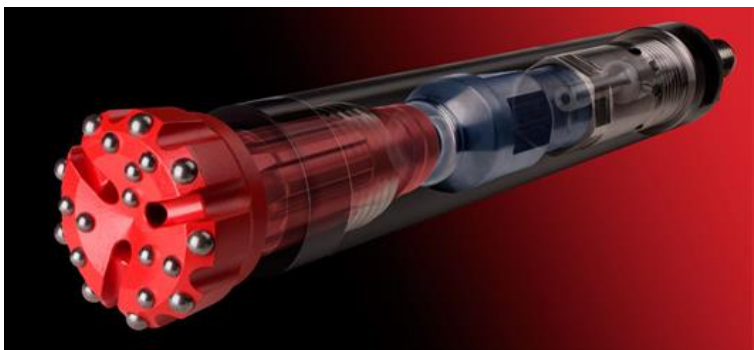


Abbildung 14: Bohrhammer (Rockmore International, 2017)

Linksspül-, Schachtbohrer: Im Schachtbau können Disc-Drill-Bits (siehe Abbildung 15) verwendet werden, welche das Gestein, ähnlich wie Rollenmeißel, zerdrücken. Diese können Durchmesser von bis zu 99“ (2,5 m) erreichen, aber nur wenige hundert Meter tief bohren.



Abbildung 15: Schachtbohrgerät mit Discs (Schlumberger, 2017)

Alternative Bohrverfahren: Alternative Bohrverfahren sind noch nicht Stand der Tiefbohrtechnik, werden aber zum Teil intensiv erforscht und für den Feldeinsatz entwickelt. Sie basieren nicht auf dem Zerdrücken oder Zerspanen der Gesteinsoberfläche und sind daher weniger durch Bohrlochdurchmesser begrenzt als konventionelle Bohrmeißel.

Beispiele dieser alternativen Bohrverfahren sind:

- Flammenbohrverfahren („Jetpiercing“),
- Laserbohren,
- Mikrowellenbohren,
- Plasmabohren,
- Elektroimpulsverfahren (zur Zeit an der TU Freiberg / TU Dresden in Entwicklung).

Grundsätzlich ist für alle Meißeltypen zu berücksichtigen, dass ein großkalibriges Bohrloch zunächst mit einem kleineren Durchmesser vor- und anschließend in einem oder mehreren Schritten auf Enddurchmesser aufgebohrt werden kann.

6.3.3 Konzeptionelles Bohrstrangdesign

Die bisher größten Durchmesser für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe im Hartgestein betragen 17 ½“ (44,5 cm) und wurden mit Rollenmeißeln erzielt. Meißel mit noch größeren Durchmessern sind erhältlich, allerdings für den Einsatz in weicheren Formationen vorgesehen. Dies liegt insbesondere daran, dass es in der Tiefbohrindustrie keine Nachfrage nach solchen Meißeldurchmessern für Hartgestein gibt, denn Öl- und Gaslagerstätten befinden sich in Sedimentgesteinen. Nur im Bereich der Tiefengeothermie wird vermehrt im kristallinen Hartgestein gebohrt, allerdings mit geringeren Durchmessern (Beswick, 2009). Weiterhin ist zu beachten, dass mit steigendem Durchmesser der notwendige Andruck auf den Meißel immer größer wird, um eine ausreichende Gesteinszerstörung zu erreichen. Als Grundlage für die weiteren Betrachtungen für den Bohrstrang wird ein Bohrloch im Hartgestein mit einem Durchmesser von 17 ½“ (44,5 cm) angenommen.

In Abbildung 16 ist die Spannweite der benötigten Belastung für Rollenmeißel mit verschiedenen Durchmessern im Hartgestein dargestellt. Dabei wird die Annahme zugrunde gelegt, dass der benötigte Meißelandruck 4 000 bis 9 000 lb pro Zoll Bohrlochdurchmesser, also grob 8 bis 18 t pro Meter Bohrlochdurchmesser beträgt (grobe Daumenregel der „alten Tiefbohrer“).

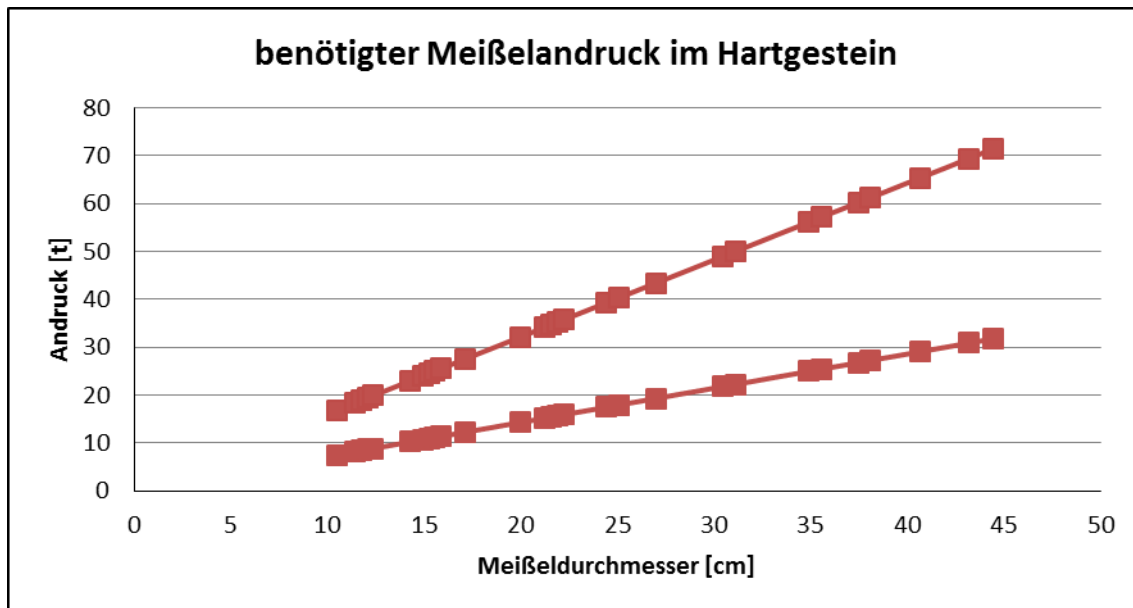


Abbildung 16: Benötigter Meißelndruck im Hartgestein (4 000 - 9 000 lb pro Zoll)

Die untere und obere Linie in Abbildung 16 spiegeln den typischen benötigten Andruck für mittelharte bis harte Gesteine (z. B. Granit) wieder. Auf einen 17 ½“ (44,5 cm)-Meißel muss im Hartgestein folglich ein Andruck von 31 t bis 70 t aufgebracht werden, je nach Festigkeit des Hartgesteins. Granit ist eine besonders harte Formation. Daher ist für eine optimale Bohrleistung ein Meißelndruck von etwa 70 t (ca. 4,4 MPa) zu erwarten.

Mit Hilfe der Software „Landmark - Drilling and Completions“ wurde ein möglicher Bohrstrang konzeptioniert (siehe Abbildung 17). Als Meißel wurde ein Rollenmeißel mit einem Durchmesser von 17 ½“ (44,45 cm) angenommen. Es folgt ein stabilisierter Richtbohrmotor (Bent Housing) zur Richtungssteuerung der Bohrung. Auch bei einer Vertikalbohrung ist es erforderlich, die Richtung zu kontrollieren und gegebenenfalls zu korrigieren, da die Bohrung sonst an z. B. einfallenden härteren Formationen abgelenkt würde. Es folgen die MWD (Measurement while Drilling) und LWD (Logging while Drilling) Systeme (siehe Abschnitt 6.2 Erkundungsverfahren bis 5 000 m Tiefe ab Seite 45) zur Messung der Bohr- und Formationsparameter. Oberhalb der Messgeräte wird der Strang zunächst auf einer Länge von etwa 9 m durch nicht-magnetische Schwerstangen beschwert, um den Kompass des MWD-Tools von den magnetisierbaren Bohrstangen zu isolieren. Darüber werden ca. 46 m Schwerstangen und ca. 91 m „schweres Bohrgestänge“ (heavy weight drill pipes) verschraubt. Die Schwerstangen (Durchmesser: 9 ½“ (24,13 cm)) dienen der Lastaufgabe auf den Bohrmeißel. Das „schwere Bohrgestänge“ (Durchmesser: 6 5/8“ (16,83 cm)) dient dazu, den Querschnitt des Bohrstrangs allmählich nach oben zu verkleinern, was sich positiv auf dessen Stabilität auswirkt. Das Bohrgestänge (Länge: ca. 4 828 m, Durchmesser: 5“ (12,7 cm)) wird auf Zug beansprucht. Der neutrale Punkt im Bohrstrang (Wechsel von Zug- auf Druckbelastung) muss immer im Bereich der stabilen Schwerstangen liegen.

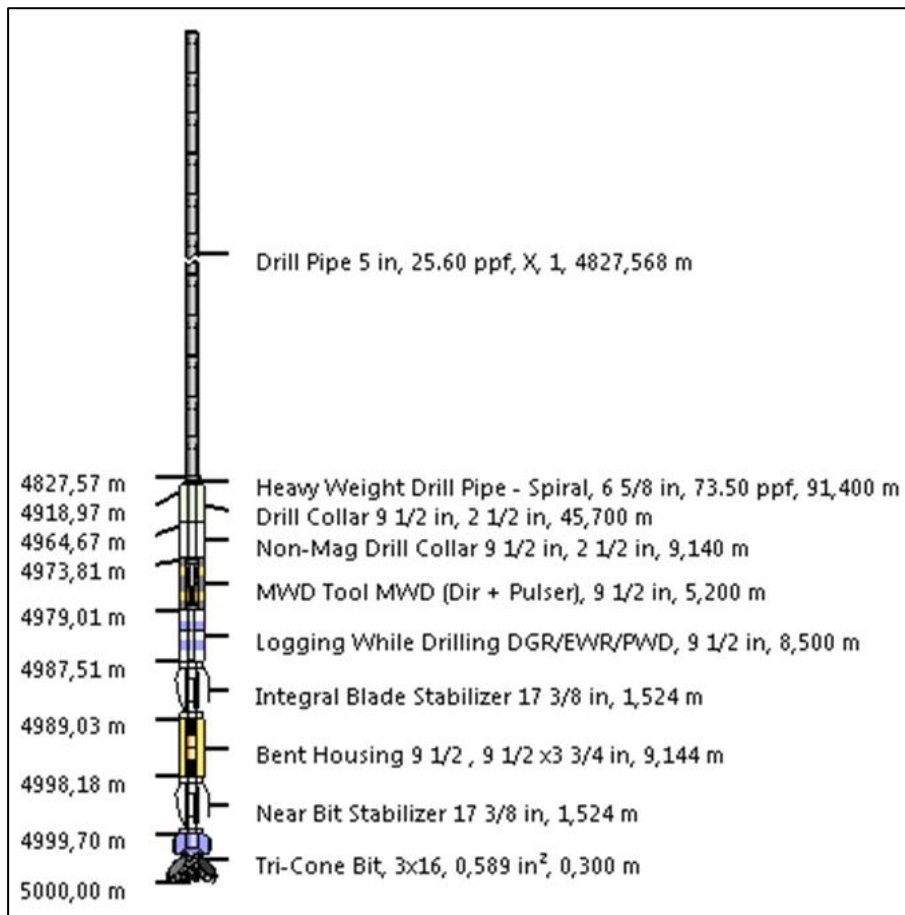


Abbildung 17: Konzeptionelles Bohrstrangdesign für die Tiefbohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Beim Einsatz eines Rollenmeißels ist ein Drehmoment von ca. 100 kNm erforderlich.

Grundsätzlich bestünde auch die Möglichkeit, die Bohrung mit einem geringeren Durchmesser vorzubohren und anschließend mit Hilfe eines Erweiterungswerkzeugs auf den Enddurchmesser aufzuweiten. In der Tiefbohrtechnik ist diese Methode bei großen Bohrungsdurchmessern sehr üblich, allerdings bisher vorwiegend in weicheren Formationen wie Sand- oder Tonstein (Mensa-Wilmot, et al., 2015), (Miller, et al., 2003). Im Mississippi Canyon wurde zum Beispiel eine 16 1/2“ (41,2 cm) Bohrung in Salz- und Tonstein mit Hilfe eines Reamers auf 20“ (50,8 cm) aufgeweitet (Miller, et al., 2003). Im Hartgestein ist dieses Verfahren noch nicht Stand der Technik.

6.3.4 Casings (Futterrohre)

Bohrlochdesign (Verrohrungsschema)

Das Einbringen und die Zementation von Casings dient der Bohrlochintegrität. Sie stützen und dichten das Bohrloch dauerhaft ab und verhindern dadurch ein Zusammendrücken durch die umgebende Formation sowie ein „Platzen“ durch Innendruck. Weiterhin bewahren sie zum einen das Bohrloch vor Einbrüchen und vor dem Eintritt von Formationsfluiden und schützen das umgebene Gestein vor dem Einfluss von Fluiden, welche beim Abteufen der Bohrung eingesetzt werden sowie vor Injektions- und Produktionsfluiden. Casings werden aufgrund der sich ändernden Porendruckgradienten und Gesteinsfestigkeiten (siehe Abbildung 18) und im Bereich von problematischen Formationsschichten gesetzt. Als problematisch gelten nicht standfeste Formationen, quellende oder fließende Gesteine (Tone, Salz) und Formationsschichten mit abnormalen Druckgradienten.

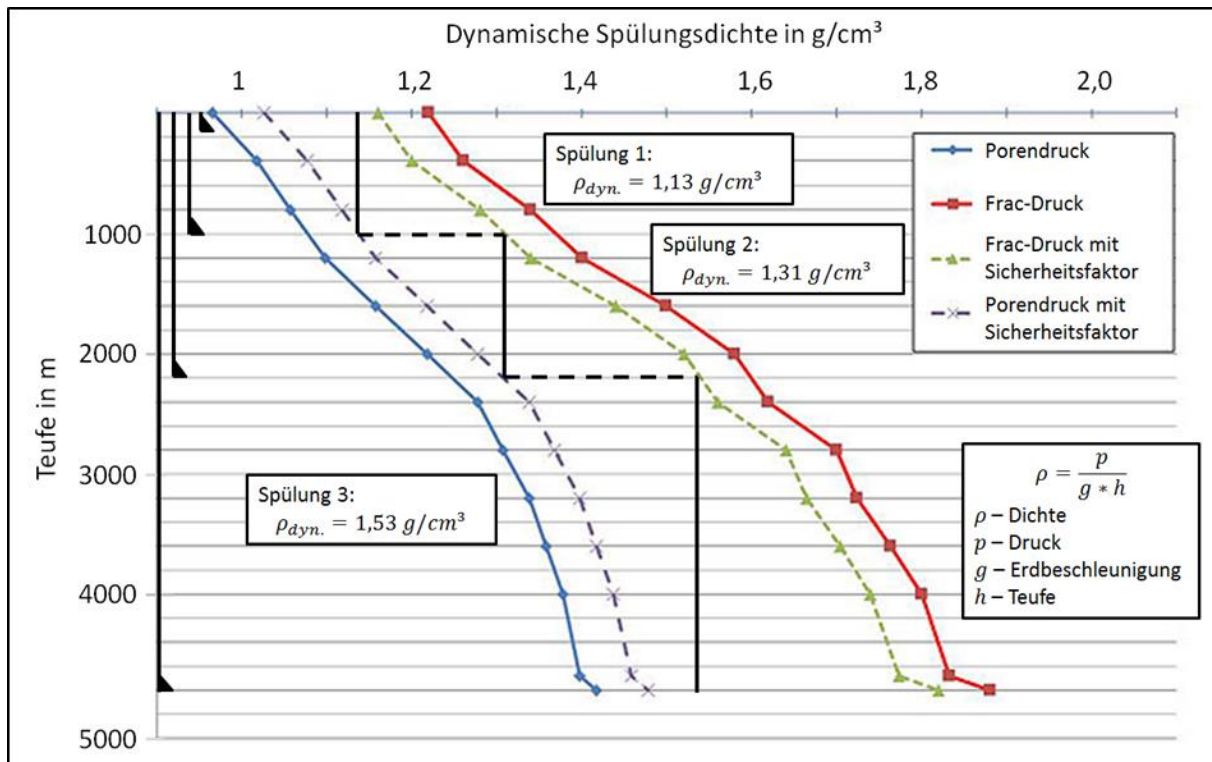


Abbildung 18: Verrohrungsschema bei Beachtung des Poren- und Frac-Druckgradienten (nach (Drilling Formulas and Drilling Calculations, 2017))

Es ergibt sich ein teleskopartiger Aufbau der verrohrten Bohrung mit typischen Rohrsträngen, wie sie beispielhaft für eine Erdöl- oder Erdgasbohrung in Abbildung 19 dargestellt ist.

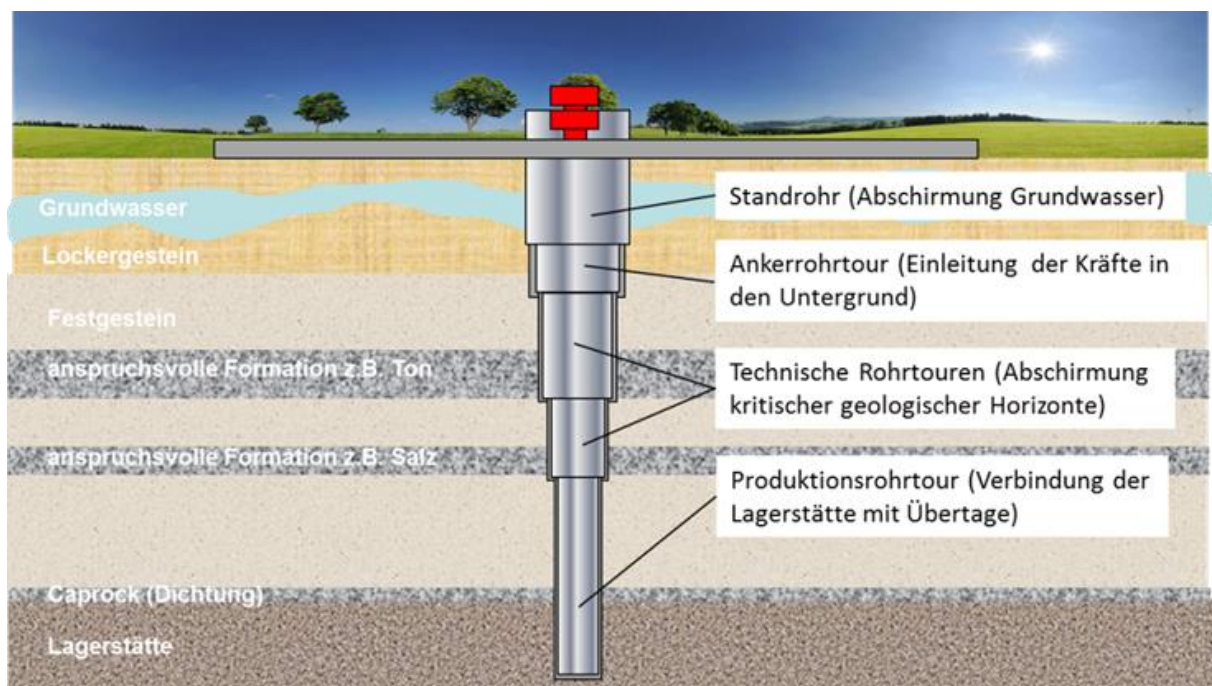


Abbildung 19: Verrohrungsschema

Stand- und Ankerrohrtour sind obligatorisch. Sie schützen die Bohrung in den oberen unkonsolidierten Bodenschichten vor Einfall sowie den Boden und das Grundwasser vor Verschmutzung durch den Bohr- und Förderbetrieb. Das Standrohr kann bei typischen Bohrungen nach Öl oder Gas Durchmesser von über 30“ besitzen und bis zu 200 m lang sein.

Die Ankerrohrtour wird im Festgestein abgesetzt. Sie wird bis zur Oberfläche einzementiert und auf diese Weise fest mit dem Untergrund verankert. Auf die Ankerrohrtour wird im Bohrbetrieb der Bohrlochkopf aufgeflanscht. Im Bohrlochkopf werden auch alle folgenden Rohrtouren vorgespannt und in die Ankerrohrtour eingehängt. Auf den Bohrlochkopf wird für jede Bohrlochsektion ein passender Blowout-Preventer montiert. Der Blowout-Preventer ist ein großes Sicherheitsventil, mit dem die Bohrung im Gefahrfall jederzeit sicher verschlossen werden kann.

Unterhalb der Ankerrohrtour folgen die technischen Rohrtouren, deren Anzahl sich, wie oben beschrieben, nach den Druckverhältnissen im Untergrund und den zu durchteufenden (problematischen) Formationen richtet. Die technischen Rohrtouren können bis zur Oberfläche reichen. Die Zementation der Rohrtouren muss aber nicht den gesamten Ringraum bis zur Oberfläche ausfüllen, sondern nur mindestens 50 m bis 100 m weit in die vorangehende Rohrtour hineinreichen. Der Ringraum oberhalb des Zementkopfes ist in diesem Fall mit einer Ringraumschutzflüssigkeit gefüllt.

Um Material zu sparen, können Rohrtouren auch als Liner ausgeführt werden. Liner reichen im Gegensatz zu Casings nicht bis zur Oberfläche, sondern werden in der jeweils vorhergehenden Rohrtour abgehängt und gegen diese hydraulisch abgedichtet.

Die Verrohrung einer Bohrung wird grundsätzlich „von unten nach oben“ geplant, d.h. der geplante Enddurchmesser im Bohrlochtiefsten dient zusammen mit dem geologischen Profil als Grundlage der gesamten Auslegung.

In der Tiefbohrtechnik sind viele Dinge standardisiert, so auch die Durchmesser der Casingrohre. Der bekannteste Standard ist der API-Standard (American Petroleum Institute).

Bei der Auslegung einer Tiefbohrung wird zunächst der Enddurchmesser der letzten Rohrtour, der Produktionsrohrtour, festgelegt. Dann werden anhand der API-Durchmesserreihe (Abbildung 20) die nach oben folgenden Casings ausgewählt, wobei die Wandstärken und Materialgüten an die zu erwartenden Belastungen angepasst werden. Folgt man den dicken schwarzen Pfeilen in der Durchmesserreihe in Abbildung 20, so erhält man zwischen den einzelnen Rohrtouren Ringräume, welche mit Standard-Prozeduren der Öl- und Gasindustrie erfahrungsgemäß gut zu zementieren sind. Bewegt man sich entlang der dünnen Pfeile, so resultiert das in engeren Ringräumen zwischen den Rohrtouren, die im Vergleich zur „normalen“ Durchmesserreihe schwieriger zu zementieren sind. In diesem Fall muss mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden, unter Umständen spezieller Zement eingesetzt werden und ein größerer Aufwand bei den Kontrollmessungen betrieben werden, damit eine einwandfreie Qualität der Verrohrung und Zementation gewährleistet werden kann. Dafür ergeben sich entlang der dünnen Linien im oberen Bereich der Bohrung aber kleinere Durchmesser, was in erheblichen Kosteneinsparungen für die Rohre und auch die kleinere erforderliche Bohranlage resultieren kann.

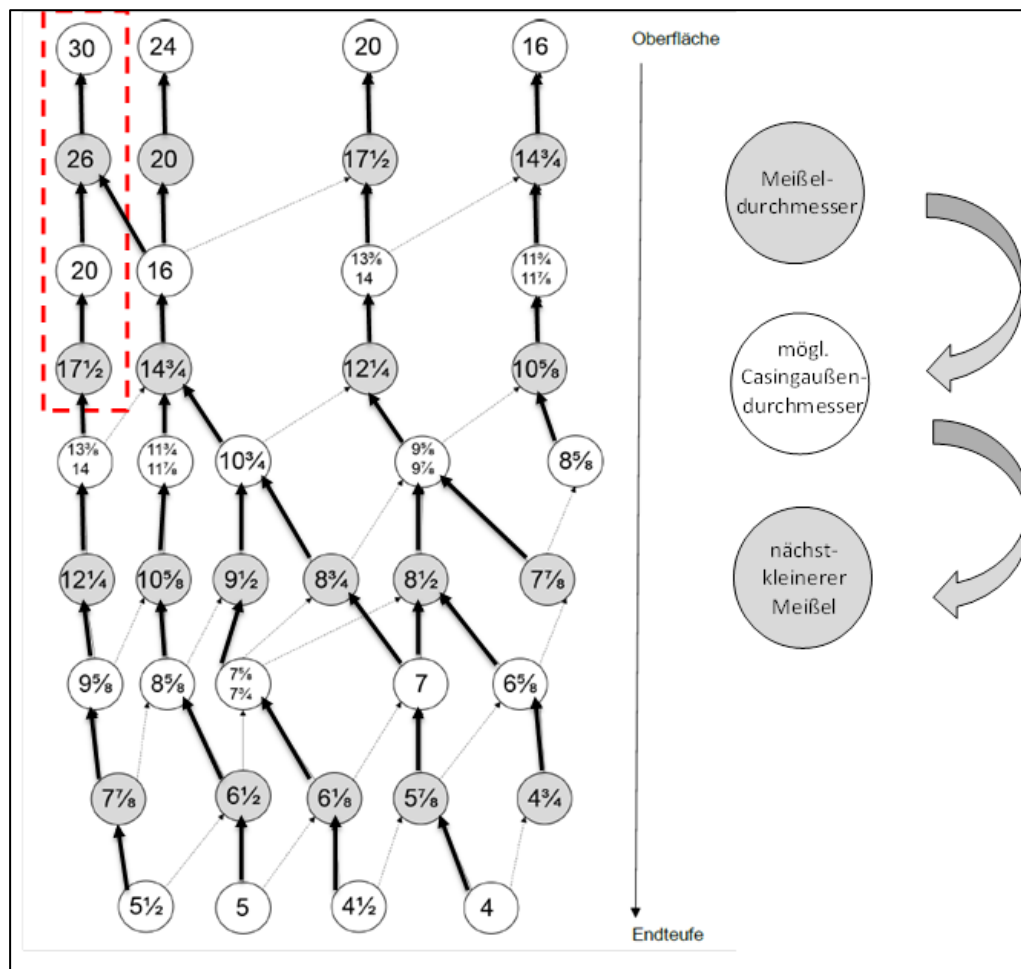


Abbildung 20: Durchmesserreihe für die Verrohrung einer Tiefbohrung bis 3 000 m nach Standard API-Durchmesserreihe (Angaben in ") (Reich, 2010)

Eine weitere Möglichkeit, den Anfangsdurchmesser einer Bohrung zu reduzieren, besteht in der Anwendung eines „Lean Casing“-Programms. Hier werden die Durchmessersprünge zwischen den einzelnen Rohren noch enger als bei den dünnen Linien der API-Durchmesserreihe ausgewählt. Allerdings werden die Ringräume durch Spezialmaßnahmen (Unterschneiden) beim Bohren so aufgeweitet, dass trotzdem eine zuverlässige Zementation möglich ist. Beim Unterschneiden wird unterhalb eines Rohres mit einem Durchmesser weitergebohrt, der größer ist, als der Innendurchmesser des Rohres, was in einem vergrößerten Ringraum resultiert.

Quasi der Extremfall des Lean Casing Bohrens ist das so genannte „Mono Bore“-Konzept. Hier wird nicht nur das letzte zementierte Rohr unterschritten, sondern es wird auch ein aufweitbares („expandable“) Casing durch das letzte zementierte Rohr eingefahren und im neuen Bohrabschnitt so weit aufgeweitet, dass es sich an die vorhergehende Rohrtour ohne Durchmessersprung anschließt. Auf diese Weise ist theoretisch eine Bohrung herzustellen, die trotz mehrerer Bohrabschnitte vom Bohransatzpunkt bis zur Endteufe einen konstanten Durchmesser besitzt.

Das Mono Bore Verfahren muss aber derzeit noch als Verfahren in der Entwicklung bezeichnet werden, da die Rohre den Vorgang des Aufweitens noch nicht ohne Festigkeitsverlust ertragen. Das Lean Casing Bohren wird dagegen schon seit mehreren Jahrzehnten betrieben und entspricht somit dem Stand der Technik.

Zur Planung eines möglichen Verrohrungsschemas für die Tiefbohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird das geologische Profil 2 (siehe Abbildung 7 auf Seite 42) herangezogen. Das generische geologische Profil 1 würde durch den häufigen Wechsel der Schichtfol-

gen (Sandstein, Tonstein und Salzgestein) bereits eine Vielzahl an abgesetzten Rohrtouren verlangen. Es ist absehbar, dass dies nach API-Durchmesserreihe nicht zu einem Anfangsdurchmesser führt, der mit konventioneller Tiefbohrtechnik erstellbar ist bzw. in einem für die Endlagerung nutzbaren Enddurchmesser endet. Daher wird das Verrohrungsschema zunächst für das geologische Profil 2 berechnet. Sollte hier ausreichend Spielraum für ein erfolgsversprechendes Verrohrungsschema für eine kompliziertere Geologie festgestellt werden, wird auch für das geologische Profil 1 ein solches erstellt.

Geht man aufgrund der verfügbaren Meißel von einem Enddurchmesser von 17 ½" (44,5 cm) für eine Bohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle aus, kann als letzte zementierte Rohrtour ein 14" (35,56 cm) Casing eingebaut werden. Nach der Standard-API-Durchmesserreihe stehen dann nach oben hin nur noch zwei weitere „Standard-Rohrtouren“ zur Verfügung. Im besten Falle kann mit dem letzten Bohrabschnitt sowohl der Sandstein ab 1 750 m als auch das kristalline Grundgebirge bis zur gewünschten Endteufe durchteuft werden. Für das 760 m mächtige Salzgestein muss eine spezielle Bohrspülung verwendet werden, welche Auswaschungen in dieser Formation während des Bohrprozesses verhindert (entweder ausgesalzene, wasserbasierte Fluide oder Ölspülungen). Daher wird dem Salzgestein ein eigener Bohrabschnitt zugeteilt. Dieser kann nach der Standard-API-Durchmesserreihe mit einem 26" Meißel abgeteuft und einem 24" Casing verrohrt werden. Der Sandstein, welcher in einer Teufe von 460 m bis 990 m liegt muss dann mit einem 36"-Meißel gebohrt und einem 30"-Casing verrohrt werden. Im darüber liegenden Salz müsste wieder eine spezielle Bohrspülung zum Einsatz kommen, also ein neuer Bohrabschnitt mit größerem Meißel- und Casingdurchmesser eingeplant werden. Da diese größeren Durchmesser nicht mehr von der Standard-Durchmesserreihe nach API abgedeckt werden, müsste der obere Bohrungsabschnitt mit alternativen Methoden, beispielsweise einem „Schacht“ oder einer Großbohrung bis zu einer Teufe von etwa 500 m abgeteuft werden. Dieser sollte einige Meter in den Sandstein hineinragen.

Das in Abbildung 21 dargestellte Verrohrungsschema für eine Tiefbohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist optimistisch zu verstehen und geht von günstigen Druckverhältnissen im Untergrund aus. Daher ist die Teufe von etwa 500 m für den Schacht oder das Großbohrloch, von dem aus die Bohrabschnitte abgeteuft werden sollen, als Mindestteufe anzusehen.

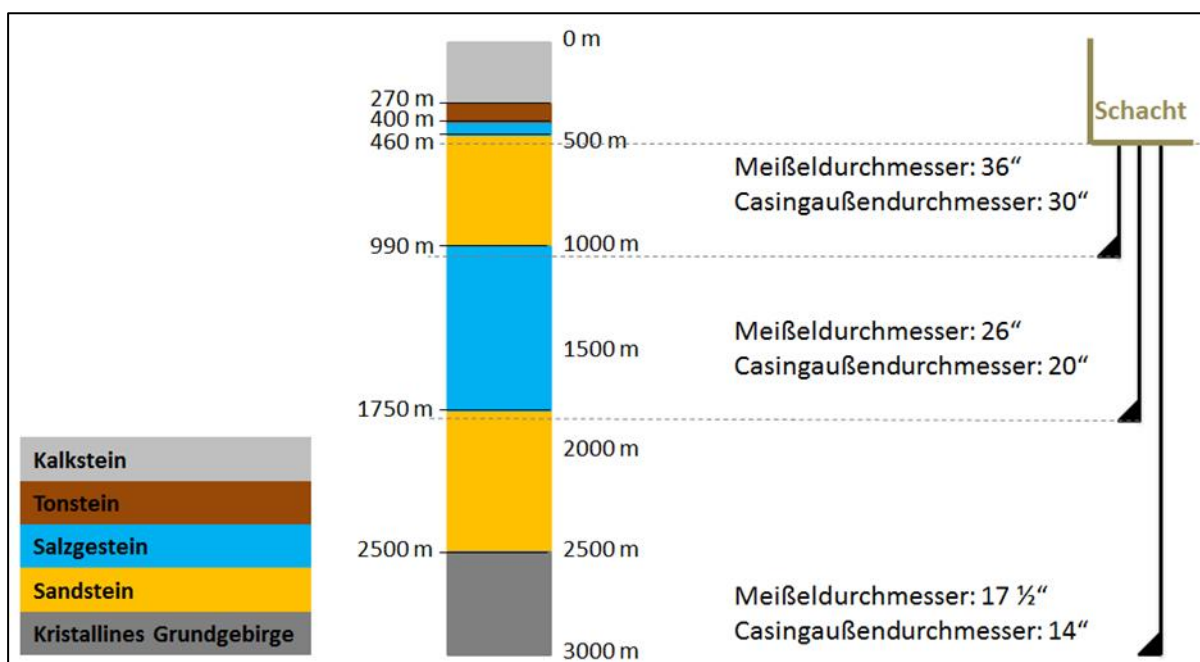


Abbildung 21: Mögliches Verrohrungsschema der Bohrung ausgehend vom geologischen Profil 2

Durch Anwendung der bereits in diesem Kapitel vorgestellten speziellen Bohrverfahren (Lean Casing Drilling oder auch Mono Bore Konzepte) könnte der Durchmesser am Bohransatzpunkt gegenüber der API-Durchmesserreihe so weit verringert werden, dass er durch gängige Verfahren der Tiefbohrtechnik abgedeckt werden könnte. Ein Schacht als Bohransatz wäre somit nicht erforderlich. Für einen Lean Casing Ansatz wären jedoch im Vorfeld tiefergehende Planungen und Untersuchungen erforderlich. Lean Casing Profile werden derzeit hauptsächlich für Tiefseebohrungen eingesetzt, die aufgrund ihrer speziellen geologischen Bedingungen besonders viele Rohrtouren erfordern. In Abbildung 22 ist ein Beispiel dazu gezeigt. Man erkennt, dass die Endverrohrung 7" beträgt und der Durchmesser der ersten Rohrtour trotz Einbaus von 6 weiteren Rohrtouren nur 30" beträgt. Nach der API-Durchmesserreihe wären hier wesentlich größere Durchmesser erforderlich gewesen.

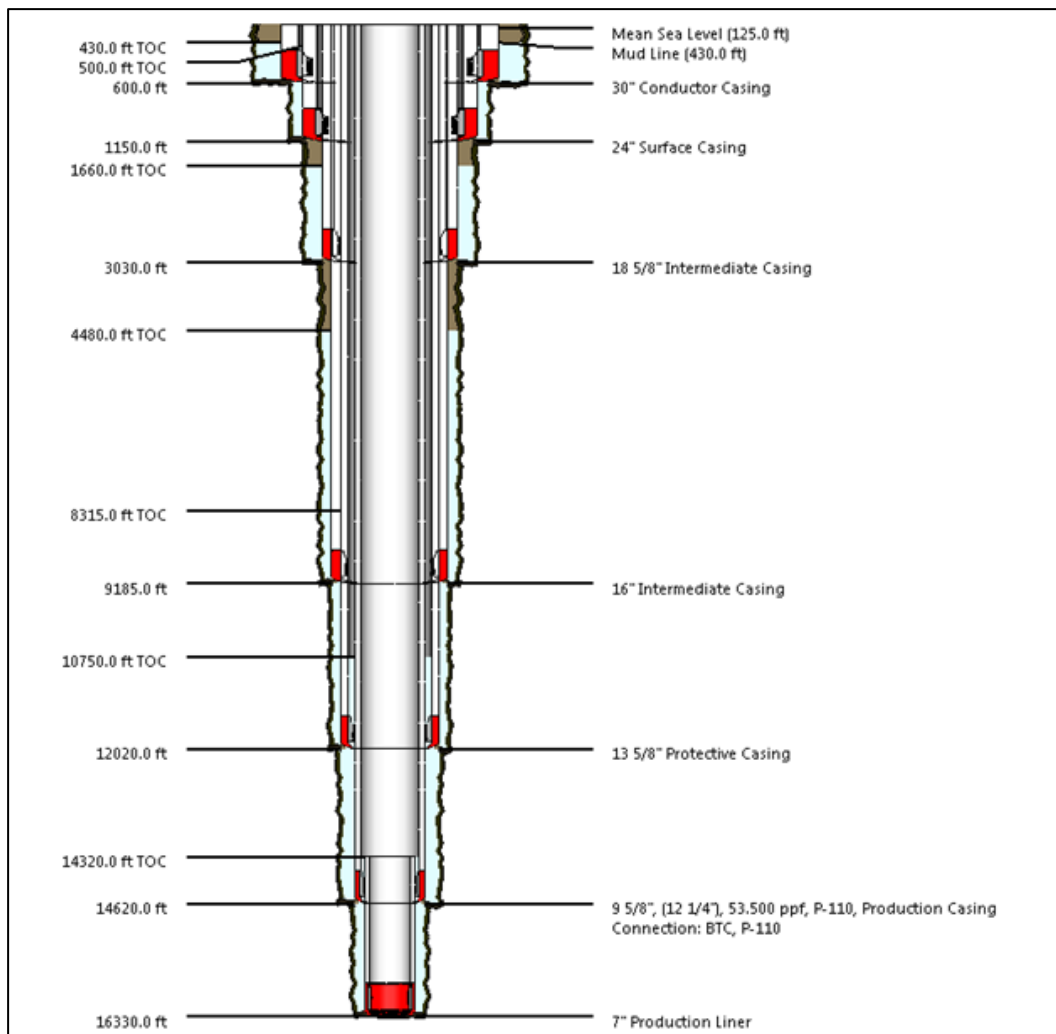


Abbildung 22: Beispiel für ein Lean Casing Verrohrungsprogramm

Herstellung des Schachtes

Der in Abbildung 21 (siehe Seite 63) gezeigte „Schacht“ mit 510 m Tiefe besitzt einen Durchmesser, der mit über einem Meter größer ist, als die standardmäßig verfügbaren Bohrmeißel und Rohre der Tiefbohrtechnik. Falls eine solche Option gegenüber einem Lean Casing Ansatz bevorzugt werden sollte, wäre zu klären, ob zu dessen Herstellung Bohrverfahren der „Flachbohrtechnik“ oder Methoden aus dem Schachtbau eingesetzt werden (denkbar wären zum

Beispiel Einsätze von Schachtbohrmaschinen oder modifizierten Anlagen aus dem Microtunneling-Bereich) oder der Stand der Tiefbohrtechnik durch Weiterentwicklungen auf größere Durchmesser hin entwickelt werden sollte. In jedem Fall bestünde hier Forschungsbedarf.

Dimensionierung der konkreten 14“ Rohrtour

Die in Abbildung 21 vorgestellte Bohrlochkonstruktion wurde in Abbildung 23 noch einmal etwas konkreter dargestellt. Im folgenden Verlauf soll gezeigt werden, dass das vorgesehene 14“ Casing auf die anfallenden Belastungen bemessen ist.

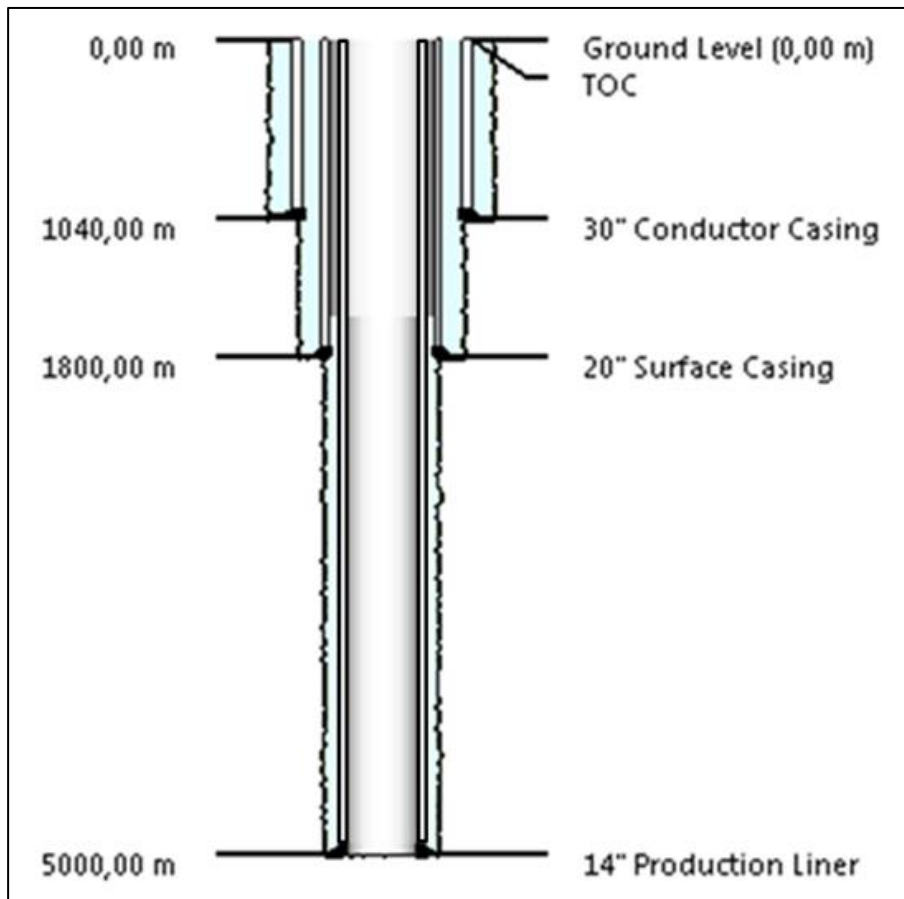


Abbildung 23: Geplantes Verrohrungs- und Zementierschema

Rohrtouren dürfen während des Einbaus und Betriebes weder durch Innendruck verformt (burst) werden, noch durch Außendruck kollabieren (collapse) oder durch Axiallasten abreißen. Um dies sicherzustellen, müssen die extremsten Belastungsfälle betrachtet werden. Die folgenden Betrachtungen basieren auf einem Festigkeitsnachweis, der mittels der gebräuchlichen Landmark-Software der Firma Halliburton durchgeführt wurde.

Annahmen zur Berechnung

Folgende Annahmen wurden dem Festigkeitsnachweis zugrunde gelegt:

- Geothermischer Gradient: 3 K pro 100 m, Oberflächentemperatur; 0 °C
- Formationsporendruck entsprechend der Dichte der Porenfluide (Süßwasser bis 400 m: $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$, ab 400 m: $\rho = 1\,100\text{ kg/m}^3$)

- Frackdruckgradient:
Sedimente: 0,22 bar/m
drückende Formationen: 0,23 bar/m
Granit, Schiefer: 0,24 bar/m
- Zementschlämme:
Normal: 1 400 - 1 800 kg/m³
aufgewichtet bis: 2 200 kg/m³
gewählt: 1 893 kg/m³ (Landmark-Default)
- Ringraumschutzflüssigkeit:
so eingestellt, dass hydrostatische Druck im Bohrloch dem Formationsporendruck entspricht: $\rho = 1\,090,8 \text{ kg/m}^3$
- 14" Rohrtour besteht durchgehend aus demselben Rohrmaterial mit derselben Wandstärke
- Es wird eine Rohrtour mit 14" Außendurchmesser, einem Metergewicht von 177,667 kg/m (dickste Standard-Wanddicke, Innendurchmesser 12,144" drift) und einer Materialgüte Q-125 (belastbarstes Standard-Material) für die Berechnung zugrunde gelegt.

Betrachtete Belastungsfälle

Um die Sicherheit der 14" Rohrtour gegen Bersten (burst), Kollaps (collapse) und Axiallasten zu berechnen wurde von folgenden „extremen“ Lastfällen ausgegangen:

- Bersten (burst):
in der Rohrtour befindet sich flüssige Zementschlämme,
im Ringraum außerhalb der Rohrtour befindet sich Formationsfluid (worst case szenario).

Ein solcher Lastfall stellt sich ein, wenn der flüssige Zement durch die Rohrtour hindurch nach unten verpumpt wird, um anschließend in den Ringraum verpresst zu werden. Aufgrund der im Vergleich zu Spülung höheren Dichte von Zement liegt ein Innendruckprofil vor.

- Kollaps (collapse):
in der Rohrtour befindet sich Bohrspülung,
im Ringraum außerhalb der Rohrtour befindet sich
 - a) flüssige Zementsuspension,
 - b) Luft.

Ein solcher Lastfall stellt sich ein, wenn die flüssige Zementsuspension in den Ringraum verpresst worden, aber noch nicht ausgehärtet ist. Aufgrund der im Vergleich zu Spülung höheren Dichte der Zementsuspension liegt im Fall a) ein Außendruckprofil vor, das im Fall b) noch ausgeprägter ist.

- Axiallast

Die Axiallast besteht aus dem Eigengewicht der Rohrtour sowie dynamischen Lasten, die beim Abbremsen und Beschleunigen der Rohrtour während des Einbaus entstehen. Weitere Überlasten (z. B. beim möglichen Festsitzen der Rohrtour im Bohrloch) wurden nicht betrachtet.

Ergebnis der Festigkeitsberechnung

Die in Tabelle 11 gezeigten Ergebnisse basieren hinsichtlich des Kollapses auf dem theoretischen „worst case szenario“ b), bei dem das Casing „evakuiert“, also lediglich mit Luft gefüllt ist (Spülung leergepumpt).

Tabelle 11: Ergebnisse der Festigkeitsbetrachtung der 14 „Rohrtour“

[illegible]

Es ist ersichtlich, dass alle Sicherheiten größer als 1 sind, damit ist der Festigkeitsnachweis erbracht. Die Sicherheit ist am unteren Ende des Casings (in 5 000 m Tiefe) am geringsten, dort ist die Gefahr des Kollapses am größten.

Ein Ausbau des unteren Teils der Bohrung mit Standard-Rohren der Öl- und Gasbohrtechnik ist möglich. Die Spezifikationen der betrachteten Rohrtour sind in Abbildung 24 nochmals zusammengefasst worden.

String Casing/Tubing Data

From Catalog...

General

Description: 14 in, 119.38 ppf, Q-125, Type: Casing

Manufacturer:		Linear Capacity:	0.07666	m ³ /m
Model No.:		Closed End Displacement:	0.09931	m ³ /m
Length:	3300.000 m	Makeup Torque:		kN-m
Body OD:	14.000 in	Minimum Yield Strength:	861.8447	MPa
Body ID:	12.300 in	Collapse Resistance:	695.8237	bar
Approximate Weight:	177.66 kg/m	Young's Modulus:	206.84271984	GPa
Grade:	Q-125	Poisson's Ratio:	0.300	
Material:	CS_API 5CT	Density:	7849	kg/m ³
Connection:		Coeff. of Thermal Exp.:	12.42	E-06/°C

Casing

Drift ID:	12.144 in	Joint Strength:		kN
Connection OD:		Internal Yield Pressure:		bar
Body Yield Strength:		Outside Coupling Length:		m
Nominal Weight:	119.38	Inside Coupling Length:		m
		Coupling ID:		in
Average Joint Length:	12.19 m	Number of Joints:	271	

OK Cancel Apply Help

Abbildung 24: Spezifikationen der eingesetzten 14“ Rohrtour

Der Einbau des 14" Rohrstrangs wird die schwerste Last sein, die die übertägige Bohranlage im Verlauf der Bohrarbeiten handhaben muss. Die gesamte Bohranlage muss also auf diese Last ausgelegt werden, obwohl der maximale Lastfall nur kurzfristig zu erwarten ist. Insofern ist zu überlegen, ob der Einbau der Rohrtour als „schwimmender Einbau“ erfolgen kann, bei dem das Casing beim Einbau nicht wie üblich mit Spülung, sondern mit Luft gefüllt wäre. Auf diese Weise würde der Auftrieb das Eigengewicht des Rohrstranges verringern.

Alternatives Konzept (Sandia National Laboratories)

(Brady, et al., 2015) beschrieben 2015 ein Verrohrungsschema für einen Feldtest zur Einlagerung von radioaktivem Abfall in tiefen Bohrlöchern, welches auch von der GRS im Bericht „Tiefe Bohrlöcher“ (Bracke, et al., 2016) thematisiert wurde. Dieses ist in Abbildung 25 dargestellt. Das konzeptionelle Bohrungsdesign für die endgültige Endlagerung entspricht dem des geplanten Feldtests (Arnold, et al., 2011). Das Konzept aus den USA sieht, wie im hier vorgeschlagenen Konzept, eine Einlagerungsteufe von 3 000 m bis 5 000 m vor. Der Enddurchmesser der Bohrung entspricht mit 17" etwa dem hier ebenfalls vorgeschlagenen Enddurchmesser.

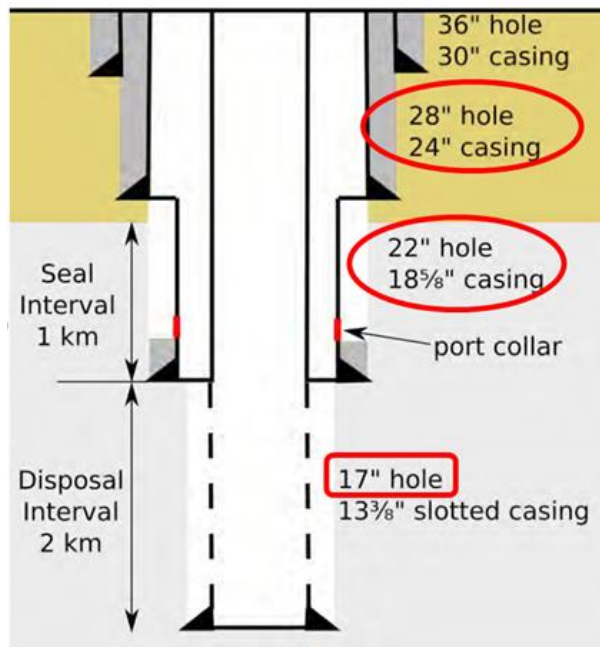


Abbildung 25: Verrohrungsschema zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern (USA) (Brady, et al., 2015)

Mit dem Verrohrungsschema für den Feldtest in Abbildung 25 ist es möglich, die Bohrung in vier Abschnitte einzuteilen, bevor mit dem größten Casing nach der Standard-API- Durchmesserreihe (Außendurchmesser: 30") die Oberfläche erreicht wird. Allerdings sind die dadurch entstehenden Ringräume sehr schmal ($\leq 1"$). Um diese Ringräume zu zementieren ist unter Umständen ein besonderer Zement und spezielles Equipment zum Verpressen der Zementsuspension sowie die Anwendung spezieller Bohr- und Zementationsverfahren nötig. Diese Technologien sind in der Tiefbohrtechnik durchaus üblich, müssen aber dennoch als fortgeschrittene Spezialverfahren bezeichnet werden, die im Rahmen des vorliegenden Berichtes nicht eingehend beschrieben werden können.

Die in Abbildung 25 rot umrandeten Durchmesser für Meißel und Casings liegen außerhalb der Standard-Durchmesserreihe nach API.

Die 13 3/8"-Rohrtour ist als geschlitztes (slotted) Casing ausgeführt. Dies hat zum einen den Grund, dass im Feldtest eine hydraulische Stimulation (Fracking) des Grundgebirges geplant

ist, um die angenommenen dort vorherrschenden Gebirgsspannungen zu verifizieren (Brady, et al., 2015). Zum anderen soll das geschlitzte Casing bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle gewährleisten, dass der Druck, der sich innerhalb der Bohrung durch die eingetragene Wärmeleistung des radioaktiven Abfalls aufbaut, ins umliegende Gebirge entweichen kann (Arnold, et al., 2011). Eine Zementation der 13 3/8"-Rohrtour ist im standfesten Grundgebirge nicht vorgesehen.

Sollte der Druck bei der im Rahmen dieses Berichtes konzipierten Bohrung auch in das umliegende Gestein entspannen können, könnte die letzte Futterrohrtour auch hier in geschlitzter Ausführung eingebaut werden, die im Bereich der Schlitze nicht zementiert wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das 14"-Casing als volles Stahlrohr einzubauen, zu zementieren und anschließend zu perforieren. Zur Perforation des Stahlrohrs und des Zementes wird eine Jetgun am Kabel bis zur gewünschten Teufe in das Bohrloch hinabgelassen. Eine Jetgun besteht aus einem Träger, an dem mehrere Hohlladungen angebracht sind. Diese werden durch einen elektrischen Prozess von über Tage gezündet und schießen so Wegsamkeiten in das Casing und den dahinter befindlichen Zement. Die Überprüfung, ob eine Perforation oder ein geschlitztes Casing für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern vorteilhaft oder sogar notwendig ist steht noch aus und ist als weiterer Forschungsbedarf auszuweisen.

6.3.5 Einbau von Casings

Im Folgenden soll kurz auf den Einbau der Rohrtouren (Casing) eingegangen werden. Die einzelnen Rohrtouren sollen für die Endlagerbohrung von hochradioaktiven Abfällen in Deutschland immer bis zur Oberfläche geführt werden. Für den Fall, dass zukünftige Technologien es ermöglichen ein Bohrloch mit einem Durchmesser größer als 17 1/2" (44,5 cm) im Hartgestein abzuteufen, werden im selben Zuge auch Casings mit Außendurchmessern zwischen 14" und 26" betrachtet. In Tabelle 12 sind die geometrischen Daten, das Metergewicht und zum Teil die Streckgrenze der betrachteten Casings gegeben. Die in der API-Richtlinie angegebenen Casing haben einen Außendurchmesser von höchstens 20". Die Daten für die 24" und 26" Casings stammen von der Firma Vallourec GmbH. (Vallourec Oil and Gas France, 2016)

Tabelle 12: Geometrische und mechanische Eigenschaften von Casings nach API (bis 20") (Halliburton, 2012) und Casings der Firma Vallourec GmbH (24" und 26") (Vallourec Oil and Gas France, 2016)

Casing-bezeichnung	Außendurchmesser [cm]	Wandstärke [cm]	Metergewicht [kg/m]	Streckgrenze (N80) [kN]
API 14" dick	35,56	2,03	169,60	11 810
API 14" dünn	35,56	1,43	122,73	8 840
API 16" dick	40,64	1,67	162,21	11 250
API 16" dünn	40,64	0,95	96,73	6 550
API 20" dick	50,80	1,61	197,93	13 750
API 20" dünn	50,80	1,11	139,80	9 580
24" dick	60,96	2,06	302,10	21 025
24" dünn	60,96	1,61	241,08	16 558
26" dick	66,04	2,54	401,80	27 949
26" dünn	66,04	1,91	308,05	21 225

Die betrachteten Casings können ihr Eigengewicht bei einer Stahlgüte von N80 halten. In den folgenden Diagrammen in Abbildung 26 sind die Massen der Casings in Abhängigkeit der Stranglänge (Teufe des Bohrlochs) dargestellt. Außerdem sind die Hakenlasten der beiden besonders großen, mobilen Landbohranlagen, welche in Kapitel 6.3.1 Bohranlagen ab Seite 49 beschrieben sind, eingezeichnet. Es ist zu beachten, dass in die Massenberechnung allein das Metergewicht des entsprechenden Casings eingegangen ist. Die Masse von benötigten Verbindern sowie Schleiflasten, welche beim Einbau auftreten, da kein Bohrloch zu 100 % vertikal abgeteuft werden kann, sind nicht berücksichtigt. Die Linien stellen folglich den günstigsten Belastungsfall dar und müssen als zu optimistisch betrachtet werden.

Der Einbau erfolgt in einem mit Spülung gefüllten Bohrloch. Zum einen kann der Auftrieb genutzt werden, um die erforderliche Hakenlast der Bohranlage zu reduzieren. Zum anderen kann ein Fluid die Reibung zwischen Casing und Bohrlochwand verringern und den Einbau somit erleichtern. Ausgehend von einer Hakenlast von 907 t und einem gänzlich mit Bohrspülung (Dichte: $\rho \approx 1,2 \text{ g/cm}^3$) gefüllten Bohrloch ist es theoretisch möglich einen 4 500 m langen Casingstrang mit einem maximalen Durchmesser von 20" (50,8 cm) einzubauen. Der maximal mögliche Durchmesser erhöht sich für einen 3 700 m langen Strang auf 24" (60,96 cm) mit gleicher Wandstärke. Eine weitere Durchmessersteigerung auf 26" (66,04 cm) ist durch das Verringern der Stranglänge auf 3 600 m zu erreichen.

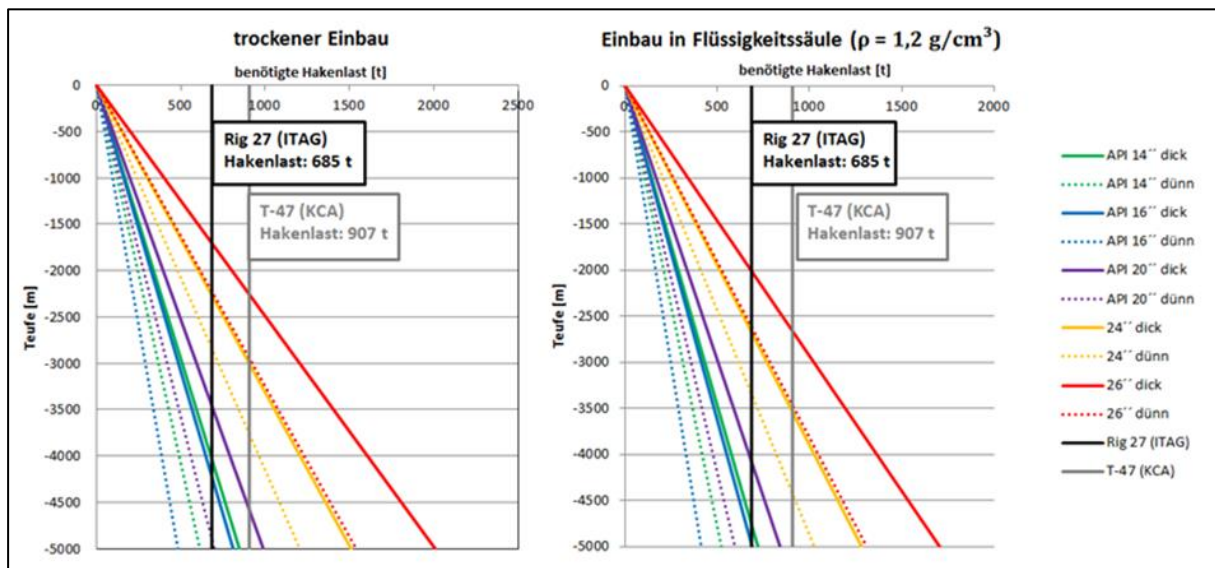


Abbildung 26: Benötigte Hakenlasten beim Casingeinbau (links: trocken, rechts mit Flüssigkeitssäule)

Ein leichteres 14" Casing (wie im vorliegenden Konzept vorgesehen), hat vergleichsweise geringe Hakenlasten zur Folge und könnte mit beiden Anlagen bis in eine Teufe von 5 000 m eingebaut werden.

6.3.6 Einbau dichter Verrohrungen

Die Dichtigkeit verschraubter Verbinder gegenüber Flüssigkeiten kann nach korrekt ausgeführter Verschraubung, Einbau und Zementation einer Tiefbohrung als gegeben vorausgesetzt werden. Die einzelnen Arbeitsschritte werden von Servicefirmen durchgeführt, welche auf ihren Aufgabenbereich spezialisiert sind und die Qualität der Arbeiten durch Kontrollmessungen belegen.

Die Schwachstellen von Verrohrungen bezüglich der Dichtheit sind die Rohrverbinder. Abbildung 27 zeigt zwei für die Tiefbohrtechnik typische Verbindertypen.

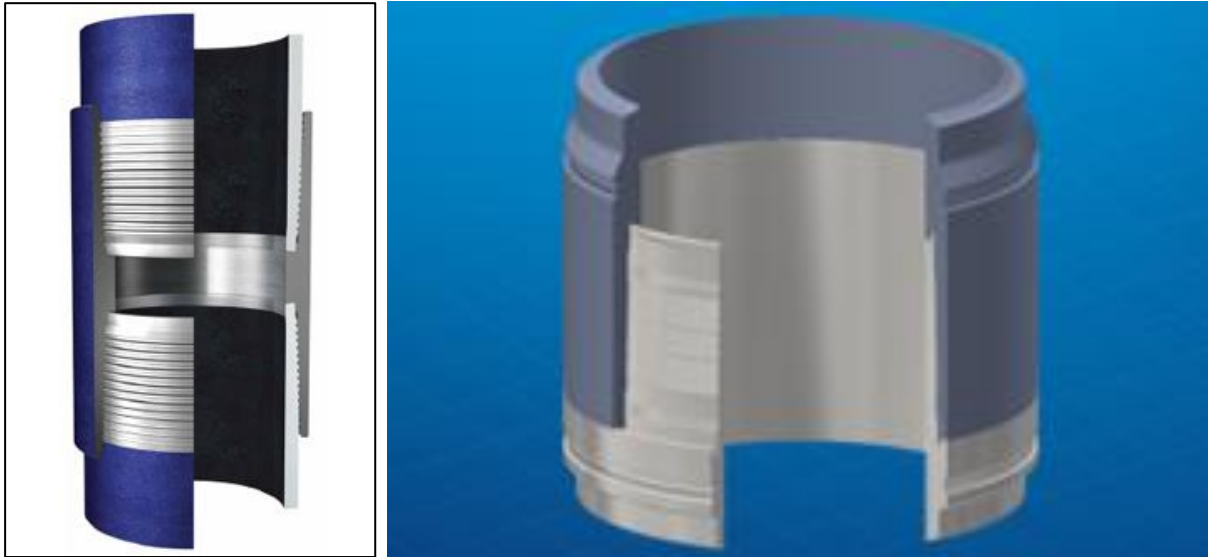


Abbildung 27: Typische Verbindertypen für Casings, links: Muffenverbinder (Tenaris, 2018), rechts: Integralverbinder (Oil States Industries, 2018)

Der Muffenverbinder (links) weist zwei mögliche Leckpfade im Bereich der Gewinde auf. Bei einem Integralverbinder (rechts) gibt es nur einen Leckpfad. Im Bereich der Verbinder ist die Wandstärke des Casingstranges meist erhöht, was im Gewindebereich entweder zu einem größeren Außen- oder verringerten Innendurchmesser führt.

Es gibt gasdichte Verbinder. Zur Langzeitintegrität solcher Metall-auf-Metallverbindungen ist im Allgemeinen wenig bekannt. Zur Erhöhung der Dichtheit werden oft Teflonringe in die Verbinder eingesetzt. Die größtmögliche Dichtheit wird durch das Verschweißen der einzelnen Rohre miteinander erreicht. Bei der Betrachtung der Langzeitdichtheit der Verrohrung gegen Gas sind Gasdiffusion in und durch die Rohre und die daraus resultierenden Folgen (z. B. Wasserstoffversprödung) zu beachten. Um eine Versprödung des Metalls durch Wasserstoff zu verhindern, könnten austenitische Stähle (CrNi-Stähle) eingesetzt werden. Allerdings gibt es bisher keine genormten Casings und Verbinder aus diesem Material. Diese würden einen erheblichen Kostenfaktor darstellen. Es gibt weiterhin die Möglichkeit, beschichtete Rohre einzusetzen. Auch hier müssten noch Studien zur Langzeitbeständigkeit der Beschichtungen unter in situ-Bedingungen durchgeführt werden.

Je größer der Durchmesser einer Rohrtour ist, desto weniger Platz steht für die Gewinde zur Verfügung. Abbildung 28 zeigt Casings mit einem Außendurchmesser von 16" (40,64 cm). Der Unterschied zu den in Abbildung 27 gezeigten wesentlich kleineren Casings ist deutlich zu erkennen. Größere Casings können durch die auftretenden Belastungen beim Transport und beim Verschrauben leichter beschädigt oder verformt werden als kleinere. Jede Beschädigung wirkt sich nachteilig auf die Dichtheit des Casingstranges aus.



Abbildung 28: Casings (Durchmesser: 16'') - Blick auf Gewinde (Salzgitter Mannesmann Line Pipe , 2017)

6.3.7 Zementation

Zement

Zur Befestigung der Casings im und zur Abdichtung zum Gebirge werden die Ringräume zwischen den Rohren und der Formation mit Zement verfüllt. In Tabelle 13 werden die gängigen Tiefbohrzemente kurz vorgestellt. Diese vom American Petroleum Institute (API) genormten Zemente werden in der API-Specification 10a in die Klassen (Class) A bis J eingeteilt.

Nach dieser Standard-API-Tabelle sind API-Zemente nur bis 4 800 m vertikaler Bohrungstiefen ausgewiesen. Das ist aus praktischer Sicht der Erdölingenieure plausibel, denn größere Vertikalteufen sind in der Tiefbohrtechnik nach Öl und Gas nur in Ausnahmen von Bedeutung. Gleichwohl ist aber z. B. aus der KTB Forschungsbohrung in Windischeschenbach bekannt, dass auch deutlich größere Teufen sicher zementiert werden können.

Die Zementkopfhöhe im Ringraum, die Qualität des ausgehärteten Zements, die Anbindung an die Rohre und die Gleichmäßigkeit der Verfüllung des Ringraumes können durch Kontrollmessungen ermittelt und dokumentiert werden.

Tabelle 13: Tiefbohrzemente nach API: Verwendung und Zusammensetzung (Lotzwick, 2007)

Klasse	Teufenbereich, Druck- und Temperaturbe- dingungen	Sulfatbe- ständig- keit	Bemerkungen	typische Zusammen- setzung [%]			
				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
A	bis 1 830 m (6 000 ft)	mäßig	entspricht dem deut- schen Portlandzement CEM I 42,5 N	53	24	8	8
B	bis 1 830 m (6 000 ft)	mäßig bis hoch (2 Typen)	Portlandzement	47	32	5	12
C	bis 1 830 m (6 000 ft)	mäßig bis hoch (2 Typen)	erreicht schnell eine hohe Festigkeit	58	16	8	8
D	1 830 - 3 050 m (6 000 - 10 000 ft) bei mäßig hohen Temperaturen und Drücken	mäßig bis hoch (2 Typen)	verzögerter Zement	26	54	2	12
E	3 050 - 4 270 m (10 000 - 14 000 ft) bei hohen Temperaturen und Drücken	mäßig bis hoch (2 Typen)	verzögerter Zement	26	54	2	12
F	3 050 - 4 880 m (10 000 - 16 000 ft) bei extrem hohen Temperaturen und Drücken	mäßig bis hoch (2 Typen)	verzögerter Zement				
G	Basiszement (ohne Additive): bis 2 440 m (8 000 ft)	mäßig bis hoch (2 Typen)	häufige Verwendung von Additiven (Verzöge- rer/Beschleuniger), um Einsatzbereich zu er- weitern; kann den meis- ten Bohrlochbedingun- gen angepasst werden; Aufmahlgrad grob - schnell abbindend	50	30	5	12
H	Basiszement (ohne Additive): bis 2 440 m (8 000 ft)	mäßig bis hoch (2 Typen)	häufige Verwendung von Additiven (Verzöge- rer/Beschleuniger), um Einsatzbereich zu er- weitern; kann den meis- ten Bohrlochbedingun- gen angepasst werden; Aufmahlgrad fein - langsam abbindend	50	30	5	12
J	3 660 - 4 880 m (12 000 - 16 000 ft) bei extrem hohen Temperaturen und Drücken		häufige Verwendung von Additiven (Verzöge- rer/Beschleuniger), um Druck- und Temperatur- bereich zu erweitern; keine speziellen Her- stellungsvorschriften				

Zementation im Allgemeinen

Die Verfüllung der Ringraumes zwischen einer gesetzten Rohrtour und dem Gebirge erfolgt üblicherweise in Form einer „Zwei-Stopfen-Zementation“ (Abbildung 29).

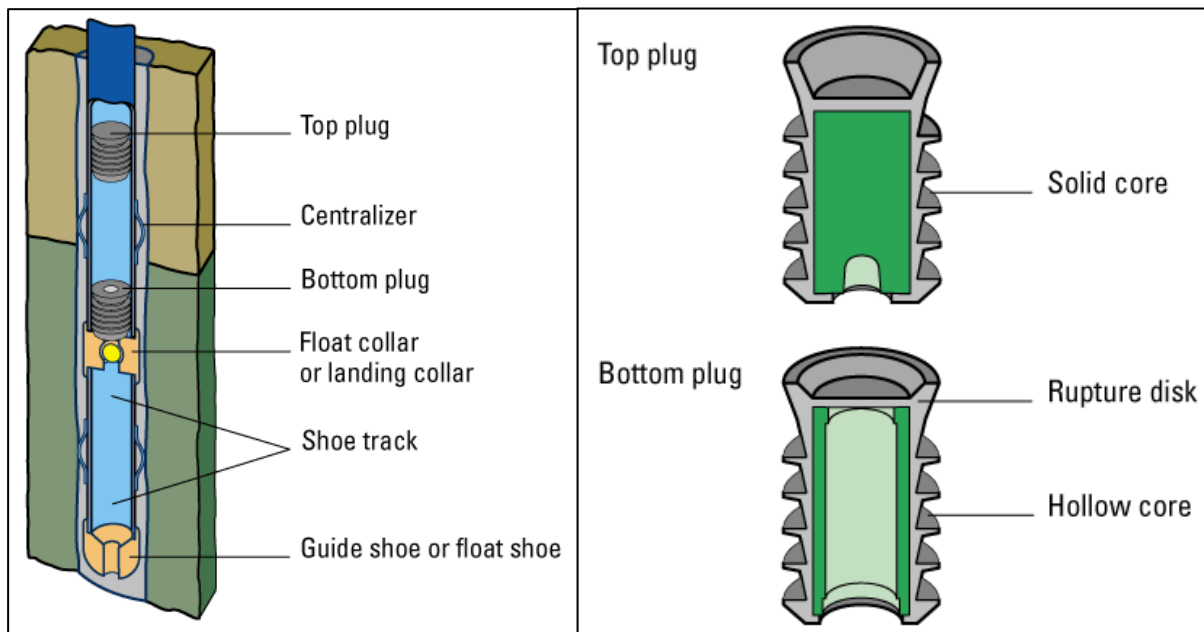


Abbildung 29: Prinzip der Zwei-Stopfen-Zementation (Schlumberger, 2018)

Die flüssige Zementsuspension wird zum Zementieren innerhalb der Rohrtour nach unten gepumpt. Damit sie sich nicht mit der Bohrspülung vermischt, wird sie durch zwei Gummistopfen isoliert. Der Bottom Plug bewegt sich vor dem Zement durch das Rohr, der Top Plug folgt nach (siehe Abbildung 29).

Da der Bottom Plug hohl ist, reißt die Membran an seinem oberen Ende, sobald der Stopfen auf dem Rohrschuh ankommt und dort arretiert wird. Der Zement ergießt sich durch den Bottom Plug hindurch in den Ringraum und füllt diesen von unten nach oben auf. Die Spülung im Ringraum wird durch die wesentlich schwerere Zementsuspension verdrängt.

Das Ankommen des massiven Top Plugs am Rohrschuh hat einen deutlichen Druckanstieg im System zur Folge, der anzeigt, dass die gesamte Zementsuspension im Ringraum verpresst wurde. Ein Rückschlagventil im Rohrschuh (float collar) verhindert, dass die Zementsuspension aus dem Ringraum wieder in das Rohr zurück schwappt.

Nach dem Aushärten des Zements werden die Zementstopfen, das Rückschlagventil und die Führungsnase durch die nachfolgende Bohrgarnitur durchbohrt. Falls nach dem Setzen des Rohres und den Zementationsarbeiten keine weiteren Bohrarbeiten erfolgen, ist die Rohrtour durch den Zement, das Rückschlagventil und die Stopfen vor einem Eindringen von Formationsfluiden gesichert.

Zementation im Salz

Salz besitzt durch seine Fließeigenschaften eine gewisse „selbstheilende“ Funktion. Insofern könnte man vermuten, dass Rohrtouren im Salz nicht zementiert werden müssten, da das Salz in den Ringraum kriechen und diesen damit von selbst verfüllen könnte.

Salze besitzen aber sehr unterschiedliche Eigenschaften, die spezifische Fließrate variiert von Fall zu Fall stark und ist schwer vorhersagbar.

Bei Kavernen (also in der Mitte des Salzstocks) kann es durchaus Wochen und Monate dauern bis ein Microannulus „geheilt“ ist. Bei Bohrungen in Öl und Gaslagerstätten (meist am Rand der Salzstöcke) kann es passieren, dass schon beim Einbau des Casings das Bohrloch kleiner ist als der Außendurchmesser der Rohrtour. Hier wird dann schon präventiv das Salz unterschritten. Dies ist ein bekanntes Problem zum Beispiel im Golf von Mexiko, aber auch in der Norddeutschen Rotliegend-Formation nicht unbekannt.

Da man sich in der Tiefbohrtechnik also nicht auf die Fließrate des Salzes verlassen will, füllt man den Ringraum mit Zement auf, den man in seinen Abbindeigenschaften deutlich besser beeinflussen und kontrollieren kann. Weiterhin möchte man nach dem Setzen der Rohrtour zeitnah weiterbohren, was aber erst möglich ist, wenn das letzte Casing fest in der Formation verankert ist. Bei reinem Salz außerhalb des Casings (also ohne Zementation) wüsste man nicht genau, wann das der Fall ist.

Die meisten Regularien schreiben vor, dass das Casing so dimensioniert werden muss, dass es die drückenden Horizontalspannungen des umfließenden Salzes auch ohne Ringraumverfüllung mit ausgehärtetem Zement aufnehmen kann. Bei einem Zementmantel, der das Casing umschließt, schmiegt sich das fließende Salz aber gleichmäßiger um die Rohrtour, sodass Punktlasten auf dem Casing vermieden oder zumindest gemindert werden. Die Zementation im Salz schützt die Rohrtour also auch vor punktuellen Spitzenlasten.

Die akustischen Messmethoden, die eingesetzt werden, um zu prüfen, ob der Zement den Ringraum gleichmäßig ausfüllt und ob der Zement gut am Casing und am Gebirge anbindet, nutzen Reflektionen von Schallwellen an den Übergängen von Stahl zu Zement und von Zement zu Gestein. Sie funktionieren deshalb nicht so gut, wenn außerhalb des Casings nur mit Salz ansteht (und kein erhärtetes Ringraummaterial). Man kann schlecht nachweisen, dass das Salz ausreichend auf das Casing aufgekrochen ist und homogen kraftschlüssig an das Casing anschließt. Deshalb werden in der Tiefbohrtechnik Rohrtouren im Salz immer zementiert. Das Salz trägt dann (gegebenenfalls) zur Nachheilung von Fehlstellen in einem gegebenenfalls nicht ausreichend zementierten Ringraum bei.

Bei Bohrlochverschlüssen schreiben viele Behörden die Abdichtung der Lagerstätte mit Zement ohnehin fest vor, d. h. auch wenn die abdichtende Wirkung des Salzes bekannt ist, wird sie nicht als alleinige Abdichtung akzeptiert.

6.3.8 Rückbau / Verfüllung von Bohrungen

Bohrungsintegrität

Die Integrität einer verfüllten Bohrung ist immer von zwei Hauptfaktoren abhängig: dem Verfüllmaterial und der operativen Ausführung der Verfüllung. Außerdem müssen die äußeren Bedingungen um die Bohrung für möglichst den gesamten Beobachtungszeitraum berücksichtigt und in die Planung der Bohrlochverfüllung einbezogen werden. Die Dichtigkeit von Öl- und Gasbohrungen ist erfahrungsgemäß, mindestens über einige Jahrzehnte gewährleistet.

Die Integrität einer Bohrung wird mittels sogenannter Barrieren sichergestellt. Die Bohrung selbst wird mittels der Casings und Zement vor Einbrüchen und Zuflüssen aus den umliegenden Formationen geschützt. Gleichzeitig schützt diese Barriere den bohrlochnahen Bereich des Bodens vor den Einflüssen von Bohrspülung und vor den produzierten Kohlenwasserstoffen. Damit diese nicht unkontrolliert aus der Bohrung austreten und damit den Boden, das Grundwasser und die Umwelt über Tage an der Produktionsbohrung gefährden, muss die Bohrungsintegrität schon während der Bohr- und Produktionsphase gewährleistet und soweit wie möglich mit Messtechnik kontrolliert werden. Eine einwandfreie Zementation der Casings bereits während des Abteufens ist auch die Voraussetzung für die Langzeit-Dichtigkeit einer Bohrung nach der Verfüllung.

Die Schwierigkeit eine Bohrung dicht zu verwahren, liegt oft nicht im Inneren der Bohrung, sondern im Ringraum zwischen Casing und Formation. Die besonders kritischen Bereiche sind die Kontaktbereiche zwischen den unterschiedlichen Materialien (Stahl, Zement, Gebirge).

Dort kann es zur Bildung von Mikroringräumen kommen. Außerdem können Defekte / Risse sowohl im Casing als auch im Zement entstehen (Abbildung 30).

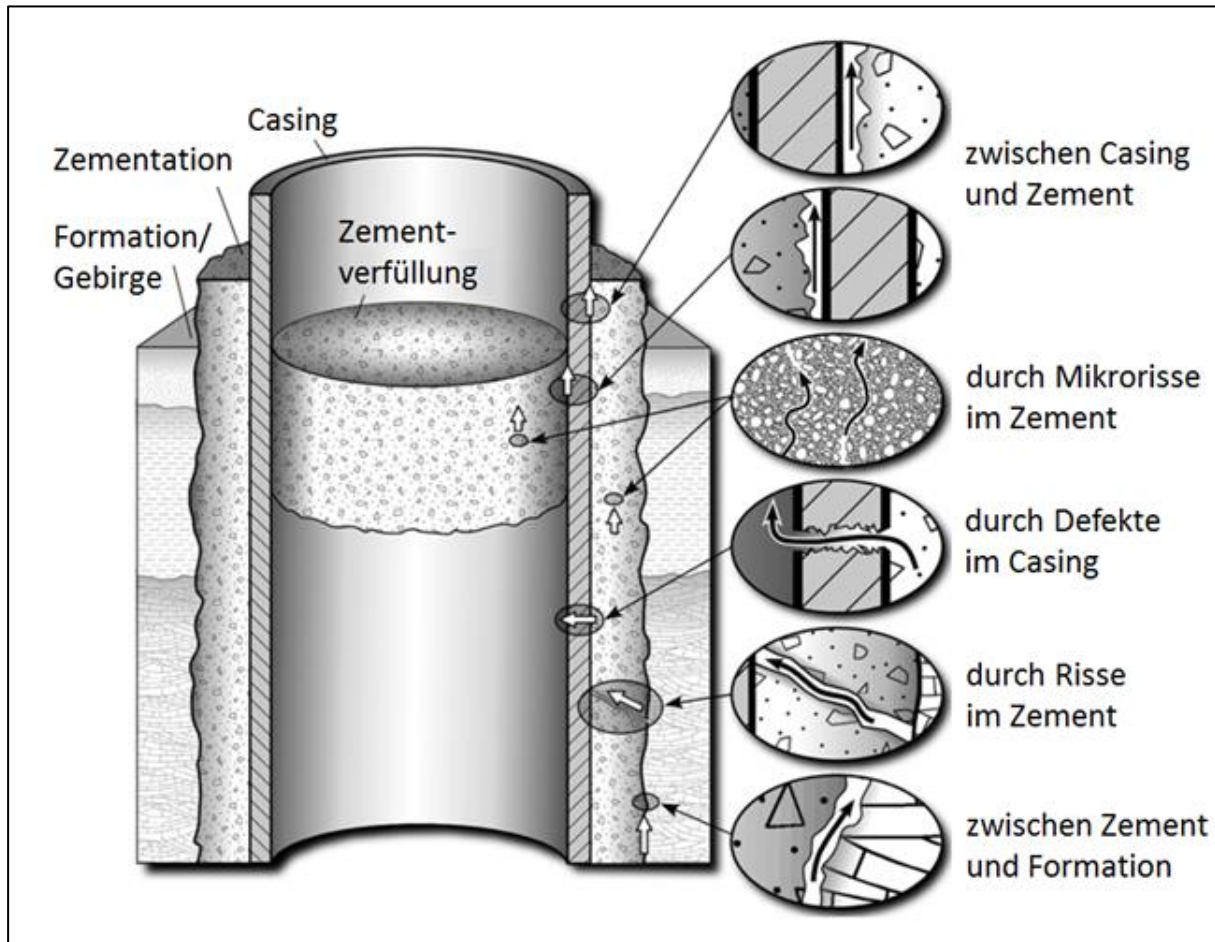


Abbildung 30: Mögliche Fließwege in einem verfüllten Bohrloch (nach (Gasda, et al., 2004))

Die Ursachen für die Entstehung der Fließwege können vielfältig sein:

- ungünstige Zementationsplanung (z. B. Zementrezeptur funktioniert nicht unter in situ Bedingungen),
- schlechte technische Durchführung (unvollständige Verdrängung der Spülung durch die Zementsuspension),
- Belastungen während Lebensdauer der Bohrung (wechselnde Temperatur- und Druckbelastungen, Alterungsprozesse, übermäßige Beanspruchung während der Bohrphase, tektonische Veränderungen),
- Gaszutritte während des Verpumpens oder während des Abbindens,
- chemische Reaktionen, Korrosion (Salze, Kohlendioxid, ...),
- Zementschrumpfung.

Viele der genannten Aspekte sind durch möglichst genaue Kenntnis der in-situ-Bedingungen, gute Planung, Kommunikation und gewissenhafte Durchführung vermeidbar. Trotzdem bedarf es an Erfahrung und teilweise umfangreichen Laboruntersuchungen, um eine nach Stand der Technik einwandfreie Zementation herzustellen und zu dokumentieren. Es gibt bisher nur wenig Erfahrung bezüglich der Langzeitintegrität von verwahrten Bohrungen und zum Beispiel Diffusionsprozessen im Bohrzement. Bei der Erstellung aktueller Tiefbohrungen geht mit der

Bohrlochplanung bereits ein konkretes, individuelles Konzept zur Bohrlochverfüllung nach Nutzungsende einher.

Folgende Aspekte fließen in die Umsetzung der Bohrlochverfüllung ein:

- Bohrlochkonstruktion,
- Anzahl und Eigenschaften der porösen Zonen, Frischwasserhorizonten und kohlenwasserstoffhaltigen Formationen,
- Eigenschaften der Fluide, die in den Ringräumen oder im Bohrloch verbleiben bzw. in den Formationen anstehen,
- Zustand der Ringraumzementation auf Grundlage der Zusammensetzung und Menge an Zement, die während der Bohrphase eingebracht wurde,
- Zustand der Bohrung (Einfluss von Druck, Korrosion, mechanischer Beanspruchung, im Bohrloch verbliebene Hindernisse, ...),
- Art der Komplettierung (open hole, Perforation, Ablenkungen, ...),
- Bedingungen über Tage (Infrastruktur, Verfügbarkeiten, ...).

Technische Durchführung

In der Regel kann jede Tiefbohrung als ein Unikat betrachtet werden. Aufgrund der Unterschiede der Bohrungen kann kein allgemeiner Arbeitsplan angegeben werden. Die folgenden Vorgehensweisen haben sich jedoch in der Praxis bewährt. (Reinicke, 2016)

Intakte Ringraumzementation und Casings

Bei einer Bohrung, welche in der Bohr- und Betriebsphase keine Anzeichen von Undichtigkeiten aufwies, wird der Innenraum durch das Einbringen von Zementsuspension im Bereich jeder porösen Formation, jedem Wasserhorizont und jeder kohlenwasserstoffhaltigen Formation verschlossen.

Dazu wird ein Zementationsstrang in die Bohrung eingebaut, durch den der Zement einzirkuliert wird. Vor und hinter der Zementpille sollte ein sogenannter Spacer verpumpt werden, um Verunreinigung der Zementsuspension durch das im Bohrloch vorhandene Fluid zu vermeiden. Wenn das benötigte Zementvolumen verpumpt wurde, wird der Zementationsstrang wieder ausgebaut. Dies sollte sehr vorsichtig geschehen, damit es auch bei diesem Schritt zu keiner Durchmischung von Zement und anderen Bohrlochfluiden kommt. Jede Zementbarriere wird auf die ordnungsgemäße Platzierung (z. B. durch Tagging) sowie auf deren Festigkeit und Dichtigkeit (Druck- und Zuflusstest) geprüft. Beim sogenannten Tagging wird ein Bohrstrang in die Bohrung eingefahren, bis dieser auf die Zementierung trifft. Durch Ausmessen der eingefahrenen Länge des Stanges kann die Teufe der Barriere verifiziert werden. Beim Drucktest wird die Bohrung an der Oberfläche verschlossen und Druck auf die Bohrung ausgeübt. Bleibt der Druck konstant, ist die Barriere nach unten hin dicht. Durch einen Zuflusstest wird geprüft, ob Leckagen vorhanden sind, welche Formationsfluiden bei Unterdruck in die Bohrung Zufluss in das Bohrloch erlauben. Dazu wird über der Zementbarriere eine Flüssigkeit mit geringer Dichte eingefüllt, um dort einen geringeren hydrostatischen Druck als unterhalb der Barriere zu erzeugen. Steigt der Spiegel dieses Fluids daraufhin an oder sind aufsteigende Gasblasen zu beobachten, muss eine Undichtigkeit der Zementbarriere angenommen werden.

Zwischen den einzelnen Zementbarrieren wird Spülung (oft: Wasser-Bentonit-Gemisch) in der Bohrung belassen (siehe Abbildung 31).

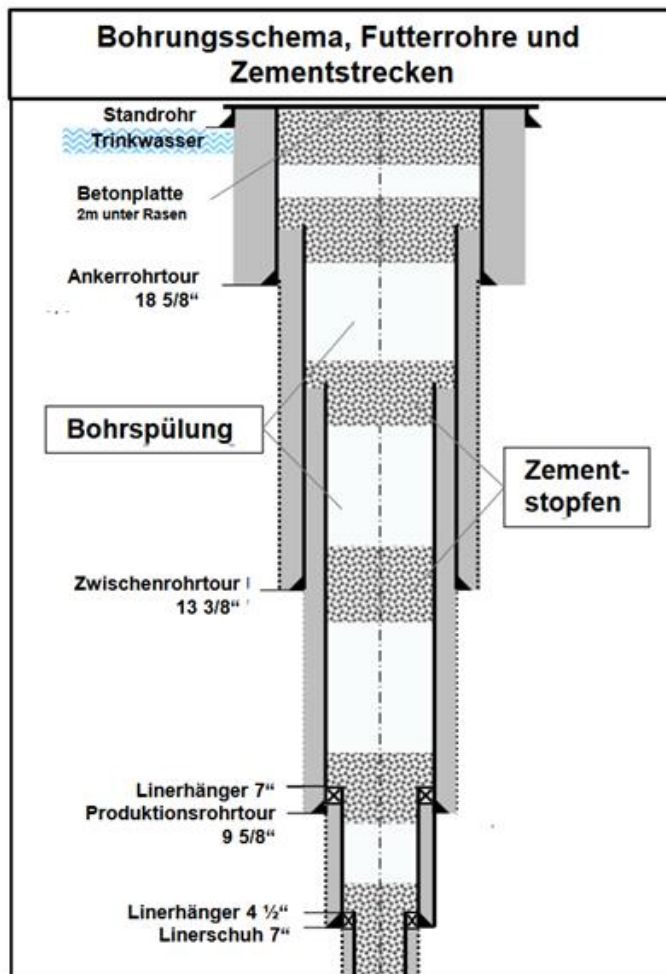


Abbildung 31: Beispielhaftes Schema einer verfüllten Bohrung (Reinicke, 2016)

Als weitere Abdichtmaßnahmen können mechanische Abdichtungen verwendet werden. Dazu zählen Zementierpacker (Retainer) und Brückstopfen (Bridge Plugs). Beide werden an bestimmten Stellen in der Bohrung platziert und dort als mechanische und hydraulische Barriere fest „verriegelt“. Ein Zementierpacker wird über einer zu zementierenden Formation abgesetzt und die Zementsuspension durch diesen hindurchgepumpt. Nach Einbringen des gewünschten Volumens an Zementsuspension wird durch Ziehen am Steigrohr eine Klappe am Zementierpacker geschlossen, so kann der Bereich mit höheren Drücken abgedichtet werden. Über dem Zementierpacker wird in der Regel eine weitere Schicht aus Zementsuspension eingebracht. Die Abdichtung aus Zement und Zementierpacker kann bei eventuellen späteren Arbeiten durchbohrt werden. Ein Bridge Plug wird unter der zu setzenden Zementsäule eingebracht um dort als „Fundament“ für die Zementsäule zu dienen und Verunreinigungen der Zementschlämme durch aufsteigendes Gas oder andere Fluide zu verhindern. Er besteht aus zwei gusseisernen Teilen mit Dichtelement dazwischen und kann bei Bedarf nachträglich ebenfalls aufgebohrt werden.

Der letzte Schritt jeder Verfüllung beinhaltet den Abbau des Bohrlochkopfes und das Ziehen der verbliebenen Rohre bis einige Meter unter der Geländeoberkante.

Undichtigkeit im Ringraum

Wenn bekannt ist, dass die Ringraumzementation nicht (mehr) einwandfrei ist, müssen die Casings aus der Bohrung entfernt werden, bevor die Verfüllmaterialien eingebracht werden. Ist ein Ziehen der Casings nicht möglich, ist eine Nachzementation des Ringraumes erforderlich. Dazu wird die Verrohrung im kritischen Bereich der Bohrung perforiert und mit einer

schwachen Säure ausgewaschen, um die Fließwege von feinkörnigen Zementanteilen zu reinigen. Danach wird eine Druckzementation des Ringraumes durch die perforierte Verrohrung durchgeführt. Die Vorteile dieser Verfahrensweise sind, dass sie vergleichsweise wenig Zeit in Anspruch nimmt und das Bohrloch während der Durchführung standfest bleibt. Allerdings besteht die Gefahr, dass die Zementsuspension durch den turbulenten Fluss durch die Perforationen und im Ringraum verunreinigt wird und dadurch schlechter an das Gebirge anbindet.

Eine weitere Möglichkeit zur Ausbesserung einer Undichtigkeit im Ringraum ist, die Verrohrung und die Zementation in dem entsprechenden Bereich wegzufräsen und nachfolgend im freigelegten Bereich einen Zementstopfen zu setzen.

Beschreibung gesetzlicher Vorgaben in Deutschland

Die gesetzliche Grundlage für die Verfüllung und Verwahrung von Bohrungen ist in der BVOT - Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen in § 11 „Auflässige Bohrungen“ gelegt. Darin steht, dass „*Erdöl- und Erdgasträger, Speicherhorizonte sowie nutzbare Wasserstockwerke abzudichten*“ sind (LBEG, 2006 S. 8). Die Verordnung wird eingesetzt durch das Bundesberggesetz. Seit 2006 liegt die Bergaufsicht beim Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), welches dem Bergrecht untersteht und im Rahmen der Lagerstättengesetze agiert. Einzelheiten sind in der „Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“ (aktuelle Ausgabe: 29.07.1998, herausgegeben vom Oberbergamt in Clausthal-Zellerfeld) festgelegt. Die Richtlinie besteht aus vier Teilen, welche im Folgenden zusammengefasst werden.

Allgemeines

Auflässige Bohrungen „... *sind so zu verfüllen, dass Einbrüche an der Erdoberfläche vermieden werden und eine spätere Nutzung des Untergrundes zur Gewinnung von Bodenschätzen und Wasser oder zur Tiefspeicherung nicht beeinträchtigt wird.*“ (Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, 1998 S. 1)

Es sollen „*aller Erfahrung nach ein flüssigkeits- und gasdichter Verschluss erreicht*“ und „*nachteilige Veränderungen des Grundwassers vermieden*“ werden. (Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, 1998 S. 1)

Anforderungen an die Verfüllung

Besondere Verfüllungsstrecken werden benötigt in:

- nutzbaren Erdöl-, Erdgas- und Salzlagerstätten,
- nutzbaren Speicher- und Wasserhorizonten,
- druckstarken Horizonten mit Zuflüssen,
- Linern,
- Schnittstellen von Rohren und Ringräumen,
- Rohrschuhen der tiefsten Rohrtour in einem teilweise unverrohrten Bohrloch,
- Bereichen unter der Erdoberfläche,
- Bereichen mit Schwierigkeiten während der Lebenszeit der Bohrung.

Als Verfüllungsmaterial können verwendet werden:

- geeignete Zementsuspensionen,
- andere geeignete Feststoffe,
- ggf. mechanische Abdichtungen (Bridge Plug).

In der Richtlinie werden keine genaueren Anforderungen an Zement und Feststoffe gestellt. Es werden einzig eine gute Haftung an Rohr- und Bohrlochwand gefordert. Zur Füllung der Bereiche in der Bohrung, welche nicht zu den besonderen Verfüllungsstrecken gehören, können Zwischenfluide verwendet werden (z. B. entsalztes Wasser, Bohrspülung, verdichteter und hydratisierter Bentonit). Diese dürfen keinerlei schädliche Auswirkungen auf Verrohrung, Gebirge oder die anderen Verfüllstoffe haben.

Abmessungen der besonderen Verfüllungsstrecken

Der Hauptfokus der Richtlinie liegt in Vorgaben für die erforderlichen Verfüllungsstrecken. Die Abmessungen der besonderen Verfüllungsstrecken sind abhängig von ihrer Art.

- Lagerstätten (nutzbare Erdöl-, Erdgas- und Salzlagerstätten und nutzbare Speicher- und Wasserhorizonten):
 - Alle nicht zementierten Rohrtouren müssen gezogen werden, ist dies nicht möglich muss eine Perforation und Druckzementation erfolgen.
 - Unter bestimmten Bedingungen ist es möglich, einen Salzhorizont, welcher später als abdichtende Schicht fungieren soll, vorübergehend durch ein unzeementiertes Casing zu verrohren (beispielsweise bei Erkundungsbohrungen, die nur kurzfristig benutzt werden). Zum Verschluss der Bohrung kann ein solches Casing leichter abgefräst und ausgebaut werden, um das Zusammenfließen des Salzes und die Entstehung einer natürlichen Abdichtung zu gewährleisten. Dieses Casing muss allerdings in der Lage sein, dem anstehenden Gebirgsdruck während der Bohr- und Messphase standzuhalten. Für die Verfüllung dieser Art muss Punkt 2) „mächtige Salzlagerstätten“ beachtet werden.
 - Eine Zementsäule ist zu setzen, welche den Lagerstättenbereich nach oben und unten um 50 m überschreitet.
 - Bei perforierten Strecken sollen Druckzementationen mit einem Zementierpacker und zusätzlich 20 m Zementsäule darüber erfolgen.
 - Nur wenn eine Druckzementation nicht möglich ist, ist eine mechanische Abdichtung mit 50 m Zementsäule darüber zulässig.
 - Abweichungen von diesen Regelungen sind mit Begründung im Betriebsplan zu nennen.
- mächtige Salzlagerstätten:
 - In mächtigen Salzformationen erlaubt die Vorschrift, dass auf eine durchgehende Zementation verzichtet werden kann. Im oberen und unteren Bereich muss die Zementsäule aber mindestens 50 m in das anstehende Nebengestein und 100 m weit in die Salzformation hineinreichen.
 - Im Bereich mächtiger Salzlagerstätten ist es außerdem denkbar, bereits während des Abteufens der Bohrung Vorkehrungen für einen sicheren Bohrlochverschluss zu treffen. Das trifft insbesondere für nur kurzzeitig verwendete Bohrungen zu, die nach ihrer Nutzung wieder verschlossen werden. Das Casing, welches im Bereich der Salzformation gesetzt wird, könnte in diesem Fall beispielsweise im oberen Bereich des Salzes unzeementiert bleiben, um im Rahmen der nachfolgenden Bohrlochverfüllung abgefräst und aus dem Bohrloch entfernt zu werden. Anschließend würde dieser Bereich mit einer entsprechenden Salzlösung verfüllt werden. Das fließende Salzgestein würde dann im Laufe der Zeit einen dichten Abschluss der Bohrung gewährleisten.

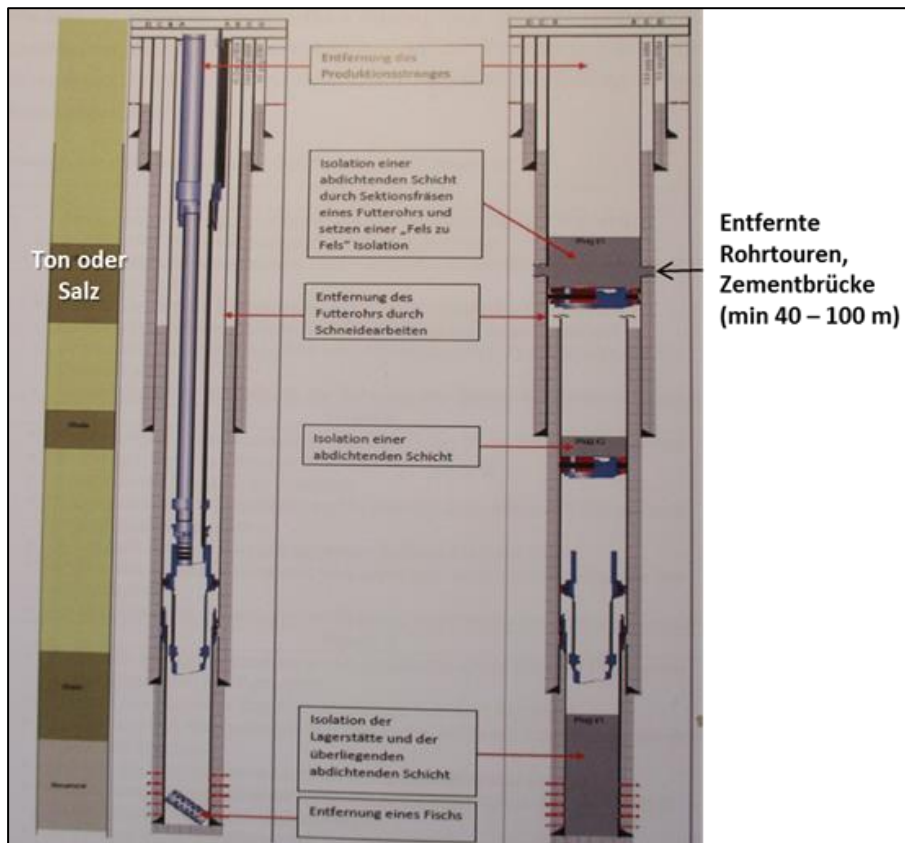


Abbildung 32: Entfernte Rohre und Zementstopfen in einer Salzformation

- unverrohrte Bohrlöcher:
 - Verfüllungsstrecke von mindestens 100 m oberhalb einer mechanischen Abdichtung im letzten verrohrten Bohrlochabschnitt
- Liner, Schnittstellen von Rohren und Ringräumen (damit sind Übergänge von einem Rohr in ein anderes gemeint, wenn die Rohrtour nicht komplett von der Endteufe bis nach über Tage geführt ist):
 - Mindestverfüllungsstrecke von 100 m mit je 50 m in beiden Rohrtouren, oder
 - mechanische Abdichtung im größeren Rohrdurchmesser und 50 m Verfüllungsstrecke
 - Wenn eine Schnittstelle eine dichte 100 m lange Zementation im Ringraum über dem Rohrschuh der größeren Rohrtour aufweist, muss diese nicht extra verfüllt werden.
- Vorgehensweise im Bereich unter der Erdoberfläche:
 - Mit 100 m Verfüllungsmaterial verdichten und 25 cm dicke Betonplatte als letzten oberen Abschluss einbauen.
 - Rohrtouren sind bis mindestens 1 m unter Geländeoberfläche zu entfernen (Nutzung der Oberfläche muss weiter gewährleistet sein).

Überprüfung und Verfüllungsbericht

Die Platzierung der Verfüllungsstrecken soll kontrolliert werden, indem überprüft wird, ob sich das obere Ende der Abdichtung in der erwarteten Teufe befindet.

Wenn keine mechanische Abdichtung (Bridge Plug) verwendet wurde, muss ein erfolgreicher Verschluss durch einen Drucktest nachgewiesen werden.

Internationale Richtlinien (Vorteile bzw. Erweiterungen gegenüber deutscher Richtlinie)

Das hauptsächliche Ziel der deutschen Richtlinie ist der Schutz zukünftig nutzbarer Lagerstätten (nicht der Umweltschutz). Daher enthält sie keine Hinweise auf das Erreichen und Überprüfen eines langzeitstabilen und -dichten Bohrungsverschlusses. Es werden viele Problematiken und Aspekte in der Richtlinie angesprochen und differenziert, allerdings fehlen qualitative Anforderungen an die Verfüllmaterialien, technische Aspekte der Durchführung und Angaben zum Monitoring der Bohrlochintegrität gänzlich.

Im Folgenden werden vergleichend die Vorteile bzw. Erweiterungen in Bezug auf die Qualität der Verfüllmaterialien und das Monitoring von einigen internationalen Richtlinien (Kanada, Norwegen, Großbritannien, USA) gegenüber der deutschen Richtlinie herausgestellt. Allgemein ist zu sagen, dass in allen betrachteten Ländern Zement bzw. Zementsuspension als Hauptverfüllmaterial verwendet wird. Die ausgearbeiteten Erweiterungen zur deutschen Richtlinie (siehe Absatz „Beschreibung gesetzlicher Vorgaben in Deutschland“) über das Verfüllen auflässiger Bohrungen stellen teilweise einen Mehraufwand bei der technischen Durchführung dar, garantieren jedoch eine größere Sicherheit bezüglich der Bohrlochintegrität.

Qualität der Verfüllmaterialien

In **Kanada** ist als Verfüllmaterial der Tiefbohrzement Klasse G nach API oder (harzbasierter) Gipszement vorgeschrieben. Der Einsatz einer mechanischen Abdichtung (Bridge Plug) in Verbindung mit einer Zementsäule wird zur Verfüllung empfohlen. Das Zementvolumen muss der Tiefe angepasst werden. Je tiefer die Verfüllstrecke liegt, desto länger soll sie sein (Alberta Energy Regulator, 2016).

In der **norwegischen Richtlinie** wird von einem dauerhaften Verschluss der Bohrung ausgegangen, eine erneute Öffnung der Bohrung ist nicht vorgesehen. Die Verfüllungsmaterialien müssen langzeitstabil, impermeabel, nicht schrumpfend, widerstandsfähig gegen mechanische Lasten und chemische Einflüsse sein sowie eine gute Anbindung an Stahl und Gebirge und Verträglichkeit mit Stahl aufweisen. Zur Bestimmung der Aushärtungszeit und Festigkeitsentwicklung des Verfüllungsmaterials sind Labortests vorgeschrieben. Die eingesetzten mechanischen Abdichtungen müssen Leckagetests durchlaufen. Bei der Verwendung von Zement ist die Qualität der API-Klasse G gefordert. (NOROSK, 2004), (PSA, SFT, NSHD, 2001).

In **Großbritannien** wird eine mechanische Abdichtung (Bridge Plug oder viskoses Fluid) als Zementbasis zur Vermeidung des Nachsackens der Verfüllungssäule und Gasmigration stark empfohlen. Die zugelassenen Verschlussmaterialien sind Zement/Keramik, Mörtel (Steinbruchfeinmaterial), Duroplaste (Harze), Gele, Glas und Metalle.

In den **USA** sind als Verfüllungsmaterialien nur genehmigte API-Ölbohrzemente zu verwenden. Die Dichte (1,1 kg/l) und Viskosität (TAZ = 20 s) der Zementsuspension sind genau definiert. Auch hier muss das Zementationsvolumen der Tiefe angepasst werden. (Railroad Commission of Texas, 2017), (API, 2009), (NPC, 2011)

Monitoring

In **Kanada, Norwegen und Großbritannien** ist die Überprüfung der Zementationsdichtigkeit hinter den Rohrtouren vor Beginn der Verfüllungsarbeiten ausdrücklich gefordert. Außerdem ist ein Drucktest für jede Verfüllstrecke vorgeschrieben. Die ordnungsgemäße Platzierung der Verfüllung soll in **Kanada** entweder durch Tagging, durch eine Dichtemessung mit einer Gamma-Gamma-Sonde oder einem radioaktiven Tracer im Zement nachgewiesen werden (Alberta Energy Regulator, 2016). **Großbritannien** sieht dazu Cement-Bond-Logs, Ultrasonic-Imaging oder Temperaturmessungen bei der Zementaushärtung vor (King, et al., 2014). In **Kanada** sind außerdem Dichtigkeitstests vorgeschrieben (Alberta Energy Regulator, 2016).

In aktiven Bohrungen ist das regelmäßige Testen der Barrieren auf Dichtigkeit und Überwachen der Bohrlochsicherheit vorgeschrieben und wird durchgeführt. Das Überwachen der

Langzeitintegrität von verfüllten Bohrungen spielt in der Öl- und Gasindustrie eine untergeordnete Rolle. Die Sicherstellung der Langzeitintegrität wird in Richtlinien, Normen oder Gesetzen zwar gefordert, jedoch sind die Aussagen zur Untersuchung (welche Tests, in welchen Intervallen) und Dokumentation der Langzeitintegrität von verfüllten Bohrlöchern sehr vage.

Beispiel:

In (PSA, SFT, NSHD, 2001): *"When a well is temporarily and permanently abandoned, the barriers shall be designed to provide for well integrity for the longest period of time that the well is expected to be abandoned, inter alia so that outflow from the well or leakages to the external environment do not occur."*

Der Aspekt des Langzeitmonitorings spielt in der Tiefbohrtechnik eine untergeordnete Rolle, da die Bohrungen für gewöhnlich nach dem Ausfördern einer Kohlenwasserstofflagerstätte verfüllt werden. Nach der Förderung sind kein Druckaufbau und kein weiteres Austreten von Öl oder Gas aus der Lagerstätte zu erwarten.

6.4 Fazit zum maximal möglichen Enddurchmesser einer nach heutigem Stand der Technik erstellten Bohrung bis in eine Tiefe von 5 000 m im Kristallin

Der bisher mit dem üblichen „Stand der Tiefbohrtechnik“ maximal realisierte Durchmesser einer Bohrung im kristallinen Grundgebirge (Granit) liegt laut Literaturrecherche bei 17 ½“ (44,45 cm) und wurde mit den in der Tiefbohrtechnik üblichen Rollenmeißeln mit drei Rollen abgeteuft. Für noch größere Durchmesser wäre es erforderlich, mehr als drei Rollen auf dem Meißel zu platzieren. Solche Bohrmeißel werden in Großlochbohrungen der so genannten „Flachbohrtechnik“, die alle Bohraktivitäten umfasst, die nicht mit der Aufsuche von Öl und Gas in Verbindung stehen, eingesetzt. Die eingesetzte Technologie ist hierbei aber sehr unterschiedlich zur Tiefbohrtechnik, geht eher in Richtung Brunnen-, Schacht- oder Tunnelbau im Lockergestein und ist deshalb auf die Tiefbohrtechnik im Hartgestein, wie sie zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle eingesetzt werden müsste, nicht anwendbar.

Durch die weitere Forschung und Entwicklung von alternativen Bohrverfahren im Hartgestein (z. B. dem in ersten Feldtests erprobten Elektro-Impuls-Verfahren) könnten die maximal bohrbaren Durchmesser mit Technologien aus der Tiefbohrtechnik im Hartgestein in Zukunft auch deutlich größer ausfallen.

Die Spülpumpen müssen in der Lage sein, das Bohrklein jederzeit zuverlässig aus dem Bohrloch austragen zu können. Im oberen Bereich der Bohrung, wo große Durchmesser vorliegen, müssen hohe Volumenströme realisiert werden. Im unteren Bereich der Bohrung sind dagegen eher hohe Drücke erforderlich, um die Spülung zirkulieren zu lassen. Moderne Hochleistungsspülpumpen könnten die Pumpendrucke und Volumenströme, die einen ausreichenden Bohrkleinaustrag in einer 5 000 m tiefen 17 ½“-Bohrung ermöglichen, durch Parallel- bzw. Reihenschaltung mehrerer Aggregate bereitstellen. Eine weitere Vergrößerung des Bohrdurchmessers würde aber zu einem so starken Anstieg der benötigten Pumpendrucke bzw. Volumenströme führen, dass größere Cluster mit sowohl Reihen- als auch Parallelschaltungen von Pumpen erforderlich wären. Es ist zu beachten, dass die erforderlichen Spülvolumina (und die erforderlichen Meißelandrücke auf die Bohrlochsohle) mit dem Quadrat des Radius der Bohrung ansteigen. Hier ist zu beachten, dass die Innendurchmesser der üblichen Bohrgestänge sowie der erforderlichen Mess- und Richtbohrsysteme nicht für Volumenströme oberhalb von ca. 4 500 l/min (ermöglicht eine Bohrlochreinigung für Bohrlöcher bis 44“ Durchmesser) ausgelegt sind.

Das geologische Profil 2, welches für die Bohrlochkonstruktion zugrunde gelegt wurde, erfordert es, dass oberhalb der Endverrohrung von 17 ½“ noch mindestens zwei weitere Rohrtouren gesetzt werden. Unter Berücksichtigung der Standard API-Durchmesserreihe würde der

Durchmesser der Sektion in den oberen 500 m dabei aus dem Bereich des „Standes der Technik“ herausfallen und könnten deshalb nicht durch den Einsatz konventioneller Tiefbohrtechnik erschlossen werden. Hier wäre beispielsweise ein Schachtausbau vorzunehmen. Durch Anwendung des Lean Casing Drillings (bewusste Nutzung engerer Ringräume zwischen Casings und der Bohrlochwand und Kompensation der entstehenden Nachteile durch spezielle Bohr- und Zementationsverfahren) oder des noch in der Entwicklung befindlichen Mono Bore Ansatzes (durchgehender Durchmesser von der Oberfläche bis zur Endteufe) könnte ein Schachtausbau jedoch vermieden werden.

Große, auf dem Markt erhältliche Landbohranlagen (z. B. Bohranlage T-47 der Firma KCA Deutag) könnten aufgrund ihrer Hakenlasten theoretisch einen Casingstrang von 5 000 m Länge bis zu einem Durchmesser 20“ (50,8 cm) bewältigen. Ein Strang mit 24“ (60,96 cm) Durchmesser könnte bis auf eine Teufe von 4 200 m eingebaut werden. Die angegebenen Durchmesser sind allerdings als theoretische Obergrenzen zu betrachten, da die Massen der benötigten Verbinder nicht in die Kalkulation mit eingingen und die Stranggewichte daher optimistisch angenommen wurden. Außerdem sind keine Sicherheitsfaktoren eingeflossen. Die Berechnungen berücksichtigen auch nicht, dass die Rohre beim Einbau verklemmen könnten und zum Freiziehen größere Ausnahme-Hakenlasten erforderlich wären.

Die Dichtigkeit des Casings gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ist bei fachgerechter Verschraubung und vorsichtiger Handhabung erfahrungsgemäß über einen Zeitraum von einigen Jahren gegeben. Über die Langzeitdichtigkeit der Rohre, vor allem in Bezug auf Diffusionsvorgänge und Versprödung, liegen nur wenige belastbare Kenntnisse vor. Bei Rohrdurchmessern oberhalb der in der API gebräuchlichen Größen stellt die Forderung von gasdichten Gewinden eine immer größere Herausforderung dar. Hier müssten Schweißverbindungen in Erwägung gezogen werden. Auch hier besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

In Deutschland gibt es viel Erfahrung in Bezug auf den Rückbau und das Verfüllen von Bohrungen. (LBEG, 2006) bildet die gesetzliche Grundlage für die Verfüllung und Verwahrung von Bohrungen. Technische Einzelheiten sind in der „Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“ festgelegt. Die deutsche Richtlinie legt besonderes Augenmerk auf den Schutz zukünftig nutzbarer Rohstoffe / Lagerstätten und enthält keine Angaben zum Monitoring der Bohrlochintegrität. Zu diesem Aspekt können den gesetzlichen Vorgaben anderer Länder (besonders: Norwegen und Kanada) ergänzende Angaben entnommen werden. Generell spielt das Langzeitmonitoring von Altbohrungen in der Tiefbohrtechnik nach Öl und Gas eine untergeordnete Rolle, da ein weiterer Austritt von Kohlenwasserstoffen aus einer ausgeförderten Lagerstätte nicht zu erwarten ist. Bei Bohrungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle spielt der Nachweis des dichten Verschlusses und das Langzeitmonitoring des Bohrloches aber eine entscheidende Rolle. Hier müssten erhebliche Weiterentwicklungen erfolgen.

7 Endlagerbehälter

Die Dimensionierung und Auswahl eines geeigneten Endlagerbehälters hängt von vielen Einflussfaktoren ab. Das einzulagernde Inventar, die zugewiesene Sicherheitsfunktion und die Art der Endlagerung sind dabei maßgebend. Im Folgenden wird auf das prognostizierte Abfallmengengerüst für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in Deutschland und die Anforderungen an den Endlagerbehälter eingegangen. Davon ausgehend wird ein Konzept für die Dimensionierung eines geeigneten Endlagerbehälters erstellt.

7.1 Abfallmengengerüst

Die Auslegung eines Endlagers und dessen Betrieb wird maßgeblich vom einzulagernden Inventar an radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen bestimmt. In einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgedienten Brennelementen sind neben den ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren auch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu berücksichtigen. Gemäß dem Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm (NaPro)) (BMUB, 2015b) sind bei den Planungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auch diejenigen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ggf. nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können, zu berücksichtigen. Exakte Angaben zu Art und Menge dieser Abfälle liegen zurzeit nicht vor. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieses Vorhabens die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können, nicht berücksichtigt. Die einzige Ausnahme hierbei stellen die Strukturteile der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren dar, die von Anfang an für die Einlagerung im Endlagerbereich für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente vorgesehen sind. Das Mengengerüst der wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

7.1.1 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

In Deutschland wurden drei unterschiedliche Leistungsreaktortypen betrieben. Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) und Druckwasserreaktoren russischer Bauart (WWER). Von allen drei Typen sind ausgediente Brennelemente für die Endlagerung zu berücksichtigen. Die Brennelemente unterscheiden sich in ihrer Länge, Form und Anzahl der Brennstäbe pro Brennelement. Ein Brennelement besteht neben den Brennstäben aus den Brennelement-Strukturteilen. Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Brennstäbe und Brennelement-Strukturteile separat in Behälter verpackt.

Im Nationalen Entsorgungsprogramm NaPro (BMUB, 2015b) ist auf Basis der Verzeichnisse radioaktiver Abfälle (BMUB, 2013) der Bestand und die Prognose an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren dargestellt. Insgesamt wird eine Menge von etwa 10 500 tSM an ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren erwartet. Eine Aufteilung dieser Menge in die einzelnen Leistungsreaktortypen wird dort nicht vorgenommen.

Die Beladung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen von einzelnen Leistungsreaktoren hängt auch vom Typ der Brennelemente und von seiner Wärmeleitung ab. Daher ist für die Bestimmung der Anzahl der zu berücksichtigenden Endlagerbehälter die Kenntnis über die Aufteilung der Brennelemente auf die einzelnen Leistungsreaktoren nötig. Im Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB, 2015b) sind diese Angaben nicht enthalten.

Im Rahmen der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) wurde ein Mengengerüst zusammengestellt. Eine Aufteilung in die einzelnen Reaktortypen wurde vorgenommen. Die Schwermetallmasse aus der VSG ist 55 tSM geringer als im Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB, 2015b). Dies resultiert aus Rundungen bei der Berechnung der prognostizierten Brennelementbestände beim Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro). Trotz dieser geringeren Anzahl an Schwermetallmasse wird im Rahmen dieses Vorhabens das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus der VSG berücksichtigt, da dort das Mengengerüst auf die einzelnen Leistungsreaktortypen aufgeteilt wurde und damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Vorhaben gewährleistet ist. In der Tabelle 14 ist das Mengengerüst der endzulagernden ausgedienten Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren aufgeführt. (Peiffer, et al., 2011)

Tabelle 14: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren nach (Peiffer, et al., 2011)

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM]
DWR	UO ₂	12 450	6 415
	MOX	1 530	765
SWR	UO ₂	14 350	2 465
	MOX	1 250	220
WWER	UO ₂	5 050	580
Gesamt	UO ₂	31 850	9 460
	MOX	2 780	985
	Summe	34 630	10 445

7.1.2 Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren

In Deutschland wurden sieben Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke betrieben, die alle stillgelegt sind, sowie diverse Forschungsreaktoren, von denen noch acht in Betrieb sind. Die Brennelemente der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren sind in ihrer Form, Größe und Spaltstoffgehalt sehr unterschiedlich. Bei den Brennelementen aus den beiden Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR 300 handelt es sich z. B. um Graphitkugeln, in denen der Brennstoff integriert ist.

In der Vergangenheit wurden viele ausgediente Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren auf Basis bestehender Rücknahmeverträge ins Ausland entsorgt. Die Brennelemente aus bereits länger abgeschalteten Anlagen sind deshalb vollständig entsorgt.

In dem Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB, 2015b) wird keine Angabe über die Art und die Menge der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren gemacht.

In der VSG wurde das Mengengerüst für die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt. Allerdings sind die Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) und des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) im Rahmen der VSG nicht berücksichtigt worden, da ein Rücktransport der Brennelemente nach Russland bzw. in die USA angenommen wurde. In dem FuE-Vorhaben

„Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung / Lagerung (LABRADOR)“ (DBETEC, 2011) wurde das gesamte Mengengerüst der in Deutschland zu entsorgenden ausgedienten Brennelemente aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird das Mengengerüst aus der VSG und das Mengengerüst für den RFR und den FRMZ aus dem Vorhaben LABRADOR berücksichtigt, da ein Rücktransport der Brennelemente des RFR nach Russland nicht zugestimmt wurde (BMUB, 2010) und eine Zwischenlagerung der Brennelemente des FRMZ in Deutschland geplant ist (BMUB, 2015a). In der Tabelle 15 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt.

Tabelle 15: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren nach (Peiffer, et al., 2011) und (DBETEC, 2011)

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren	Anzahl der Brennelemente/Brennstäbe
AVR	288 161 Brennelement-Kugeln
THTR 300	617 606 Brennelement-Kugeln
KNK	2 484 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
BER II	120 Brennelemente
FRM II	150 Brennelemente
FRMZ	89 Brennelemente
RFR	950 Brennelemente und 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben

7.1.3 Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Bis zum 30.06.2005 war es möglich, die ausgedienten Brennelemente deutscher Leistungsreaktoren zur Wiederaufarbeitung ins Ausland zu transportieren und die radioaktiven Abfälle danach zurück zu nehmen. Ein Großteil der Brennelemente wurde in Frankreich (La Hague) und Großbritannien (Sellafield) wiederaufgearbeitet. Ein vergleichsweise geringer Anteil wurde in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) zwischen 1971 und 1990 aufgearbeitet und in der Verglasungseinrichtung Karlsruhe (VEK) verglast.

Die bei der Wiederaufarbeitung angefallenen radioaktiven Abfälle sind in Deutschland endzulagern. Bei diesen Abfällen handelt es sich um

- Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen (HAW-Kokille (CSD-V)),
- Kokillen mit verglasten mittelfradioaktiven Spülwässern (CSD-B) und
- Kokillen mit kompaktierten mittelfradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

Von der Sellafield Ltd. (ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich Wiederaufarbeitungsabfälle in Form von CSD-V zurückgeführt. Die leicht- und mittelradioaktiven Abfälle werden vollständig durch CSD-V substituiert.

Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben HAW-Kokillen (CSD-V) und kompaktierten mittelradioaktiven festen Abfällen (CSD-C) auch radioaktive Reststoffe aus der Betriebswasseraufbereitung (CSD-B) zurückzuführen.

Bei der Verglasung der CSD-V wurden ca. 150 Liter flüssige Glasschmelze in einen Edelstahlbehälter (Werkstoff 1.4833) mit 5 mm Wandstärke abgefüllt. Der Deckel wird mit dem Behälterkörper verschweißt. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Trappfuß auf. Die CSD-V hat einen Durchmesser von 430 mm und eine Länge von 1338 mm.

Die Verglasung der CSD-B erfolgt in Edelstahlkokillen mit den identischen Abmessungen der bisherigen Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen (CSD-V) (ESK, 2010).

Die zu kompaktierenden Abfälle für die CSD-C werden in 90 l-Presskartuschen gepackt und getrocknet. Zuvor können die Abfälle vorverpresst oder vorzerlegt werden. Die Presskartuschen werden mit einem Pressdruck von 200 MPa kompaktiert. Die entstandenen Presslinge werden in die CSD-C eingebracht. Die CSD-C hat einen Durchmesser von ≤ 440 mm und eine Länge von $\leq 1\,345$ mm.

Im Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB, 2015a) ist das aktuelle Mengengerüst der radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung dargestellt. Dies wird im Rahmen dieses Vorhabens berücksichtigt. In Tabelle 16 ist das Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle dargestellt.

Tabelle 16: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren nach (BMUB, 2015a)

Abfallstrom		Kokillen
CSD-V	AREVA-NC	3 024
	Sellafield Ltd.	565
	VEK	140
	Summe	3 729
CSD-B	AREVA-NC	140
CSD-C	AREVA-NC	4 104
Gesamt		7 973

7.2 Anforderung an den Endlagerbehälter

Die Anforderungen an die Auslegung eines Endlagerbehälters für die Einlagerung im kristallinen Grundgebirge in einer Teufe um 3 000 m bis 5 000 m ergeben sich aus den im Einlagerungsbereich herrschenden THMC-Bedingungen sowie aus der für die Einlagerung und Rückholung erforderlichen Handhabungstechnik. Durch die Endlagerung in einem Einlagerungshorizont zwischen 3 000 m bis 5 000 m Teufe ergeben sich dementsprechende Anforderungen an die Dichtigkeit, Druckfestigkeit und Festigkeit gegenüber auftretenden Spannungen, Temperaturbeständigkeit, Beständigkeit gegenüber dem Stützfluid im Bohrloch sowie Anforderungen an die Abmaße des Behälters aufgrund des begrenzten Platzangebotes im Bohrloch. Weiterhin muss der Behälter in der Lage sein, alle anfallenden Abfälle aufnehmen zu können. Damit ergeben sich Anforderungen an die Dimensionierung des Innendurchmessers des Behälters.

Bei einer Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in einer Tiefbohrung müssen unter anderem hohe Temperaturen und Drücke berücksichtigt werden. In Mitteleuropa nimmt die Temperatur mit der Tiefe um circa 3 °C pro 100 m zu (geothermische Tiefenstufe). Bei einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur in Deutschland von 10 °C herrschen im Einlagerungshorizont bereits Temperaturen zwischen 100 °C und 160 °C (Bundesverband Geothermie e.V., 2018). Je nach Inventar und Zwischenlagerzeit kommt es durch die Einlagerung der in den Behältern befindlichen Abfälle zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag. Die geforderte Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteraußenfläche nach (StandAG, 2017) steht im Widerspruch zu den im Bohrloch bereits vorherrschenden Temperaturen. Die festgelegte 100 °C-Grenze gilt *„solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind“* (StandAG, 2017 § 27 Abs. 4). Demnach muss über weitere Forschungsarbeiten eine maximale Grenztemperatur für das gewählte kristalline Wirtsgestein ermittelt werden. In den nachfolgenden Untersuchungen wird die Temperatur nicht weiter betrachtet. Unter der Annahme, dass die erwarteten Temperaturen als unkritisch bewertet werden, kann das Konzept der tiefen Bohrlöcher weiterverfolgt werden.

Der Druck auf den Behälter ergibt sich zum einen durch die Auflast der gestapelten Behälter sowie durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule, da der Behälter in einem Fluid eingelagert wird. Der Behälter muss darüber hinaus gegenüber dem Stützfluid chemisch beständig sein. Der Gebirgsdruck wird anfänglich über die Zementation, das Casing sowie die Fluidsäule aufgenommen und wirkt damit zunächst nicht auf den Behälter. Nach der Korrosion des Casings (sofern diese überhaupt eintritt) die zu einer Zerstörung des Casings führen könnte, kann auch der Gebirgsdruck bzw. tektonischer Druck auf den Behälter wirken und auch diesen zerstören. Dies darf allerdings erst auftreten, nachdem der Verschluss des Bohrloches voll wirksam ist.

Die Einlagerung des Endlagerbehälters kann über Seile oder Gestänge mit angekoppeltem Greifersystem erfolgen, das den Behälter aufnimmt, während der Förderung bis zum Einlagerungsort hält und dann freigibt (siehe Kapitel 10.1 Einlagerungs- und Rückholungstechnik ab Seite 119). Die daraus resultierenden Beanspruchungen sind bei der Auslegung des Behälters zu berücksichtigen.

Die Rückholbarkeit der Behälter muss für die Zeit der Betriebsdauer des Endlagers (hier: einer einzelnen Bohrung, siehe Definition Rückholung in Kapitel 10.5) gegeben sein, ebenso wird in (BMU, 2010) eine Handhabbarkeit der Behälter für den Fall einer Bergung für den Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers gefordert. Dabei soll der Behälter möglichst aerosoldicht sein.

7.3 Konzept eines geeigneten Endlagerbehälters

7.3.1 Materialauswahl

Der gewählte Stahl für einen Behälter für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss gegenüber einem Stützfluid beständig sein, welches sich während der Einlagerung und auch nach Verschluss im Bohrloch befindet und er muss den Bedingungen innerhalb einer verrohrten Bohrung standhalten können.

In (Bracke, et al., 2016) fiel die Wahl eines geeigneten Materiales zunächst auf einen austenitischen Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2 (Werkstoffnummer 1.4571). Tabelle 17 beschreibt die chemische Zusammensetzung des Stahls nach DIN EN 10088-3.

Tabelle 17: Chemische Zusammensetzung (in Massen-% nach (DIN EN 10088-3, 2014)) von Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
Min.	-	-	-	-	-	16,5	10,5	2,0	5xC
Max.	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	18,5	13,5	2,5	0,7

Um erste Aussagen zur Beständigkeit des Stahles im Stützfluid treffen zu können, wird im Folgenden für die Analyse der Chancen und Risiken dieses Konzeptes eine Stützflüssigkeit gewählt, die möglichst geringe korrosive Eigenschaften gegenüber dem gewählten Stahl aufweist.

Stützfluid

Als Stützflüssigkeiten kommen unterschiedlich wässrige Lösungen in Betracht. In der Tiefbohrtechnik wird vorrangig mit folgenden Fluiden als Stützfluid gearbeitet:

- NaCl- und CaCl_2 -Lösungen,
- CaBr_2 - und ZnBr_2 -Lösungen,
- K_2CO_3 - und Na_2CO_3 -Lösungen.

Den chlorid- und bromid-haltigen Lösungen können Korrosionsinhibitoren zugegeben werden. So ist es allgemein, üblich Inhibitoren zuzumischen, wenn die Lösungen einen pH-Wert von weniger als 10 haben.

K_2CO_3 - und Na_2CO_3 -Lösungen werden in der Bohrtechnik auch zum Ausfällen von Calcium- und Magnesiumionen (Wasserenthärtung) eingesetzt (Bildung von Alkalicarbonaten). Des Weiteren werden K_2CO_3 -Lösungen als „Edelkühlsolen“ eingesetzt. Die chlorid-haltigen Lösungen sowie K_2CO_3 -Lösungen werden auch in den Rohren von Erdwärmesonden als Wärmeträgersolen verwendet.

Es wird davon ausgegangen, dass die Lösungen in Folge des Drucks im Bohrloch flüssig sind, d. h. keine relevante Gasphase auftritt.

Korrosion

Korrosion ist nach (DIN EN ISO 8044, 2015) die „*physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann.*“ (DIN EN ISO 8044, 2015 S. 5) Angewandt auf die zu bearbeitende Fragestellung bedeutet dies die Schädigung von Behältern aufgrund der Eigenschaften der Stützflüssigkeiten, wobei mechanische Einwirkungen nicht betrachtet werden. Als wesentlicher Aspekt der Definition ist der negative Einfluss auf die Materialeigenschaften hervorzuheben (z. B. Verlust der Dichtigkeit, Festigkeit). Demnach ist nicht jede Reaktion des Werkstoffes ein korrosiver Prozess. Vielmehr versteht man beispielsweise unter Passivierung Reaktionen von Werkstoffoberflächen, die zur Bildung einer Schutzschicht führen, welche die Korrosion des Werkstoffs verlangsamen oder verhindern. Für die Funktion eines Werkstoffs ist jedoch nicht nur das Ausmaß des korrosiven Prozesses relevant, sondern zudem die Art des Korrosionsschadens. Gleichmäßige Flächenkorrosion äußert sich als Materialabtrag auf der gesamten Fläche. Sie kann mittels einer Korrosionsrate quantifiziert werden. Diese Art ist zu unterscheiden von der lokalen Korrosion (Stichwort Lochfraß), die Spannungsrisskorrosion (inter-/transkristalline Rissbildung) und die Spaltkorrosion (Korrosion durch lokal ungünstige chemische Bedingungen) zählen.

Bewertung der Korrosion

Grundsätzlich gibt es drei Ansätze, das Ausmaß von chemischen Reaktionen zu bewerten:

- Auswertung natürlicher Analoga,
- geochemische Modellierungen,
- experimentelle Befunde (empirisch ermittelte Informationen).

Natürliche Analoga und geochemische Modellierungen können derzeit nicht genutzt werden, um die Fragestellung zu beantworten. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung auf der Basis von Erkenntnissen der Werkstoffwissenschaften, die meist empirisch gewonnen wurden.

In den tiefen Bohrlöchern ist davon auszugehen, dass der Sauerstoffgehalt der Stützflüssigkeiten schnell verbraucht ist und damit über die meiste Zeit anoxische bzw. anaerobe Bedingungen herrschen. In diesem Fall kann eine erste Aussage mit Hilfe des Pourbaix-Diagramms der Abbildung 33 getroffen werden. Es zeigt die Stabilitätsfelder von Fe-Mineralen und -Spezies in Abhängigkeit des Redox-Potentials und des pH-Werts. Im Bohrloch werden Redoxpotentiale kleiner Null angenommen. Der relevante Stabilitätsbereich von Wasser ist in Abbildung 33 durch die gestrichelten Linien markiert.

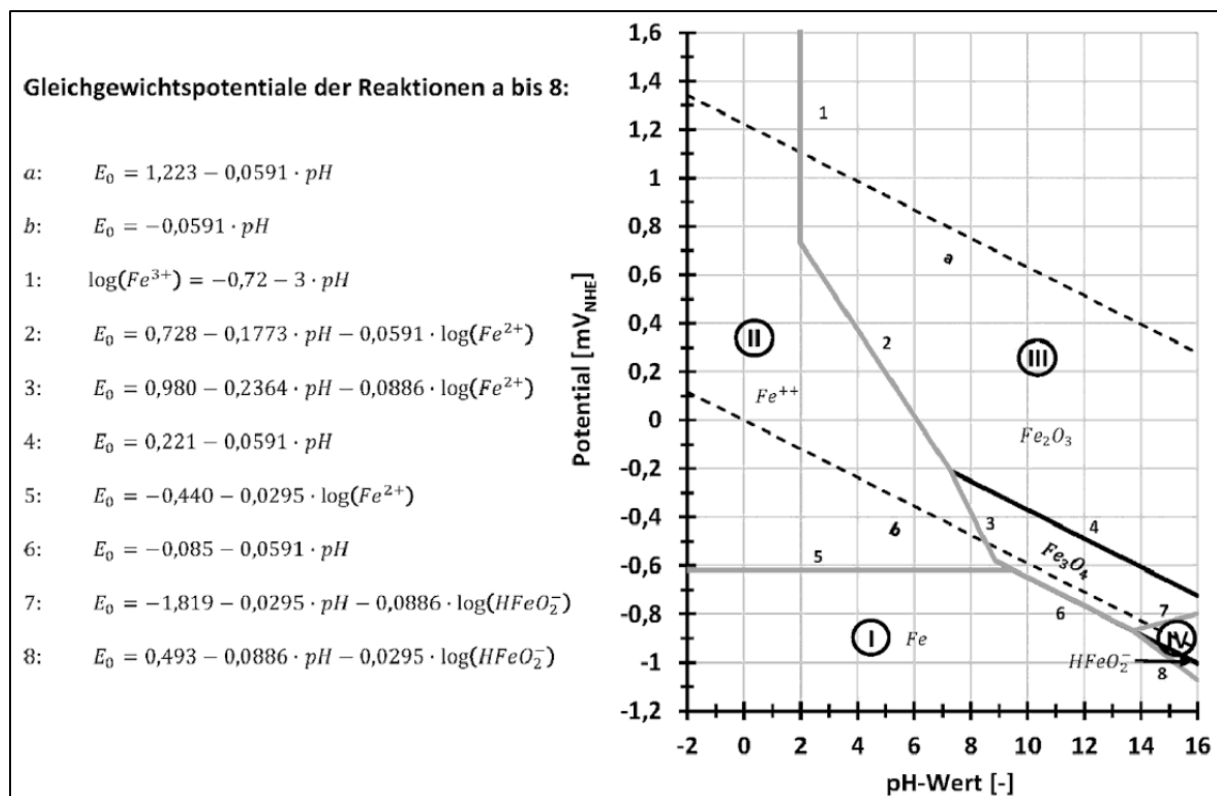


Abbildung 33: Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für das System Fe-H₂O unter sauerstofffreien Bedingungen bei einer Fe²⁺-Konzentration im Elektrolyten von 10⁻⁶ mol/Liter

Im zu betrachtenden Redox-pH-Bereich liegen demnach Fe²⁺-Ionen oder die Minerale Fe₂O₃ und Fe₃O₄ vor. Stahl wandelt sich um. Bei pH-Werten oberhalb von 9 bilden die Oxide aber Schutzschichten. In diesem Fall sind sie passiviert.

Lösungen von K₂CO₃ und Na₂CO₃ sind aufgrund der folgenden Reaktionen alkalisch (pH-Wert > 9):

- $K_2CO_3 + H_2O \rightarrow KHCO_3 + K^+ + OH^-$,
- $Na_2CO_3 + H_2O \rightarrow NaHCO_3 + Na^+ + OH^-$.

Halogenide (Bromid, Chlorid) wirken selbst nicht korrodierend, verstärken aber die Korrosion. Die Einflüsse sind komplex, wobei jedoch der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit und die Bildung löslicher Metallsalze hervorzuheben ist. In Verbindung mit Halogeniden tritt oft lokale Korrosion, wie Lochfraß auf. Das Risiko von Lochfraß erhöht sich bei steigender Temperatur. Es wird angenommen, dass weitere chemische Verbindungen, die die Korrosion von Stählen fördern, wie Kohlendioxid, Sulfide, Sulfate, einige Schwermetallsalze oder Wasserstoff nicht im Stützfluid vorhanden sind.

Eine mikrobielle Korrosion wird nicht erwartet. Innerhalb eines Endlagersystems kann auch unter anaeroben Bedingungen eine signifikante Metallkorrosion stattfinden. Besonders hervorzuheben ist hier die mikrobielle Reduktion von Fe(III) und Sulfat. Nach (Jobmann, et al., 2015) können solche Mikroben Temperaturen bis ca. 120 °C überleben. Die erwarteten Temperaturen am Behälter bzw. innerhalb des Stützfluids liegen deutlich darüber. Es wird daher erwartet, dass alle Mikroorganismen und deren Endosporen im Zuge des Wärmeeintrags abgetötet werden. Auf den Einsatz von Bioziden kann verzichtet werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei Einsatz von K_2CO_3 - und Na_2CO_3 -Lösungen keine gravierende Schädigung (Korrosion) der Behälter zu erwarten ist.

In chlorid- und bromidhaltigen Lösungen wird der Stahl aufgrund der pH-Werte außerhalb des Passivierungsbereiches und der korrosionsfördernden Wirkung dieser Anionen korrodieren. Dies zeigen auch Laborversuche eines Anbieters dieser Stahlsorte (Anhang 2). Korrosionsraten werden jedoch vom Anbieter nicht genannt. Untersuchungen zur Stahlkorrosion bei 300 °C erfolgten im Bergwerk Asse und sind aufgrund des Auftretens chloriddominierter Lösungen am ehesten mit den Bohrlochbedingungen vergleichbar. Die folgenden Abschnitte und Resultate stammen aus dem Jahresbericht 1968 der Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.:

„Um den Einfluss von Wärme, Salz, Salzlauge und radioaktiver Strahlung auf Materialien zu untersuchen, die für die Fertigung von Behältern für hochaktive, wärmeentwickelnde Abfälle und deren spätere Einlagerung im Salzbergwerk in Frage kommen, wurden 15 verschiedene Werkstoffe unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt. Von jedem Werkstück wurden 6 Proben angefertigt, von denen je 3 im Labor und je 3 im Bergwerk in Langzeitversuchen eingesetzt waren. Die Auswahl der Werkstoffe war nach dem Grad der Korrosionsbeständigkeit entsprechend den Angaben der Hersteller vorgenommen worden.

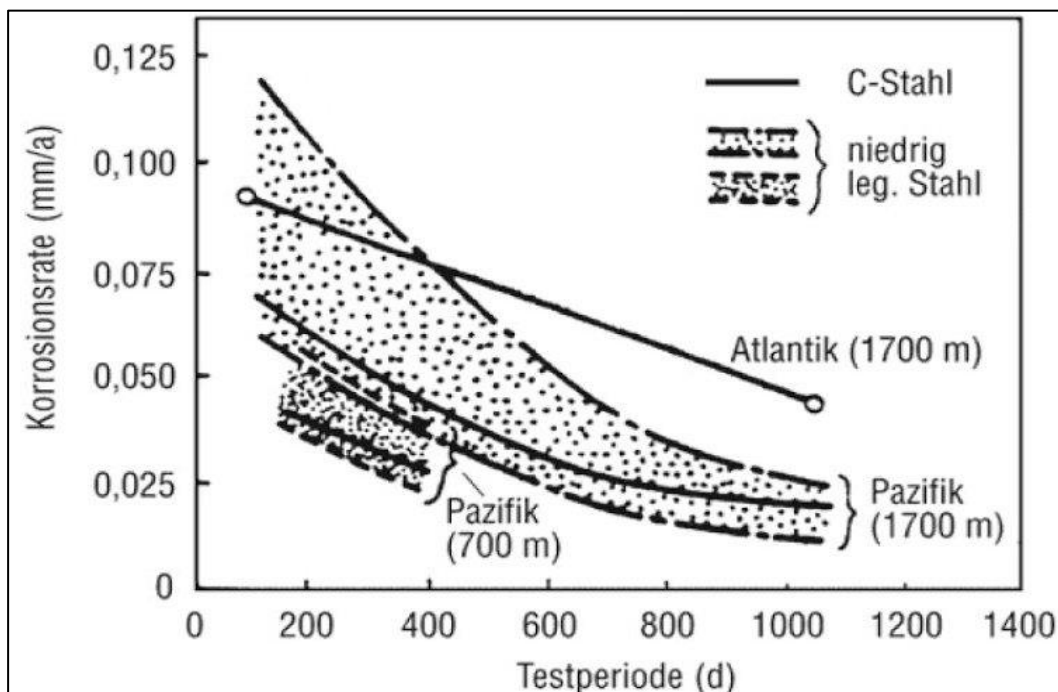
Die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Technischen Universität Karlsruhe durchgeführt, die Bestrahlung eines Teils der Proben im Institut für Strahlenchemie der Gesellschaft für Kernforschung. In den nachfolgenden Tabellen sind einige Ergebnisse über das Verhalten einer Auswahl geprüfter Materialien aufgeführt.“ (Hepp, et al., 1969)

(Erläuterung zu Tabelle 18: Die Bezeichnung V2A wird heute für den Werkstoff 1.4301 (X5CrNi18-10) und dem Stahl 1.4305 (X8CrNiS18-9) verwendet). Hastelloy C ist eine Nickel-Chrom-Molybdän-Legierung. Incoloy 825 ist eine Werksbezeichnung für die titanstabilisierte, voll-austenitische Nickel-Eisen-Chrom-Legierung. Ceras enthält Nickel und Chrom. Remanit ist eine Nickel-Chrom-Molybdän-Legierung. Thermax enthält höhere Anteile an Chrom und Nickel sowie etwas Silicium. NCT sind austenitische Chrom-Nickel-Stähle.)

Tabelle 18: Korrosionsversuche im Salzbergwerk. Proben im Salz bei 300 °C (Hepp, et al., 1969)

Werkstoffbezeichnung	Materialabtrag durch Korrosion mm/a	Lochfraß + : ja - : nein
N C T	0,0106	-
V 2 A Supra	0,0019	-
Cekas A 18 S	0,0058	+
Remanit HC	0,0019	-
Remanit 1880	0,0058	+
Thermax 11 A	0,0019	-
A T S 115	Korrosionsbelag	-
A T S 200	0,0194	-
V 2 A	0,0078	-
Hastelloy Alloy C	0,0039	-
Hastelloy	nicht meßbar	-
Incoloy 825	0,0291	-

Die Abbildung 34 zeigt Angaben zur Stahlkorrosion im Meerwasser. Die Meerwassertemperatur ist wesentlich niedriger als die angenommene Bohrlochtemperatur, jedoch ist Sauerstoff ständig verfügbar. Beispielsweise aufgrund dieser Unterschiede sind die Befunde nur eingeschränkt vergleichbar, erkennbar ist jedoch die Abnahme der Korrosionsrate mit der Zeit.

**Abbildung 34: Korrosion von un- und niedriglegierten Stählen in der Tiefsee nach (Reinhart, 1967 S. 71)**

Genauere Angaben zur Stahlkorrosion in den halogenidhaltigen Flüssigkeiten können derzeit für die vorgegebenen in-situ-Bedingungen nicht gemacht werden. Gegebenenfalls sind weitere Angaben möglich, wenn die Daten der Experimente zur Gasentwicklung in Endlagern in Folge Metallkorrosion ausgewertet werden. Die Resultate gelten aber für Temperaturen unterhalb von 200 °C, da sie in Bezug zur Endlagerung der Abfälle im Salz gewonnen wurden. Allgemein gültig dürfte jedoch der Sachverhalt sein, dass die Korrosionsraten wahrscheinlich durch die Bildung einer Deckschicht aus Korrosionsprodukten mit der Zeit abnehmen.

Als Korrosionstyp ist nach den Grundlagen der Werkstoffkunde und den Angaben des Anbieters (Anhang 2) lokale Korrosion (Lochfraß) zu erwarten. Lochfraß und Spaltkorrosion entwickeln sich am stärksten, wenn das Metall ganz mit Flüssigkeit bedeckt ist. Angegeben wird nach Anhang 2 ein PREN-Index von 23,1 bis 26,7. Der PREN-Index ist ein Maß der Stahlstabilität gegen lokale Korrosion. Generell gilt: Je höher der PREN-Index, desto korrosionsfester ist der Stahl. Stähle mit PREN-Werten über 32 gelten als meerwasserbeständig (NaCl-dominierte Lösung). Ein PREN-Wert von über 34 oder 35 ist üblicherweise für Anwendungen in Seewasser vorgeschrieben. Lochfraß ist ein temperaturabhängiger Vorgang. Daher wird in der Literatur häufig eine sogenannte kritische Lochfraßtemperatur (Critical Pitting Corrosion Temperature CPT) angegeben. Für Stähle in einer 3,5 %igen Salzlösung (Meerwasser) wurde eine empirische Gleichung entwickelt: kritische Lochfraßtemperatur CPT(°C) = $10 + 7 \times (\% \text{Mo-lybdän})$. Der CPT-Wert liegt bei nur 27,5 °C. Eine lokale ist im Vergleich zur gleichmäßigen Korrosion der Stahloberflächen problematischer, da frühzeitiger ein lokaler Verlust der Behälterdichtheit auftreten kann.

Empfehlungen zum Material und Stützfluid

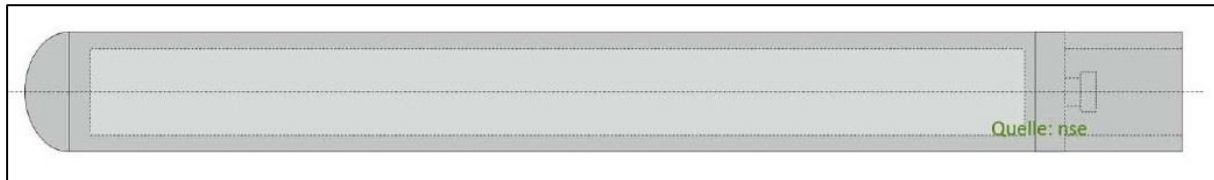
Nach den Befunden zur Stahlkorrosion sollte einer K_2CO_3 - oder Na_2CO_3 -Lösung der Vorzug vor den chlorid- oder bromidhaltigen Flüssigkeiten gegeben werden. Diese Lösungen hätten darüber hinaus einen positiven Einfluss auf die Stabilität des Casings. Als Stützfluid wird demnach zunächst eine K_2CO_3 -Lösung gewählt. Diese soll eine Dichte von 1 300 kg/m³ aufweisen. Der gewählte austenitische Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2 kann nach dieser ersten Einschätzung in diesem Stützfluid eingelagert werden.

7.3.2 Behälterkonzept für einen Bohrlochdurchmesser von 90 cm

Im Bericht (Bracke, et al., 2016) der GRS im Auftrag der Kommission „Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe“ wird ein Endlagerbehälter vorgestellt, der so ausgelegt wurde, dass er einen Großteil der Anforderungen erfüllen kann. Der Behälter wird, angelehnt an die Brennstabkockille 3, unabgeschirmt ausgeführt. Der sogenannte Deep Borehole Container - Retrievable (DBC-R) ist für ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 90 cm ausgelegt und hat die in der folgenden Tabelle 19 aufgestellten Kenndaten. Abbildung 35 zeigt eine Schemazeichnung dieses Behälters.

Tabelle 19: Kenndaten des Behälters DBC-R für einen Bohrlochdurchmesser von 90 cm (Bracke, et al., 2016)

Behälterlänge [m]	Außendurchmesser [cm]	Wandstärke [cm]	Gewicht [t]	Anzahl Behälter je Bohrloch	Anzahl benötigter Bohrlöcher
5,6	64	10	10,31	363	31



**Abbildung 35: DBC-R, Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für die tiefe Bohrlochlage-
rung (Bracke, et al., 2016 S. 153)**

Die Maße des Behälters DBC-R berücksichtigen den Durchmesser der Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und die maximale Länge der Brennstäbe. Der Behälter ist rückholbar ausgeführt und stapelbar. Es ist nach (Bracke, et al., 2016) geplant 363 Behälter in einem Bohrloch zu stapeln. Als Material wurde ein austenitischer Stahl (Material-Id.: X6CrNiMoTi17-12-2) gewählt.

Der geforderte Bohrlochdurchmesser für den DBC-R Behälter liegt bei 90 cm bzw. ca. 35,4“. Aufgrund der in den Kapiteln 5.2 (Anforderungen an die geologischen Verhältnisse an einem möglichen Standort) ab Seite 40 und 6.3 (Stand der Technik für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe) ab Seite 49 dargestellten Sachverhalte, ist ein solcher Enddurchmesser für einen Einlagerungshorizont zwischen 3 000 m und 5 000 m im Kristallin nicht Stand der Technik (siehe Kapitel 6.3.2 Bohrmeißel ab Seite 51) in der Tiefbohrtechnik. Selbst ein derzeit als Stand der Technik identifizierter Enddurchmesser von 17 ½“ (44,45 cm) ist unter den gegebenen Anforderungen an die geologischen Verhältnisse eine Herausforderung.

Unter diesen Voraussetzungen wurden im Folgenden weitere Überlegungen zu alternativen Dimensionierung eines Endlagerbehälters für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angestellt.

7.3.3 Behälterkonzept für einen Bohrlochdurchmesser von 17,5“

Entscheidungsfindung zur Dimensionierung

Für die Dimensionierung der Endlagerbehälter ist zum einen der Stand der Technik der Tiefbohrtechnik für die entsprechend geplante Einlagerungsteufe entscheidend. Der geplante Einlagerungshorizont und die Anzahl übereinander gestapelter Behälter haben ebenso einen Einfluss auf die Wandstärke des Behälters, wie die Flüssigkeitssäule im Bohrloch und die Dichte des gewählten Stützfluides. Weiterhin ist die geplante Beladung wichtig für die Auslegung des Innendurchmessers des Endlagerbehälters. Diese Einflussgrößen bedingen die Auslegung des Behälters, deren benötigte Anzahl, sowie die daraus resultierende Anzahl an benötigten Bohrungen.

Die Annäherung an ein sinnvolles Konzept muss demnach die nachfolgenden Einflussfaktoren berücksichtigen:

- Abfallmengengerüst (Beladung),
- Stand der Technik der Tiefbohrtechnik,
- Einlagerungsteufe,
- realistische Anzahl an Bohrlöchern,
- Anzahl an Behältern.

Abfallmengengerüst

Von dem in Abschnitt 7.1 (siehe Seite 85) beschriebenen Abfallmengengerüst sind etwa 24 % der Abfälle konditioniert, wovon ungefähr die Hälfte verglast ist. Aus den Maßen der verglasten Abfälle ergibt sich ein Mindestinnendurchmesser der Endlagerbehälter von 43,1 cm. Eine erste Idee eines daraus resultierenden Endlagerbehälters ist in Kapitel 7.3 Konzept eines geeigneten Endlagerbehälters ab Seite 89 als DBC-R beschrieben.

Um einen geringeren Innendurchmesser realisieren zu können, müssten die bereits konditionierten und teilweise verglasten Abfälle rekonditioniert werden. Eine Rekonditionierung resultiert nach heutigem Stand in einer neu zu errichtenden Anlagentechnik, welche als Wiedereinstieg in die Kerntechnikindustrie angesehen werden kann und damit im Widerspruch zur gültigen Gesetzeslage steht. Mit der Berücksichtigung dieser Abfallgruppe ist der Mindestinnendurchmesser eines möglichen Behälters festgelegt. Alternative Behälterdurchmesser erfordern, diese Abfälle aus der Betrachtung einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern in einer Teufe zwischen 3 000 m und 5 000 m auszuschließen und für diese ein separates Endlagerkonzept vorzusehen.

Stand der Technik der Tiefbohrtechnik

Der Stand der Technik in der Tiefbohrtechnik wurde in Kapitel 6 (ab Seite 44) bereits ausführlich dargelegt. Im Kapitel 6.3.2 Bohrmeißel ab Seite 51 ist dargelegt, dass für die angestrebte Teufe zwischen 3 000 m und 5 000 m unter bestimmten Bedingungen ein Enddurchmesser der Bohrung von 17,5“ erreichbar ist. Dementsprechend ist der Außendurchmesser und damit auch der Innendurchmesser eines Endlagerbehälters begrenzt, da er auf die 17,5“ Bohrlochdurchmesser abgestimmt sein muss. Eine Endlagerung aller Abfallstoffe, auch der bereits konditionierten, ist mit dem heutigen Stand der Technik und den definierten Parametern nicht möglich.

Einlagerungsteufe

Ausgangspunkt aller Betrachtungen ist die Einlagerung in einem Teufenbereich zwischen 3 000 m und 5 000 m. In (Bracke, et al., 2016) wurde die Endteufe des Bohrloches und damit die Länge des Einlagerungshorizontes bereits variiert. Eine veränderte Endteufe wirkt sich demnach auf die notwendige Wandstärke des Endlagerbehälters aus. Die Wandstärke könnte rechnerisch bei geringerer Einlagerungsteufe von 10 cm bis auf 4,5 cm verringert werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 20 aufgeführt. Die Betrachtungen beziehen sich dabei auf das Behälterkonzept des DBC-R.

Tabelle 20: Auswirkung der Endteufe des Bohrloches auf die Wandstärke des Endlagerbehälters (Werte übernommen aus (Bracke, et al., 2016))

Bohrloch- teufe [m]	Bohrlochdurch- messer [cm] / [in]	Wandstärke Behälter [cm]	benötigte Bohrlöcher	Behälter je Bohrloch
5 000	90 / 35,4	10,0	31	357
4 200	80 / 31,5	6,5	55	214
3 600	75 / 29,5	4,5	104	107

Der kürzere Einlagerungshorizont resultiert in einer höheren Anzahl an Bohrlöchern, da weniger Behälter pro Bohrloch eingelagert werden können. Es muss geprüft werden, ob die Wandstärke des Casings (Futterrohres) ebenso verringert werden kann.

Der Enddurchmesser der Bohrung ändert sich durch den verringerten Einlagerungsbereich nicht. Der Druck der Fluidsäule verringert sich ebenso wie die Auflast durch überlagernde Behälter. Die Auflast beeinflusst die Behälterwandstärke.

Anzahl benötigter Bohrlöcher

Die Länge des Einlagerungshorizontes, die Beladung der Endlagerbehälter und deren damit verbundene Anzahl beeinflussen die Anzahl an benötigten Bohrungen. In (Bracke, et al., 2016) wurde bereits der Einfluss der Länge des Einlagerungshorizontes auf die Anzahl der Bohrungen gezeigt (siehe Tabelle 20). Auch die theoretisch möglichen Beladungen sind für die Evaluierung der Grenzen des Konzeptes bedeutsam. Als Maximal-Beladung wird an dieser Stelle das Beladungsschema der BSK-3 angesehen, wie es auch für das Konzept des DBC-R genutzt wurde. Als theoretisches Minimum wurde die Beladung mit nur einem Brennstab angenommen. Bereits konditionierte Abfälle (CSD-V, -B und -C) und auch die Brennelemente aus Versuch- und Prototypkernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren gehen an dieser Stelle nicht in die Berechnung mit ein. Die Art und Form der entstehenden Abfälle ist an dieser Stelle so unterschiedlich, dass sie für diese Übersichtsrechnung nicht mit betrachtet werden. Sollte dieser Ansatz weiterverfolgt werden, müssen diese Abfälle gesondert betrachtet werden.

Ein Brennstab eines Druckwasserreaktorbrennelements des Typs BE DWR 16x16-20 hat einen Durchmesser von 10,75 mm (Beitz, et al., 1981). Brennstäbe aus WWER, DWR und SWR (siehe dazu Tabelle 21) werden aufgrund ihrer wiederum unterschiedlichen Abmaße in DWR 16x16-20 äquivalente Brennstäbe umgerechnet, um einen Anhaltspunkt für eine erste überschlägige Rechnung zu schaffen, ohne ein neues Beladungsregime zu diskutieren. Wenn die Beladung des Behälters für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern tatsächlich von der geplanten Beladung einer BSK-3 Kokille abweichen sollte, muss eine ausführliche Betrachtung und Berechnung stattfinden.

Tabelle 21: Anzahl von Brennelementen (BE) und Brennstäben (BS) aus DWR, SWR und WWER-Leistungsreaktoren

	DWR	SWR	WWER
Anzahl BE UO2	12 450	14 350	2 465
Anzahl BE MOX14	1 530	1 250	-
Anzahl BE insgesamt	13 980	15 600	5 050
Anzahl BS pro BE	236	96	126
Anzahl BS insgesamt	3 299 280	1 497 600	636 300
Anzahl BE pro BSK-3	3	9	7,5
Anzahl äquivalenter BS	3 299 280	1 227 200	476 720

Unter Berücksichtigung der Längen der unterschiedlichen Brennstäbe ergeben sich 5 003 200 äquivalente Brennstäbe eines DWR 16x16-20 Brennelementes und bei kleinstmöglicher Beladung ebenso viele Endlagerbehälter. Ohne an dieser Stelle auf die Dimensionierung des Bohrloches und der Wandstärken einzugehen, sind für den Einlagerungshorizont zwischen 3 000 m und 5 000 m (357 Behälter je Bohrloch) mindestens 14 009 Bohrlöcher notwendig. Diese überschlägige Berechnung zeigt, dass eine zu geringe Beladung zwar einen kleineren Innendurchmesser des Behälters und somit auch einen kleinen, technisch einfacher umzusetzenden Bohrlochdurchmesser nach sich zieht, aber in einer viel zu großen und damit nicht realistischen Anzahl an Bohrungen resultiert.

Aufgrund der Erkenntnis, dass die kleinstmögliche Beladung eine viel zu große Anzahl an Bohrlöchern erfordert, wurde als neuer Ansatzpunkt die Optimierung aller Einflussfaktoren betrachtet. Dabei sind besonders das Abfallmengengerüst und der Stand der Technik der Tiefbohrtechnik als entscheidende Parameter identifiziert worden.

Ein Konzept für die Einlagerung aller Abfälle ist mit dem DBC-R Behälter (Bracke, et al., 2016) bereits erstellt worden. Im Folgenden wird der Ansatz verfolgt, nach dem Stand der Technik der Tiefbohrtechnik einen passenden Behälter für die Einlagerung in ein 17,5" Bohrloch zu konzipieren.

Behälterkonzept für einen Bohrlochdurchmesser von 17,5"

Der Bohrlochaufbau für die geologischen Verhältnisse des generischen Profils 2 ist bereits in Kapitel 5.2 Anforderungen an die geologischen Verhältnisse an einem möglichen Standort ab Seite 40 beschrieben. Für die Dimensionierung des Behälters ist der Innendurchmesser des Casings entscheidend. Dieser berechnet sich aus dem Bohrlochdurchmesser abzüglich des Zementationsringraumes, der Wandstärke des gewählten Casings und des notwendigen freien Ringraums innerhalb der Verrohrung. Der schematische Aufbau des ausgebauten Bohrloches ist in Abbildung 36 dargestellt.

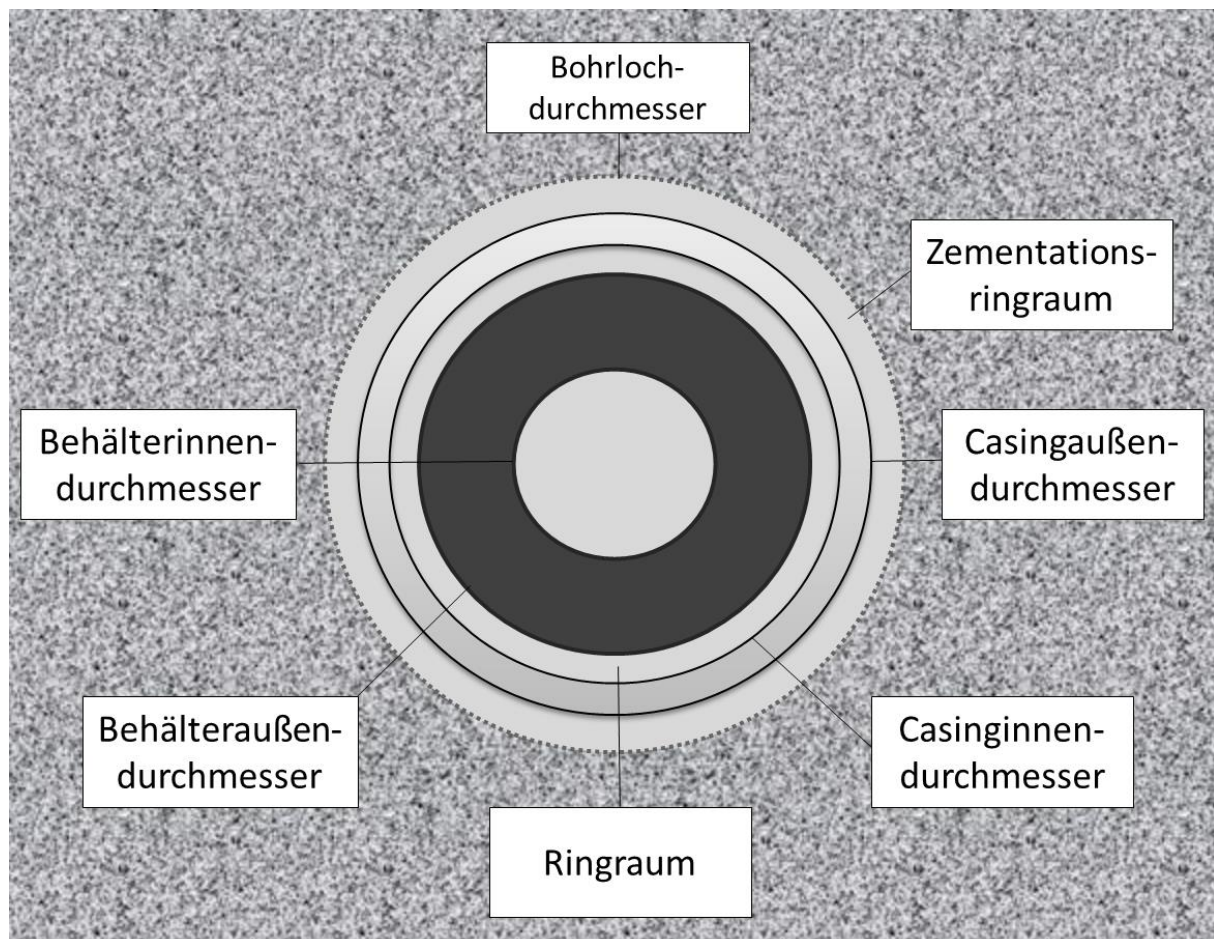


Abbildung 36: Schematische Darstellung der voneinander abhängigen Durchmesser im Einlagerungsbohrloch

Der Außendurchmesser des Behälters wird in Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers, der Wandstärke des Casings und den erforderlichen Ringräumen dimensioniert. Für den Bohrlochdurchmesser von 17,5" (44,45 cm) wurde nach API-Standard ein Casing Außendurchmesser von 14" (35,56 cm) mit einer Wandstärke von 21,6 mm gewählt (siehe Kapitel 6.3.4 Casings (Futterrohre) ab Seite 59). Daraus ergibt sich nach Abzug eines freien Ringraumes (24 mm) innerhalb des Bohrloches ein Behälteraußendurchmesser von maximal 26,5 cm bzw. 10,9". Entscheidend für die Beladung ist der Innendurchmesser des Behälters. Die Wandstärke des Behälters ist abhängig von der Anzahl der überlagernden Behälter und der Dichte des Stützfluides und dem daraus resultierendem Fluiddruck. Um die notwendige Wandstärke des Behälters zu ermitteln, wurde dessen Stabilität nach (DIN EN 1993-1-4, 2015) berechnet. Ein Behälter mit einem Außendurchmesser von 26,5 cm, einer Länge von 5,6 m und einer Wandstärke von 4,5 cm wäre auch bei einer Auflast von 179 Behältern und einer Fluidsäule (Dichte 1 300 kg/m³) in einer Teufe von 5 000 m beispielsweise stabil (siehe Anhang 3). Daraus ergibt sich ein freier Innendurchmesser von 17,5 cm oder 7,2".

Die Beladung des kreisrunden Behälters mit Brennstäben entspricht dem komplexen mathematischen Problem der dichtest möglichen Kreispackung in einem Kreis (Kravitz, 1967). Aus dem Verhältnis des Innendurchmessers ($D = 17,5$ cm) zum Brennstabdurchmesser ($d = 1,075$ cm) von rund 16,28 lässt sich eine theoretisch dichteste Packung von 221 Brennstäben ableiten (Specht, 2018). Dies entspricht einer theoretischen Ausnutzung des Behälterinnenraums von 83 %. Von der Anwendung der theoretisch dichtesten Konfiguration wird jedoch abgesehen, da während des Beladevorgangs die nötige exakte Position der einzelnen Brennstäbe nicht eingehalten werden kann und Abweichungen in der Brennstabgeometrie ggf. eine dichteste Lagerung nicht ermöglichen bzw. die Reibungskräfte während des Einschieben die Stabilität der Brennstäbe gefährden.

Als Minimalwert für die Behälterbeladung soll die Packungsdichte in den Beladebüchsen eines POLLUX®-10 Behälters berücksichtigt werden. Jede der fünf Büchsen wird mit den Brennstäben aus zwei Brennelementen beladen. Dies entspricht einer Ausnutzung des Büchseninnenraums von 61 %. Der geringe Ausnutzungsgrad ist zum Teil in der ungünstigen (trapezförmigen) Geometrie der Büchse begründet.

In Abbildung 37 ist eine mögliche Beladung eines Behälters mit DWR 16x16-20 Brennstäben dargestellt. Die maximale Füllung einer Kreisfläche mit Kreisen von erheblich kleinerem Durchmesser stellt ein komplexes mathematisches Problem dar. In Abbildung 37 sind DWR16x16-20 BE-Brennstäbe zeichnerisch so dicht wie möglich in den Behälter gepackt worden. Es sind 214 Brennstäbe in den Behälter eingelassen, dies entspricht einem Ausnutzungsgrad von ca. 81 %. Für eine Ausnutzung von beispielsweise 70 % kann der Behälter 186 Brennstäbe fassen. In Abbildung 37 ist eine mögliche Beladung eines Behälters mit DWR 16x16-20 Brennstäben dargestellt.

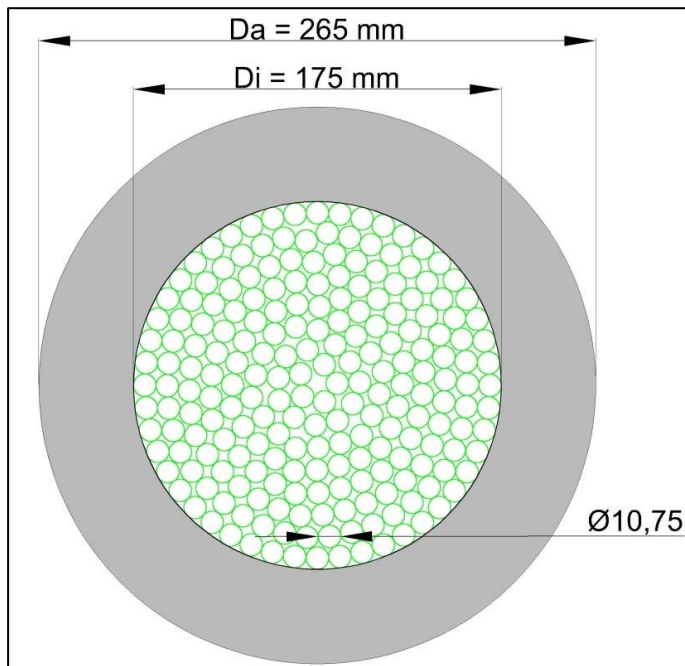


Abbildung 37: Mögliche Beladung eines Behälters mit 17,5 cm Innendurchmesser mit DWR-16x16-20 BE Brennstäben

Werden wie beschrieben alle Leistungsreaktorbrennstäbe in äquivalente Brennstäbe aus DWR 16x16-20 Brennelementen umgerechnet, ergeben sich für eine Ausnutzung von 81 % insgesamt 23 380 Behälter bzw. für 70 % Ausnutzung ca. 26 900 Behälter. Für 180 Behälter pro Bohrloch sind demnach ca. 130 bzw. für eine geringere Ausnutzung ca. 150 Bohrungen notwendig. Die Stapelhöhe beträgt für 180 Behälter ca. 1 000 m. In Tabelle 22 sind die Daten für ein 17,5" Bohrloch im Vergleich zu einem 90 cm Bohrloch zusammengefasst. Abbildung 38 zeigt beide Behälterkonzepte im Vergleich.

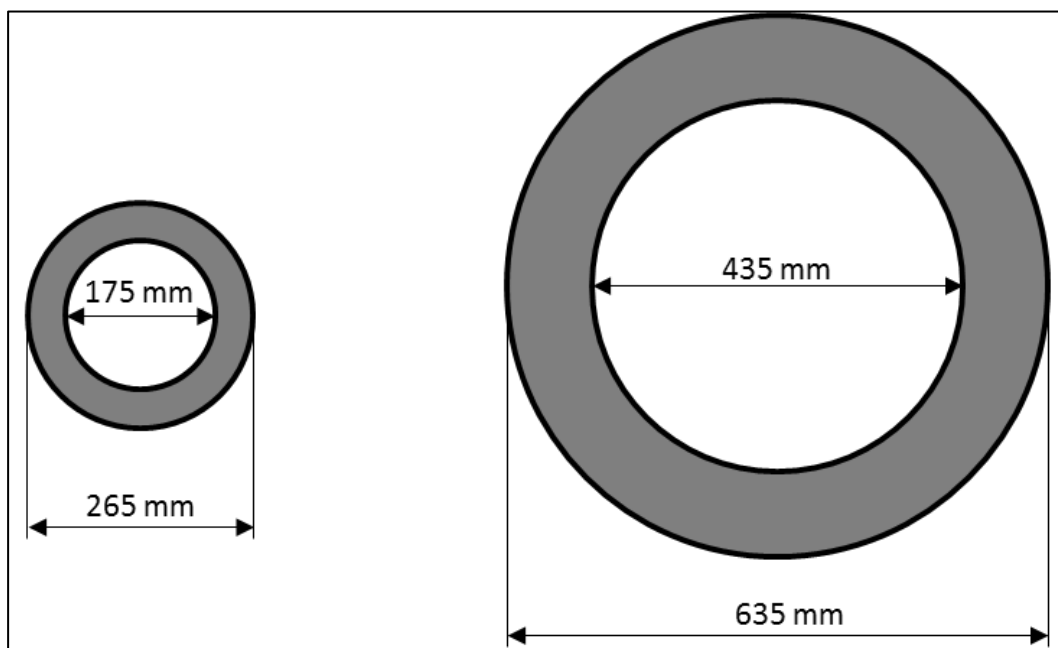


Abbildung 38: Vergleich der Behälterkonzepte im Schnitt. Links: Behälter für das Konzept eines 17,5" Bohrloches, Rechts: Behälter für das Konzept eines 90 cm Bohrloches

Tabelle 22: Auslegung Bohrloch und Behälter für einen Bohrlochenddurchmesser von 17,5“ mit Vergleich zum 90 cm Bohrloch aus (Bracke, et al., 2016)

Bohrlochdurchmesser	17,5“ / 44,45 cm	35,4“ / 90 cm
Bohrlochteufe	5 000 m	5 000 m
zu beladene Bohrlochlänge	2 000 m	2 000 m
Ringraum	24 mm	25 mm
Zementationsringraum	44,5 mm	44 mm
Casing Außendurchmesser	14“ / 356 mm	32“ / 812 mm
Wandstärke Casing	21,6 mm	63,5 mm
Außendurchmesser Behälter	265 mm	635 mm
Innendurchmesser Behälter	175 mm	435 mm
Länge Behälter	5,6 m	5,6 m
Anzahl Behälter		11 000
Ausnutzung Innendurchmesser 81 %	23 379	
Ausnutzung Innendurchmesser 70 %	26 899	
Anzahl Behälter pro Bohrloch	180	363
Anzahl Bohrlöcher		31
Ausnutzung ID des Behälters 81 %	130	
Ausnutzung ID des Behälters 70 %	150	

Diese Berechnung ist ein Beispiel für die Auslegung eines möglichen Behälters. Es ist noch Optimierungsspielraum beispielsweise bei der Anpassung der Einlagerungsteufe oder der Anzahl der übereinander gestapelten Behälter gegeben. Grundsätzlich wird darauf verwiesen, dass bei dieser Berechnung nur die Brennstäbe der Leistungsreaktoren (DWR, SWR WWR) berücksichtigt sind. Das Mengengerüst der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren sowie die bereits konditionierten Abfälle sind aufgrund der geometrischen Abmessungen der Abfälle in der Betrachtung nicht berücksichtigt. Auch die Brennelementstrukturteile sind nicht in die Berechnung eingegangen. Das bedeutet, dass die beispielhaften 130 bzw. 150 Bohrlöcher nur für diese eine Art der Abfälle ausreichen. Für alle anderen Brennelemente und radioaktiven Abfälle wäre alternativ ein Endlagerbergwerk oder teilweise anders dimensionierte (ggf. flachere) Bohrlöcher notwendig.

7.3.4 Fazit

Es wurden zwei grundsätzliche Möglichkeiten für die Auslegung von Behältern zur Endlagerung in tiefen Bohrlöchern vorgestellt.

Zum einen das Konzept eines Behälters DBC-R aus (Bracke, et al., 2016) mit einem Außendurchmesser von 64 cm, welcher aufgrund seines großen Innendurchmessers von 43,5 cm alle wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfallstoffe des Deutschen Abfallmengengerüsts (siehe Abschnitt 7.1 ab Seite 85) aufnehmen kann, jedoch einen großen Bohrlochdurchmesser im Bohrlochtiefsen von mindestens 90 cm voraussetzt. Für ein Bohrloch in der geplanten Teufe und den Anforderungen an die geologischen Verhältnisse gibt es dafür aber derzeit keinen Stand der Technik in der Tiefbohrindustrie.

Zum anderen wurde in diesem Projekt ein Behälter konzipiert, der sich hinsichtlich des Außendurchmessers vor allem an dem derzeitigen Stand der konventionellen Tiefbohrtechnik für den

maximalen Bohrlochdurchmesser orientiert. Als derzeit realisierbarer Bohrloch-Enddurchmesser wurden 17,5“ unter den gestellten Bedingungen, wie den Anforderungen an die geologischen Verhältnisse (Kapitel 5.2 ab Seite 40) oder einem Einlagerungshorizont zwischen 3 000 m und 5 000 m, identifiziert. Aber auch für diesen kleineren Bohrlochdurchmesser muss zunächst ein mindestens 500 m tiefer Schacht / Großbohrloch mit einem Durchmesser von ca. 2 m bis 3 m geteuft werden, bevor mit konventioneller Tiefbohrtechnik weiter gearbeitet werden kann oder es müssen alternative Bohr- bzw. Verrohrungsverfahren angewandt werden.

Beide Behälterkonzepte weisen deshalb Schwächen auf. Sie sind entweder aufgrund des derzeitigen Standes der Technik in der Tiefbohrtechnik (kein ausreichend großer Bohrdurchmesser für einen Behälter mit 64 cm Außendurchmesser möglich) oder aufgrund dessen, dass nicht alle hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden können (Behälter mit 26,5 cm Außendurchmesser), derzeit nicht für eine Einlagerung in tiefen Bohrungen zwischen 3 000 m und 5 000 m geeignet.

Ein Referenzbehälter für alle wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente kann nach heutigem Stand innerhalb dieses Projektes nicht festgelegt werden.

8 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

8.1 Allgemeines

Die Definition des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) nach den Sicherheitsanforderungen des BMU lautet: „Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.“ (BMU, 2010 S. 5)

Im Standortauswahlgesetz wird der ewG als „der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet“ definiert. (StandAG, 2017 § 2 Abs. 9)

Im Bericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte wurde der ewG in zwei Typen (A und B) eingeteilt (siehe links in Abbildung 39). Bei Typ A ist das Wirtsgestein „hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.“ (AkEnd, 2002 S. 131) Bei Typ B hingegen ist das Wirtsgestein „hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.“ (AkEnd, 2002 S. 131) Der Typ B wurde weiterhin unterteilt in Typ Ba (siehe links in Abbildung 39) und Bb (siehe rechts in Abbildung 39). Bei Typ Ba wird der Wirtsgesteinskörper vom ewG vollständig umschlossen, während bei Typ Bb die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG unvollständig ist. (AkEnd, 2002)

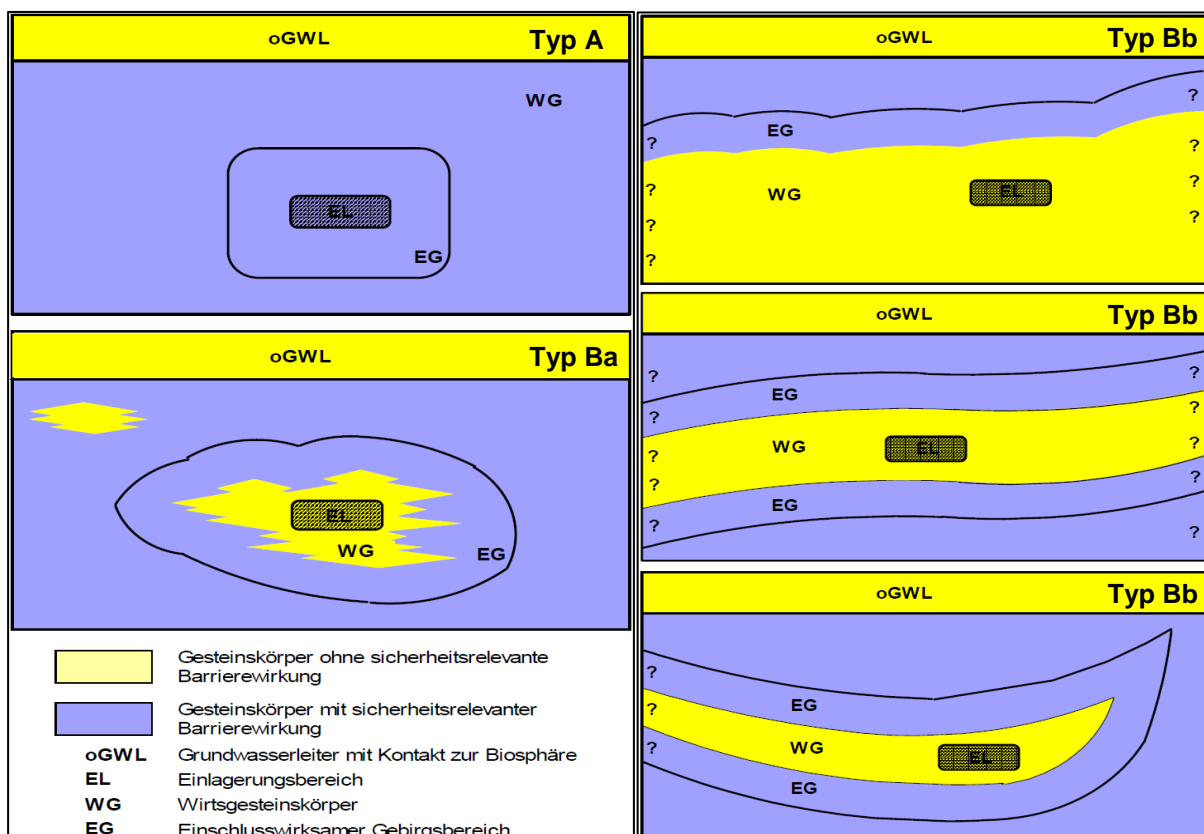


Abbildung 39: Typeneinteilung des ewGs nach AkEnd (AkEnd, 2002 S. 134 - 135)

Zu den Anforderungen an den ewG steht in den Sicherheitsanforderungen des BMU geschrieben: „Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgeführten Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohr-

löchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden. Die Tiefenlage und der Abstand sind im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen abzuleiten.“ (BMU, 2010 S. 18)

Die Anforderungen an den ewG hinsichtlich geowissenschaftlicher Kriterien sind in den Sicherheitsanforderungen des BMU dabei weitestgehend qualitativer Natur. Dies betrifft Anforderungen an das Einschlussvermögen des ewGs, die dafür maßgeblichen Eigenschaften sowie die Integrität des Einschlusses und der relevanten Eigenschaften über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre. Dabei werden folgende Berechnungskriterien besonders erwähnt: das Dilatanzkriterium, das Fluidruckkriterium und das Temperaturkriterium. Hinsichtlich der radiologischen Langzeitaussage werden Grenzwerte, jedoch keine Berechnungsverfahren, genannt. (BMU, 2010)

Im Standortauswahlgesetz hingegen sind nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen zu geowissenschaftlichen Kriterien enthalten. Hierbei wird zunächst in Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, geowissenschaftliche Abwägungskriterien und planungswissenschaftliche Abwägungskriterien unterschieden. (StandAG, 2017)

Zu den Ausschlusskriterien zählen großräumige geogene Vertikalbewegungen (Hebung von mehr als 1 mm/a über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre), aktive Störungszonen (Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste), Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit, seismische Aktivität, vulkanische Aktivität und der Nachweis junger Grundwässer im ewG. (StandAG, 2017)

Als Mindestanforderungen werden im Standortauswahlgesetz genannt: eine Gebirgsdurchlässigkeit k_f von weniger als 10^{-10} m/s (wobei die Erfüllung dieses Kriteriums auch mit Hilfe überlagernder Schichten nachgewiesen werden kann), eine Mächtigkeit des ewGs von mindestens 100 m, eine minimale Teufe des ewGs von mindestens 300 m, eine ausreichende horizontale Ausdehnung des ewGs und der Erhalt der Barrierewirkung über eine Million Jahre, wobei keine Erkenntnisse vorliegen dürfen, die die Integrität des ewGs über einen Zeitraum von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen. (StandAG, 2017)

Zudem wird im Standortauswahlgesetz darauf verwiesen, dass im Kristallingestein die Möglichkeit eines alternativen Konzeptes zum ewG mit deutlich höheren Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters besteht, sofern sich kein ewG ausweisen lässt. Weiterhin heißt es: *„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“* (StandAG, 2017 § 27 Abs. 4) Da bei der tiefen Bohrlochlagerung die Temperatur im Einlagerungsbereich bereits aus dem geothermischen Gradienten (Annahme: 3 K / 100 m) höher als 100 °C ist (aus angenommenen geothermischen Gradienten ergeben sich Temperaturen zwischen ca. 10 °C (oberflächennah) und ca. 160 °C (in etwa 5 000 m Tiefe), wird davon ausgegangen, dass die dort vorherrschenden Temperaturen, trotz dessen sie über 100 °C liegen, keine negativen Einflüsse haben.

8.2 EwG bei tiefen Bohrlöchern

Die geowissenschaftlichen Kriterien im Standortauswahlgesetz für einen Standort zur Einlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfallstoffe sind für eine Endlagerung in einem Bergwerk in etwa 500 m bis 1 000 m Tiefe abgefasst worden. Für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern müssten eigene geowissenschaftliche Kriterien aufgestellt werden, nach denen dann eine Standortauswahl für die tiefen Bohrlöcher erfolgen müsste. Da es solche geowissenschaftlichen Kriterien derzeit nicht gibt und da die geowissenschaftlichen Kriterien für eine Bergwerkslösung prinzipiell auch für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angewendet wer-

den können, werden diese nachfolgend auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern zugrunde gelegt. Dies gilt sowohl für die Ausschlusskriterien als auch für die Mindestanforderungen der geowissenschaftlichen Kriterien für eine Bergwerkslösung.

Das geologische Profil 1 wird nicht weiter betrachtet, da es aufgrund der häufigen Wechsel der Schichtfolgen nicht absehbar ist, dass es nach der API-Durchmesserreihe zu einem Anfangsdurchmesser führt, der mit konventioneller Tiefbohrtechnik erstellbar ist bzw. in einem für die Endlagerung nutzbaren Enddurchmesser endet (siehe hierzu Kapitel 6.3 Stand der Technik für Bohrungen bis 5 000 m Tiefe ab Seite 49).

Bezogen auf das geologische Profil 2 (siehe Abbildung 40 bzw. Abbildung 7 auf Seite 42) lässt sich feststellen, dass aufgrund der Mindestanforderung an die minimalen Teufe des ewGs von 300 m gemäß dem Standortauswahlgesetz die Tonsteinschicht und die obere Salzgesteinschicht bei der Ermittlung des ewGs nicht berücksichtigt werden kann - insbesondere, da eiszeitliche Rinnen Tiefen bis zu 500 m erreichen können, und da eine offenliegende Tonstein- oder Salzgesteinsschicht durch exogene Prozesse erosionsgefährdet wäre. Zudem muss „*die Salzschwebe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich mindestens 300 Meter mächtig sein*“. (StandAG, 2017 § 23 Abs. 5 Nr. 3) Damit lässt sich eine überlagernde Schicht mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung (geringer Durchlässigkeit) oberhalb des Wirtsgesteins ausweisen. Dies ist das ca. 750 m mächtige Salzgestein in etwa 1 000 m bis 1 750 m Tiefe. Damit wird erwartet, dass bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ein ewG vom Typ Bb (siehe Abbildung 39 auf Seite 103) nach (AkEnd, 2002) ausgewiesen werden muss. Voraussetzung ist, dass das anstehende Salzgestein eine ausreichende laterale Erstreckung aufweist. Nur wenn das kristalline Grundgebirge über ausreichende einschlusswirksame Eigenschaften verfügt und eine ausreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit k_f aufweist, lässt sich auch ein ewG vom Typ A nach (AkEnd, 2002) ausweisen. (StandAG, 2017), (AkEnd, 2002)

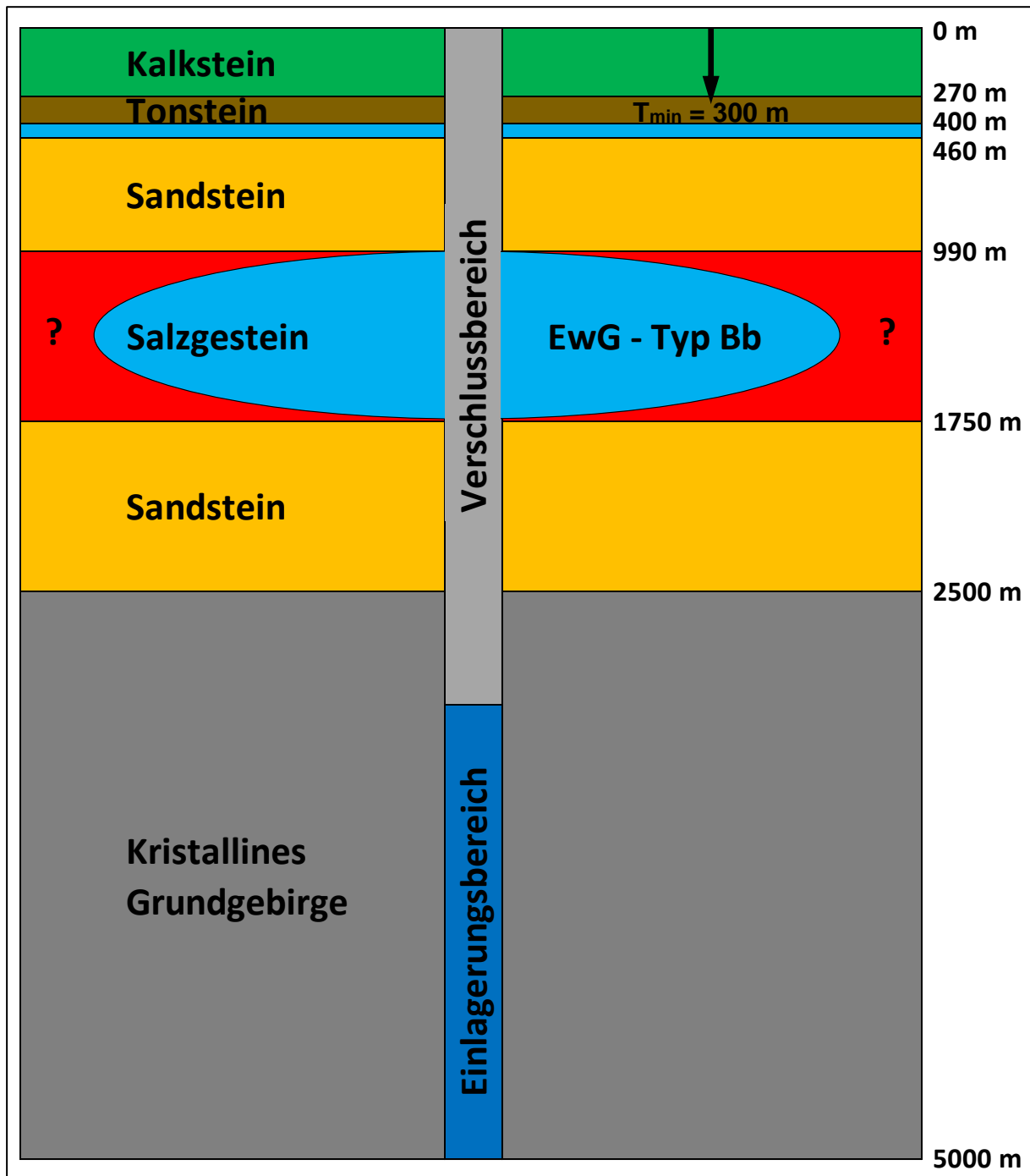


Abbildung 40: EwG bei tiefen Bohrlöchern bezogen auf das geologische Profil 2 (Schnitt nur in vertikale Richtung maßstäblich)

8.3 Zusammenfassung

Für einen Standort zur Einlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfallstoffe in tiefe Bohrlöcher bis in 5 000 m Tiefe wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ein ewG vom Typ Bb nach (AkEnd, 2002) (siehe Abbildung 39 auf Seite 103) ausgewiesen werden müssen. Hierfür ist (mindestens) ein überlagernder Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung notwendig (beispielsweise Ton oder Salzgestein). Wie der Nachweis des ewGs beim Typ Bb rechnerisch erfolgt, ist derzeit noch unklar. Dies gilt sowohl für einen ewG vom Typ Bb bei einer Endlagerung in einem Bergwerk als auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Unter der Annahme, dass mindestens über den Einlagerungsbereich der radioaktiven Abfälle von 2 000 m Länge hinweg und auch über eine große horizontale Ausdehnung hinweg die Gebirgsdurchlässigkeit k_f ausreichend gering ist und damit ausreichend einschlusswirksame Eigenschaften des Kristallingesteines vorliegen, lässt sich bei tiefen Bohrlöchern möglicherweise auch ein ewG vom Typ A nach (AkEnd, 2002) ausweisen. Dies ist jedoch eher nicht zu erwarten. Zudem ist derzeit offen, wie eigentlich der „Nachweis“ eines ewGs vom Typ A bei der tiefen Bohrlochlagerung bei einer Einlagerungsstrecke von 3 000 m bis 5 000 m zu führen ist.

Für das angenommene geologische Profil 2 (siehe Abbildung 40) lässt sich bei Erfüllung der Kriterien nach (AkEnd, 2002) ein Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung ausweisen: das ca. 750 m mächtige Salzgestein in etwa 1 000 m Tiefe.

9 Einschätzungen zum Sicherheits- und Nachweiskonzept

9.1 Einleitung

In einem Sicherheitskonzept wird verbalargumentativ beschrieben, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Dabei liegen dem Sicherheitskonzept Leitgedanken zugrunde, die in übergeordneter und qualitativer Weise beschreiben, wie in den zu betrachtenden Fallbeispielen die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll (Mönig, et al., 2012). Die Leitgedanken werden auf Basis der vorliegenden Kenntnisse zu den im Endlagersystem möglicherweise ablaufenden Prozessen, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen können, sowie zu den geologischen Standortgegebenheiten entwickelt. Aus dem Sicherheitskonzept ergeben sich konkrete Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung. Während die Anforderungen an einen Standort durch seine charakteristischen Eigenschaften erfüllt sein müssen, lassen das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung Gestaltungsmöglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen zu. Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich schließlich die Einzelnachweise ab, die zum Nachweis der Sicherheit der Endlagerung an einem Standort zu erbringen sind. Sie werden im Nachweiskonzept beschrieben.

9.2 Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen des BMU

Die Sicherheit eines Endlagers ist dann gewährleistet, wenn die allgemeinen Schutzziele eingehalten werden können. Diese Schutzziele sind in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU, 2010) definiert:

- Dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle sowie
- Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Vorgaben zum Sicherheitskonzept werden durch die Sicherheitsanforderungen gegeben. Dazu gehört der Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der einen definierten Bereich im Wirtsgestein um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche einschließt und den Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterung der geologischen Barriere. Die Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) sind im Hinblick auf ein Endlager in einem Bergwerk in einer tiefen geologischen Formation (ca. 500 m bis 1 000 m tief) formuliert. Darüber hinaus muss die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung durch ein robustes, gestaffeltes Barriersystem sichergestellt werden, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten. Damit wird die Sicherheitsfunktion „Einschluss (im ewG)“ in den Mittelpunkt des Sicherheitskonzeptes gestellt. Die Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert. Für eine Anwendung für eine bestimmte geologische Situation muss das Sicherheitskonzept im Rahmen der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen konkretisiert werden. Das bedeutet, dass die oben genannten zwei Anforderungen auch für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern Anwendung finden müssen. Zudem muss ein Sicherheitskonzept bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern auf diese Anforderungen konkretisiert werden.

Gemäß den erwähnten Sicherheitsanforderungen des BMU ist der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen ionisierender Strahlung zu erreichen, wenn folgende Sicherheitsprinzipien beachtet werden (BMU, 2010):

„4.1 Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.

4.2 Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.

4.3 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.

4.4 Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.

4.6 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.“ (BMU, 2010 S. 9)

9.3 Vorgehensweise zur Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes am Beispiel des Forschungsvorhabens KOSINA

Am Beispiel des FuE-Vorhaben KOSINA (Bertrams, et al., 2015) soll für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen kurz gezeigt werden, welche Konkretisierungen aus den Sicherheitsanforderungen abgeleitet wurden. Das Sicherheitskonzept für ein Endlager in einer flach lagernden Steinsalzformation basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010), auf drei Leitgedanken zum Einschluss der radioaktiven Abfälle. Daraus wiederum wurden drei Grundanforderungen definiert, aus denen die konkreten Zielsetzungen abgeleitet und strategische, planerische Maßnahmen festgelegt wurden.

Folgende Leitgedanken wurden abgeleitet:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010)).
- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (vgl. Abschnitt 4.6 der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010)).
- Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

Diese Leitgedanken gelten gleichermaßen für alle Endlagersysteme im Wirtsgestein Salz. Die geologische Barriere soll den Einschluss der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines Endlagers im Salzgestein ist die geologische Barriere im ewG, die gegenüber Fluiden technisch dicht ist. Dazu muss die Integrität der geologischen Barriere sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG gewährleistet werden muss.

„**Grundanforderung A:** Die eingelagerten Abfallgebände sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (**Einschlussgedanke**).“

Grundanforderung B: Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierefunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (**Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit**).

Grundanforderung C: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (**Kritikalitätsausschluss**).“ (Bertrams, et al., 2015 S. 70)

Als eine weitere Grundanforderung wurde in KOSINA abgeleitet, dass die Abfallbehälter für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus dem Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden sind, gibt es jedoch zurzeit nicht. Insofern wird mit dieser Forderung gleichzeitig angenommen, dass solche Behälter entwickelt werden können.

Für diese Grundanforderungen wurden in dem FuE-Vorhaben KOSINA (Bertrams, et al., 2015) 14 Zielsetzungen und 17 strategische Maßnahmen definiert und der jeweilige Bezug zu den entsprechenden Sicherheitsanforderungen genannt. Die Maßnahmen umfassen sowohl planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Einlagerungshorizont der flach lagernden Salzschiefer als auch technische Vorkehrungen. Ein Ziel und eine dazu vorgesehene Maßnahme wurden dort beispielsweise wie folgt formuliert:

„Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zutreten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt. (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010)).“ (Bertrams, et al., 2015 S. 71)

„M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird - unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten - so klein wie möglich gehalten. Die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender (z. B. schneidender anstatt sprengender) Verfahren. Im Hinblick auf die besonderen Gegebenheiten bei der flachen Lagerung ist hierbei insbesondere die seigere Ausdehnung der Einlagerungsgrubenbaue so klein wie möglich zu halten. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das flach anstehende Salzgestein und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert. (→ Z1, Z2, Z3; entspricht auch der Sicherheitsanforderung 8.2 (BMU, 2010)).“ (Bertrams, et al., 2015 S. 73)

9.4 Sicherheitskonzept für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gemäß GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016)

Im Folgenden wird das in (Bracke, et al., 2016) für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern entwickelte Sicherheitskonzept zusammengefasst und bewertet.

Zur Abschätzung, inwieweit die vorgenannte Methode zur Ableitung von Zielsetzungen und technischen Maßnahmen für ein Sicherheitskonzept für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit den Sicherheitsanforderungen des BMU übereinstimmt, wurde die entsprechende Darstellung in dem GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016) gesichtet. GRS hat in dem Bericht „Tiefe Bohrlöcher“ für den Bundestag (Bracke, et al., 2016) Gedanken zum Sicherheitskonzept und zu den Sicherheitsanforderungen für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern formuliert und Bezug genommen zu den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU, 2010), die generell für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente gelten. Es wird in dem Bericht auch versucht, diese Anforderungen auf die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern zu übertragen. Dort heißt es: „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, 2010) für 1 Mio. Jahre erreicht werden soll, die vor dem

gedanklichen Hintergrund einer Endlagerung in einem geologischen Bergwerk aufgestellt wurden. 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, 2010)). 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.“ (Bracke, et al., 2016 S. 39)*

Damit wird, wie in den Sicherheitsanforderungen gefordert, der Schwerpunkt auf den Einschlussgedanken gelegt. Es heißt dort weiter: „Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss der Bohrung wirksam werden und dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (Abschnitt 4.6 der (BMU, 2010)).“ (Bracke, et al., 2016 S. 40)

Mit dieser Zielsetzung wird auch die zweite, weiter oben genannte Grundanforderung übernommen, der Gedanke der Integrität / Wartungsfreiheit.

Darüber hinaus sollen nach GRS weitere Anforderungen an ein Grundkonzept für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern gelten:

- *„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.“ (Bracke, et al., 2016 S. 40)*

Hier muss festgehalten werden, dass von den Sicherheitsanforderungen des BMU zum Teil Abstand genommen wird. Die Forderung nach Kritikalitätsausschluss (3. Grundanforderung) wird nicht explizit aufgestellt (später aber diskutiert), ebenso wenig wie die Forderung, die Endlagergebinde bis 500 Jahre nach Verschluss der Einlagerungsbohrung zu bergen (später wird für die Bergung von Endlagergebinden aus verschlossenen Bohrungen auf dafür notwendige Forschung verwiesen). Weiterhin wird angenommen, dass sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in gleicher Weise wie die hochradioaktiven Abfälle und die ausgedienten Brennelemente eingelagert werden können. Hier fehlt der Nachweis oder zumindest der Ansatz, wie diese Abfälle konditioniert werden sollen, damit sie in tiefen Bohrlöchern eingelagert werden können.

9.5 Technisches Endlagergrundkonzept zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes gemäß GRS-Bericht

Ein Technisches Grundkonzept für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern wurde unter Berücksichtigung der oben genannten Gedanken zum Sicherheitskonzept in (Bracke, et al., 2016) entworfen. Die wesentlichen und übergeordneten Sicherheitsfunktionen sind gemäß GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016) dabei die Folgenden:

- „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 Salzschiechten. Dies bedeutet, dass die Bohrungen insbesondere im Bereich dieser Barrieren zuverlässig abgedichtet werden.“
- Aufgrund geringer Grundwasserbewegung wird in großer Tiefe ein diffusionsdominiertes Transportverhalten erwartet. Aufgrund des großen Abstandes zwischen Einlagerungsbereichen und dem Schutzgut ist von extrem langen Transportzeiten auszugehen, weswegen signifikante Radionuklideinträge in die Biosphäre unwahrscheinlich sind.“ (Bracke, et al., 2016 S. 40, 41)

Aus den oben genannten Anforderungen und Sicherheitsfunktionen wurde in (Bracke, et al., 2016) das nachfolgend skizzierte Technische Grundkonzept (Abbildung 41) abgeleitet. Dort kann man qualitativ einen ewG hinein skizzieren (siehe rote Linien).

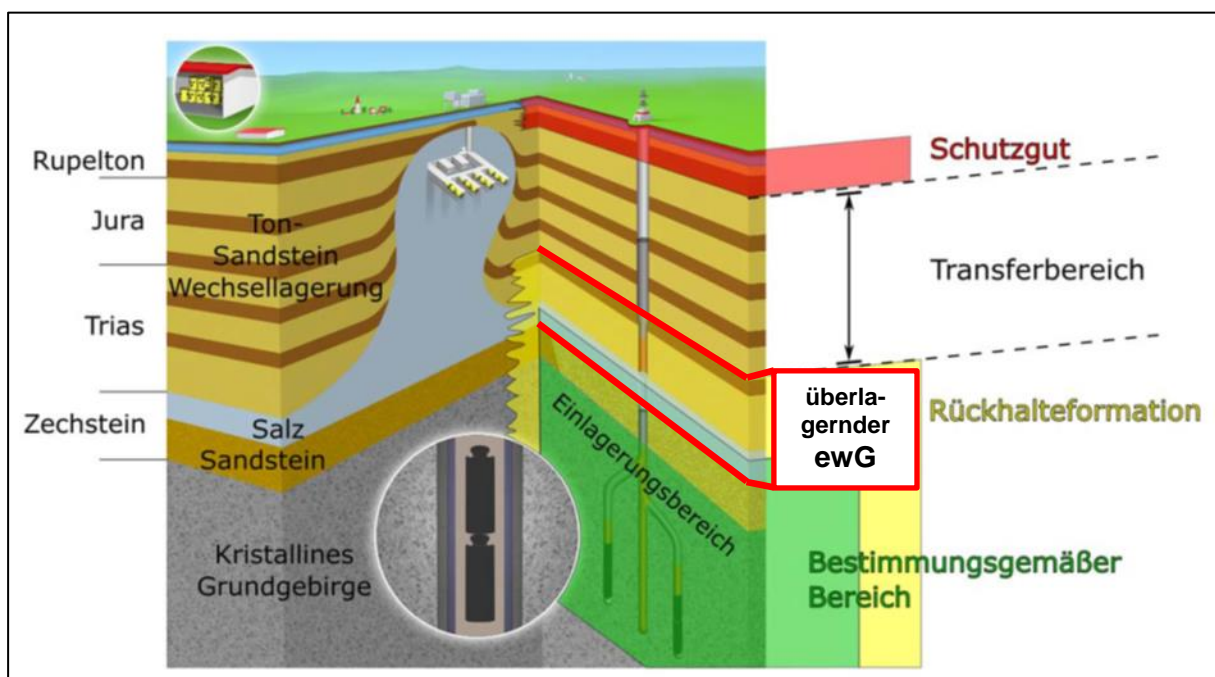


Abbildung 41: Schema einer möglichen Bohrlochlagerung im Kristallin unter Salz und Tongestein nach (Bracke, et al., 2016); überlagernder ewG schematisch mit roten Linien angedeutet

Das Grundkonzept zeigt einen gangbaren Weg zur Umsetzung der in (Bracke, et al., 2016) aufgestellten Sicherheitsfunktionen und Anforderungen im Sicherheitskonzept. Dazu zählt ein Wirtsgestein (kristallines Grundgestein), was zusammen mit den technischen und den anderen geologischen Barrieren einen schnellen Einschluss der Abfallgebinde bietet. Hinzu kommt ein sehr großer Abstand zu wasserführenden Deckgebirgsschichten und ein ewG vom „Typ überlagernder ewG“ (Bb) durch großflächige Salz- und Tonsteinformation oberhalb des Einlagerungsbereiches.

Festzuhalten bleiben dennoch die zwei vorgenannten Abweichungen von den Sicherheitsanforderungen des BMU (kein Kritikalitätsausschluss und keine Möglichkeit der Bergung gefordert). Um genauer einschätzen zu können, ob dieses Grundkonzept das in (Bracke, et al., 2016) entwickelte Sicherheitskonzept erfüllt, muss man sich das entsprechende Nachweis-konzept anschauen, in dem festgelegt werden sollte, wie vorgegangen wird, um die Sicherheit

des Endlagersystems nachzuweisen. In dem GRS-Bericht findet man dazu jedoch nur Angaben zum Behälter, der den chemischen Angriffen des Stützfluides widerstehen muss, und zu Baustoffen, die in Frage kommen, um die Bohrung zu verfüllen. Weitere Angaben fehlen.

9.6 Nachweiskonzept gemäß Sicherheitsanforderungen des BMU

Im Nachweiskonzept werden die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß (BMU, 2010) erfüllt werden. Ausgangspunkt für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes ist der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in der Nachverschlussphase in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Daten- und Modellungswissheiten sollen bei der Bewertung berücksichtigt werden. Der ewG muss in einem definierten Bereich um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche, dargestellt werden. Dabei wird als sicherer Einschluss der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum (hier eine Million Jahre) allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG kommt. In Abbildung 42 ist graphisch dargestellt, welche Nachweise zu führen sind und welche Relevanz sie für die Sicherheitsaussage haben (Bertrams, et al., 2015). Der Kern des Nachweiskonzeptes beinhaltet den radiologischen Sicherheitsnachweis und ist in der Graphik rot markiert. Darüber hinaus sind Nachweise zu Human Intrusion (hellblau), zum Kritikalitätsausschluss, zur Einhaltung nicht radiologischer Schutzziele sowie zur Betriebssicherheit zu führen (alle dunkelblau).

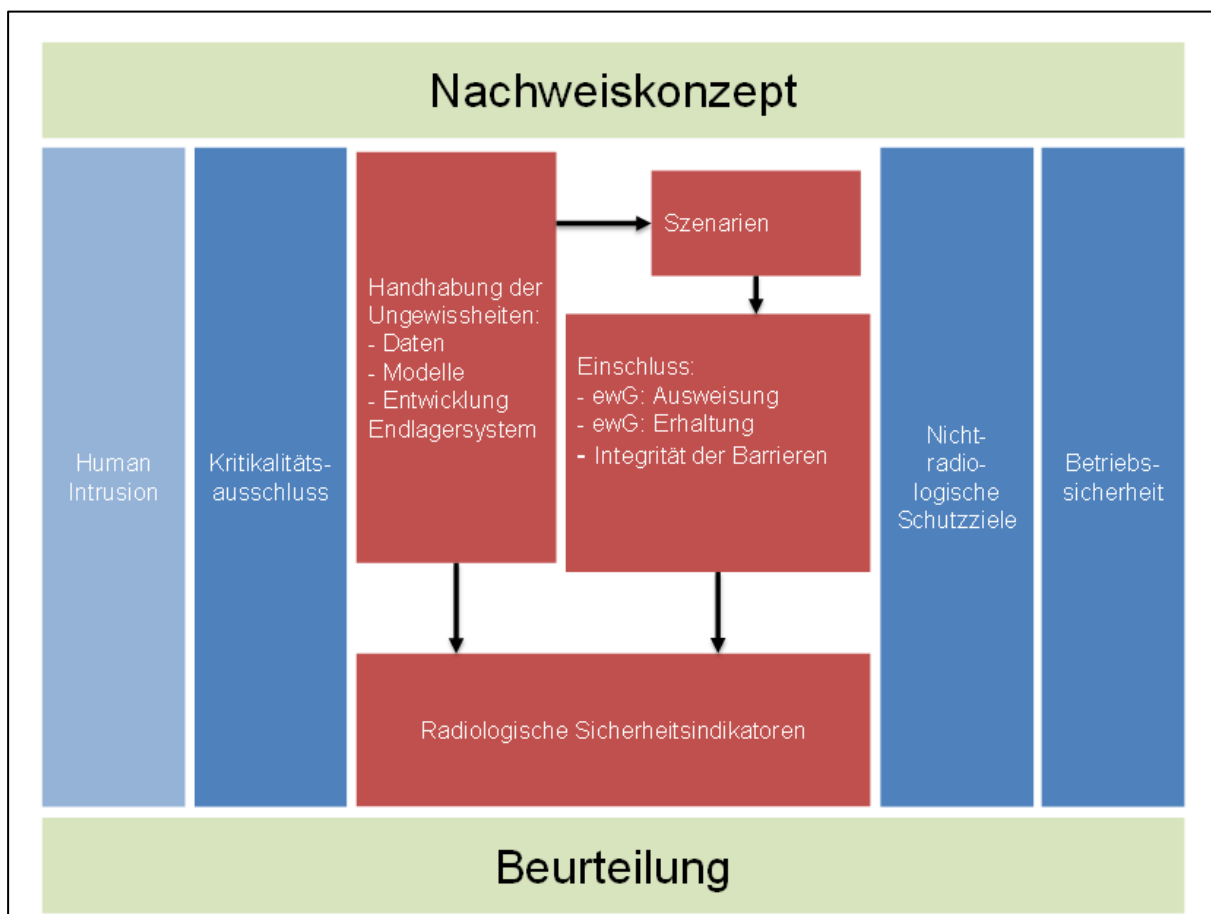


Abbildung 42: Bestandteile des Nachweiskonzeptes (Bertrams, et al., 2015)

- 1) Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des ewG,
- 2) Bewertung des Erhalts des ewGs im Nachweiszeitraum,
 - Bewertung der Mächtigkeit der Salzbarriere/Tonbarriere im ewG,
 - Bewertung der Integrität der geologischen Barrieren,
 - Bewertung der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke,
 - Bewertung des Kritikalitätsausschlusses,
 - Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im ewG,
 - Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre bei Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG,
 - Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien.

Bei der Ausweisung der Lage und der Grenze des ewGs sind die Vorgaben in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) zu beachten:

- Der ewG ist räumlich und zeitlich zu definieren.
- Es gibt keine konkreten Vorgaben bzw. Einschränkungen für die Lage/Größe des ewG.

Für die Bewertung des Erhalts des ewGs im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sind die oben genannten Nachweise zu führen.

9.7 Nachweiskonzept am Beispiel des FuE-Vorhabens KOSINA

In dem FuE-Vorhaben KOSINA (Bertrams, et al., 2015) wurde auf Basis eines erarbeiteten Sicherheitskonzeptes für ein HAW-Endlager in flach lagernden Salzformationen ein Nachweiskonzept entwickelt, in welchem detailliert die Vorgehensweise beschrieben wird, wie die Sicherheit des Endlagersystems bewertet werden soll. Diese Vorgehensweise lehnt sich stark an die vom BMU vorgegebene Methodik an. Dabei wurde ein Verfahren zur Bewertung des Einschlussvermögens des ewGs angewendet, das kompatibel mit der Vorgehensweise für den vereinfachten Nachweis nach (BMU, 2010) ist. Der dabei verwendete Indikator zur Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen für in Lösung befindliche Radionuklide ist ein relativer Index, der das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem ewG im Verhältnis zu einem Freisetzungswert angibt, der als geringfügig angesehen wird. Der Indikator wird radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) genannt und ist eine dimensionslose Zahl. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung werden in vier Stufen bewertet, siehe Abbildung 43, wobei auch die Art des Radionuklidtransports (advektiv oder diffusiv) in die Bewertung einfließt. In den ersten drei, in der Abbildung grün dargestellten Stufen wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG nachgewiesen. Bei Nichteinhaltung der Schutzziele - Stufe 4 - wird das Endlagersystem in der der Bewertung zugrundeliegenden Form als ungeeignet bewertet. Die Bewertung erfolgt sowohl für eine Freisetzung von Radionukliden über den Lösungspfad als auch über den Gaspfad. Im Vorhaben KOSINA konnte für alle betrachteten Einlagerungsvarianten und Lastfälle der sichere Einschluss nachgewiesen werden.

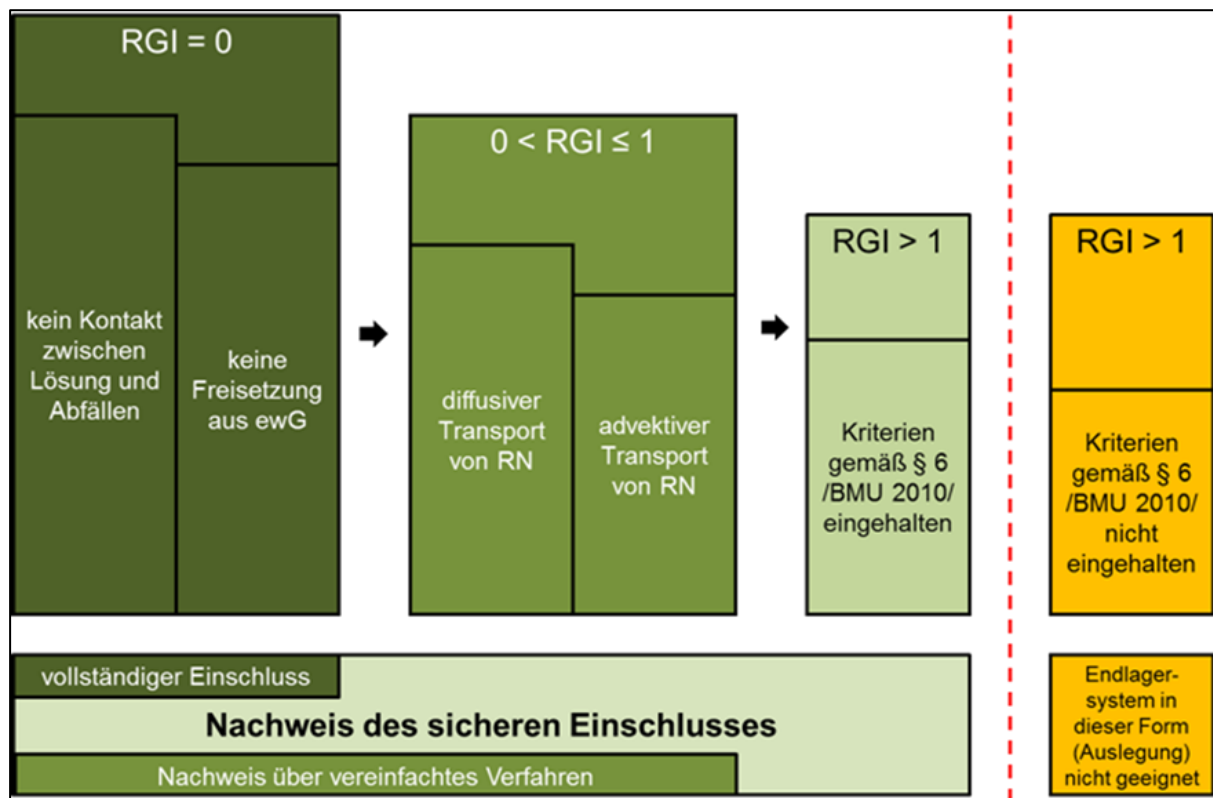


Abbildung 43: Gestuftes Verfahren für die Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im ewG (Bertrams, et al., 2015)

9.8 Einschätzung des Nachweiskonzeptes gemäß GRS-Bericht

Im Folgenden wird die oben genannte Nachweismethode übertragen auf die dazu im GRS-Bericht getroffenen Aussagen für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern. Als erstes soll die Lage und räumliche Ausdehnung des ewGs betrachtet werden. Dazu könnte man in das oben genannte technische Grundkonzept in (Bracke, et al., 2016) (Abbildung 41), z. B. mit einfachen Linien einen ewG einzeichnen der dem Typ „überlagernder ewG“ entspricht und die überlagernden Salz- und Tongesteinsschichten oberhalb der einzelnen Einlagerungsbohrung (oder eines Bohrlochfeldes), der mit Abfallgebinden gefüllt wurde (3 000 m bis 5 000 m Tiefe) umfasst. Die geologischen Verhältnisse um die Einlagerungsbohrungen lassen sich nach derzeitigem Stand der Technik mit zerstörungsfreien Erkundungsmethoden und -verfahren radial um das Bohrloch vor Einbau des Casings bestimmen. Die Reichweite der Verfahren und Kombination von ihnen (Neutronensonde, Gamma-Gamma-Sonde, Resistivity Log oder NMR-Sonde (nuclear magnetic resonance), Georadar) zur Bestimmung von Klüften und deren Füllung mit Flüssigkeit oder Gas variiert je nach Verfahren von einigen Dezimetern bis einigen Metern (siehe Kapitel 6.2.3 Messung von Formationsparametern ab Seite 46) radial um die Bohrung. Mittels Bohrlochmessungen könnte nachgewiesen werden, dass die umliegende Formation frei von Wegsamkeiten und Klüften ist. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die überlagernden Salz- und Tonschichten hinreichend abdichtend sind und den ewG darstellen. Somit wäre eine räumliche Ausweisung des ewGs grundsätzlich möglich bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Für die Bewertung des Erhalts des ewGs im Nachweiszeitraum (eine Million Jahre) ist eine Reihe an Nachweisen zu führen. Im Folgenden werden diese kurz angesprochen und der Versuch unternommen, diese auf die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sinngemäß zu übertragen.

- **Bewertung der Mächtigkeit der Salzbarriere / Tonbarriere im ewG**

Für den Nachweis der Mächtigkeit der Barrieren (hier: sowohl das Salz und der Tonstein im Hangenden als auch das kristalline Grundgebirge um die Bohrungen) im ewG sind ebenfalls Vorgaben der Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) heranzuziehen. Dort wird gefordert, dass der Erhalt der Barrierefunktion des ewGs im Nachweiszeitraum (hier eine Million Jahre) nachzuweisen ist. Dabei muss gewährleistet werden, dass keine Beeinträchtigung der Mächtigkeit der Barrieren durch externe Vorgänge zu unterstellen ist, wie z. B. Subrosion, Erosion, glazigene Rinnenbildung, Salzabwanderung. Bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern mit einem Einlagerungshorizont ab 3 000 m und darüber liegenden Sandstein- und Salzschieben sind diese Prozesse nicht zu erwarten. Gemäß dem im Kapitel 5.2 (siehe ab Seite 40) beschriebenen geologischen Profil 2 (stark vereinfachtes geologisches Modellprofil) für die geologischen Verhältnisse müsste die Tonformation in einer Tiefe von 270 m bis 400 m, die einen Teil des überlagernden ewGs darstellt, dahingehend überprüft werden, ob glazigene Einwirkungen in der betreffenden Region zu erwarten sind. Die ca. 800 m mächtige Salzformation in einer Tiefe von 990 m bis 1 750 m wird als hinreichend mächtig eingeschätzt.

- **Bewertung der Integrität der geologischen Barrieren**

Für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere wird in den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) der Erhalt der Barrierefunktion des ewGs im Nachweiszeitraum gefordert. Dazu ist der Nachweis der Integrität (hydraulische Dichtwirkung) des Wirtsgesteins / der überlagernden Barrieren (Salz und Tonsteinschicht) im ewG zu führen. Das kristalline Grundgebirge wird aufgrund seiner zu erwartenden Klüftigkeit nicht für den Nachweis berücksichtigt. Insofern sind die Nachweise zur Dichtwirkung für die überlagernden Salz- und Tonschichten zu führen. Dies kann sinnfälliger Weise nur für konkrete geologische Verhältnisse erfolgen. Gemäß dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Profil 2 als modellhafte geologische Verhältnisse wären diese Nachweise für die ca. 800 m mächtige Salzformation in einer Tiefe von 990 m bis 1 750 m möglich. Die Tonformation in einer Tiefe von 270 m bis 400 m müsste dahingehend überprüft werden, ob glazigene Einwirkungen in der betreffenden Region zu erwarten sind.

- **Bewertung der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke**

Für die Bewertung der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke gelten sinngemäß gleiche Vorgaben. Der Erhalt der Barrierefunktion des ewGs im Nachweiszeitraum ist zu zeigen. In Endlagerbergwerken geht es dabei um die Nachweise für die Schacht- und Streckenverschlüsse (erforderlicher hydraulischer Widerstand der Schacht- und Streckenverschlüsse) über die vorgesehene Funktionsdauer. Im Endlagerbergwerk ist diese mit 50 000 Jahre angegeben, weil danach wegen zu erwartender glazigener Einwirkungen damit gerechnet werden muss, dass der Schachtverschluss bis in eine bestimmte Tiefe erodiert wird. Die Bohrlochverfüllung und -verschlüsse für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, deren Funktionstüchtigkeit über mehrere Tausend Jahre nachgewiesen werden muss, sind technisches Neuland. Es liegen jedoch grundsätzlich Erfahrungen aus der Tiefbohrtechnik zur Verwahrung von Bohrungen vor - allerdings für die in der Tiefbohrtechnik geltenden Anforderungen (siehe auch Kapitel 6.3.8 Rückbau / Verfüllung von Bohrungen ab Seite 75). Es kann deshalb angenommen werden, dass mehrere Kilometer Verfüllung und qualifizierte Abdichtungen hinreichen, um einen sicheren Verschluss zu gewährleisten. Die Methode für dafür notwendige und qualitätsgesicherte Nachweise muss jedoch noch entwickelt werden. Folgende Aspekte spielen dabei für die Baustoffe und Abdichtkomponenten eine Rolle:

- Rissbeschränkung,
- Standsicherheit,
- Dauerhaftigkeit (Alterungsbeständigkeit),
- Integrale Permeabilität sowie
- Wahrscheinlichkeit des Ausfalls.

- **Bewertung des Kritikalitätsausschlusses**

Der Nachweis des Kritikalitätsausschlusses muss zeigen, dass es im Nachweiszeitraum ausgeschlossen ist, dass sich spaltbares Material lokal oder temporär in einer kritischen Anordnung sammelt. Der Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses ist der sogenannte Multiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} < 0,95$. Mit Blick auf die große Menge an spaltbarem Material, das über die ausgedienten Brennelemente eingelagert wird (mehrere Hundert Behälter pro Bohrloch) und dem vorhandenen Stützfluid, in dem die Gebinde eingelagert werden, muss von Schädigungen der Behälterwandungen und von Korrosion ausgegangen werden. Deshalb sind detaillierte Kritikalitätsberechnungen für zu unterstellende Szenarien durchzuführen. Das Gelingen dieser Nachweise könnte systementscheidend sein. Denkbare Sperren zwischen einzelnen oder Gruppen von Abfallgebinden könnten das Risiko mindern, müssten aber so ausgelegt werden, dass sie im Falle einer Rückholung kein unüberwindliches Hindernis darstellen.

- **Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im ewG**

Gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU ist der Einschluss der Radionuklide im ewG zu bewerten. Der sichere Einschluss ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind. Ein vollständiger Einschluss der Radionuklide ist dann gegeben, wenn überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden. Diese Nachweise können nur über Modellrechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgen, wobei sowohl in Lösung befindliche Radionuklide als auch gasförmig freigesetzte Radionuklide berücksichtigt werden müssen. Für eine vollständige Nachweisführung für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern müssen solche Berechnungen noch durchgeführt werden. Dabei spielen langfristig Korrosionsprozesse am Behältermaterial und am Casing eine entscheidende Rolle, weil alle Behälter über das Stützfluid, das im Bohrloch bleibt, hydraulisch miteinander verbunden sind, und das Casing die Barriere gegenüber dem klüftigen kristallinen Grundgebirge darstellt.

- **Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre bei Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG**

Des Weiteren ist eine Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre vorzunehmen, um eine radiologische Langzeitaussage für eine Million Jahre zu erhalten. Damit soll der Nachweis geführt werden, in welchem Maße das Einschlussvermögen des ewGs wirkt. Auch dieser Nachweis kann nur über Modellrechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgen, wobei sowohl in Lösung befindliche Radionuklide als auch gasförmig freigesetzte Radionuklide berücksichtigt werden müssen.

- Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Abschließend sei erwähnt, dass für eine Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien, Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen zu analysieren sind, um festzustellen, ob und wenn ja, welche auslegungstechnischen Optimierungsmaßnahmen möglich sind. Dabei wird im Sinne von Optimierung an eine Senkung der Eintrittswahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens und an eine Verringerung der radiologischen Auswirkungen (für die Bevölkerung) gedacht. Hier stellt sich grundsätzlich die Frage, ob solche unbeabsichtigten menschlichen Eingriffe überhaupt möglich sind, wenn doch die Bohrungen bis zur Tagesoberfläche reichen und aller Voraussicht nach deutlich markiert werden. Ein unbeabsichtigtes Eindringen wäre dann sicher nur denkbar, wenn sowohl die Markierung am Bohransatzpunkt als auch die Dokumentation darüber nicht mehr zugänglich wären.

Dennoch wird insgesamt die Wahrscheinlichkeit für ein unbeabsichtigtes „Eindringen“ des Menschen bis zu den Abfallgebinden bzw. für ein unbeabsichtigtes Anbohren der Abfallgebinde bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als gering eingeschätzt, da die Abfallgebinde sehr weit von der Biosphäre entfernt sind (3 000 m bis 5 000 m tief). Sogar ein beabsichtigtes Vordringen des Menschen zu den Abfällen bzw. ein beabsichtigtes Anbohren der Abfallgebinde ist erheblich schwieriger als in einem Bergwerk, da die Gebinde erheblich tiefer liegen. Hinzu kommt, dass selbst wenn jemand ein Bohrloch nochmals aufbohren würde, um Abfallgebinde zu entnehmen, er nur bis zu den ersten Abfallgebinden gelangt, die in einem einzigen Bohrloch eingelagert sind. Bezogen auf Human-Intrusion-Szenarien wird deshalb für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern derzeit das Risiko eines unbeabsichtigten Eindringens als gering eingeschätzt.

10 Endlagerkonzept

10.1 Einlagerungs- und Rückholungstechnik

Nach dem erfolgreichen Erstellen des Bohrloches einschließlich Einbau des Casings kann die Bohranlage demontiert und zum nächsten Standort zum Erstellen eines weiteren Einlagerungsbohrloches transportiert werden. Anschließend sollte eine ausführliche Qualitätskontrolle des Casings und der Bohrung erfolgen, bevor das Bohrloch in Betrieb genommen wird.

Für die Einlagerung der Endlagergebinde ist eine Anlage mit einer so hohen Hakenlast, wie sie für die Tiefbohrung benötigt wird, nicht mehr notwendig. Die Einlagerungstechnik kann für geringere Lasten bemessen werden. Die erforderliche Traglast hängt zum einen von der Anzahl der Gebinde ab, die pro Einlagerungsschritt in das Bohrloch gebracht werden sollen und zum anderen von der Einlagerungsmethode. Anschließende Vorgänge, wie das Entfernen des Casings im Bereich der geplanten Abdichtungen sowie der Einbau des Bohrlochverschlusses und weitere Verfüllarbeiten können dann je nach Einlagerungsart mit dem Einlagerungsequipment realisiert werden oder erfordern eine weitere Anlagentechnik.

Die Einlagerung der Gebinde ist mit Hilfe verschiedener Systeme möglich. Unter anderem wurden in (Bracke, et al., 2016) und (SNL, 2016) unterschiedliche Möglichkeiten der Einlagerung aufgegriffen und bewertet. Die Möglichkeiten gehen über eine Einlagerung mit Hilfe von Seilen, Bohrgestänge und Coiled Tubing bis hin zum freien Absinken des Behälters mit oder ohne Führungsrohr im Stützfluid. Bei allen Systemen ist es nicht vorgesehen, das Gebinde aktiv in das Bohrloch zu schieben. Die Geschwindigkeit des Ablassens entspricht maximal der Sinkgeschwindigkeit, um einen ungewollten Druckaufbau im Bohrloch zu vermeiden. Die jeweilige Sinkgeschwindigkeit ist abhängig vom eingesetzten Fluid und dem endgültigen Behälterdesign.

Unabhängig vom gewählten System der Einlagerung gleichen sich die ersten Schritte des Transportes des Endlagergebundes zum Einlagerungsbohrloch. Das Endlagergebinde wird unabgeschirmt ausgeführt und muss daher in einem Transportbehälter in den Überwachungsbe- reich der Einlagerungshalle transportiert werden. Der Transportbehälter wird dort in eine vertikale Position über das Einlagerungsbohrloch gebracht, damit das Endlagergebinde unab- hängig vom gewählten Einlagerungssystem in das Bohrloch eingeführt werden kann. Im Fol- genden werden die Möglichkeiten der Einlagerung mittels Gestänge, Seil und Coiled Tubing kurz beschrieben.

10.2 Gestänge

Nach dem Demontieren des Bohrturmes muss eine Anlage aufgebaut werden, welche zum einen für die Einlagerung (Behälter, Gestänge sowie zu erwartende Lastfälle) ausgelegt ist und zum anderen für die daran anschließenden Arbeiten zum Entfernen des Casings in Berei- chen von Abdichtelementen und das anschließende qualitätsgesicherte Abdichten und Verfül- len des Bohrloches. Eine solche Einlagerungstechnik, welche im Anschluss auch für weitere Arbeiten am Bohrloch genutzt werden kann, gibt es derzeit nicht und muss noch entwickelt werden. Sogenannte „Workover“-Anlagen, welche in der Tiefbohrtechnik für den Verschluss eines Bohrloches eingesetzt werden, sind auch für die Einlagerung der Gebinde denkbar, müs- sen aber für einen solchen Einsatzfall neu konzipiert und ausgelegt werden. Für den Einlage- rungsprozess müssen die Anlagenteile, welche für die Einlagerung benötigt werden, unter anderem aus Strahlenschutzgründen vollständig eingehaust werden.

Das Bohrgestänge ist Hauptbestandteil aller Bohrstränge in der Tiefbohrtechnik. Es besteht überwiegend aus standardisierten Bohrstan- gen (Rohren) von jeweils etwa 10 Metern (30 Fuß) Länge, an dessen Enden sich ebenfalls standardisierte Gewindeverbinder befinden. Bohrstan- gen sind in verschiedenen Durchmessern, Wandstärken und Materialqualitäten erhältlich. Die typischen Außendurchmesser (gemessen auf dem Rohrkörper) betragen 2 3/8“, 2 7/8“, 3 1/2“, 4“, 4 1/2“, 5“, 5 1/2“ und 6 5/8“. Die Gewindeverbinder an den Enden besitzen je nach Gewinde-

typ größere Durchmesser. Das Bohrgestänge sollte nur auf Zug belastet werden (zum Beispiel durch sein Eigengewicht).

Über das Bohrgestänge wird die Spülung in das Bohrloch gepumpt. Die Bohrstangen sind über die Gewinde miteinander verbunden und werden im Bohrturm verschraubt. Bohrgestänge ist in verschiedenen Größen, Materialqualitäten und Wandstärken erhältlich. (Reich, 2015).

Einlagerung mittels Gestängeführung

Über den Antriebsmotor der Anlage und das Gestänge kann das daran befestigte Endlagergebinde bewegt und damit z. B. kontrolliert gedreht werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, mehrere Gebinde hintereinander zu befestigen und als Strang in das Bohrloch einzubringen. Die Gebinde müssten aus Strahlenschutzgründen jedoch unterhalb einer Schleuse innerhalb des Bohrloches miteinander verbunden werden. Dazu müsste eine technische Lösung gefunden werden.

Da das Gestänge immer vertikal von oben in das Bohrloch eingeführt wird, ergeben sich grundsätzliche Herausforderungen hinsichtlich des Strahlenschutzes. Sobald sich der Transportbehälter öffnet, ist die vom Endlagerbehälter ausgehende ionisierende Strahlung nach oben nicht mehr abgeschirmt. Daher muss eine Vorrichtung entwickelt werden, die die Direktstrahlung durch die Öffnung des Transportbehälters verhindert. In (Cochran, et al., 2015) ist die in Abbildung 44 dargestellte Einlagerung von Behältern mit Gestängen beschrieben.

Hierbei befindet sich ein Transportbehälter über einer Prenter-Vorrichtung, die das Innere des Bohrloches abschirmt. Damit ist jedoch der Strahlenschutz beim Öffnen des Transportbehälters nicht gewährleistet. Denkbar wäre den Aufbau während der Einlagerung so zu gestalten, dass ein solcher Prenter über dem Transportbehälter angeordnet wird und somit auch vor Strahlen während des Öffnens des Transferbehälters schützt. Ein solcher Aufbau sowie ein „Strahlenschutz-Prenter“ sind noch zu entwickeln, und die Machbarkeit einer solchen Vorrichtung muss überprüft werden.

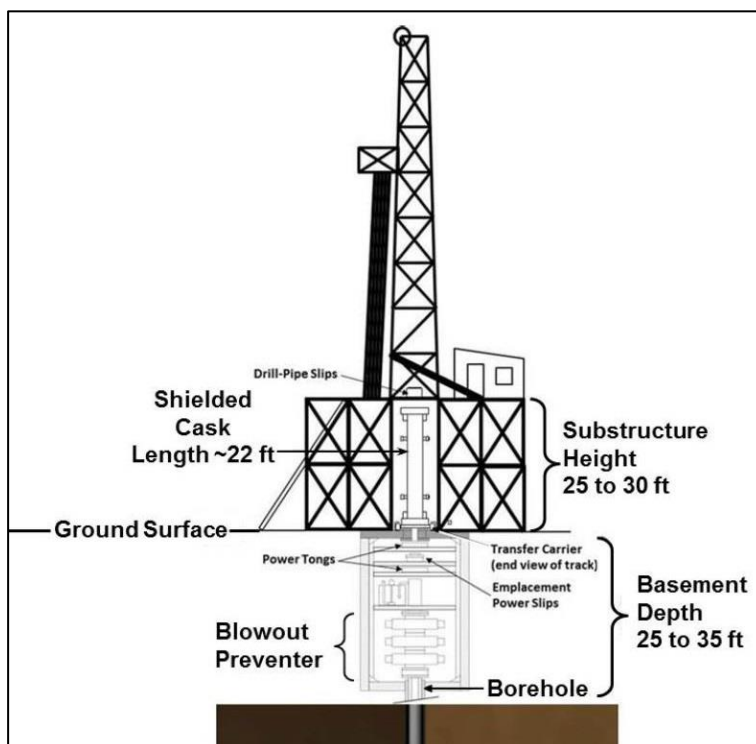


Abbildung 44: Skizze einer Einlagerungsvorrichtung mit Gestängen aus (Cochran, et al., 2015)

Eine weitere Möglichkeit ist es, den Aufenthalt von Personal in diesem Bereich unter allen Umständen auszuschließen. Das Verschrauben und Öffnen („Brechen“) der Gestängeverbindungen und die weiteren planmäßigen Abläufe, die für das Einlagern des Endlagergebundes nötig sind, sind grundsätzlich für eine Automatisierung geeignet. Da im Falle einer Havarie während des Einlagerungsvorganges eine notwendige Intervention von Personal jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, ist „...jede unnötige Exposition von Mensch und Umwelt zu vermeiden.“ (StrlSchG, 2017 § 8 Abs. 1¹) Die Entwicklung einer Abschirmvorrichtung, welche auf dem Transportbehälter aufgesetzt wird und die dennoch Vertikal- und Rotationsbewegungen des Gestänges zulässt, ist daher für das Konzept des Einlagerns mit Hilfe von Gestänge notwendig. Ein solcher „Abschirm-Preventer“ muss nicht nur die Bewegungen des Gestänges zulassen, sondern auch eine sichere Abschirmung gewährleisten. Bei einer Havarie (Verkleben, Steckenbleiben, o. ä.) muss der „Preventer“ in der Lage sein, das Gestänge mitsamt des oder der Endlagergebunde zu halten, ohne das Gestänge zu kappen und einen Absturz zu riskieren.

Im Folgenden ist ein möglicher Ablauf einer störungsfreien Einlagerung jeweils eines Endlagergebundes mit Gestänge skizziert:

- 1) Vorbereiten der Einlagerung (z. B. Absaugen von Stützfluid, Mengen abhängig von verdrängtem Volumen des Gestänges und der Endlagergebunde),
- 2) Anlieferung (liegend) des Endlagerbehälters in einem Transfergebunde im Überwachungsbereich der Einlagerungshalle,
- 3) Drehen des Transferbehälters in eine vertikale Position und Transportverschiebung in den Kontrollbereich zur Einlagerung,
- 4) Positionieren des Transferbehälters über der Bohrlochabspernung,
- 5) „Abschirm-Preventer“ setzt oben auf Transferbehälter auf,
- 6) Verschließen des Kontrollbereiches (keine Personen befinden sich mehr in dem Kontrollbereich der Einlagerungshalle),
- 7) Öffnen des „Abschirm-Preventers“ und des oberen Transferbehälterdeckels,
- 8) Einführen des Gestänges durch den „Abschirm-Preventer“ in den Transferbehälter,
- 9) Verbinden des Bohrgestänges mit dem Endlagergebunde,
- 10) Anheben des Endlagerbehälters öffnet den unteren Verschluss des Transferbehälters parallel zur Bohrlochschleuse,
- 11) Absenken des Endlagerbehälters in das Bohrlochtiefste bzw. auf den zuvor bereits eingelagerten Endlagerbehälter,
- 12) Loslösen des Endlagerbehälters vom Bohrgestänge,
- 13) Ausbauen des Bohrgestänges aus dem Bohrloch,
- 14) Bohrlochschleuse und unterer Verschluss des Transferbehälters parallel schließen,
- 15) Oberen Verschluss des Transferbehälters und „Abschirm-Preventer“ schließen,
- 16) „Abschirm-Preventer“ wird vom Transferbehälter getrennt,
- 17) Transferbehälter wird aus dem Sperrbereich transportiert,
- 18) Wiederholung der vorangegangenen Schritte mit neu beladenem Transferbehälter.

Für die Variante der Einlagerung eines Stranges von mehreren Endlagergebunden würde der betreffende Behälter in Schritt 11 nicht bis in die Endlagerposition gebracht, sondern unterhalb der Bohrlochschleuse festgehalten und mit einem bereits dort befindlichen Endlagergebunde verbunden werden. Dieses Verfahren ist nicht erprobt und käme einem Prozessschritt in einer heißen Zelle gleich, nur dass in diesem Fall keine optische Kontrolle möglich ist. Danach

¹ § 8 tritt gemäß Art. 32 Abs. 1 Satz 3 G. v. 27.06.2017, 1966 mWv am 31.12.2018 in Kraft

schließen sich die Schritte 12 bis 18 und 1 bis 10 an, bis die erforderliche Anzahl an Endlagergebinden verbunden ist. Im Anschluss wird der gesamte Strang in die Endlagerposition gebracht. Das hier beschriebene Verfahren, welches weitgehend automatisiert ablaufen soll, müsste noch in einem umfangreichen Entwicklungsprozess optimiert und bis zur Anwendungsreife getestet werden.

Da ein Endlager in tiefen Bohrlöchern nicht zwingend zentral oder in der Nähe des oder der Zwischenlager liegen würde, ist bei der Variante der Einlagerung der Endlagergebinde im Strang auch die Anlieferung der Endlagergebinde am jeweiligen Bohrlochstandort zu berücksichtigen. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass pro Tag ein Gebinde am Standort angeliefert wird, müssten die Gebinde kurzzeitig so lange am Standort zwischengelagert werden, bis ein neuer Einlagerungsstrang sinnvoll aufgebaut werden kann. Dies müsste zukünftig noch bewertet werden.

Weiterhin ist nach der sicherheitstechnischen Regel KTA 3902 für die „Auslegung von Hebezeugen in kerntechnische Anlagen“ für Hubwerke eine doppelte Hubwerkskette oder Hubwerke mit einfachen Triebwerksketten mit Sicherheitsbremse notwendig (KTA, 2012). Nach Auslegung von (Peiffer, et al., 2012) müsste dementsprechend ein zweites Gestänge oder eine andere Sicherung (zweites Hubwerk) am Gebinde installiert werden, die bei Versagen des Gestänges einen Absturz des Endlagergebindes verhindert. Ein konstruktiver Ansatz, der dabei auch weiterhin die Aspekte des Strahlenschutzes berücksichtigt, konnte in diesem Vorhaben nicht gefunden werden und müsste noch entwickelt werden.

Zusammenfassend wird eine Einlagerung eines einzelnen Gebindes an einem Gestänge für möglich gehalten. Für eine Einlagerung von mehreren Gebinden in einem Strang ist weitere erhebliche Entwicklungsarbeit notwendig.

10.3 Coiled Tubing

Unter Coiled Tubing ist ein langes, durchgehendes Stahlrohr geringen Durchmesser zu verstehen, welches auf einer Winde aufgewickelt ist. Dieses wird abgerollt und kurz vor Eintritt in das Bohrloch begradigt und dann in dieses eingeführt. In der Öl- und Gasindustrie wird Coiled Tubing vor allem nach dem Fertigstellen der Bohrung für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Ein Vorteil ist das durchgängige, stabile Rohr, durch welches Flüssigkeiten auch mit einem gewissen Druck gepumpt werden können. Damit werden vor allem Reinigungsarbeiten in einem im Betrieb befindlichen Bohrloch durchgeführt. Es können auch, zum Beispiel in vertikalen Bohrungen, Instrumente an den Bestimmungsort geschoben bzw. von dort entfernt werden. (Schlumberger, 2014) Die Belastbarkeit des Materials ist jedoch begrenzt und es kann nur eine begrenzte Anzahl an Arbeitsgängen durchführen. Dies unterliegt einer ständigen Kontrolle, damit es nicht zum Bruch innerhalb des Bohrloches kommen kann. Allein durch die Begrenzung der Durchgänge ist diese Methode für die kontinuierliche Einlagerung von mehreren hundert Behältern pro Bohrloch ungeeignet.

10.4 Seile

Im Folgenden wird die Eignung von Seilen für den Transport von Endlagergebinden bei der Einlagerung in tiefe Bohrlöcher bis in 5 000 m Tiefe betrachtet. Berücksichtigt werden dabei Stahldrahtseile sowie Faserseile.

Die Seile werden hierfür als „*linienförmige, biegeflexible Strukturen, die der Übertragung von Zugkräften dienen*“ (Heinze, 2013 S. 10), definiert.

Stahldrahtseile

Stahldrahtseile bezeichnen Seile, deren Tragelemente Drähte aus dem Werkstoff Stahl sind. Die Drähte sind in der Regel in einer oder in mehreren Lagen um einen Kern als Einlage zu einer Litze verseilt. Die Litzen wiederum ergeben z. B. durch Verflechten die Seilstruktur. Die Stahldrahtseile unterscheiden sich dabei durch die Anzahl und die Form der Drähte, die Anzahl und die Art der Litzen sowie durch die Art der Einlagen. (Heinze, 2013), (VDI 2358, 2012), (DIN EN 12385-2, 2008)

Nach (Bracke, et al., 2016 S. 48) kann für den Transport von Endlagergebinden bei der Einlagerung in Bohrlöcher bis in 5 000 m Tiefe auf „*Erfahrungen eines automatisierten Bohrbetriebes und Einlagerungsbetriebes zurückgegriffen werden.*“ Die Verwendung eines Seiles mit einem Durchmesser von 44,5 mm ist für Lasten bis ca. 120 Mg nach (Bracke, et al., 2016) Stand der Technik.

In (DIN EN 12385-4, 2008) sind Mindestbruchkräfte für gebräuchliche Seilklassen, Seilfestigkeitsklassen und Seildurchmesser angegeben. Die Abbildung 45 zeigt hierzu exemplarisch die Angaben für die Seilklasse 6 x 19 aus (DIN EN 12385-4, 2008).

Betrachtet man beispielhaft ein Stahldrahtseil in Form eines einlagigen Rundlitzenseiles nach DIN EN 12385-4 der Seilklasse 6 x 19 mit einer Stahleinlage und der höchsten Seilfestigkeitsklasse mit einem ähnlichen Seildurchmesser, wie er in (Bracke, et al., 2016) als Stand der Technik beschrieben wurde, ergeben sich aus Abbildung 45 (siehe Hervorhebungen) die in Tabelle 23 aufgeführten Werte. Unter Berücksichtigung einer Seillänge von 5 000 m ergibt sich ein ungefähres rechnerisches Eigengewicht von 38,7 Mg. Damit ergibt sich bis zum Erreichen der Mindestbruchkraft eine weitere mögliche Belastung von ca. 110 Mg. Ohne Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors kann die Masse des Endlagergebindes damit bis zu 110 t betragen. Je nach Größe des Sicherheitsfaktors verringert sich entsprechend die mögliche Masse des zu transportierenden Endlagergebindes.

Tabelle 23: Beispiel für die Parameter eines Stahldrahtseiles nach DIN EN 12385-4

Seilart	einlagiges Rundlitzenseil
Seilklasse	6 x 19 (Litzenanzahl x Drahtanzahl)
Art der Einlage	Stahl
Seilfestigkeitsklasse	2160 N/mm ²
Nenn Durchmesser des Seiles	44 mm
Längengewicht (Richtwert)	7,74 kg/m
Mindestbruchkraft	1490 kN

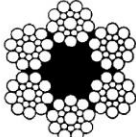
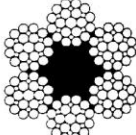
Konstruktion Beispiele für Querschnitt	Seilkonstruktion		Litzenkonstruktion				
	Gegenstand	Anzahl	Gegenstand		Anzahl		
	Litzen Außenlitzen Litzenlagen Drähte im Seil (ohne die Stahleinlage)	6 6 1 90 bis 156	Drähte Außendrähte Drahtlagen		15 bis 26 7 bis 12 2 bis 3		
6 × 19S-FC	Typisches Beispiel		Anzahl der Außendrähte		Außendraht- faktor ¹⁾		
	Seil	Litze	gesamt	je Litze			
6 × 25F-FC	6 × 19S	1-9-9	54	9	0,080		
	6 × 25F	1-6-6F-12	72	12	0,064		
	6 × 19W	1-6-6+6	72	12 6 6	0,073 0,055		
	6 × 26WS	1-5-5+5-10	60	10	0,074		
Faktor für die Mindestbruchkraft:			$K_1 = 0,330$; $K_2 = 0,356$				
Faktor für das rechnerische Längengewicht ¹⁾ :			$W_1 = 0,359$; $W_2 = 0,400$				
Faktor für den metallischen Querschnitt ¹⁾ :			$C_1 = 0,384$; $C_2 = 0,449$				
Nenndurch- messer des Seiles mm	Ungefähres rechnerisches Längengewicht ¹⁾ kg/100 m		Mindestbruchkraft kN				
			Seilfestigkeitsklasse				
	Fasereinlage	Stahleinlage	1770		1960		2160
			Fasereinlage	Stahleinlage	Fasereinlage	Stahleinlage	Stahleinlage
1	2	3	4	5	6	7	8
6	12,9	14,4	21,0	22,7	23,3	25,1	27,7
7	17,6	19,6	28,6	30,9	31,7	34,2	37,7
8	23,0	25,6	37,4	40,3	41,4	44,7	49,2
9	29,1	32,4	47,3	51,0	52,4	56,5	62,3
10	35,9	40,0	58,4	63,0	64,7	69,8	76,9
11	43,3	48,4	70,7	76,2	78,3	84,4	93,0
12	51,7	57,6	84,1	90,7	93,1	100	111
13	60,7	67,6	98,7	106	109	118	130
14	70,4	78,4	114	124	127	137	151
16	91,9	102	150	161	166	179	197
18	116	130	189	204	210	226	249
20	144	160	234	252	259	279	308
22	174	194	283	305	313	338	372
24	207	230	336	363	373	402	443
26	243	270	395	426	437	472	520
28	281	314	458	494	507	547	603
32	368	410	598	645	662	715	787
36	465	518	757	817	838	904	997
40	574	640	935	1 010	1 040	1 120	1 230
44	695	774	1 130	1 220	1 250	1 350	1 490
48	827	922	1 350	1 450	1 490	1 610	1 770
52	971	1 080	1 580	1 700	1 750	1 890	2 080
56	1 130	1 250	1 830	1 980	2 030	2 190	2 410
60	1 290	1 440	2 100	2 270	2 330	2 510	2 770

Abbildung 45: Beispiel für Stahldrahtseile nach DIN EN 12385-4 (Tabelle 7: Seilklasse 6 x 19) (DIN EN 12385-4, 2008 S. 11)

Im Weiteren sollen zwei Einsatzbeispiele für Stahldrahtseile mit großen Längen bzw. Durchmessern dargelegt werden, um zu zeigen, dass bisher ähnliche Seillängen und Seildurchmesser, wie sie bei der tiefen Bohrlochlagerung eingesetzt werden könnten, verwendet wurden.

Die im Jahr 2017 im Bau befindliche Eibsee-Seilbahn (Ersatzneubau) befindet sich auf der deutschen Seite der Zugspitze und verläuft vom Eibsee zum Zugspitzgipfel. Sie überwindet 1 945 m Höhe bei einer Fahrbahnlänge von 4 460 m und ist dabei nur einmal gestützt. Eine

Kabine (für 120 Personen) wird von zwei Stahldrahtseilen (Seildurchmesser: 72 mm), bei einer maximal frei hängenden Seillänge von 3 214 m, getragen. (Seilbahn.net, 2017)

Stahldrahtseile kommen derzeit auch bei den tiefsten Goldminen in Südafrika zum Einsatz. So wird in der South Deep Gold Mine in Südafrika ein bis in 3 000 m Tiefe frei hängendes Stahldrahtseil (Seildurchmesser: 48 mm) für die Materialförderung eingesetzt. Dabei tragen zwei Seile eine Nutzlast von 31 t. (SIEMAG TECBERG, 2013)

Das Weiterentwicklungspotenzial bei Stahldrahtseilen hinsichtlich Länge und Traglast wird als gering eingeschätzt, da eine Steigerung der Förderlängen bzw. Fördermassen nur bei einer Steigerung der Zugfestigkeit des Seiles bzw. dessen Gewichtsreduzierung möglich ist. Die Steigerung der Förderlängen bzw. Fördermassen unterliegt jedoch physikalischen Grenzen.

Faserseile

Faserseile können aus Natur- und Chemiefasern hergestellt werden. Dabei werden die Litzen in der Regel durch Verdrehen der Garne hergestellt, während die Seilstruktur durch Verflechten der Litzen entsteht. Für hochfeste Seile bieten HM-HT-Fasern die besten werkstoffseitigen Voraussetzungen (high modulus - high tenacity - Fasern: „*bestehen aus anisotropen Thermoplasten mit linearen langkettigen Molekülen, die im Spinnprozess kristalline Strukturen bilden*“ (Heinze, 2013 S. 5)). Dies sind Chemiefasern synthetischer Polymere organischen Ursprungs. Hierzu zählen vor allem die folgenden Werkstoffgruppen: Polyolefine, Polyamide und Polyester. (Heinze, 2013)

Die Vorteile der HM-HT-Fasern liegen in der hohen Zugfestigkeit bei gleichzeitiger geringer Dichte. Dabei kann gegenüber Stahldrahtseilen die Zugfestigkeit um den Faktor 3 größer und die Dichte um den Faktor 8 geringer sein, wodurch die Reißlängen höher und damit die Förderhöhen größer werden bzw. der Materialfluss energieeffizienter realisiert werden kann. (Heinze, et al., 2010)

Weiterhin haben Faserseile Bruchdehnungen ($\geq 2,5\%$), die abhängig von der jeweiligen Werkstoffgruppe, in der gleichen Größenordnung wie von Stahl (Bruchdehnung: 2 %) liegen können. (Mammitzsch, 2014), (Michael, 2011)

Abbildung 46 zeigt für drei verschiedene HM-HT-Fasern Beispiele mit ihren jeweiligen Eigenschaften sowie den Vergleich zum Stahldrahtseil.

Bezüglich des Anwendungszieles haben HM-HT-Faserseile gegenüber Stahldrahtseilen nach (Heinze, 2013) generell folgende Vorteile:

- erweiterte technische Möglichkeiten infolge größerer Förderlängen,
- höhere Förderkapazitäten durch höhere Nutzlasten,
- höhere Betriebssicherheit durch höhere Sicherheitsfaktoren / Lebensdauer,
- geringere Anschaffungskosten durch kleinere Seilscheiben / Antriebe,
- längere Wartungsintervalle bzw. geringere Ausfallzeiten,
- Verbesserung der Energiebilanz durch kleinere Antriebsleistungen sowie in Summe niedrigere Betriebskosten. (Heinze, 2013 S. 14)

In (DIN EN ISO 10325, 2010) sind Mindestbruchkräfte für verschiedene Seildurchmesser von Faserseilen aus HMPE (hochmodulares Polyethylen - Gruppe der Polyolefine) angegeben. Die Abbildung 47 zeigt hierzu exemplarisch die Angaben für 8-litzige und 12-litzige geflochtene HMPE-Seile aus (DIN EN ISO 10325, 2010).

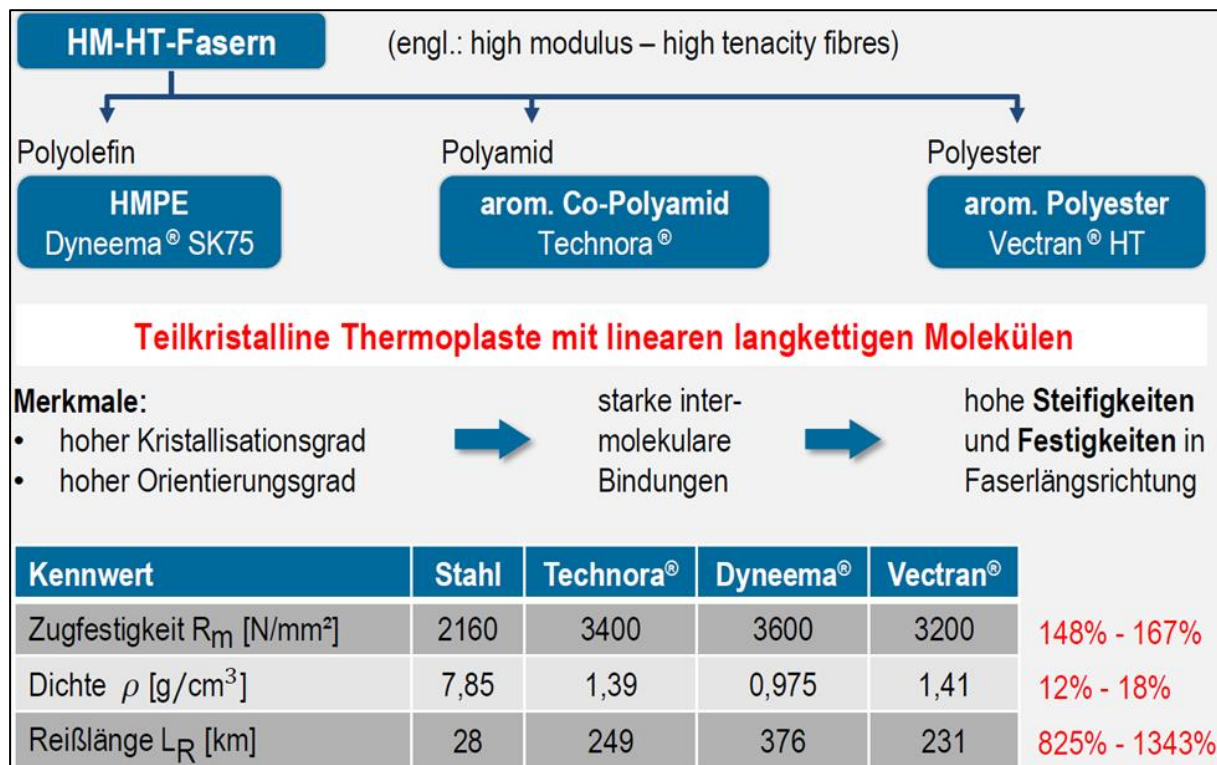


Abbildung 46: HM-HT-Faserstoffe und ihre Eigenschaften (Heinze, 2014 S. 4)

Betrachtet man beispielhaft ein 12-litziges geflochtenes ungespleißtes Faserseil aus hochmodularem Polyethylen nach DIN EN ISO 10325 mit dem gleichen Seildurchmesser, wie er in Tabelle 23 für das Stahldrahtseil betrachtet wurde (44 mm), ergeben sich aus Abbildung 47 (siehe Hervorhebungen) die in Tabelle 24 aufgeführten Werte. Aus diesen Daten geht eine nahezu identische Mindestbruchkraft zwischen Faserseil und Stahldrahtseil, bei einem erheblich geringeren Längengewicht des Faserseiles, hervor (etwa Faktor 7 - siehe Tabellen 23 und 24). Unter Berücksichtigung einer Seillänge von 5 000 m ergibt sich ein ungefähres rechnerisches Eigengewicht von 5,3 Mg. Damit ergibt sich bis zum Erreichen der Mindestbruchkraft eine weitere mögliche Belastung von ca. 140 Mg. Ohne Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors kann die Masse des Endlagergebindes damit bis zu 140 t (zum Vergleich Stahldrahtseil: 110 t) betragen. Je nach Größe des Sicherheitsfaktors verringert sich entsprechend die mögliche Masse des zu transportierenden Endlagergebindes.

Tabelle 24: Beispiel für die Parameter eines Faserseiles nach DIN EN ISO 10325

Seilbezeichnung	Faserseil
Litzenanzahl	12
Machart	geflochten, ungespleißt
Werkstoff	hochmodulares Polyethylen
Seil-Nenngröße	44 mm
Längengewicht (Richtwert)	1,06 kg/m
Mindestbruchkraft	1460 kN

Seil-Nenn- größe ^a	Feinheit ^{b,c} (lineare Masse)		Mindestbruchkraft ^{d,e}	
	Nennwert ktex	Grenzabweichung %	Faserseile ungespleißt	Seile mit gespleißten Endverbindungen/ Augenspleißen
6	23,0	± 10	36,7	33,0
8	40,0		65,3	58,7
10	61,0		102	92,0
12	87,0	± 8	147	132
14	117		200	180
16	151		260	235
18	190	± 5	310	283
20	232		380	340
22	281		450	400
24	331		520	470
26	384		600	540
28	445		680	610
30	506		770	690
32	575		870	780
34	648		960	860
36	720		1 040	940
38	798		1 160	1 040
40	881		1 260	1 130
44	1 060		1 460	1 310
48	1 250		1 700	1 530
52	1 460		1 970	1 770
56	1 690		2 260	2 030
60	1 930		2 530	2 280
64	2 200		2 840	2 560
68	2 480		3 170	2 850
72	2 780		3 520	3 170
76	3 090		3 890	3 500
80	3 430		4 300	3 870
88	4 170		5 200	4 680
96	4 970		6 180	5 560

^a Die Seil-Nenngröße bezieht sich auf den ungefähren Durchmesser in Millimeter.

^b Die Feinheit, in Kilotex, bezieht sich auf die Nettomasse durch Seillänge, ausgedrückt in Gramm durch Meter oder in Kilogramm durch Kilometer.

^c Die Feinheit wird unter Nennspannung ermittelt und wie in ISO 2307 beschrieben gemessen.

^d Die Bruchkräfte beziehen sich auf neue, trockene und nasse Seile.

^e Eine durch die Prüfverfahren nach ISO 2307 bestimmte Kraft ist nicht notwendigerweise genau die Kraft, bei der dieses Seil unter anderen Umständen und in anderen Situationen brechen könnte. Die Art und Güte der Endverbindungen, die Geschwindigkeit der Kraftaufbringung, vorheriges Konditionieren und vorherige Krafteinwirkungen auf das Seil können die Bruchkraft deutlich beeinflussen. Ein Seil, das um einen Pfosten, ein Spill/Winde, eine Rolle oder Scheibe gewunden ist, kann bei einer deutlich geringeren Kraft brechen. Ein Knoten oder eine andere Verformung im Seil kann die Bruchkraft deutlich vermindern.

Abbildung 47: Beispiel für Faserseile aus HMPE nach DIN EN ISO 10325 (Tabelle 1: 8- und 12-litzige geflochtene Seile) (DIN EN ISO 10325, 2010 S. 6)

Im Bereich der Faserseile wird stetig geforscht, sodass zukünftig mit weiteren Neuerungen in diesem Bereich zu rechnen ist. Sofern Faserseile für den Transport von Endlagergebinden bei der Einlagerung in tiefe Bohrlöcher bis in 5 000 m Tiefe genutzt werden sollen, empfiehlt es sich, den aktuellen Forschungsstand auf diesem Gebiet stets neu zu betrachten.

So sind beispielsweise bereits neue Tragmittelkonstruktionen in der Entwicklung, die aus mehreren geflochtenen Faserseilen bestehen, welche parallel angeordnet in einem elastomeren

Matrixmaterial eingebettet werden (siehe Abbildung 48). Dabei teilt sich der tragende Querschnitt auf mehrere parallel verlaufende Seilgeflechte auf. Zudem bietet dieses System die Möglichkeit Sensoren in das Matrixmaterial einzubetten, um den Zustand des Tragmittels während des Betriebes zu überwachen. (Heinze, et al., 2010)

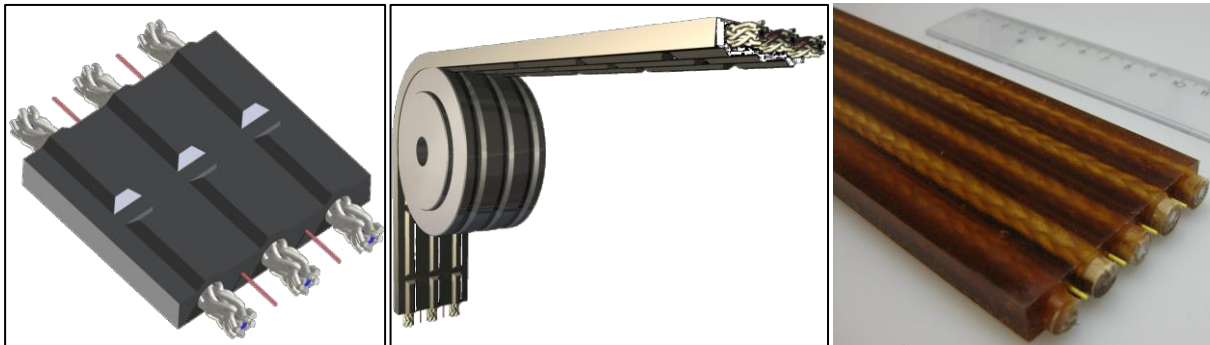


Abbildung 48: Modell einer neuartigen Tragmittelkonstruktion (Nendel, et al., 2010 S. 15)

Seilzentrierung

Die Abweichung des Bohrlochtiefsten (5 000 m) vom Ansatzpunkt kann 10 m und mehr betragen. Dies führt bei einem im Bohrloch frei hängenden Seil dazu, dass dieses das Casing berührt und infolge von Reibung sich der Seilverschleiß erhöht. Demzufolge wurden Möglichkeiten zur Zentrierung von Seilen im Bohrloch recherchiert, jedoch keine Standardlösungen auf dem Markt gefunden. Daher wurde ein Vorschlag für eine solche Zentriereinrichtung erarbeitet (siehe Abbildung 49). Diese besteht aus einem metallischen Fachwerk (identischer Werkstoff, wie die Endlagergebinde, um Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Bohrlochbetriebsfluid zu unterbinden) mit Gelenk und Spannvorrichtung (siehe Abbildung 49), um die Seilklemme schnell und einfach am Seil zu befestigen. Die Reibung der Seilklemme am Casing wird mittels Rollen / Rädern vermindert. Anstelle der vier Rollen sind auch Teflonschienen als Reibungsminderer denkbar. Die Anzahl der notwendigen Seilklemmen am Seil ist bohrlochspezifisch festzulegen, nachdem die Vertikalität bekannt ist. Die Lage und Anzahl der notwendigen Seilklemmen am Seil muss dabei so gewählt werden, dass das Seil an keiner Stelle das Casing berührt.

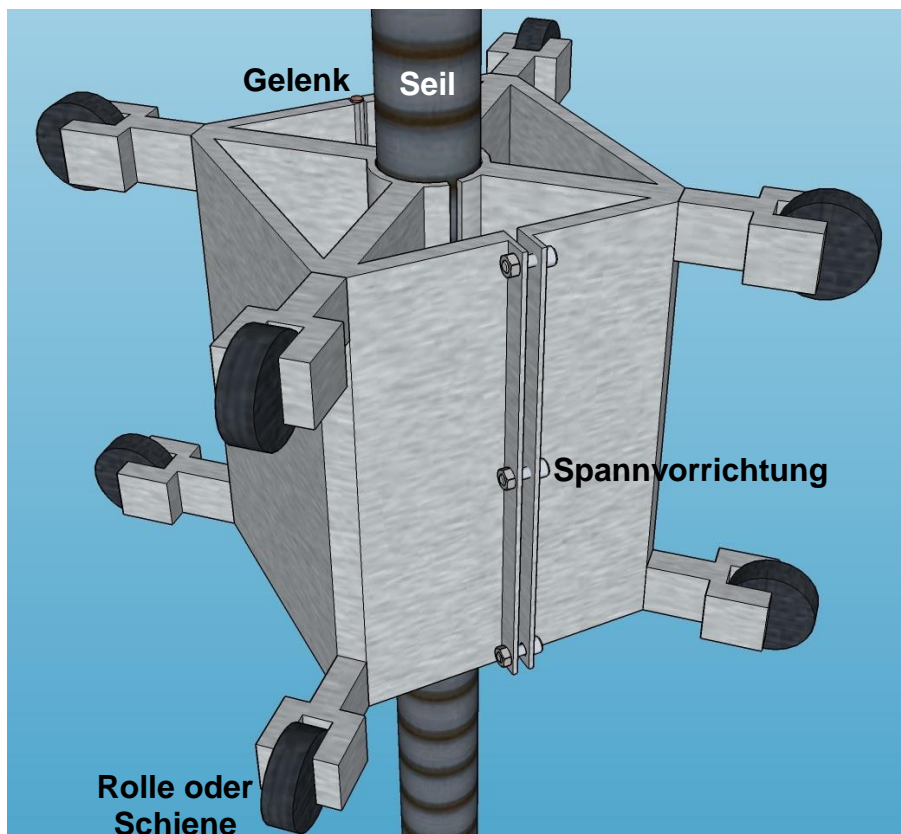


Abbildung 49: Vorschlag für eine Seilklemme zur Seilzentrierung

Zusammenfassung zu Stahldraht- und Faserseilen

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass sowohl Stahldrahtseile als auch Faserseile prinzipiell für den Transport der Endlagerbehälter bis in 5 000 m Tiefe in Frage kommen. Hierbei spielt jedoch die Größe des Sicherheitsfaktors eine entscheidende Rolle, da dieser bei hohen Werten beim hohen Eigengewicht der Stahldrahtseile dazu führen kann, dass diese nicht mehr bis in 5 000 m Tiefe verwendet werden können. Weiterhin ist zu beachten, dass der Einsatz von Faserseilen für Hebezeuge nach der sicherheitstechnischen Regel KTA 3902 derzeit nicht zulässig ist (KTA, 2012).

Nach der Festlegung des Bohrlochbetriebsfluides muss eine Prüfung auf chemische Wechselwirkungen mit dem Seil erfolgen, insbesondere bei der Verwendung von Faserseilen. Weiterhin ist nach Klärung der maximalen Einwirktemperaturen zu prüfen, ob diese zu Schädigungen an den Seilen führen. Da für Stahl der Schmelzpunkt bei ca. 1 600 °C liegt, werden die Temperaturen im Bohrloch keine wesentlichen negativen Auswirkungen auf das Stahlseil haben. Bei Faserseilen hingegen hängt dies im Wesentlichen vom Material der Faser ab. So existieren HM-HT-Fasern, deren thermische Zersetzung erst bei 600 °C einsetzt, wobei die zulässigen Verwendungsbereiche dieser Fasern bereits bei niedrigeren Temperaturen enden. Untersuchungen des Produktes „Vectran®“ (siehe Abbildung 46 auf Seite 126) zeigten kritische Temperaturen erst ab etwa 240 °C, sodass eine Nutzung im Bohlochtiefsten möglich wäre. (Michael, 2011) Weiterhin existieren Fasern (PBO-Fasern - Poly-phenylene-benzobisoxazole - Vertrieb unter dem Namen „Zylon®“), die maximale Einsatztemperaturen von 400 °C erreichen können. (Mammitzsch, 2014)

Die Seile müssen nach Kenntnis aller Einflussparameter für den speziellen Anwendungsfall „dimensioniert“ werden. Dabei kommt bei den Faserseilen hinzu, dass diese aus verschiedenen Materialien gefertigt werden können, sodass zur Dimensionierung auch die Wahl eines geeigneten Werkstoffes zählt, wovon alle weiteren Parameter abhängen (Zugfestigkeit, Dichte, Bruchdehnung, Einsatztemperatur, chemische Wechselwirkung). Aufgrund der sicherheitstechnischen Bedeutung des einwandfreien Zustandes der Seile müssen diese, ähnlich

wie bei Schachtförderanlagen, regelmäßig auf mögliche Beschädigungen oder unentdeckte Fertigungsfehler überprüft werden.

Einlagerung mittels Seilführung

Wie weiter oben schon beschrieben, wird vor Beginn der Einlagerung der Bohrturm demontiert und kann zum Standort des nächsten Einlagerungsbohrloches transportiert werden. Nach erfolgter Demontage und Qualitätsüberprüfung des Einlagerungsbohrloches kann die Einlagerungstechnik installiert werden. Für die Einlagerung der Behälter über ein Seil wird eine Seilwinde benötigt. Exemplarisch wurde dafür bereits in (Bracke, et al., 2016) die Einlagerungsvorrichtung aus (Filbert, et al., 2010) angeführt (siehe Abbildung 50). Der Einlagerungsbereich mit allen Anlagenteilen muss vor Beginn der Einlagerung eingehaust werden.

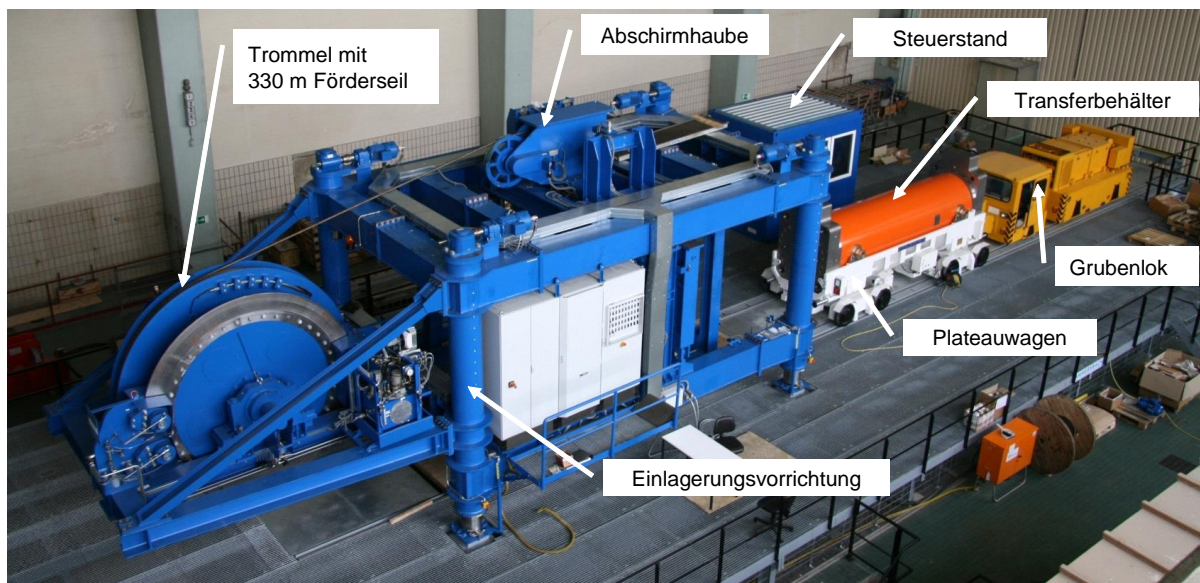


Abbildung 50: Demonstrationsversuchsstand der Einlagerungsvorrichtung für tiefe, vertikale Bohrlöcher bis 300 m (Filbert, et al., 2010)

Die Einlagerungsvorrichtung (ELV) für Brennstabkokillen und Triple-Packs wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens „Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes“ (Filbert, et al., 2010) konzipiert und in Demonstrationsversuchen auf ihre Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit hin erfolgreich getestet. Sie ist mit allen Handhabungseinrichtungen zur Übernahme des Transferbehälters vom Plateauwagen und zum Einlagern der Brennstabkokillen und Triple-Packs in das Bohrloch ausgerüstet. Die ELV ist für den Einsatz in einem Bergwerk mit dementsprechend eingeschränktem Platzangebot konzipiert worden.

Die Einlagerung der Endlagerbehälter in vertikale Bohrlöcher innerhalb eines Bergwerkes wurde so ausgelegt, dass während der Einlagerungsphase das Bohrloch durch eine Bohrlochschleuse verschlossen ist. Für die Einlagerung der Endlagerbehälter wird zunächst der beladene Transferbehälter unter die ELV gefahren. Die ELV übernimmt den Transferbehälter und hebt diesen dazu vom Plateauwagen. Nach dem Ausfahren des Plateauwagens beginnt das Schwenken des Transferbehälters. Abschließend dockt dieser an die Bohrlochschleuse an (siehe Abbildung 51).



Abbildung 51: Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochsleuse (GRS, 2011)

Nach dem Andocken auf der Bohrlochsleuse setzt eine Abschirmhaube auf den oberen Deckel des Transferbehälters auf. Durch die Abschirmhaube kann ein Greifer den Endlagerbehälter im Inneren des Behälters fassen und zunächst leicht anheben. Danach wird die Bohrlochsleuse parallel mit dem unteren Deckel des Transferbehälters geöffnet, und das Endlagergebinde kann mittels Seil an dem Einlagerungsort abgelassen werden. Das Bohrlochinnere ist während des gesamten Einlagerungsvorganges vom Bohrlochkeller strahlenschutzdicht abgeschlossen.

Das Greifersystem, welches in der ELV genutzt wurde, ist auch für die Einlagerung von Endlagergebinden in tiefe Bohrlöcher ein möglicher Ansatz. Die Greiferklinken werden über einen Linearmotor und Kniehebelgestänge betätigt. Die Kolbenstange des Linearmotors mündet in drei Auslegerarmen die über eine Druck-/ Zugstange jeweils mit einem Kniegelenk verbunden sind. Die Lagerpunkte der Kniehebel sind so gewählt, dass bei geschlossenem Greifer eine öffnend wirkende Kraft an den Greiferklinken vom Kniegelenk durch einen Festanschlag aufgenommen wird und somit keine Rückstellkräfte auf den Linearmotor ausgeübt werden. Des Weiteren ist durch die Anordnung der Klinkenlagerung gewährleistet, dass bei angehängter Last eine in Schließrichtung wirkende Kraft erzeugt wird (Lagerpunkt näher zur Mittelachse des Greifers als der Angriffspunkt der Greiferklaue). Die Abbildung 52 verdeutlicht den Aufbau. Über dieses System wird der Behälter sicher vom Greifer gehalten. Die Energieversorgung des Greifers erfolgt über das Förderseil. Für die Einlagerung über ein Gestänge ist das Greifersystem daher nicht geeignet, da es einer Energieversorgung bedarf.

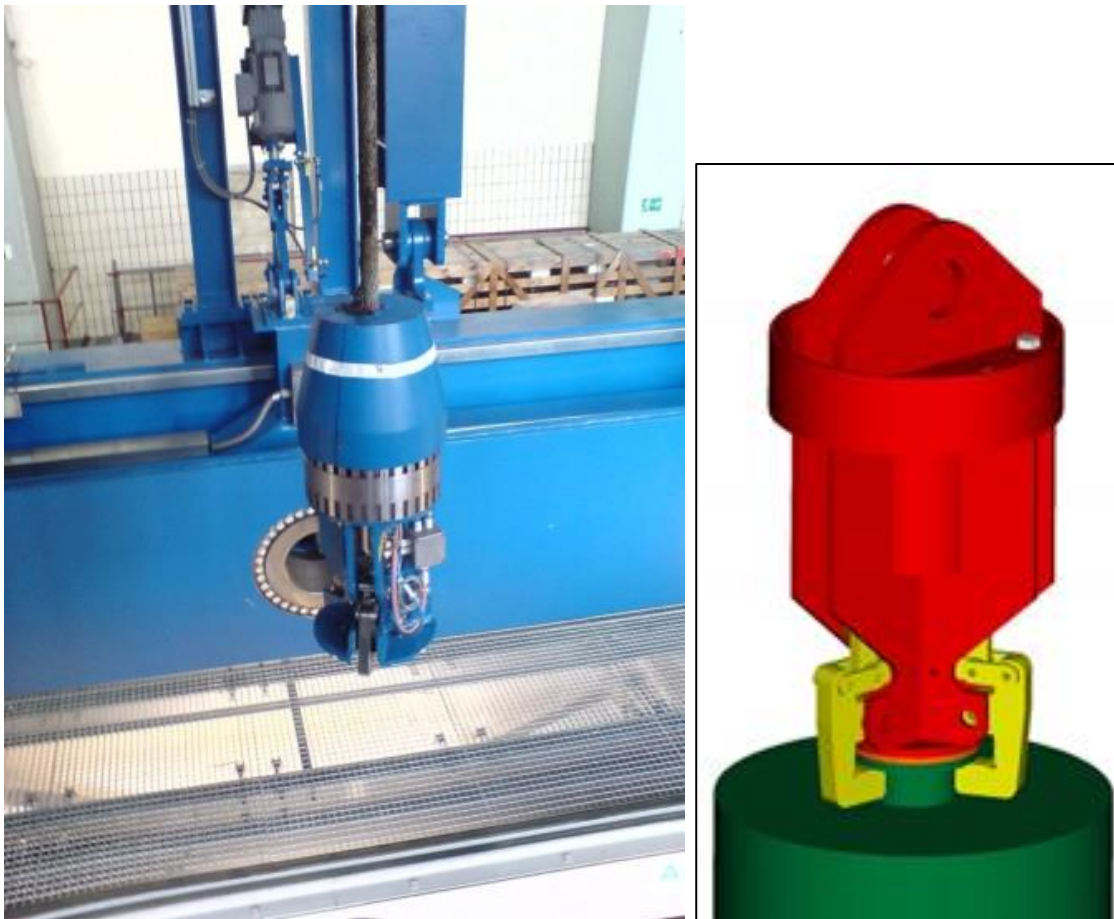


Abbildung 52: Greifer der Einlagerungsvorrichtung für die Einlagerung von Behältern in 300 m tiefe Bohrlöcher (links) und 3D-Darstellung des Greifers (rechts) (Filbert, et al., 2010)

Durch die Demonstrationsversuche wurde belegt, dass die Einlagerung und Rückholung von einzelnen Endlagergebinden in / aus 300 m tiefen Bohrlöchern mit Hilfe der beschriebenen ELV technisch möglich ist. Dadurch wurde ein neuer Stand der Technik erreicht. Nach Auslegung von (Peiffer, et al., 2012) muss nach der sicherheitstechnischen Regel KTA 3902 für die „Auslegung von Hebezeugen in kerntechnische Anlagen“ (KTA, 2012) bei einem Einsatz der Vorrichtung ein zweites Seil die Einlagerung des Endlagerbehälters absichern. Diese Anforderung scheint konstruktiv mit einer zweiten Winde erfüllbar. Der Versuch erfolgte in einem Versuchsstand über Tage, wobei die Bohrung durch ein 10 m langes Rohr simuliert wurde.

Die Übertragung dieser Zusatzanforderung auf eine Technik für ein 5 000 m tiefes Bohrloch ist nicht ohne weiteres möglich. Deshalb sind sowohl ein Demonstrationsversuch unter realen Bedingungen für die Einlagerung in ein 300 m tiefes Bohrloch in einem Bergwerk als auch in 5 000 m tiefe Bohrlöcher unverzichtbar.

Im Folgenden ist ein möglicher Ablauf der Einlagerung eines Behälters über ein Seil in Teilschritten aufgeführt:

- 1) Anlieferung des Endlagerbehälters in einem Transferbehälter auf einem Transportwagen im Überwachungsbereich der Einlagerungshalle,
- 2) Transportwagen fährt mit Transferbehälter fährt unter ELV, die sich über dem Bohrlochkeller befindet,
- 3) ELV hebt den Transferbehälter vom Transportwagen,
- 4) leerer Transportwagen fährt aus ELV,

- 5) ELV dreht Transferbehälter in vertikale Position,
- 6) ELV setzt Transferbehälter auf Bohrlochsleuse,
- 7) Abschirmhaube der ELV setzt auf Transferbehälter auf,
- 8) Abschirmhaube und obere Schleuse des Transferbehälters öffnen,
- 9) Greifer wird in Transferbehälter abgelassen und schlägt an Endlagerbehälter an,
- 10) Greifer hebt Endlagerbehälter,
- 11) Bohrlochsleuse und untere Schleuse des Transferbehälters öffnen,
- 12) Absenken des Endlagerbehälters in das Bohrlochtiefste bzw. auf den zuvor bereits eingelagerten Endlagerbehälter,
- 13) Greifer legt Endlagerbehälter im Bohrlochtiefsten bzw. auf zuvor eingelagertem Behälter ab,
- 14) Greifer löst von Endlagerbehälter,
- 15) Greifer fährt durch Bohrlochsleuse und untere Schleuse des Transferbehälters,
- 16) Bohrlochsleuse und untere Schleuse des Transferbehälters schließen,
- 17) Greifer fährt in Ausgangsposition,
- 18) Abschirmhaube und obere Schleuse des Transferbehälters schließen,
- 19) Abschirmhaube hebt vom Transferbehälter ab,
- 20) ELV hebt Transferbehälter von Bohrlochsleuse,
- 21) ELV schwenkt Transferbehälter in horizontale Position,
- 22) leerer Transportwagen fährt unter ELV,
- 23) ELV setzt Transferbehälter auf Transportwagen,
- 24) Transportwagen fährt mit leerem Transferbehälter aus Sperrbereich.

Eine ausführliche Risikobetrachtung der Sandia National Laboratories (USA) zur Einlagerung von Endlagergebunden in bis zu 5 000 m tiefe Bohrlöcher mittels Seilen oder Gestängen, ergab ein Ergebnis zu Gunsten der Seilförderung. Dabei wurde die Einlagerung eines Behälters einzeln am Seil mit der Einlagerung eines Stranges von Gebunden an einem Gestänge verglichen. Die Versagens- und Eintrittswahrscheinlichkeit in Kombination mit dem zu erwartenden Konsequenzen ergab, dass eine Einlagerung mit Gestänge am Strang wahrscheinlicher ohne Zwischenfälle durchgeführt werden kann als die Einlagerung am Seil. Wenn es aber zu einer Havarie kommt, führt die Einlagerung mittels Gestänge höchst wahrscheinlich zu einer radioaktiven Freisetzung. Im Vergleich dazu steht die Einlagerung jedes Behälters einzeln am Seil, bei welcher aufgrund der häufigeren Einlagerungsprozesse mit mehr Zwischenfällen zu rechnen ist. Diese Zwischenfälle führen am wahrscheinlichsten zu Verzögerungen, aber enden nicht in einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen oder der Notwendigkeit, das Endlagerbohrloch aufzugeben. (SNL, 2016)

Nach dem Abschluss der Einlagerungsarbeiten wird das Bohrloch wie in Kapitel 11 Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrlöchern ab Seite 137 beschrieben verschlossen. Für die Verschlussarbeiten sowie für das Entfernen des Casings im Bereich der ausgewiesenen Abdichtungen wird eine Workover-Anlage benötigt. Die Einlagerungsvorrichtung wird zum nächsten Einlagerungsstandort transportiert und eine entsprechende Workover-Anlage muss innerhalb der Einhausung errichtet werden. Die Strahlenschutzanforderungen gelten weiterhin.

10.5 Rückholung

Die Auslegung des Einlagerungskonzeptes muss eine Rückholung der eingelagerten Endlagergebinde in der Betriebsphase ermöglichen (BMU, 2010). Als Rückholung wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlager bezeichnet. In (BMU, 2010) heißt es dazu *„In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfälle möglich sein. Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen“*. (BMU, 2010 S. 18) Übertragen auf die Englagerung in tiefen Bohrlöchern ist eine Rückholung bis zum Beginn des Verschlusses des Endlagers, in diesem Falle des einzelnen Bohrloches, zu ermöglichen. Die wesentlichen Gründe für die Initiierung einer Rückholung können dabei nach (Ziegenhagen, 2005) verschiedene Ursachen haben:

- Soziologische und ethische Aspekte (veränderte Akzeptanz oder Wahrnehmung des Risikos),
- Sicherheitsaspekte (Unvorhergesehene Entwicklung des Endlagers oder neue Erkenntnisse zum Endlager / Standort),
- Technische Aspekte (Entwicklung alternativer Abfallbehandlungstechnologien),
- Ökonomische Aspekte (Nutzung der Abfälle oder Teile davon als Ressource).

Die Beweggründe zur Durchführung der Rückholung werden hier nicht weiter betrachtet, da sie allesamt nicht vorhersehbar und damit eher spekulativ sind.

Der Vorgang der Rückholung wird in diesem Bericht für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als Umkehrprozess der Einlagerung verstanden. Die eingelagerten Behälter sollen mit demselben System zurückgeholt werden, mit dem sie eingelagert wurden. Die Herausforderung an dieser Stelle besteht unter anderem darin, dass ein direkter Zugang zu den Behältern nicht gegeben ist und auch die Qualität einer Sichtprüfung beispielsweise über Kamerasysteme derzeit nicht abgeschätzt werden kann. Das sichere Anschlagen der Gebinde ist dabei eine Grundvoraussetzung, welche im Rahmen eines Demonstrationsversuches unter realitätsnahen Bedingungen gezeigt werden muss. Über Tage müssen für die Handhabung der zurückgeholt Behälter Infrastrukturbereiche (Lagerbereiche für Behälter, heiße Zelle) vorgehalten werden. Diese Bereiche müssen an jedem Einlagerungsstandort von vornherein geplant und von Beginn der Einlagerung an vorgehalten werden, um bei einer möglichen Rückholung sofort handlungsfähig zu sein.

Im Folgenden wird ein möglicher Ablauf einer Rückholung in Teilschritten aufgeführt. Das Bohrloch ist zu dieser Zeit noch unverschlossen. Die Einlagerung der Behälter kann, muss aber noch nicht vollständig abgeschlossen sein. Der Ablauf wird anhand der Rückholung mittels Seil beispielhaft aufgeführt.

- 1) Transportwagen mit leeren Transferbehälter fährt unter ELV, die sich über dem Bohrloch befindet,
- 2) ELV hebt Transferbehälter,
- 3) leerer Transportwagen fährt aus ELV,
- 4) ELV schwenkt Transferbehälter,
- 5) ELV setzt Transferbehälter auf Bohrlochsleuse,
- 6) Abschirmhaube setzt auf Transferbehälter,
- 7) Abschirmhaube und Transferbehälter öffnen,
- 8) Bohrlochsleuse und Transferbehälter öffnen,
- 9) Greifer senkt sich bis zum obersten Endlagerbehälter,
- 10) Greifer fasst Endlagerbehälter,

- 11) Greifer hebt Endlagerbehälter zurück in Transferbehälter,
- 12) Bohrlochsleuse und Transferbehälter schließen,
- 13) Greifer legt Endlagerbehälter in Transferbehälter ab,
- 14) Greifer löst von Endlagerbehälter,
- 15) Greifer fährt in Ausgangsposition,
- 16) Abschirmhaube und Transferbehälter schließen,
- 17) Abschirmhaube wird von Transferbehälter getrennt,
- 18) ELV hebt Transferbehälter von Bohrlochsleuse,
- 19) ELV schwenkt Transferbehälter,
- 20) leerer Transportwagen fährt unter ELV,
- 21) ELV setzt Transferbehälter auf Transportbehälter.

Aufgrund der begrenzten Sicht und Überwachungsmöglichkeiten innerhalb des Bohrloches stellt das Andocken des Seiles bzw. Gestänges an das Endlagergebinde eine Herausforderung dar. Das bereits beschriebene Greifersystem sollte nach den bereits erfolgten Demonstrationsversuchen (Filbert, et al., 2010) in der Lage sein einen Behälter mit unbeschädigtem Kopf zu greifen und aus dem Bohrloch zu transportieren. Diese und andere alternative Möglichkeiten zum Greifen der Behälter müssen für den Anwendungsfall der tiefen Bohrlochlagierung geprüft, demonstriert bzw. noch entwickelt werden.

Zeitlich ist bis zur Entscheidung zum Verschluss des Bohrloches eine Rückholung möglich. Nach dem Verfüllen und Verschließen der Bohrung ist von einer Bergung auszugehen.

10.6 Strahlenschutzmaßnahmen im Betrieb und bei der Rückholung

Die Anlage zur Einlagerung der hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfallstoffe unterliegt Strahlenschutzanforderungen. Sie muss zum einen von der Umgebung abgeschirmt werden. Dies erfordert eine entsprechende Einhausung und Zugang über Schleusensysteme. Alles innerhalb dieser Einhausung ist dem Kontrollbereich² zuzuordnen. Die Bohranlage unterliegt dagegen keinen Strahlenschutzbedingungen.

Das Einlagerungsbohrloch selbst ist dem Sperrbereich zuzuordnen. Dieser Bereich muss so abgesichert werden, dass Personen auch mit einzelnen Körperteilen dort nicht unkontrolliert eindringen können. Der Sperrbereich ist Teil des Kontrollbereiches, dementsprechend muss auch alles, was den Sperrbereich verlässt, freigemessen werden. Das betrifft die eingesetzten Mittel zur Einlagerung (Gestänge oder Seile) ebenso, wie aus dem Bohrloch austretende Fluide.

Während der Einlagerung der Behälter wird Fluid im Bohrloch verdrängt. Dieses muss gesichert aufgenommen und in einen dafür bereitgehaltenen Behälter gepumpt werden. Das Stützfluid muss dabei ständig auf Kontamination geprüft werden, um einen möglichen Defekt an einem der Einlagerungsbehälter so zeitnah wie möglich zu detektieren.

Alternativ kann geprüft werden, ob es aus Stabilitätsgründen für das Casing möglich ist, die Mengen Stützfluid vor der Einlagerung zu entnehmen, die von den eingelagerten Gebinden verdrängt würden. Auch während der Rückholung müssen alle aus dem Bohrloch kommenden

² Der Kontrollbereich ist deutlich zu kennzeichnen und abzugrenzen. Es gelten Zutrittsregelungen. Alles was den Kontrollbereich verlässt muss freigemessen werden. Die zugelassene jährliche Dosis beträgt kleiner 6 mSv/a. (StrlSchV, 2017)

Materialen freigemessen werden. Um einer möglichen Kontaminationsverschleppung entgegen zu wirken, sollte möglichst alles, was den Sperr- und Kontrollbereich verlässt, zuvor getrocknet werden. Das bedeutet, dass planmäßig eine Trocknungsanlage vorzusehen ist.

Für die Einlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfallstoffen in tiefe Bohrlöcher steht die Entwicklung eines detaillierten Strahlenschutzkonzeptes noch aus.

10.7 Bergung

Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet. „Für die wahrscheinliche Entwicklung muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.“ (BMU, 2010 S. 18).

In Abbildung 53 ist die zeitliche Zuordnung von Rückholung und Bergung über die Lebensdauer eines Endlagers schematisch dargestellt.

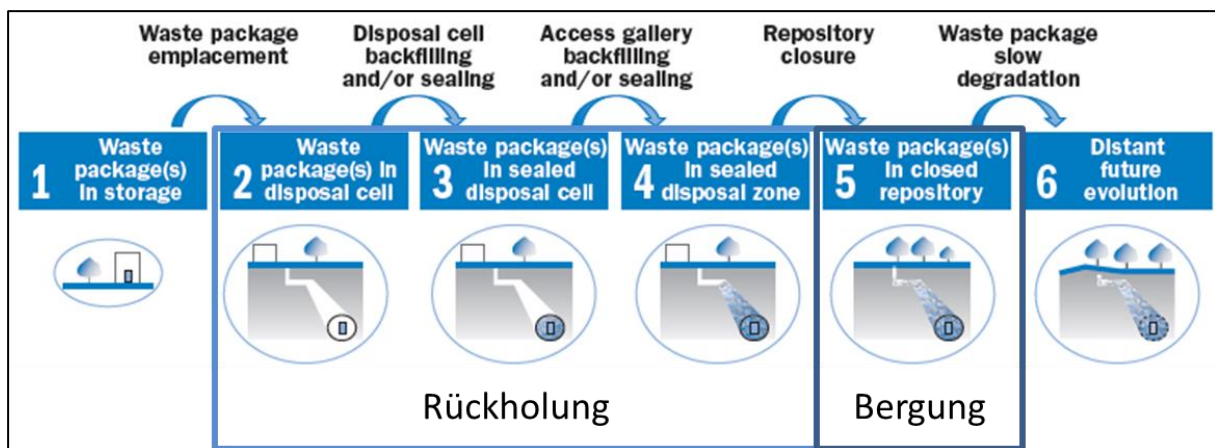


Abbildung 53: „R-scale“ - Darstellung der charakteristischen Stadien während der Endlagerung und schematische Darstellung des steigenden Rückholungsaufwandes (NEA, 2011) (Schema an Terminologie nach (BMU, 2010) angepasst) (Bollingerfehr, et al., 2014)

Eine Bergung setzt demnach eine Handhabbarkeit der Behälter voraus. Auch in (Bracke, et al., 2016) wird nicht davon ausgegangen, dass dies gewährleistet werden kann. Der Zustand des Bohrloches und der Behälter nach einer Lagerzeit von bis zu 500 Jahren ist ungewiss. Nach der Korrosion des Casings (sofern diese eintritt) und nach tektonischen Verschiebungen, die zu einer Zerstörung des Casings führen können, kann auch der Gebirgsdruck bzw. tektonische Druck auf den Behälter wirken und auch diesen zerstören. Ein erneutes Auffahren der Bohrung nach einer ungewissen Zeitspanne oder das Bergen aus einer neu aufgefahrenen Nebenlokation scheint unter Sicherheitsgesichtspunkten unmöglich. Damit ist ein sicheres Bergen der Endlagergebinde aus einem tiefen Bohrloch in 3 000 m bis 5 000 m Teufe nach einer Lagerzeit von bis zu 500 Jahren technisch und sicherheitstechnisch unmöglich.

11 Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrlöchern

11.1 Allgemeines

Nach der Einlagerung des letzten Endlagergebindes ist das Bohrloch auf ca. 3 000 m Länge bis zur Geländeoberfläche vollständig zu verfüllen und zu verschließen, mit dem Ziel das Bohrloch als potenzielle Wegsamkeit für Gase und Fluide zu unterbinden. Dabei soll zum einen der Zufluss von Süßwasser von der Geländeoberfläche aus in Richtung des Einlagerungsbereiches gehemmt werden und zum anderen der Austritt bzw. der Transport von Radionukliden aus dem Einlagerungsbereich in Richtung der Biosphäre verhindert werden.

Aufgrund der Belastung und der Funktion des Verschlusses werden an die einzusetzenden Materialien Anforderungen gestellt. Nach (Nagra, 2002) und (Brenner, 1988) sind dazu folgende Parameter maßgebend, auf die sich die Anforderungen beziehen:

- Festigkeit (für die strukturelle Integrität des Bohrloches),
- Deformationsverhalten (ausreichende Duktilität, um Gebirgsverformungen ohne Risse überstehen zu können),
- Durchlässigkeit (in der Größenordnung des Wirtgesteines),
- Ionenretention (hohes Sorptionsvermögen),
- Langzeitstabilität (in chemischer und mechanischer Hinsicht),
- Selbstheilung (eigenständiger Verschluss von Rissen durch Quellen oder durch plastische Verformung),
- Quellfähigkeit oder Expandierfähigkeit (für lückenloses Ausfüllen von Hohlräumen zwischen Verschlussmaterial und Bohrlochwand und zur Verringerung der Durchlässigkeit in dieser Kontaktzone),
- Handhabbarkeit (Verfüll- und Verschlussmaterial muss mit den vorhandenen Mitteln eingebaut bzw. eingepumpt werden können). (Nagra, 2002), (Brenner, 1988)

Da voraussichtlich kein Material existiert, das alle Anforderungen vollumfänglich erfüllt, sollte die Verschlussstrecke, von der Einlagerung des letzten Endlagergebindes bis zur Geländeoberfläche (ca. 3 000 m), aus verschiedenen Materialien (diversitär) und der gesamte Bohrlochverschluss redundant aufgebaut sein. Die Art und die Lage der verschiedenen Verschlussmaterialien sind dabei an die geologischen Verhältnisse des Deckgebirges und die örtlichen Gegebenheiten (Temperatur, Art der anwesenden Wässer) anzupassen. Die Temperatur innerhalb der Verschlussstrecke variiert dabei aus dem geothermischen Gradienten (Annahme: 3 K / 100 m) bereits zwischen ca. 10 °C (oberflächennah) und ca. 100 °C (in etwa 3 000 m Tiefe). Infolge der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle kann sich diese insbesondere im Nahbereich der Endlagergebäude zusätzlich erhöhen.

Für den Bohrlochverschluss kommen im Wesentlichen die drei Baustoffe (Zement, Bentonit und Bitumen / Asphalt) in Frage, wie diese im Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung der Sandia National Laboratories in Abbildung 54 dargestellt sind. In den folgenden Kapiteln werden daher für diese Materialien Betrachtungen insbesondere zu den Einbringtechnologien dargelegt sowie zu berücksichtigende Schwierigkeiten bzw. Besonderheiten bei der tiefen Bohrlochlagerung aufgezeigt. Zusätzlich werden weitere in Frage kommende Verfüll- und Verschlussmaterialien kurz betrachtet.

Es ist zu erwarten, dass der Einbau der Verfüll- und Verschlussmaterialien in ein Fluid gefülltes Bohrloch erfolgt, sodass es sich nicht um ein trockenes Bohrloch handelt. Dies wirkt sich entsprechend auf die Einbringtechnologie der Verfüll- und Verschlussmaterialien aus. Es besteht jedoch die Möglichkeit, bereits bei der Casingdimensionierung die Wandstärke des Casings im oberen Bereich des Bohrloches so zu bemessen, dass nach dem Einbau eines Teiles des Verschlusses das Bohrloch gelenzt werden kann, sodass der anschließende übrige Materialeinbau in einem trockenen Bohrloch vorgenommen werden kann (siehe Kapitel 6.3.4 Casings

(Futterrohre)ab Seite 59). Bei sehr günstigen Randbedingungen hinsichtlich der geologischen Verhältnisse kann die komplette Verschlussstrecke vor dem Einbau der Verfüll- und Verschlussmaterialien leergepumpt werden, was einen kompletten Materialeinbau in einem trockenen Bohrloch ermöglicht.

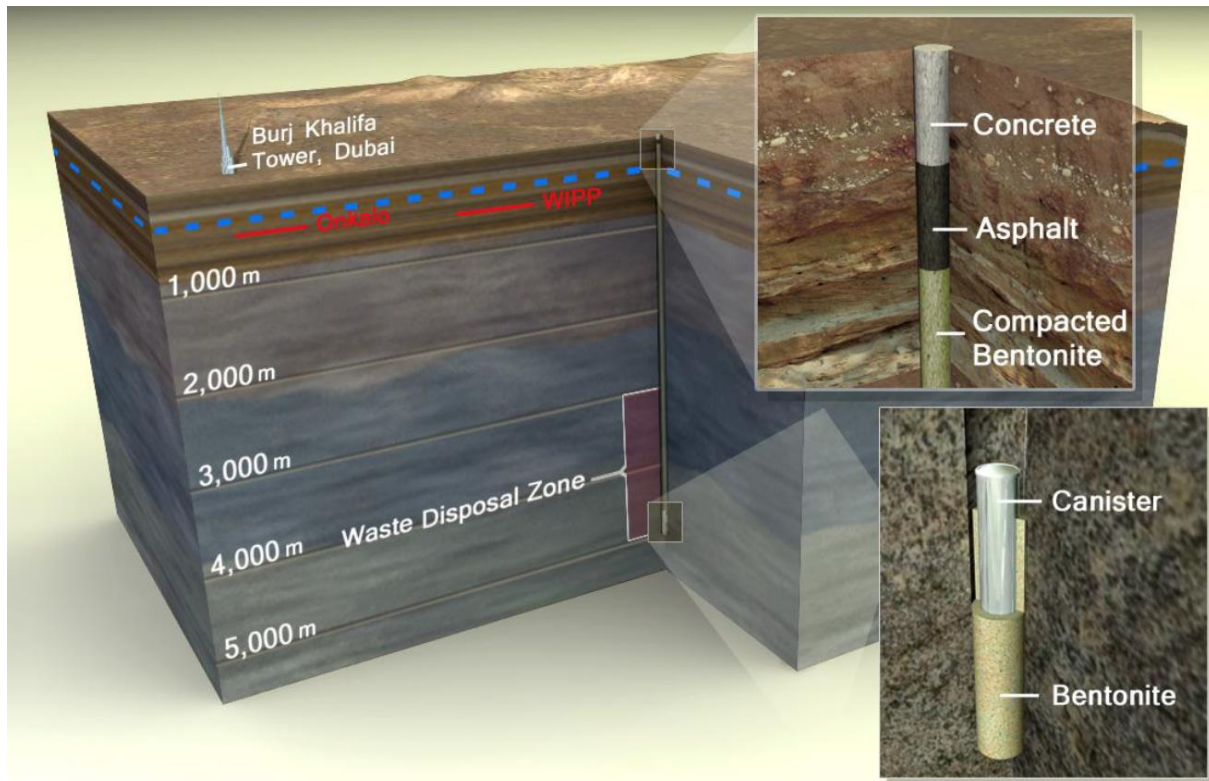


Abbildung 54: Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung der Sandia National Laboratories (Arnold, et al., 2012 S. 3)

Für den Einbau der Verfüll- und Verschlussmaterialien kann grundsätzlich das Casing und die Ringraumzementation erhalten bleiben, sodass lediglich das Innerste der Bohrung verfüllt und verschlossen werden muss. Im Bereich von geologischen Schichten, die zum Fließen neigen, oder wenn die Verfüllung aus dem gleichen Material besteht wie das umgebende Deckgebirge (beispielsweise bei Salz oder Ton), kann das Casing und die Ringraumzementation zurückgeschnitten werden (siehe Kapitel 6.3.8 Rückbau / Verfüllung von Bohrungen ab Seite 75), um einen durchgängigen und bündigen Verschluss an das umgebende Gebirge zu erzielen. Dies empfiehlt sich insbesondere, wenn im Deckgebirge Formationen anstehen, die in der Lage sind, in Hohlräume einzudringen und diese lückenlos zu verschließen (beispielsweise Salz). Sollte der Einbau der Verfüll- und Verschlussmaterialien zunächst im trockenen Bohrloch erfolgt sein, muss für das Zurückschneiden des Casings und der Ringraumzementation erneut ein Bohrlochbetriebsfluid eingebracht werden. Dies ist jederzeit möglich, auch nach einem teilweisen Einbau der Verschlussstrecke. Das Bohrlochbetriebsfluid ist für das Fräsen des Casings und der Ringraumzementation aus Gründen der Kühlung des Fräswerkzeuges, der Erhaltung der Bohrlochstabilität und des Abtransportes des erfrästen Materials notwendig. Hierbei ist auf die richtige Einstellung des Bohrlochbetriebsfluids zu achten, sodass es weder zum Fracken des Gebirges, noch zu dessen Fließen ins das Bohrloch kommt (insbesondere bei Salz).

11.2 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das heißt er erhärtet nach dem Anmischen mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser. Anschließend bleibt er auch unter Wasser fest und raumbeständig.

Die Vorteile von Zement liegen in seiner hohen Festigkeit, hohen Dichte und geringen Durchlässigkeit. Zudem wird Zement beim Abdichten von Bohrlöchern seit langem verwendet. Weiterhin ist es ein gut verfügbares Produkt, welches verhältnismäßig günstig ist. Mit Hilfe von Additiven können die Eigenschaften gezielt eingestellt werden (beispielsweise die Homogenität, die Erstarrungszeit und die Viskosität bzw. die Pumpbarkeit). Durch die Zugabe inerter Materialien, wie Ton, Schluff, Sand oder Kies, lässt sich beispielsweise die Festigkeit und die Verarbeitbarkeit beeinflussen. (Coons, et al., 1987), (Arnold, et al., 2014)

Tiefbohrzemente, die üblicherweise für den Verschluss von Tiefbohrungen eingesetzt werden (siehe Kapitel 6.3.7 Zementation auf Seite 72), werden in die API-Klassen A bis J eingeteilt und sind bis in Tiefen von ca. 5 000 m einsetzbar (abhängig von der Klasse). (Nagra, 2002)

Der Zement kann sowohl ins trockene als auch in das fluiderfüllte Bohrloch eingebracht werden. Dies kann mittels Pumpen über Rohrleitungen oder mittels eines am Gestänge bzw. am Seil befindlichen Behälters, welcher einen Öffnungsmechanismus zum Herauslassen des Zementes besitzt, erfolgen. Die Nachteile der letzteren Methode sind jedoch die diskontinuierliche Einbringung des Zementes, wodurch es zu einer Durchmischung des Zementes mit dem Bohrlochbetriebsfluid kommen kann, und eine generelle Fehleranfälligkeit des Verfahrens. Vor der Einbringung des Zementes können zusätzlich mechanische Abdichtungen (Packer) eingesetzt werden, sodass Druckzementationen möglich sind. (Arnold, et al., 2012)

Bei der Verwendung von Zement als Material für das Verfüllen und Verschließen des Bohrloches sind folgende Punkte für die jeweiligen Bedingungen (Druck, Temperatur) unter denen sie im Bohrloch eingesetzt werden, zu untersuchen:

- chemischer Angriff des Betons durch salinare bzw. saure Wässer,
- Langzeitbeständigkeit (Entgegenwirken durch z. B. MgO-/ Sorel-/ Quellzemente),
- Schrumpfen bei Hydratation (Entgegenwirken durch z. B. MgO-/ Sorel-/ Quellzemente). (Nagra, 2002), (Arnold, et al., 2011)

Der Vorteil von Quellzementen besteht darin, dass diese in der Lage sein können, eine lückenlose Verfüllung von kleinen Hohlräumen (beispielsweise Einschlüsse oder Spülrückstände am Casing) zu bewirken. Ist kein freier Raum zur Ausdehnung zur Verfügung führt die verhinderte Ausdehnung zu einer Verringerung der Porenradien und damit zu einer Verringerung der Durchlässigkeit. Zudem wird die Kontaktspannung an den angrenzenden Flächen erhöht, wodurch Wegsamkeiten vermindert werden können. (Nagra, 2002)

11.3 Bentonit

Bentonit ist ein Gestein, welches aus verschiedenen Tonmineralen besteht. Der Hauptbestandteil ist das quellfähige Tonmineral Montmorillonit aus der Smektitgruppe. Es ist ein Dreischicht-Silikat, bestehend aus zwei äußeren Tetraederschichten (Siliziumdioxid) und einer inneren Oktaederschicht (Aluminiumoxid), das in der Lage ist, innerkristallin zu quellen. Bentonit besitzt austauschbare Zwischenschichtkationen (Calcium- bzw. Natriumionen). (Eichler, 2009)

Die Vorteile von Bentonit liegen in einer sehr geringen Durchlässigkeit, einem hohen Sorptionsvermögen für Radionuklide, der Vertrautheit in der Ingenieurspraxis und der Widerstandsfähigkeit gegen Rissentstehung durch plastisches Verhalten. Zudem ist Bentonit in der Lage,

unter günstigen Umständen in Risse und Hohlräume einzudringen und diese lückenlos zu verschließen (Selbstheilungseffekt) sowie zu Quellen, wodurch die Durchlässigkeit weiter verringert werden kann und es zu einer sehr guten Anbindung an die Umgebung (beispielsweise an Unebenheiten der Bohrlochwand) kommt. (Coons, et al., 1987), (Arnold, et al., 2014)

„Als mögliche Bentonitarten kommen der aus den USA stammende Na-Bentonit MX-80 und der aus Bayern stammende Ca-Bentonit Montigel in Frage.“ (Brenner, et al., 1989 S. 57) Bei Untersuchungen in (Brenner, 1988) „zeigte sich, dass die beiden Materialien weitgehend vergleichbare Eigenschaften haben. Der Montigel hat allerdings eine geringere Plastizitätszahl und scheint auch gegen Erosion etwas weniger widerstandsfähig zu sein.“ (Brenner, et al., 1989 S. 57) Für Gesteine, in denen eher kalkreiche Grundwässer zu erwarten sind, ist Montigel-Bentonit dem MX-80 vorzuziehen, „da sich der Na-Bentonit mit der Zeit sowieso in die Ca-Form umwandeln würde.“ (Brenner, et al., 1989 S. 57)

Der Bentonit kann sowohl ins trockene als auch in das fluiderfüllte Bohrloch eingebracht werden. Ist das Bohrloch trocken, kann der Bentonit in Form von Pellets oder als Block mittels eines am Gestänge bzw. am Seil befindlichen Behälters eingebracht werden. Der Behälter muss dabei über einen Öffnungsmechanismus und beispielsweise eine Ramm- oder Ausdrückvorrichtung verfügen, um den Bentonit im Bohrlochtiefsten aus dem Behälter zu drücken. Werden hingegen Pellets verwendet, müssen diese verdichtet werden. Eine Technologie zur Verdichtung der Pellets in einem tiefen Bohrloch muss erst noch entwickelt werden. Beim Einbau des Bentonits im trockenen Bohrloch ist für die Ausbildung von Quelldrücken Wasser zuzugeben. (Arnold, et al., 2012), (Brenner, et al., 1989)

Ist das Bohrloch fluiderfüllt, kann der Bentonit ebenfalls in Form von Pellets oder als Block mittels eines am Gestänge bzw. am Seil befindlichen Behälters eingebracht werden. Eine Technologie zur Verdichtung der Pellets in einem mit Betriebsfluid gefüllten tiefen Bohrloch muss erst noch entwickelt werden. Werden (handelsübliche) Pellets verwendet, hydratisieren diese im fluiderfüllten Bohrloch schnell. Das Einbringen als hochverdichteter Block im Behälter hat den Vorteil, dass kein Bentonit durch Erosion verloren geht und höhere Dichten erwartet werden können. Jedoch entsteht hierbei ein Ringspalt der zunächst durch das Quellen verschlossen werden muss. (Arnold, et al., 2012), (Brenner, et al., 1989)

Eine weitere Möglichkeit den Bentonit ins fluiderfüllte Bohrloch einzubringen besteht darin, perforierte Behälter (mit ca. 50 % offene Oberfläche) zu verwenden, in denen sich hochverdichteter Bentonit befindet (siehe Abbildung 55). Aufgrund dessen, dass der Behälter in der Verschlussstrecke verbleibt, empfiehlt sich die Verwendung von Kupfer als Behälterwerkstoff, da dieser chemisch stabil ist und nicht zur Gasfreisetzung neigt. Allerdings sind derartige Behälter schnellstmöglich an ihre Position innerhalb der Verschlussstrecke zu bringen, da sonst der Bentonit beim Absenkvorgang hydratisiert und aus dem Behälter quillt (siehe Abbildung 56). Diese Methode wurde jedoch erst in wesentlich kleineren Bohrlöchern (Bohrlochdurchmesser: 76 mm) erfolgreich getestet. Bevor diese perforierten Behälter mit hochverdichtetem Bentonit auch in größer kalibrigen Bohrlöchern eingesetzt werden, muss die Eignung durch Versuche getestet werden. Um die Einbringzeit der perforierten Behälter möglichst gering zu halten, empfiehlt sich die Verwendung von Seilen anstelle eines Gestänges zum Ablassen dieser. Weiterhin können die Behälter auch im freien Fall innerhalb des Bohrlochbetriebsfluides abgesenkt werden. (Arnold, et al., 2012), (Brenner, et al., 1989), (Pusch, et al., 1987)

Sowohl beim Einbringen des Bentonits in Form von Pellets bzw. in Form eines Blockes als auch beim Einbringen des Bentonits im perforierten Behälter empfiehlt es sich, zuvor eine Bentonitsuspension einzupumpen und den Bentonit darin abzusetzen, um eine höhere Dichte, einen höheren Quelldruck und folglich eine geringere Durchlässigkeit zu erreichen.

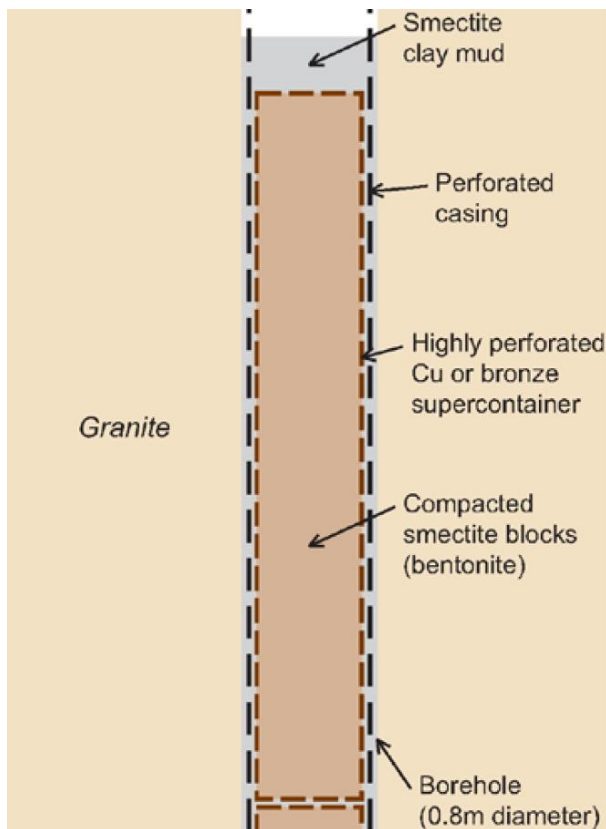


Abbildung 55: Supercontainer - verdichteter Bentonit im perforierten Behälter (Gibb, 2016 S. 11)

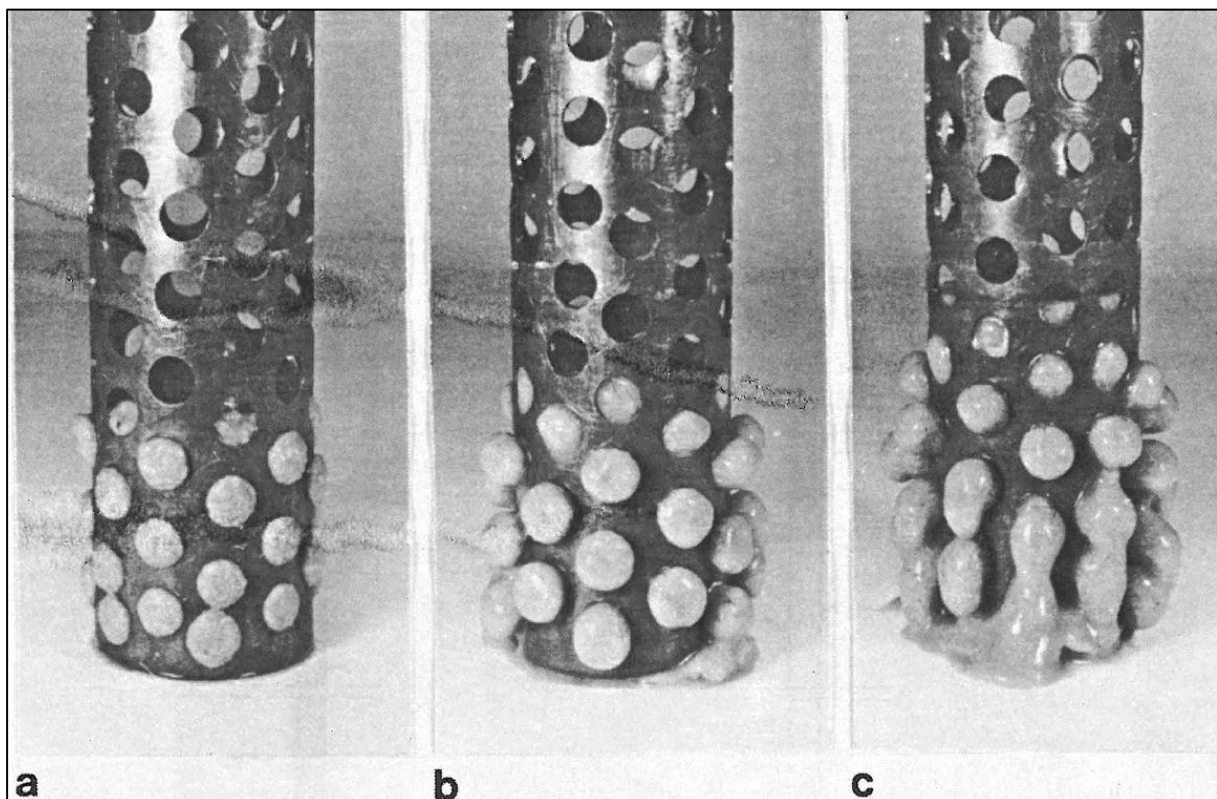


Abbildung 56: Quellversuche an hochverdichtetem Na-Bentonit im perforierten Behälter nach 1 h (a), nach 8 h (b) und nach 24 h (c) (Pusch, et al., 1987 S. 4)

Wird Bentonit als Material für das Verfüllen und Verschließen des Bohrloches verwendet, sind die folgenden Punkte für die jeweiligen Einsatzbedingungen zu untersuchen:

- Verdichtung des Bentonits und die daraus resultierende effektive in situ-Dichte,
- Langzeitstabilität und Quellverhalten bei den anstehenden (salinaren / sauren) Wässern, (Gefahr des Ionenaustausches durch salinare Wässer oder die Anwesenheit von Kationen, in deren Folge es zum Schrumpfen des Bentonits kommt). (Arnold, et al., 2014)

Die hohen Temperaturen im tiefsten Bereich der Verschlussstrecke (ca. 3 000 m Tiefe) können 100 °C aufgrund des geothermischen Gradienten und der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle durchaus übersteigen. Untersuchungen in (Bucher, et al., 1984) hinsichtlich dieser Thematik zeigten, dass es bei Temperaturen von ca. 150 °C und einem Wasserdruck von 10 N/mm² zur Ausbildung von Quelldrücken kommt. Generell empfiehlt sich jedoch, Bentonit unterhalb von 100 °C zu verwenden. (Bucher, et al., 1984), (Beswick, et al., 2014)

11.4 Bitumen

Bitumen ist ein schwerflüchtiger, dunkelfarbiger, hochviskoser, thermoplastischer Erdölrückstand. Es ist ein Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe, welches bei der Erdöldestillation anfällt oder in Naturasphalt vorkommt. Asphalte sind dabei Gemische von Bitumen und mineralischen Stoffen (Gesteinskörnungen). (Studer, et al., 1984), (Wolf, 1989)

„Bitumen sind kolloidale Systeme, die zwei Gruppen kolloidal dispergierter Anteile enthalten: die Asphaltene, welche aus relativ polaren Verbindungen mit einem grossen Anteil an Heteroatomen und darin eingeschlossenen Salzen aufgebaut sind und die Erdölharze, die überwiegend aus alkylsubstituierten naphthenaromatischen Kohlenwasserstoffen und basischen organischen Stickstoffverbindungen bestehen. Asphaltene und Erdölharze sind stabil in einer öligen Phase, auch Maltene genannt, kolloidal dispergiert.“ (Studer, et al., 1984 S. 12 - 13)

Bitumen ist konvektiv undurchlässig, plastisch und viskos. Damit ist Bitumen widerstandsfähig gegen Rissentstehung und besitzt die Fähigkeit in Risse und Hohlräume einzudringen und diese von selbst zu verschließen. Weiterhin ist Bitumen resistent gegen die meisten Säuren, Salze und Alkalien. Zudem hat es eine lange Geschichte im Bauwesen. (Coons, et al., 1987), (Brady, et al., 2009)

Bitumen kann über Rohrleitungen eingepumpt werden. Allerdings muss es dazu ständig eine ausreichend hohe Temperatur aufweisen, sodass es ausreichend fließfähig ist. Zudem muss es eine Dichte besitzen, die größer ist als das Bohrlochbetriebsfluid, um ein Aufschwimmen zu verhindern. Dies kann gegebenenfalls durch die Zugabe von Füller erreicht werden. (Brady, et al., 2009)

Bei der Verwendung von Bitumen als Material für das Verfüllen und Verschließen des Bohrloches können folgende Eigenschaften zu Problemen führen und sind daher im speziellen Anwendungsbereich gesondert zu betrachten:

- geringe Dichte (kann zum Aufschwimmen des Bitumens führen, wenn das Bohrlochbetriebsfluid eine größere Dichte als das Bitumen aufweist),
- temperaturabhängiges, rheologisches Verhalten (führt abhängig von der Einbautiefe aufgrund des geothermischen Gradienten zu unterschiedlichen Viskositäten und möglicherweise zum Ausquetschen des Bitumens),
- Biodegradation (mikrobiologische Abbauprozesse unter Kohlenstoffdioxidfreisetzung, die nur relevant sind, sofern entsprechende Mikroorganismen an der Lokalität des Einbaues anwesend sind; dabei besitzt der aerobe Abbau eine ungefähr 100 Mal höhere Abbaurate gegenüber dem anaeroben Abbau). (Coons, et al., 1987), (Wolf, 1989), (Bates, et al., 2014)

11.5 Sonstige Materialien

Salzsuspension

Weist das Deckgebirge Salzformationen auf, können in diesem Bereich die positiven Eigenschaften des Salzes als Verschlusselement genutzt werden. Diese sind das visko-plastische Verhalten, die sehr geringe Porosität, der sehr geringe Feuchtigkeitsgehalt und die Impermeabilität gegenüber Gasen und Flüssigkeiten bei Fluiddrücken bis zum lithostatischen Teufendruck. Zur Nutzung des Salzes als Verschlusselement ist im Bereich des Salzes das Casing inklusive Zementation zurückzuschneiden (Fräsen) und die Verschlussstrecke in diesem Bereich mit einer Salzsuspension zu versehen. Anschließend verschließt sich der Bereich innerhalb kurzer Zeit durch Salzfließen von selbst. Die Salzsuspension kann über Rohrleitungen eingepumpt werden. (Minkley, 2016)

Eutektische Salzschnmelzen

„Eine Alternative für ein Verschluss- und Versatzmaterial in tiefen Bohrlöchern im Salzgestein bietet die Verwendung von eutektischen Salzschnmelzen (Schmelzpunkt 100...220 °C), wie sie in der Solarindustrie als Wärme-Übertragungsmedium und zur Energiespeicherung als Flüssigsalzspeicher verwendet werden.“ (Minkley, 2016 S. 56)

Ein Beispiel für eine solche Salzschnmelze ist HITEC salt (53 % KNO_3 + 40 % NaNO_2 + 7 % NaNO_3 , Schmelztemperatur: 142 °C, Dichte: ca. 2 g/cm³). (Minkley, 2016)

Der Vorteil von eutektischen Salzschnmelzen besteht darin, dass das rekristallisierte Salz, wie auch das natürliche Salzgestein, impermeabel gegenüber Fluiden ist und seine Dichtheit und Integrität erst verliert, wenn der Fluiddruck größer als die minimale Hauptspannung ist. Zudem besitzt die rekristallisierte eutektische Salzschnmelze keine Restfeuchte (im Gegensatz zum natürlichen Steinsalz) sowie keine Flüssigkeitsfilme an den Korngrenzen. Damit kommt als Transportmechanismus keine Advektion, sondern ausschließlich eine Festkörperdiffusion in Frage. Weiterhin weist das rekristallisierte Salz keine Porosität auf. Die Abbildung 57 zeigt eine rekristallisierte eutektische Salzschnmelze von HITEC salt. (Minkley, et al., 2017)

Die Salzschnmelze kann über Rohrleitungen eingepumpt werden. Allerdings muss sie dazu permanent eine ausreichend hohe Temperatur (bei HITEC salt über 142 °C) aufweisen, um fließfähig zu bleiben.



Abbildung 57: Rekristallisierte eutektische Salzschnmelze (HITEC salt) (Minkley, et al., 2017 S. 104)

Schwerspat / Baryt

Schwerspat bzw. Baryt ist ein natürlich vorkommendes Erz, dessen Hauptbestandteil Bariumsulfat ist. Schwerspat ist ein inertes Material, das aufgemahlen eine Plättchenform aufweist und das in der Tiefbohrtechnik zum Beschweren von Bohrspülungen (Dichte: 4,2 g/cm³ bis 4,4 g/cm³) und zum Verfüllen auflässiger Bohrungen eingesetzt wird. (Brenner, et al., 1989), (Nagra, 2002)

Der aufgemahlene Schwerspat ergibt mit Wasser gemischt eine Suspension, in der sich die Plättchen in Schwebe befinden, solange diese in Bewegung ist (Thixotropie). Ohne Zirkulation fällt der Schwerspat aus und es bildet sich eine dichte Packung der Schwerspatplättchen und somit ein gas- und flüssigkeitsdichter Verschluss. Dieser besitzt eine hervorragende Langzeitstabilität, eine äußerst geringe Löslichkeit und „*infolge des großen spezifischen Gewichtes, ist zu erwarten, dass er auch eine gute Erosionsbeständigkeit aufweist.*“ (Brenner, et al., 1989 S. 64)

Rock Welding nach GIBB

Als mögliches Verschlusselement kommt nach (Beswick, et al., 2014) das Aufschmelzen und Rekristallisieren des kristallinen Wirtsgesteins in Frage. Dazu wird das Casing inklusive Zementation zurückgeschnitten und zerkleinerter Granit in das Bohrloch eingebracht und aufgeschmolzen. Dabei soll jedoch nicht nur das eingebrachte Material, sondern auch die EDZ mit aufgeschmolzen werden. Die Abkühlung muss hierbei nach genauen Vorgaben erfolgen, damit der rekristallisierte Granit identische Eigenschaften zum umgebenden Gebirge hat.

Dadurch soll kein Übergang zwischen Verschluss und Gebirge vorhanden sein, sodass das Bohrloch verschlossen und die EDZ beseitigt ist. (Beswick, et al., 2014)

Zur Umsetzung dieser Methode wird in (Beswick, et al., 2014) vorgeschlagen, dass zuerst zerkleinertes Wirtsgestein in das Bohrloch eingebracht wird, anschließend eine Elektroheizung (Opferheizung) und weiteres zerkleinertes Wirtsgestein. Danach beginnt der Aufschmelzungsprozess, wobei die Schmelze die Hohlräume füllt. Nach einigen Wochen wird die Leistung der Heizung reduziert und das Gestein rekristallisiert. Insgesamt ist mit einer Dauer von einigen Monaten zu rechnen. Das Rock Welding erfordert dabei Temperaturen von etwa 700 °C bis 800 °C und genaue Abkühlbedingungen, damit das Gestein bei ca. 550 °C komplett rekristallisiert. (Beswick, et al., 2014)

Die Abbildung 58 zeigt beispielhaft die Temperaturverteilung (Isothermen) beim Rock Welding in einem Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,66 m bei einer 12 kW Heizung für ein homogenes Material. Detaillierte Untersuchungen (wirtsgesteinsspezifisch) können erst nach Auswahl eines Endlagerstandortes an den lokalen angetroffenen Materialien durchgeführt werden. (Beswick, et al., 2014)

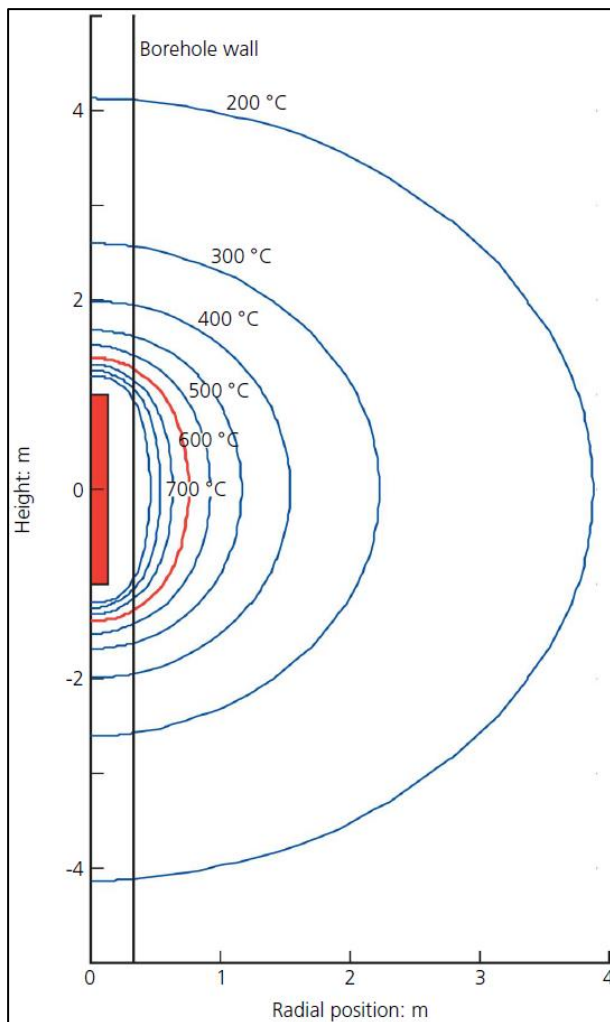


Abbildung 58: Temperaturverteilung beim Rock Welding in einem Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,66 m bei einer 12 kW Heizung (Grenze fest-flüssig: ca. 700 °C) (Beswick, et al., 2014 S. 63)

Das Rock Welding wurde noch nicht praktisch erprobt. Zudem sind geeignete Heizer noch zu entwickeln die den Bedingungen im Bohrloch (Druck, Temperatur, Chemismus) standhalten. Die Temperatur im Bohrloch und dessen Umgebung wird mit dieser Verschlussmethode erheblich erhöht, sodass Wechselwirkungen mit den radioaktiven Abfällen und mit den darüber befindlichen Verschlussmaterialien zu prüfen wären.

Sand / Ausbruchmaterial

Eventuell kann das bei der Herstellung des Bohrloches gewonnene Ausbruchmaterial als Verfüllmaterial beim Verschließen des Bohrloches wiederverwendet werden. Dieses übt dabei primär eine Stützfunktion aus, sodass hierbei eine gewisse Festigkeit gefordert wird und dieses eine erhöhte Durchlässigkeit besitzen darf. Hierfür ist das Ausbruchmaterial zusätzlich aufzubereiten (bei ausreichender Ursprungsqualität ist auch ein Einsatz ohne weitere Aufbereitung denkbar) und bedarf voraussichtlich Untersuchungen auf dessen Eignung. Ebenso ist eine Verwendung des Ausbruchmaterials in Verbindung mit Zement oder Bentonit denkbar, jedoch müsste hierzu die Eignung durch umfangreiche Vorversuche abgeklärt werden. (Studer, et al., 1984)

Das Ausbruchmaterial darf jedoch nicht von der Geländeoberfläche bis zum Bohrlochtiefsten frei sedimentieren, sondern muss mittels eines am Gestänge bzw. am Seil befindlichen Behälters eingebracht werden, sodass es zu keiner Pfropfenbildung im Bohrloch kommt. Der Behälter sollte über einen Öffnungsmechanismus und beispielsweise eine Ramm- oder Ausdrückvorrichtung verfügen, um das Ausbruchmaterial im Bohrlochtiefsten aus dem Behälter zu befördern (siehe Kapitel 11.3 Bentonit).

11.6 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass zahlreiche Materialien existieren, die für das Verfüllen und Verschließen von tiefen Bohrlöchern in Frage kommen. Jedoch ist die Auswahl der Materialien speziell an die örtlichen Gegebenheiten (geologische Verhältnisse im Deckgebirge, Temperatur, Art der anwesenden Wässer) für jede Bohrung anzupassen und für jeden Standort ein entsprechendes Verschlusskonzept zu entwickeln. Hierbei ist auf die Interaktion zwischen den einzelnen Verschlussmaterialien zu achten.

Um eine sich negativ auswirkende Interaktion zwischen den einzelnen Verschlussmaterialien (beispielsweise chemische Interaktion zwischen Zement und Bentonit mit der Folge von reduziertem Quellverhalten / Quelldruck des Bentonits) zu verhindern, bieten sich insbesondere Materialien wie Sand / Ausbruchmaterial oder Schwerspat / Baryt (siehe Kapitel 11.5 Sonstige Materialien) an. (Arnold, et al., 2011), (Nagra, 2002)

Die meisten der in diesem Abschnitt genannten Einbringtechnologien sind bisher nicht (auch nicht im Technikumsmaßstab) erprobt worden. Die Funktionstüchtigkeit (Dauerhaftigkeit, Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, usw.) jedes Bohrlochverschlusses bzw. seiner Komponenten muss ingenieurtechnisch nachgewiesen werden.

12 Betriebssicherheit und Havariebewältigung

Gemäß den Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente (BMU, 2010) ist für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich der Stilllegung die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers nachzuweisen. Dort heißt es im Kapitel 7 Sicherheitsnachweise: *„Es ist ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen zu führen. Insbesondere sind für den Einlagerungsbetrieb und die Stilllegung anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung von definierten Auslegungsfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen. Dazu gehört, dass die Robustheit des Endlagersystems analysiert und dargestellt wird.“* (BMU, 2010 S. 12 - 13)

Weiter wird dort im Kapitel 8 Endlagerauslegung gefordert: *„Für die Sicherheit des Endlagers in der Betriebsphase einschließlich Stilllegung ist die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen innerhalb des Endlagers in Anlehnung an das kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen nachzuweisen. Für die Betriebsphase sind darüber hinaus in vier Sicherheitsebenen gestaffelte Maßnahmen zu planen, wie dies analog auch für Kernkraftwerke gilt. Durch die Zuordnung dieser vier Ebenen zu Anlagenzuständen und durch die Festlegung der für diese Anlagenzustände zu ergreifenden oder vorgesehenen Schutzmaßnahmen ist ein Konzept in der Tiefe gestaffelter Abwehrmaßnahmen (defence in depth) zu realisieren.“*

Folgende vier Sicherheitsebenen sind zu betrachten:

- *Normalbetrieb (Maßnahmen verhindern Eintreten von Betriebsstörungen)*
- *Anomaler Betrieb (Maßnahmen verhindern Eintreten von Auslegungsfällen)*
- *Auslegungsfälle (Maßnahmen beherrschen Auslegungsfälle)*
- *Auslegungsüberschreitende Störfälle/Ereignisse (Maßnahmen verringern die Eintrittswahrscheinlichkeit oder vermindern Umgebungsauswirkungen)“* (BMU, 2010 S. 17)

Für die Bewertung der Betriebssicherheit kann man folgenden Ansatz wählen, wie er auch bei Forschungsvorhaben für generische Endlagerkonzepte angewendet wird. Mittels einer Betriebsstörungsanalyse werden in drei Schritten die Betriebsabläufe beschrieben, die möglichen Betriebsstörungen und potentiellen Störfälle (= Havarie) identifiziert und schließlich Maßnahmen zur Beherrschung von möglichen Betriebsstörungen und potentiellen Störfällen abgeleitet.

Wendet man diesen Ansatz auf die tiefe Bohrlochlagerung an, kann man z. B. für den Einlagerungsprozess mittels Seilführung für einen Behälter folgende Abläufe beschreiben:

- 1) Anlieferung des Endlagerbehälters in einem Transferbehälter auf einem Transportwagen im Überwachungsbereich der Einlagerungshalle,
- 2) Transportwagen fährt mit Transferbehälter fährt unter ELV, die sich über dem Bohrlochkeller befindet,
- 3) ELV hebt den Transferbehälter vom Transportwagen,
- 4) leerer Transportwagen fährt aus ELV,
- 5) ELV dreht Transferbehälter in vertikale Position,
- 6) ELV setzt Transferbehälter auf Bohrlochsleuse,
- 7) Abschirmhaube der ELV setzt auf Transferbehälter auf,
- 8) Abschirmhaube und obere Leuse des Transferbehälters öffnen,
- 9) Greifer wird in Transferbehälter abgelassen und schlägt an Endlagerbehälter an,

- 10) Greifer hebt Endlagerbehälter,
- 11) Bohrlochsleuse und untere Leuse des Transferbehälters öffnen,
- 12) Absenken des Endlagerbehälters in das Bohrlochtiefste bzw. auf den zuvor bereits eingelagerten Endlagerbehälter,
- 13) Greifer legt Endlagerbehälter im Bohrlochtiefsten bzw. auf zuvor eingelagertem Behälter ab,
- 14) Greifer löst von Endlagerbehälter,
- 15) Greifer fährt durch Bohrlochsleuse und untere Leuse des Transferbehälters,
- 16) Bohrlochsleuse und untere Leuse des Transferbehälters schließen,
- 17) Greifer fährt in Ausgangsposition,
- 18) Abschirmhaube und obere Leuse des Transferbehälters schließen,
- 19) Abschirmhaube hebt vom Transferbehälter ab,
- 20) ELV hebt Transferbehälter von Bohrlochsleuse,
- 21) ELV schwenkt Transferbehälter in horizontale Position,
- 22) leerer Transportwagen fährt unter ELV,
- 23) ELV setzt Transferbehälter auf Transportwagen,
- 24) Transportwagen fährt mit leerem Transferbehälter aus Sperrbereich.

In dem GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016) dazu findet man eine Beschreibung des Einlagerungsprozesses in diesem Detaillierungsgrad nicht. Dort wird nur auf wesentliche Schritte abgehoben (Gestänge an den Behälter flanschen, zusätzlich Seilsicherung anbringen, Ablassen des Behälters durch Preventer, Absetzen des Behälters und Gestänge ziehen, Kontaminationsüberwachung beim Gestänge ziehen).

Von dem oben genannten umfangreichen Ablauf ausgehend lassen sich z. B. folgende Betriebsstörungen und potentiellen Störfälle identifizieren:

- Bohrlochhavarien während der Einlagerung:
 - o Eindringen von Fluiden in das Bohrloch und Vermischung mit Bohrlochfluid durch korrodiertes Casing / undichte Verbindung oder Druckdifferenzen zwischen Bohrlochfluid und Umgebungswässern; Worst Case: Wegsamkeit ins Grundwasser und defekter Behälter mit Radionuklidfreisetzung;
 - o (Havarien während der Erstellung der Bohrung wurden nicht betrachtet);
- Behälterhavarien während der Einlagerung:
 - o Festklemmen des Behälters im Bohrloch im Bereich des Schutzgutes (oberhalb ewG) oder im Einlagerungsbereich; planmäßige Befüllung nicht möglich, ggf. Verschlussmaßnahmen nicht möglich;
 - o Beschädigter Behälter und Kontakt des Bohrlochfluides mit Abfall und damit Freisetzen von Radionukliden in das Bohrlochfluid (aber nicht außerhalb des Bohrlochs);
 - o Absturz des Behälters in das Bohrloch (Versagen Gestänge und Seil oder Anbindung an Greifersystem, Versagen Greifermechanismus).

Bei der Betriebsstörungsanalyse kann in Anlehnung an die Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse vorgegangen werden. Dazu wäre im Prinzip eine detaillierte technische Beschreibung notwendig. Dennoch kann man das Vorgehen wie folgt beschreiben:

- Untersuchungen der einzelnen Komponenten entsprechend ihrer Funktion auf mögliche Störungen,
- Zuordnung potentieller Ausfallursachen zu jeder Komponente,
- entsprechend Ursache Abschätzung der möglichen Folgen,
- Beschreibung von Gegenmaßnahmen, Eingrenzung und Behebung der Störung sowie ggf. weitere Auslegung der Geräte,
- Bewertung der Betriebsstörung in 3 Kategorien:
 - o A: Zulässiger Systemzustand,
 - o B: Unzulässiger Systemzustand,
 - o C: Gefahrenzustand.

Kategorie A: Es sind keine Maßnahmen erforderlich.

Kategorie B: Die aufgetretenen Störungen können behoben werden, sie sind jedoch meist mit einer Strahlenexposition des Betriebspersonals verbunden.

Kategorie C: Es sind Untersuchungen zur Vermeidung bzw. Beherrschung der Störungen durchzuführen; entweder muss die Betriebsstörung ausgeschlossen werden oder der Einlagerungsvorgang bzw. das komplette Einlagerungskonzept wird geändert.

Wenn man versucht, diese Methode auf die tiefe Bohrlochlagerung zu übertragen, z. B. für die oben identifizierten Betriebsstörungen und potentiellen Störfälle, käme man zu folgender Einschätzung:

- Bohrlochhavarien während der Einlagerung:
 - o Eindringen von Fluiden in das Bohrloch und Vermischung mit Bohrlochfluid durch korrodiertes Casing (B: Unzulässiger Systemzustand),
Maßnahmen: durch QS-gesicherte Verbindungstechnik und korrekte technische Parameter (Pumpendruck, Fluidbemessung) ist die Störung vermeidbar,
- Behälterhavarien während der Einlagerung:
 - o Festklemmen des Behälters im Bohrloch (B: Unzulässiger Systemzustand),
Maßnahme: Fischen des Behälters.
 - o Der Behälter wird beschädigt und es kommt zum Kontakt des Bohrlochfluides mit dem Abfall. Dadurch werden Radionukliden in das Bohrlochfluid freigesetzt (C: Gefahrenzustand).
Maßnahme: Infrastrukturbereiche müssen für Rückholung und Dekontamination vorgehalten werden.
 - o Absturz Behälter (C: Gefahrenzustand),
Maßnahmen: Risikoanalyse mit Auswirkungen dieser Szenarien sind notwendig (ggf. Bremswirkung durch das Fluid).

In dem GRS-Bericht „Tiefe Bohrlöcher“ (Bracke, et al., 2016) werden umfangreich Störfälle und deren Konsequenzen diskutiert für den Fall, dass ein Behälter Schaden nimmt. Ebenso werden umfangreiche Langzeitsicherheitsuntersuchungen angestellt und dabei eine Vielzahl von Szenarien (Einwirkungen von außen, ...) berücksichtigt. Eine detaillierte Betriebssicherheitsanalyse, wie sie an wenigen Beispielen weiter oben geschildert wird, gibt es jedoch nicht. Dazu bedarf es, wie bereits erwähnt, einer umfangreichen und detaillierten Betriebsstörungenanalyse (weiterer Forschungsbedarf).

13 Endlagermonitoring

Das Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfallstoffe und ausgediente Brennelemente hat in den vergangenen Jahren stark an Beachtung gewonnen. So wurden Berichte veröffentlicht z. B. von der IAEA „TECDOC-1208“ (IAEA, 2001) oder der EU „EUR 21025 EN“ (Projektbericht des „Thematic network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal“) (NEA, 2005). Darüber hinaus gab es zu diesem Thema internationale Workshops, die 2007 in Genf und 2008 in Oxford stattfanden. Hinzu kommen weitere Berichte, die die möglichen Management-Strategien des Entsorgungsprozesses analysieren und die Wichtigkeit der Überwachung während des Entsorgungsprozesses herausstellen - z. B. der NEA-Bericht zur Umkehrbarkeit und Rückholbarkeit (NEA, 2001) und der Bericht des US National Research Council „One Step at a Time“ (NRC, 2003) über die stufenweise Endlagerentwicklung. Aktuell werden im Rahmen nationaler Forschung (FuE-Vorhaben MONTANARA) und Forschung auf europäischer Ebene konzeptionellen Überlegungen zur Strategie und zur Technik des Monitorings eines Endlagers, zur Entwicklung von sogenannten „Trigger Values“, die Indikatoren für eine nicht erwartete Endlagerentwicklung darstellen können sowie Entwicklung von entsprechenden Handlungsmöglichkeiten angestellt.

Diese Untersuchungen dokumentieren auch den Wunsch nach einer Überwachung des Endlagers von Anfang an. Der Zustand und die mögliche Veränderung der geologischen Formation, der hydrogeologischen Verhältnisse und der eingelagerten Abfälle soll möglichst umfassend überwacht werden. Eine vollständige Überwachung steht dabei häufig im Zielkonflikt mit einem sicheren und möglichst vollständigen Einschluss der hochradioaktiven Abfälle. Die Installation von Messsonden unterschiedlicher Art (z. B. Gas- oder Druckmesssonden) direkt in geotechnischen Barrieren erfordert Zuleitungen (meist Kabel), die wiederum die Dichtfunktion der Barriere negativ beeinträchtigen kann.

Kabel im Verschlussystem des Bohrloches führen zu Schwachstellen innerhalb des Verschlusses. Eine kabellose Übertragung über eine gewisse Zeitspanne (einige Jahre, je nach Energieträger) scheint für den oberflächennahen Bereich denkbar, aber die Übertragung aus einer Tiefe von 3 000 m bis 5 000 m aus einem verschlossenen Bohrloch ist derzeit unmöglich. In (Bracke, et al., 2016) wird deshalb vorgeschlagen das Monitoring deshalb zusätzliche Erkundungsbohrungen zu realisieren. Ein Beispiel für ein entsprechendes Bohrlochraster ist in Abbildung 59 dargestellt.



Abbildung 59: Vorschlag für ein Bohrlochraster. Die weißen Punkte stellen Erkundungsbohrungen dar, die auch für Monitoringzwecke nutzbar sein sollen; blau und gelb Einlagerungsbohrungen. Der Abstand zwischen den Bohrungen beträgt immer 50 m. (Bracke, et al., 2016 S. 131)

Die Erkundungsbohrungen (weiß) sollen im Nachhinein als Überwachungsbohrungen weiter genutzt werden. Das Monitoring kann durch den Zugang zu den offenstehenden Erkundungsbohrungen immer dem Stand der Technik angepasst werden. Die Standzeit solcher verrohrter Bohrungen über einen längeren Zeitraum wäre zu untersuchen. Entscheidender ist jedoch, dass durch ein Monitoring über eigenständige Erkundungsbohrungen zwar eine Störung der Integrität des Verschlusses der Einlagerungsbohrungen verhindert wird, aber in direkter Nachbarschaft zu den Einlagerungsbohrungen direkte offene Wegsamkeiten durch die als Abdichtung betrachteten Dichtschichten geschaffen werden. In wie weit sich dies auf die Langzeitsicherheit der eingelagerten Abfälle auswirkt, muss untersucht werden.

Die Zeitdauer eines aktiven Endlagermonitoring nach Einlagerung der Behälter wäre zu ermitteln. Da bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern die Bergbarkeit der Behälter als unmöglich angesehen wird (siehe auch Kapitel 10.7 Bergung auf Seite 136), stellt sich auch die Frage nach der Sinnhaftigkeit eines langfristigen, aktiven Endlagermonitorings im direkten Einlagerungsbereich der Bohrungen, wenn ein Eingreifen bei eventuellen Fehlfunktionen ausgeschlossen ist. In Abwägung von Schaden und Nutzen erscheint unter diesem Gesichtspunkt ein Monitoring oberhalb der Dichtschichten angemessener. Die Integrität der Dichtschichten würde durch einen Verzicht auf weiteres Durchhörern mit offen stehen bleibenden Erkundungsbohrungen nicht weiter in Mitleidenschaft gezogen werden. Eine ausführliche Abwägung der Vor- und Nachteile eines Verzichts auf ein aktives, langfristiges Endlagermonitoring bei der tiefen Bohrlochlagerung steht noch aus.

14 Chancen und Risiken

Für das Abschätzen der Chancen und Risiken der Einlagerung von wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfallstoffen in tiefen Bohrlöchern wurden zwei Referenzkonzepte für die Einlagerung in einer Teufe zwischen 3 000 m und 5 000 m zugrunde gelegt. Zum einen das in (Bracke, et al., 2016) und in Kapitel 7.3.2 ab Seite 94 beschriebene Konzept mit einem Bohrl Lochdurchmesser von 35,4" (ca. 90 cm), in dem Endlagerbehälter vom Typ DBC-R eingelagert werden sollen. Zum anderen wird die Endlagerung in einem Bohrloch mit einem kleineren Durchmesser von 17,5" (ca. 44,5 cm) betrachtet (siehe Kapitel 7.3.3 ab Seite 95). Die Bohrungen werden in beiden Konzepten verrohrt ausgeführt und sind während der Einlagerung mit einem Stützfluid gefüllt. Nach erfolgreicher Einlagerung aller Behälter, 356 Stück für das Konzept eines 90 cm Bohrloches und ca. 130 Stück (Optimierungsspielraum) für 17,5" Bohrlöcher, wird das Bohrloch verschlossen. In den Bereichen der ausgewiesenen Dichtschichten im Deckgebirge wird das Casing entfernt. Das Verfüllmaterial wird in das Bohrloch eingebaut. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit eines Einbaus der Verfüllmaterialien im Fluid, aber auch die Option eines Trockeneinbaus ist untersuchungswürdig. Die Chancen und Risiken für beide Bohrlochdurchmesser wurden im jeweiligen konkreten Fall abgewogen und in der nachfolgenden Tabelle in Form einer gestaffelten Bewertung für die Chancen (hellgrün bis dunkelgrün) und Risiken (hellrot bis dunkelrot) ausgewiesen.

Tabelle 25: Chancen und Risiken

[illegible]

	ca. 35,4“ (90 cm) Bohrloch/ 31 Bohrlöcher	17,5“ (ca. 44,5 cm) Bohrloch/ ca. 130 Bohrlöcher
Stand der Technik der Tiefbohrtechnik	Bohrlöcher mit diesem Durchmesser und den Anforderungen an die überdeckende Geologie sind in den angestrebten Tiefen derzeit nicht realisierbar. Die Technologie der Tiefbohrtechnik ist auf möglichst geringe Durchmesser spezialisiert. Alle technischen Bestandteile, wie die Meißeltechnik, Casing, Bohranlagen mit der nötigen Hakenlast, Bohrgestänge etc. müssen für die großen Durchmesser in der angestrebten Tiefe neu entwickelt werden und sind nicht Stand der Technik der Tiefbohrtechnik. Das Fachwissen für die Entwicklung der erforderlichen Technologie wäre in Deutschland vorhanden.	Ein Durchmesser von 17,5“ ist für die angestrebte Tiefe Stand der Technik (Meißel, Casings etc. vorhanden). Allerdings muss bereits bei nur einer Dichtschicht (Salz oder Ton) und unter optimalen Bedingungen (minimales Absetzen der Rohrtour) mit einem Schacht / Großbohrloch bis in eine Teufe von 500 m gearbeitet werden oder alternative Bohr- oder Verrohrungsverfahren (Lean Casing oder Mono Bore Konzept (noch in Entwicklung)) angewandt werden. Es gibt derzeit keine Kenntnisse über die Langzeit-Dichtheit von Verbindungen von Casings für die hierfür vorgesehenen Durchmesser.
Endlagerbehälter	Der konzipierte Behälter vom Typ DBC-R kann alle wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfälle, die in Deutschland endgelagert werden sollen, aufnehmen.	Der kleine Innendurchmesser der Behälter resultiert in vielen Behältern, die noch zu entwickeln sind. Es können nicht alle wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfälle des Abfallmengengerüsts eingelagert werden (Abfälle aus der Wiederaufarbeitung).*)
Behälter im Fluid	Der Behälter muss so ausgelegt sein, dass er sicher einer Flüssigkeitssäule von 5 000 m standhält.	
Materialauswahl	Der austenitische Stahl X6CrNiMoTi17-12-2 ist nach vorläufiger Einschätzung geeignet, muss aber noch nach Gesichtspunkten des Strahlenschutzes bewertet werden (Aktivierung).	
Einlagerung in einem Fluid	Die Einlagerung in einem Fluid scheint möglich (es müssen Strahlenschutzbedingungen, wie Freimessen, Trocknen / Reinigen des aus dem Bohrloch kommenden Equipments, Überlauf für verdrängtes Fluid bei Einlagerung etc. beachtet werden). Das Fluid wirkt beim Eintauchen des unabgeschirmten Behälters abschirmend.	
Einlagerungsablauf	Es besteht die Chance einer geringeren Handhabungszeit der Behälter durch das Personal und einer stärker automatisierten Einlagerung der Abfälle im Vergleich zu einem Endlagerbergwerk.	
Gestänge	Das Anbringen einer zweiten Sicherung ist nicht geklärt. Ein Strahlenschutzkonzept ist nicht geklärt. Der Behälter kann bei Bedarf gedreht oder leicht gedrückt werden.	
Seile	Ein Seilreiben am Casing muss über Klemmen verhindert werden. Der Behälter kann bei Bedarf nicht mehr gedreht oder leicht gedrückt werden. Strahlenschutzmaßnahmen bei Einlagerung sind gut umsetzbar.	

	ca. 35,4“ (90 cm) Bohrloch/ 31 Bohrlöcher	17,5“ (ca. 44,5 cm) Bohrloch/ ca. 130 Bohrlöcher
Rückholung	Eine Rückholung der Behälter ist nur bis zum Verschluss des Bohrloches (wenige Jahre Betriebszeit) möglich.	
	Auch zerstörungsfrei, ist die Fishing Technologie nur bedingt zur Rückholung geeignet.	
Bergung	Eine Bergung nach Verschluss des Bohrloches ist unmöglich.*)	
Havariebewältigung	Es ist kein direkter, schneller Zugang zu den Behältern möglich.	
Verschluss	Der Verschluss erfolgt direkt nach dem Beenden der Einlagerung der hochradioaktiven Abfallstoffe in einem Bohrloch.	
Verschluss im Trockenem	Ein qualitätsgesicherter Einbau ist möglich.	
	Es ist eine Mehrzahl an Verfüllmaterialien möglich.	
Verschluss im Fluid	Ein qualitätsgesicherter Verschluss ist nur schwer möglich.*)	
	Es besteht eine eingeschränkte Materialauswahl	
	Es besteht die Möglichkeit des Verschlusses des fluidgefüllten Bohrloches mit hochverdichtetem Bentonit in einem perforierten Behälter („Supercontainer“).	
Überwachung im Fluid	Eine Sichtüberwachung ist nur eingeschränkt (Kamerabefahrung?) möglich.	
*) ...Wird der Kategorie „hohes Risiko“ zugeteilt, ist aber im Grunde genommen ein Fakt.		

Die hinsichtlich der Radionuklide abschirmende und beim Ablassen der Gebinde abbremsende Wirkung des Stützfluides im Bohrloch erweist sich für die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern als voraussichtlich positiv und wird in die Kategorie Chance eingeordnet. Das aufzufahrende gesamte Hohlraumvolumen ist im Vergleich zu einem Endlagerbergwerk geringer und der Verschluss des einzelnen Bohrloches kann direkt nach dem Einbringen der Endlagergebäude erfolgen. Es besteht dabei auch eine gute Chance, den Bohrungsverschluss in einem trockenen Bohrloch einzubringen. Das Erstellen eines Bohrloches mit einem Enddurchmesser von 17,5" ist nach dem Stand der Technik der Tiefbohrtechnik machbar. Derzeitige Entwicklungen alternativer Technologien für Bohr- und Verrohrungsverfahren könnten dies auch ohne einen Schacht oder ein Großbohrloch ermöglichen. Die Entwicklung einer Technologie für das Abteufen von Bohrungen mit größerem Durchmesser bis 90 cm in Tiefen bis 5 000 m im Kristallin ist nicht ausgeschlossen. Allerdings müsste diese Entwicklung mit öffentlichen Mitteln gefördert werden, da innerhalb der Rohstoffindustrie kein direkter Bedarf an einer solchen Technologie besteht.

Die Bewertung von Chancen und Risiken zeigt aber auch deutliche Risiken für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern. Dazu gehört die Unmöglichkeit einer Bergung von Abfallgebünden und die Tatsache, dass nach heutigem Stand der Technik nicht alle wärmeentwickelnden Abfälle in ein 17,5“ (44,5 cm) Bohrloch eingelagert werden können. Die Endlagerung von Kokillen (Durchmesser: 43 cm) mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C, CSD-B und CSD-V) ist in Tiefbohrungen nicht möglich. Dementsprechend muss zusätzlich ein Endlagerbergwerk errichtet werden. Das sind sozusagen klare Ausschlusskriterien für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern. Die Einlagerung in einem Schutzfluid erfordert eine entsprechende Auswahl korrosionsresistenter Behältermaterialien und einen dichten Behälter bis das Bohrloch dauerhaft verschlossen ist.

Weitere risikobehaftete Themen wie z. B. Rückholung in der Betriebsphase des Bohrloches oder Havariebewältigung erfordern einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, dessen Ergebnis offen ist. Aber auch die Aspekte mit einer guten bis geringeren Chance auf

Erfolg wie z. B. Herstellen von Bohrlöchern mit einem Enddurchmesser von 90 cm (35,4“) verlangen intensive und aufwändige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Weiterhin werden zur sicherheitstechnischen Bewertung der tiefen Bohrlochlagerung Temperatur- oder Kritikalitätsberechnungen als dringend notwendig betrachtet. Bisher wurden dazu keine Arbeiten veröffentlicht.

Potenzielle weitere Forschungsarbeiten für die tiefe Bohrlochlagerung sollten auch folgende weitere Ansätze betrachten:

- Herstellung eines 5 000 m tiefen verrohrten Einlagerungsbohrloches in einem Salzstock, um die positiven Eigenschaften des Salzgesteines als Barriere zu nutzen,
- Einlagerung in einer verringerten Teufe zwischen 1 500 m und 3 000 m,
- Nutzung von Clusterbohrungen.

15 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der Begriff „Tiefbohrtechnik“ beschreibt meist die Technik zum Abteufen von Bohrungen nach Öl oder Gas. Die ersten Ölbohrungen wurden um 1858 niedergebracht. Seitdem hat sich die Öl- und Gasindustrie stetig weiterentwickelt. Heute werden weltweit mittels Tiefbohrungen täglich etwa 80 Mio. Barrel Öl gefördert (ca. 12 Mio. m³). Die meisten Tiefbohrungen haben Längen von 3 000 m bis 6 000 m. Weitgehend waagrecht verlaufende, sehr lange Bohrungen vom Festland aus zu Offshore-Lagerstätten erreichen Längen von über 15 000 m.

Der Bedarf an Erdgas wird ebenfalls durch Tiefbohrungen abgedeckt. In zunehmendem Maße werden Tiefbohrungen auch in der Tiefengeothermie zur Wärme- und Stromgewinnung genutzt.

Bei der Förderung von Erdöl und Erdgas sowie in der Tiefengeothermie steht die sichere Förderung im Vordergrund. Insofern könnte man davon ausgehen, dass auch Bohrungen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit den Mitteln der Tiefbohrtechnik nach Öl und Gas hergestellt und sicher betrieben werden können. Die Zielstellung in der Endlagerung unterscheidet sich jedoch in wesentlichen Punkten von derjenigen in der Öl- und Gasförderung. Deshalb bleibt ein signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Tiefbohrtechnik bestehen, wenn diese zur Herstellung von tiefen Bohrlöchern für die Endlagerung genutzt werden soll.

Für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern gibt es Überlegungen / Konzepte in Schweden, den USA und in Deutschland. Auf diesen aufbauend wurden mögliche Konzepte für eine Endlagerung in einem 17,5 Zoll-(44,5 cm)-Bohrloch und eine Endlagerung in einem Bohrloch mit 35,4 Zoll-(90 cm)-Durchmesser in diesem Bericht diskutiert. In keinem der genannten Länder wurde jedoch bisher eine Bohrung abgeteuft, in der die Einlagerung einmal erprobt und aus den dabei gewonnenen Erfahrungen das Einlagerungskonzept weiterentwickelt wurde. Gerade bei der Neuentwicklung einer Technologie sind umfangreiche Pilotversuche notwendig. Erst nach den Pilotversuchen kann tatsächlich beurteilt werden, inwieweit eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern eine realistische Entsorgungsoption ist. Nachfolgend werden insgesamt sechs Punkte aufgelistet, in denen ganz erhebliche Entwicklungsarbeit notwendig ist, wenn das Konzept zur Endlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen in tiefen Bohrlöchern weiterverfolgt werden soll. Die nachfolgenden sechs Punkte erscheinen auch in einem Zeitraum von wenigen Jahrzehnten hinsichtlich der notwendigen Forschung und Entwicklung umsetzbar, sofern ganz erhebliche finanzielle Mittel dafür aufgewendet werden.

Bevor diese sechs Punkte aufgelistet werden, werden zwei Punkte beschrieben, deren Lösung jeweils eine ganz erhebliche Herausforderung darstellt. Diese beiden Punkte betreffen:

- a) den Nachweis des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Fall Bb nach dem Bericht des AkEnd (flächig ausgedehnte überlagernde Salzschiefer / Tonschiefer) und,
- b) eine Bergung der hochradioaktiven Abfälle bei einer Einlagerung in tiefen Bohrlöchern über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers.

Zu a) Nachweis des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Fall Bb (den Einlagerungsbereich überlagernde Ton- oder Salzschiefer):

Bei der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in 3 000 m bis 5 000 m Tiefe im kristallinen Grundgebirge muss nachgewiesen werden, dass oberhalb des kristallinen Grundgebirges flächig eine so undurchlässige Schicht (Salzgestein oder Tonstein) in ausreichendem Maße vorhanden ist, dass auch über einen Zeitraum von einer Million Jahre (Nachweiszeitraum) kein mit den Abfällen in Kontakt gekommenes Grundwasser die Biosphäre erreicht bzw. mit dem Grundwasserleiter des Deckgebirges in Kontakt kommt bzw. - sofern mit Radionukliden belastetes Grundwasser mit dem Deckgebirgsgrundwasserleiter in Kontakt kommt - so verdünnt wird, dass die Kontamination unter einem festgelegten Grenzwert bleibt. Die überlagernde

Ton- bzw. Salzschiefer ist damit ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich vom Typ Bb gemäß dem Bericht des AkEnd. Beim Typ Bb ist der Einlagerungsbereich nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen. Derzeit gibt es keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder auch Forschungsarbeiten, in denen ein Weg aufgezeigt wird, wie ein solcher Nachweis geführt werden könnte. Das Projektteam hat auch große Zweifel, ob ein solcher Nachweis jemals geführt werden kann, da hier großflächig um den Einlagerungsbereich der Untergrund hinsichtlich seiner Permeabilität erheblich genauer erkundet werden muss als bei einer Einlagerung in einem ewG vom Typ A (ewG umschließt den gesamten Einlagerungsbereich).

Zu b) Bergung der Abfallbehälter:

Gemäß dem derzeitigen Diskussionsstand und den gesetzlichen Vorgaben sollen die Behälter mit den hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen bis zu einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers geborgen werden können. Hierfür müssten Bergungstechniken entwickelt werden, mit denen ein Behälter aus beispielsweise 4 500 m Tiefe wieder geborgen werden kann. Der Behälter hat sich dabei unter Umständen aufgrund des Gebirgsdruckes, der 500 Jahre auf den Behälter eingewirkt hat, eventuell verformt. Nach Einschätzung des Projektteams bestehen große Zweifel, ob die Entwicklung solcher Bergungstechniken auch bei erheblicher finanzieller Förderung möglich ist.

Dies sind die einzigen beiden Punkte, deren Lösung vom Projektteam auch bei großer finanzieller Unterstützung in den nächsten Jahren eher als unwahrscheinlich angesehen wird.

Bei nachfolgend genannten sechs Punkten besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der zwar einen hohen finanziellen Aufwand erfordert, der jedoch zu einem positiven Ergebnis führen könnte:

1) Bohrung mit großen Durchmesser:

Wie in den Kapiteln 7 und 10 ausgeführt, wurde die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in ein Bohrloch mit 17,5 Zoll (44,5 cm) Durchmesser und in ein Bohrloch mit 35,4 Zoll (90 cm) Durchmesser untersucht und dafür entsprechende Konzepte ausgearbeitet. Bei einer Einlagerung in einem Bohrloch mit 90 cm Durchmesser sind für die Aufnahme der Endlagergebinde mit radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen ca. 31 Bohrungen bis in etwa 5 000 m Tiefe notwendig. Eine solche Anzahl der Bohrungen scheint im Vergleich zur Anzahl der Bohrungen von 130 bis 150 Stück, die bei einem Bohrdurchmesser von 17,5 Zoll notwendig wären, technisch umsetzbar. Dafür muss jedoch eine Bohrtechnologie für etwa 90 cm Bohrdurchmesser bis in etwa 5 000 m Tiefe entwickelt werden. Eine solche Entwicklung scheint technisch machbar. Da bisher von der Industrie kein Bedarf für Bohrungen mit so großem Durchmesser vorhanden war, wurde auch kein Entwicklungsaufwand betrieben, eine Bohrtechnologie für Bohrungen mit so großem Durchmesser zu entwickeln. Bisher wurden in der Tiefbohrtechnik immer möglichst kleine Bohrdurchmesser angestrebt. Zudem müsste eine Bohrtechnologie für Bohrungen mit so großem Durchmesser im Kristallingestein entwickelt werden. Die bisherigen Bohrungen in der Tiefbohrindustrie, die für die Erdöl- und Erdgasgewinnung genutzt werden, wurden bisher im Vergleich dazu in relativ weichen, porösen und permeablen Sedimentgesteinen (häufig Sandstein) abgeteufelt.

2) Erkundungsverfahren im Umkreis bis ca. 50 m um den Einlagerungsbereich:

Die im Abschnitt 6.2 beschriebenen Verfahren zur Erkundung der geologischen Verhältnisse direkt aus dem Bohrloch sind auf die Anforderungen in der Tiefbohrtechnik (bzw. auf die Anforderungen bei der Gewinnung von Erdöl und Erdgas) abgestimmt. Mit den heute entwickelten Verfahren kann teilweise die Dichte des Gesteins, die Klüftung und die Permeabilität nur bis wenige Dezimeter von der Bohrlochwand in das Gebirge ermittelt / abgeschätzt werden.

Hier müssten untertägige Erkundungsverfahren weiterentwickelt und neue Erkundungsverfahren entwickelt werden, die eine präzisere Beschreibung der geologischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich und im Bereich, in dem Dichtelemente angeordnet werden, erlauben.

3) Endlagerbehälter:

Wie im Kapitel 7 beschrieben, muss ein geeigneter Endlagerbehälter neu entwickelt werden, der eine Vielzahl von Anforderungen zu erfüllen hat. Er muss z. B.:

- a) auf den Bohrlochdurchmesser abgestimmt sein,
- b) auf den zu erwartenden Fluiddruck während der Einlagerung bemessen sein,
- c) auf die zu erwartenden Vertikallasten, die durch das Stapeln der Behälter in ein Bohrloch verursacht werden, bemessen sein,
- d) auf die geochemischen Verhältnisse in einer mit Stützfluid gefüllten Bohrung in 3 000 m bis 5 000 m Tiefe abgestimmt sein,
- e) eine Rückholung (Bergung wird als unmöglich angesehen) der radioaktiven Abfälle über einen längeren Zeitraum zulassen.

4) Einlagerungstechniken:

Im Kapitel 10 sind Einlagerungstechniken der Abfallbehälter beschrieben. Die Einlagerung scheint sowohl mittels Gestänge als auch mittels Stahldrahtseilen oder Faserseilen machbar. Eine Einlagerung mittels Coiled Tubing wird im Vergleich als ungeeignet angesehen.

Die erfolgreiche Einlagerung (Ablassen des Behälters unter Strahlenschutzbedingungen) muss gegenständlich mindestens 1 000 Mal nachgewiesen werden (durch Erprobung), damit die Einlagerungstechnologie als Stand der Technik angesehen werden kann. Dies erfordert erhebliche Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten.

5) Abdichtung durch den Bohrlochverschluss:

Im Kapitel 11 sind Möglichkeiten zum Verfüllen und dichten Verschließen der Einlagerungsbohrlöcher aufgelistet. Alle hier genannten Möglichkeiten mittels Zement, Bentonit und Bitumen sind bisher nur in Konzeptstudien untersucht worden. Zu einer Abdichtung mit Bentonit fanden in Schweden bereits Technikumsversuche statt. Die Abdichtung der Einlagerungsbohrlöcher im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Ton- oder Salzgestein) einschließlich des Rückschnitts der Verrohrung muss gegenständlich erprobt werden. Bei der Erprobung müssen insbesondere Maßnahmen entwickelt werden, wie die Wirksamkeit der Abdichtung kontrolliert werden kann. Die bisher in der Tiefbohrtechnik eingesetzten Technologien zur Abdichtung von Bohrungen durch Verpressen genügen nicht den Anforderungen bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen, da bei den bisher eingesetzten Technologien in der Tiefbohrtechnik keine im Sinne der Endlagerung notwendige Erfolgskontrolle / Qualitätskontrolle erfolgt.

6) Havarien:

Im Kapitel 12 sind mögliche Havarien beschrieben. Auf die Havariebewältigung wurde nur kurz eingegangen. Möglichkeiten zur Havariebewältigung bei einer Einlagerung / Rückholung der Behälter müssen noch entwickelt und gegenständlich erprobt werden. Im Zuge dessen muss auch eine detaillierte Betriebssicherheitsanalyse und Betriebsstörungsanalyse sowohl für die Einlagerung als auch für die Rückholung erfolgen.

16 Zusammenfassung

Die Endlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen und / oder ausgedienten Brennelementen in Bohrlöchern mit einer Tiefe von 3 000 m bis 5 000 m ist eine Entsorgungsoption, die von der Endlagerkommission aufgrund der in den letzten Jahren in den USA laufenden Diskussion thematisiert wurde. Zu dieser tiefen Bohrlochlagerung gibt es Vorüberlegungen bzw. Konzepte in Schweden und den USA sowie in Deutschland von der GRS. In dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Option „Endlagerung in tiefen Bohrlöchern“ weiter mit folgenden drei Zielen untersucht:

- 1) Analyse und Beschreibung der in vorhandenen Forschungsberichten / Studien getroffenen Annahmen und Randbedingungen,
- 2) Beschreibung der wesentlichen Eckpunkte bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern und Aufzeigen eines möglichen Verbesserungspotenzials,
- 3) konzeptionelle Gesamtbewertung von Chancen und Risiken der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Die in Schweden und den USA sowie in Deutschland von der GRS ausgearbeiteten Konzepte für die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern wurden dargelegt und kritisch bewertet (Kapitel 3).

Des Weiteren wurden die Anforderungen in den in Deutschland derzeit relevanten rechtlichen Grundlagen (Standortauswahlgesetz 2017, Sicherheitsanforderungen 2010 des BMU, Strahlenschutzverordnung 2017, usw.) aufgelistet. Es wurde dargelegt, inwieweit bei einer Endlagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen Bohrlöchern die Anforderungen aus diesen rechtlichen Grundlagen erfüllt werden können. Eine Prüfung, inwieweit einzelne Randbedingungen bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern die derzeitigen gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen in den Verordnungen erfüllen, ist jedoch letztlich nur eingeschränkt sinnvoll durchführbar, da die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen bisher immer im Hinblick auf eine Endlagerung in einem Bergwerk formuliert worden sind. Dementsprechend müssten die gesetzlichen Vorgaben und Anforderungen sinnvoll im Hinblick auf eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern um- oder neu formuliert werden (siehe Abschnitt 3.3).

Im Kapitel 4 wurde auf den „Stand der Technik“ bzw. „Stand von Wissenschaft und Technik“ eingegangen. Gemäß Standortauswahlgesetz muss bei der Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen der „Stand von Wissenschaft und Technik“ berücksichtigt werden. Da es bei einer Endlagerung von radioaktiven Abfallstoffen in tiefen Bohrlöchern bisher nur Konzeptstudien gibt, ist für diese Entsorgungsoption auch kein „Stand der Technik“ vorhanden. Der „Stand von Wissenschaft“ bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern geht derzeit über Konzeptstudien nicht hinaus. Erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind deshalb notwendig (siehe Kapitel 15), um überhaupt beurteilen zu können, inwieweit eine Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern eine sinnvolle Entsorgungsoption ist und um den „Stand von Wissenschaft“ weiterzuentwickeln. Bisher ist die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern eher eine Idee / ein visionäres Konzept als eine realistische Entsorgungsoption.

Bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöcher berühren sich zwei Fachgebiete - die Tiefbohrtechnik und die Endlagertechnik. In beiden Fachgebieten gibt es teilweise die gleichen Fachbegriffe (z. B. Bohrlochverschluss bzw. Abdichtung eines Bohrloches), die teilweise unterschiedliche Bedeutung haben bzw. unterschiedlich interpretiert werden. In der Tiefbohrtechnik wird beispielsweise ein Bohrloch verschlossen, indem es mit Zement verpresst wird. Von einer „dauerhaften“ Dichtheit des Bohrlochverschlusses wird prinzipiell ausgegangen, ohne dass die Funktionsfähigkeit / die Dichtheit des Bohrlochverschlusses gegenständlich überprüft wird oder nach einigen Jahren nochmals kontrolliert wird. In der Endlagertechnik muss dagegen die Abdichtung einer Strecke oder eines Schachtes gegenständlich qualitätsgerecht geprüft werden. Dies gilt auch für Bohrlochverschlüsse. Dem entsprechend müssen weitere Begriffe, die in den beiden Fachrichtungen unterschiedlich definiert sind, in Richtung Endlagertechnik neu definiert werden.

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden zwei geologische Profile definiert, die als Referenz für mögliche geologische Verhältnisse in Deutschland bei den weiteren Überlegungen zur Einlagerung dienen (Kapitel 5). Die Einlagerung erfolgt in 3 000 m bis 5 000 m im voraussichtlich klüftigen Kristallingestein. Auch bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss nachgewiesen werden, dass Radionuklide nicht bzw. nur in ausreichend geringem Maße aus dem Einlagerungsbereich entweichen. Deshalb muss auch bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) definiert werden. Da die Einlagerung im wahrscheinlich klüftigen Kristallingestein erfolgt, kann ein ewG voraussichtlich nur in Form einer überlagernden Ton- oder Salzgesteinsschicht ausgewiesen werden (Typ Bb gemäß AkEnd-Bericht). Die Ton- bzw. Salzschiefer muss so flächig verbreitet sein, dass auch bei einer Umströmung im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren keine bzw. nur in ausreichend geringem Maße Radionuklide aus dem ewG entweichen (bzw. beim Typ Bb nach AkEnd den flächig verbreiteten ewG umströmen). Insbesondere im Bereich der Ton- bzw. Salzschiefer müssen Bohrlochabdichtungen gesetzt werden. Hinsichtlich einer Nachweisführung beim Typ Bb gemäß AkEnd-Bericht wird auf Kapitel 15 verwiesen.

Im Kapitel 6 wurde der Stand der Bohrtechnik für die Bohrungen bis 5 000 m Tiefe im Kristallin mit möglichst großem Durchmesser beschrieben. Der derzeitige Stand der Technik deckt Bohrungen bis zu einem Durchmesser von 17,5 Zoll (44,5 cm) in 5 000 m Tiefe im Kristallin ab. Für noch größere Bohrungen müssten vor allem neue Rollenmeißel mit mehr als drei Rollen entwickelt werden. Alternativ müssten Bohrvorgänge im Hartgestein (z. B. das Elektroimpulsverfahren) entwickelt bzw. weiterentwickelt werden. Ein Bohrdurchmesser von etwa 35,4 Zoll (90 cm), wie er im GRS-Bericht (Bracke, et al., 2016) als sinnvoll angesehen wurde, lässt erwarten, dass die Anzahl der Bohrungen auf ein akzeptables Maß beschränkt werden kann (siehe Abschnitt 7.3.4). Allerdings ist ein so großer Bohrdurchmesser mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht umsetzbar. Für den Durchmesser von 17,5 Zoll (44,5 cm) ist vorab ein Schacht / Großbohrloch bis etwa 500 m Teufe zu erstellen, deren stützender Ausbau bei der Entwicklung des Verfüll- und Verschlusskonzeptes zu berücksichtigen ist. Alternativ zum Schacht und dem sich mit der Tiefe ändernden Bohrdurchmesser könnte mittels Mono Bore Verfahren, das sich derzeit in Entwicklung befindet, die Bohrung mit einem einheitlichen Durchmesser der Rohrtour abgeteuft werden.

Mit den heute entwickelten Spülpumpen lassen sich Bohrdurchmesser bis 17,5 Zoll in 5 000 m Tiefe realisieren. Für größere Bohrungsdurchmesser müssten jedoch Pumpen mit erheblich größerer Pumpenleistung und Volumenströmen entwickelt werden. Die Pumpen müssten in Reihe oder parallel geschaltet werden.

Zum Stand der Tiefbohrtechnik kann festgestellt werden, dass nahezu alle bisherigen Entwicklungen darauf abzielten, Öl- und Gaslagerstätten zu erschließen und zu nutzen. Öl und Gas findet man meist in den Poren von Sedimentgesteinen. Die Bohrungen werden daraufhin optimiert, die Kosten unter Berücksichtigung der hohen Sicherheitsanforderungen zu minimieren und gleichzeitig eine maximale Förderung der Rohstoffe zu ermöglichen, ohne die Lagerstätte zu beschädigen. Typische Enddurchmesser von Öl- und Gasbohrungen liegen folglich bei 4 bis 8 ½ Zoll, also ca. 10,2 cm bis 21,6 cm.

Die Anpassung der tiefbohrtechnischen Ausrüstung an Bohrungen im Hartgestein und mit wesentlich größeren Durchmessern, wie sie zur Endlagerung erforderlich wären, wäre mit erheblichen Entwicklungs- und Testarbeiten verbunden. Die besonderen Herausforderungen bestehen darin, die erforderliche Anpresskraft auf die großkalibrigen Meißel bereitzustellen (Bohrstrangdesign), das Bohrloch kontinuierlich vom Bohrklein zu reinigen (Leistungsfähigkeit der Pumpen), den schweren Bohrstrang zu handhaben (spezielle Tiefbohranlage entwickeln und bauen) und ein Bohrungsdesign zu entwickeln, welches mit einem minimalen Bohrungsdurchmesser im ersten Bohrungsabschnitt auskommt (Lean Casing oder Mono Bore Verfahren). Es gibt in Deutschland mehrere Servicefirmen, die die nötigen Entwicklungen vorantreiben könnten.

Grundsätzlich erfolgen alle Bohrarbeiten, bevor radioaktives Material zur Bohrung angeliefert wird. Die Bohrung kann damit vollständig ohne strahlenschutztechnische Einschränkungen

ausgeführt und überprüft werden. Erst nachdem die Bohrung in einwandfreier Qualität hergestellt ist, wird sie für die Einlagerung freigegeben. Anschließend wird das Einlagerungsgebäude über dem Bohransatzpunkt errichtet. Erst danach werden die radioaktiven Abfälle angeliefert.

Im Kapitel 7 wurde das einzulagernde Abfallmengengerüst und die Anforderungen an den Endlagerbehälter beschrieben. Das Abfallmengengerüst ergibt sich aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm für das Jahr 2022. Die Anforderungen an den Endlagerbehälter bei einer Einlagerung in 3 000 m bis 5 000 m Tiefe beziehen sich insbesondere auf:

- die Dichtigkeit,
- die Festigkeit gegenüber allen auftretenden Belastungen,
- die Temperaturbeständigkeit,
- die Beständigkeit gegenüber dem Stützfluid im Bohrloch,
- die Anforderungen an die Abmaße des Behälters aufgrund des Bohrlochdurchmessers.

Im Einlagerungsbereich sind Temperaturen zwischen etwa 100 °C und 160 °C zu erwarten. Die Temperatur liegt damit erheblich über der Ausgangstemperatur in einem ca. 800 m tiefen Bergwerk (ca. 25 °C bis 30 °C). Die derzeit im Standortauswahlgesetz in der Fassung von 2017 (StandAG, 2017) geforderte Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteraußenfläche kann bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern systembedingt nicht eingehalten werden.

Der berücksichtigte Druck auf den Behälter ergibt sich aus der Auflast der gestapelten Behälter und dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule. Der Gebirgsdruck ist in dem Konzept nicht berücksichtigt, da angenommen wurde, dass das Casing den Gebirgsdruck in Verbindung mit dem fluiderfüllten Bohrloch solange übernimmt, bis der Bohrlochverschluss vollständig in Funktion ist. Sofern jedoch angenommen wird, dass das Casing zusammen mit der Zementation seine Festigkeit im Laufe der Zeit verliert bzw. korrodiert, und der Behälter jedoch weiterhin integer bleiben soll, muss zukünftig auch der zu erwartende Gebirgsdruck in der Auslegung des Behälters berücksichtigt werden. Des Weiteren ist dann auch tektonischer Druck zu beachten.

Aus den genannten Anforderungen heraus wurden die Randbedingungen für einen Behälter abgeleitet und ein Behälter überschlägig bemessen. Danach werden die Behälter für ein 17,5 Zoll Bohrloch voraussichtlich 26,5 cm Außendurchmesser und 17,5 cm Innendurchmesser aufweisen. Für ein 35,4 Zoll Bohrloch ergeben sich der Behälteraußendurchmesser zu 63,5 cm und der Behälterinnendurchmesser zu 43,5 cm. Nach den Befunden zur Stahlkorrosion sollte als Stützfluid einer K_2CO_3 - oder einer Na_2CO_3 -Lösung der Vorzug vor chlorid- oder bromidhaltigen Flüssigkeiten gegeben werden. Als Material für den Behälter wird beispielsweise ein austenitischer Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2 empfohlen.

Insgesamt wurden zwei Konzepte für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern betrachtet, die nachfolgend beschrieben werden:

Konzept 1: Bohrdurchmesser 17,5 Zoll (44,5 cm) in 5 000 m Tiefe:

Setzt man einen maximalen Bohrdurchmesser von 17,5 Zoll an, ist aufgrund des notwendigen Casings und des erforderlichen Ringraums nur ein Behälteraußendurchmesser von 265 mm (Innendurchmesser: 175 mm) möglich. Die Länge des Behälters wurde zu 5,6 m angenommen. Die Anzahl der Behälter ist bei einer Ausnutzung des Innendurchmessers für die Einlagerung der Brennstäbe von 70 % bis 80 % bei etwa 23 000 bis 27 000 Behältern zu erwarten. Bei etwa 180 Behältern pro Bohrloch wären 130 bis 150 Bohrlöcher notwendig. Die beschriebenen Behälter sind dabei auf eine Stapelhöhe von ca. 1 000 m ausgelegt. Hier besteht Optimierungspotenzial. Der Vorteil des Konzeptes 1 ist es, dass keine Weiterentwicklung der Bohrtechnik notwendig ist und auf den Stand der Technik in der Tiefbohrtechnik zurückgegriffen

werden kann. Das Konzept 1 hat jedoch den Nachteil, dass eine relativ große Anzahl an Bohrlöchern notwendig ist. Des Weiteren können beim Konzept 1 die schon verglasten und konditionierten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung nicht eingelagert werden, da dafür ein Innendurchmesser des Behälters von mindestens 43 cm erforderlich wäre. Somit können hier nur die Brennstäbe von ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren eingelagert werden.

Konzept 2: Bohrdurchmesser 35,4 Zoll (90 cm) in 5 000 m Tiefe:

Beim Konzept 2 wurde von einem Bohrdurchmesser von 35,4 Zoll in 5 000 m Tiefe ausgegangen. Die Einlagerung erfolgt zwischen 3 000 m und 5 000 m Tiefe. Unter Berücksichtigung der Casing-Wandstärke und des notwendigen Ringraumes ist ein Behälteraußendurchmesser von 635 mm (Innendurchmesser: 435 mm) und eine Stapelhöhe von 2 000 m möglich. Die Behälterlänge beträgt 5,6 m. Unter diesen Prämissen sind insgesamt 11 000 Behälter erforderlich. Bei einer Einlagerung von 363 Behältern pro Bohrloch wären 31 Bohrlöcher notwendig. (Bracke, et al., 2016) Der Vorteil des Konzeptes 2 ist, dass die Anzahl der Bohrlöcher mit 31 Stück erheblich geringer ist als im Konzept 1. Der Nachteil des Konzeptes 2 ist, dass ohne eine erhebliche Weiterentwicklung der tiefbohrtechnischen Ausrüstung eine Umsetzung nicht möglich ist.

Hinsichtlich der kennzeichnenden Daten der beiden Konzepte wird auf die Tabelle 22 (siehe Seite 101) verwiesen. Während das Konzept 2 nicht dem Stand der Technik in der Tiefbohrtechnik entspricht, ist dies beim Konzept 1 der Fall. Dennoch muss bei Konzept 1 bei den angenommenen geologischen Verhältnissen (geologisches Profil 2) ein mindestens 500 m tiefer Schacht / Großbohrloch mit einem Durchmesser von ca. 2 m bis 3 m für jedes Bohrloch abgeteuft werden, bevor mit konventioneller Tiefbohrtechnik weiter gebohrt werden kann. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, Alternativen zur konventionellen Tiefbohrtechnik, wie das Mono Bore Verfahren oder ein Lean Casing Konzept, zu nutzen, um nicht auf einen Schacht / ein Großbohrloch angewiesen zu sein.

Auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss ein ewG ausgewiesen werden. Da die Einlagerung im Kristallingestein erfolgt, das mit hoher Wahrscheinlichkeit klüftig ist, ist eine abdichtende Schicht aus Ton oder Salz oberhalb des Kristallingesteins notwendig (siehe angenommene Referenzprofile 1 und 2 im Kapitel 5). Der ewG entspricht damit dem Typ Bb nach (AkEnd, 2002). Wie ein Nachweis eines ewGs beim Typ Bb gegenständlich (rechnerisch / durch Erkundungen) erfolgen soll, ist jedoch derzeit noch unklar. Dies gilt sowohl für einen ewG vom Typ Bb bei einer Endlagerung in einem Bergwerk als auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern (siehe auch Kapitel 15).

Für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept in Ansätzen entwickelt bzw. auf das in (Bracke, et al., 2016) dargelegte Konzept der GRS zurückgegriffen. In den Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 (BMU, 2010) sind die allgemeinen Schutzziele und die Sicherheitsprinzipien dargelegt. Das Sicherheitskonzept beschreibt, wie bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern der sichere Einschluss der Abfälle für eine Million Jahre erreicht werden soll. Für einen möglichst weitgehenden Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich werden folgende Anforderungen zugrunde gelegt:

- 1) Die Abfälle müssen so eingeschlossen werden, dass allenfalls in geringem Maße Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden (Einschlusswirksamkeit).
- 2) Die geologische Barriere muss im Verbund mit den geotechnischen Barrieren den Einschluss gewährleisten.
- 3) Das Porenwasser im ewG darf nicht am hydrogeologischen Kreislauf teilnehmen.
- 4) Die Einschlusseigenschaften des ewG müssen über eine Million Jahre erhalten bleiben (siehe auch (Bracke, et al., 2016)).

Im Nachweiskonzept wird dargelegt, wie die im Sicherheitskonzept festgeschriebenen Anforderungen überprüft werden. Nachweise sind dabei mit Bezug auf den ewG vom Typ Bb zu folgenden Punkten zu führen bzw. folgende Punkte sind zu bewerten:

- 1) die Mächtigkeit der Salz-/ Tonbarriere,
- 2) die Integrität der geologischen Barrieren,
- 3) die Integrität und Wirksamkeit der geotechnischen Verschlussbauwerke (qualifizierte Abdichtungen im Bereich der Ton- und Salzschiefer),
- 4) der Kritikalitätsausschluss,
- 5) der Einschluss der Radionuklide im bzw. unterhalb des ewG,
- 6) die radiologischen Konsequenzenanalyse in der Biosphäre bei Freisetzung von Radionukliden,
- 7) Human-Intrusion-Szenarien.

Ein schlüssiges Sicherheits- und Nachweiskonzept kann erst aufgestellt werden, wenn die im Kapitel 15 genannten Weiterentwicklungen zu einem großen Teil erfolgt sind.

Im Kapitel 10 wurde ein Einlagerungs- und Rückholungskonzept entwickelt. Nach der Fertigstellung des Bohrlochs kann der Bohrturm abtransportiert werden. Anschließend wird ein Einlagerungsbauwerk über Tage erstellt. Im Einlagerungsbauwerk muss über dem Bohrloch eine Einlagerungsvorrichtung mit einer Abschirmvorrichtung vorgesehen werden. Das Endlagergebäude wird in einem geschlossenen Transferbehälter zum Bohrloch transportiert. Anschließend wird dieser vertikal über dem Einlagerungsbohrloch aufgestellt. Das Personal ist dabei durch Abschirmvorrichtungen permanent geschützt. Die Endlagergebäude können dann am Gestänge oder an Seilen aus Stahl oder Fasern in das Bohrloch eingelagert werden.

Das Kapitel 10 enthält auch Ausführungen zur Rückholung der Endlagergebäude und zur Bergung. Während die Rückholung in der Betriebszeit einer Bohrung als möglich eingeschätzt wird, erscheint die Bergung der Endlagergebäude bei diesem Konzept nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich. Deshalb müsste dafür geprüft werden, ob diese Anforderung gesetzlich aufrecht erhalten werden muss.

Im Kapitel 11 wurden verschiedene Möglichkeiten zum Verfüllen und Verschließen der Einlagerungsbohrlöcher dargelegt. In Konzeptstudien wurden bisher Bentonit, Bitumen / Asphalt, Zement und auch Salzsuspensionen und eutektische Salzschnmelzen sowie Schwespat / Baryt als Verfüll- bzw. Verschlussmaterialien genannt. Erste Überlegungen zu Einbringtechnologien wurden vorgestellt. Sämtliche Einbringtechnologien müssen allerdings noch hinsichtlich der speziellen Bedingungen in Endlagerbohrungen entwickelt und erprobt werden.

Abschließend wurden die Chancen und Risiken einer Endlagerung in tiefen Bohrlochern abgewogen (siehe Tabelle 25 auf Seite 152). Derzeit kann aus der Abwägung der Chancen und Risiken heraus keine Aussage getroffen werden, ob eine Endlagerung in tiefen Bohrlochern eine sinnvolle Alternative zu einer Endlagerung in einem Bergwerk ist und damit weiter untersuchungswürdig ist. Dazu sind zu viele Punkte offen, bei denen weitere, sehr umfangreiche und zeitaufwändige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgen müssen. Hier wird insbesondere auf das Kapitel 15 verwiesen.

17 Ausblick

Wie in Kapitel 15 dargelegt, besteht bei verschiedenen Punkten der Option Endlagerung in tiefen Bohrlöchern noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zudem sind in Kapitel 15 zwei Punkte genannt, bei denen eingeschätzt wird, dass sie auch trotz erheblicher finanzieller Aufwendungen in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, in den nächsten Jahrzehnten nur schwierig zu lösen sind. Diese beiden Punkte betreffen:

- a) den Nachweis des ewG beim Typ Bb nach (AkEnd, 2002),
- b) die Bergung der Endlagergebinde.

Der unter a) genannte „Nachweis des ewG beim Typ Bb nach (AkEnd, 2002)“ könnte umgangen werden, indem der Einlagerungsbereich in einem ewG vom Typ A gelegt wird. Dazu sollten die Bohrungen in einem Salzdiapir / Salzstock oder einer Salzmauer oder einem Salzkissen abgeteuft werden. Zudem könnte in diesem Fall, die Bohrtiefe auf etwa 2 500 m bis 4 000 m verringert werden. Der Einlagerungsbereich liegt dann vollständig im Salz. Die mehrere 100 m lange Dichtung des Bohrloches liegt ebenfalls im Salz. Aufgrund der geringeren Dichte des Salzes gegenüber Nebengesteinen lassen sich die Abmessungen des Salzstocks relativ gut durch 3D-Seismik erkunden.

Zudem könnte weiter untersucht werden, inwieweit es möglich ist, eine Kaverne mit geringem Durchmesser im Einlagerungsbereich eines Bohrloches zu solen. In einem solchen Fall könnten mehrere Behälter pro Bohrloch nebeneinander eingelagert werden. Entscheidend ist dabei allerdings, dass die Kritikalitätsbedingung eingehalten wird und eine Rückholung der Endlagergebinde gewährleistet wird.

Zudem hätte eine Einlagerung im Salz den Vorteil, dass die Zerfallswärme besser abgeleitet wird als bei einer Einlagerung im Kristallingestein. Weitere Vorteile ergeben sich beim Bohren, da Salz eine geringere Festigkeit aufweist als Kristallingestein.

Salzgestein kriecht bei Spannungsbeanspruchung. Die Kriechrate ist umso höher, je höher die Temperatur ist. Bei einer Einlagerung radioaktiver Abfallstoffe in tiefen Bohrlöchern im Salzgestein ist dies sowohl vorteilhaft als auch nachteilig. Während der Herstellung der Bohrung und / oder einer kleinen Kaverne ist das Kriechen des Salzes nachteilig, da die Kaverne / die Bohrung relativ schnell zufließen würden, sofern keine ausreichende Stützung durch das Stützfluid vorhanden ist. Von erheblichem Vorteil ist jedoch das Kriechen des Salzes nachdem die Abfallbehälter eingelagert sind. Durch das schnelle Aufkriechen des Salzes bei hoher Temperatur schließt sich das Bohrloch und / oder die Kaverne relativ schnell. In keinem anderen Wirtsgestein ist eine schnellere Abdichtung des Bohrloches durch Kriechen des Wirtsgesteins möglich.

Sofern weitere Forschungsarbeiten zur tiefen Bohrlochlagerung stattfinden, erscheint es unter den vorgenannten Randbedingungen am ehesten sinnvoll, die Endlagerung von radioaktiven Abfallstoffen in tiefen Bohrlöchern in einem Salzstock / Salzmauer / Salzkissen im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

ABBergV Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche. 2016.

AkEnd Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte [Bericht]. Köln: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, 2002.

Alberta Energy Regulator Directive 020: Well Abandonment [Bericht]. 2016.

API Environmental Protection for Onshore Oil and Gas Production Operations and Leases: API Recommended Practice 51 R [Bericht]. 2009.

Arnold Bill W. [et al.] Deep Borehole Disposal Research: Geological Data Evaluation, Alternative Waste Forms, and Borehole Seals [Bericht]. Albuquerque und Livermore: Sandia National Laboratories, 2014.

Arnold Bill W. [et al.] Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste [Bericht]. Albuquerque und Livermore: Sandia National Laboratories, 2011.

Arnold Bill W. [et al.] Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal [Bericht]. Albuquerque und Livermore: Sandia National Laboratories, 2012.

AtG Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren. 2017.

Baker Hughes 12-3/4-in. Modular Motor: Technical Data Summary [Online]. 2016. Abgerufen am: 09.10.2017. <https://assets.www.bakerhughes.com/system/73/109e80bdfe11e59cd80d9debe49188/12-75in-Mod--Motor---MMTR-70-01-004.pdf>.

Baker Hughes Drill Bits Catalogue [Online]. 2017. Abgerufen am: 28.02.2017. https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471-DrillBits_Catalog_HiRes.pdf.

Baker Hughes Interne Präsentation. 2017.

Bates Ethan A. [et al.] Plug Design for Deep Borehole Disposal of High-Level Nuclear Waste [Artikel]. American Nuclear Society Journal: Nuclear Technology, Vol. 188, Nr. 3, S. 280 - 291. North Kensington, 2014.

Bauer Carl-Otto Notwendiges Wissen vom Recht für Prüfeningenieure [Artikel]. Technische Dokumentation (Nr. 2000/03). Adolph Verlag GmbH, 2000.

BBergG Bundesberggesetz. 2017.

Beitz W. und Küttner K.-H. Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1981.

Bellwether Resources International Inc. Rock Bit Brochure Complete [Online]. 2017. Abgerufen am: 28.02.2017. http://www.briinc.com/Files/BRI_BrochurePDFs/rockbitbrochurecomplete_e.pdf.

Bertrams N. [et al.] Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzsichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA, Zwischenbericht [Bericht]. Peine, 2015.

Beswick J. Status of Technology for Deep Borehole Disposal [Bericht]. EPS International for the Nuclear Decommissioning Authority, 2009.

Beswick John A., Gibb Fergus G. und Travis Karl P. Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges [Artikel]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, Vol. 167, Nr. 2, S. 47 - 66. London, 2014.

BGR Der tiefe geologische Untergrund von Deutschland [Bericht]. Hannover, 2014.

BGR Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen [Bericht]. Hannover Berlin, 2007.

BImSchG Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. 2017.

BMI Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Bundesminister des Innern (GMBI. 1983, Nr. 13, S. 220), 1983.

BMU Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010.

BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bericht des BMUB zur Entsorgung bestrahlter Brennelemente aus Forschungs-, Versuchs- und Demonstrationsreaktoren [Bericht]. 2015a.

BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Keine Zustimmung zum Transport bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente nach Russland, Pressemitteilung Nr. 199/10. 2010.

BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose [Bericht]. 2013.

BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm) [Bericht]. 2015b.

Bollingerfehr W. [et al.] Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte [Bericht]. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH, 2014.

Bracke Guido [et al.] Tiefe Bohrlöcher [Bericht]. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2016.

Bracke Guido Endlagerkonzept einer tiefen Bohrlochlagerung (Deutschland) - Bericht zum Arbeitspaket 1 - Anhang 7 - Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen [Bericht]. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2017.

Brady P. V., Kuhlmann K. L. und Sassani D. L. The U. S. Deep Borehole Field Test [Bericht]. Albuquerque und Livermore: Sandia National Laboratories, 2015.

Brady Patrick V. [et al.] Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste [Bericht]. Albuquerque und Livermore: Sandia National Laboratories, 2009.

Brenner Rolf P. Technischer Bericht 88-04 - Bohrlochversiegelung: Materialeigenschaften von hochverdichtetem Bentonit mit Eignungsbeurteilung [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1988.

Brenner Rolf P. und Jedehauser Peter Technischer Bericht 89-26 - Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeitsnachweis [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1989.

Bucher Felix und Spiegel U. Technischer Bericht 84-18 - Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1984.

Bundesverband Geothermie e.V. <http://www.geothermie.de> [Online]. 2018. Abgerufen am: 24.01.2018. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie/ursprung-der-erdwaerme.html>.

Cochran John R. und Hardin Ernest L. Handling and Emplacement Options for Deep Bore-hole Disposal Conceptual Design [Bericht]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2015.

Coons William [et al.] Technical Report 87-33 - State-of-the-Art Report on Potentially Useful Materials for Sealing Nuclear Waste Repositories [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1987.

DBE Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8221) - Simulation des Schachttransportes - Abschlussbericht - Hauptband [Bericht]. Peine: Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 1994.

DBETEC Status Quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftiger Behandlung/Lagerung (LABRADOR) [Bericht]. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH, 2011.

Deutsche Edelstahlwerke Acidur 4571 - Werkstoffdatenblatt X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571. Witten: Deutsche Edelstahlwerke GmbH, 2015.

DIN EN 10088-3 Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.

DIN EN 1993-1-4 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2015.

DIN EN ISO 8044 Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2015.

DIN EN 12385-2 Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 2: Begriffe, Bezeichnung und Klassifizierung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2008.

DIN EN 12385-4 Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2008.

DIN EN ISO 10325 Faserseile – Hochmodulares Polyethylen – 8-litzige geflochtene Seile, 12-litzige geflochtene Seile und ummantelte Seile. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.

Drillbits International Pvt. Ltd. Product Brochure [Online]. 2017. Abgerufen am: 28.02.2017. http://www.drillbits.com/product_catalogue.pdf.

Drilling Formulas and Drilling Calculations Basic Understanding of Oilwell Casing and Tubing. <http://www.drillingformulas.com/basic-understanding-of-oil-well-casing-and-tubing/>, 2017.

DTE Drilling Components of a Land-Based Rotary Drilling Platform [Online]. 2014. Abgerufen am: 10.07.2017. <https://dtetechnology.wordpress.com/2014/05/04/components-of-a-land-based-rotary-drilling-platform/>.

Eichler Klaus Spezialtiefbau: Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren [Buch]. Renningen: Expert-Verlag, 3. Auflage. 2009.

Engeser B. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland KTB: Bohrtechnische Dokumentation; mit 591 Abbildungen und 256 Tabellen [Bericht]. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1996.

ESK Entsorgungskommission, Stellungnahme, Spezifikation der FA. AREVA-NC zu mittelradioaktiven verglasten Abfällen (CSD-B) aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen [Bericht]. 2010.

Exxon Mobil Cooperation Erdgas aus Deutschland - Im Fokus - Flächenbedarf [Online]. 2017. Abgerufen am: 25.07.2017. <http://www.erdgas-aus-deutschland.de/de-de/erdgas/im-fokus/flaechenbedarf/Flaechenbedarf>.

Filbert Wolfgang [et al.] Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes - Final Report [Bericht]. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH, 2010.

Gabolde G. und Nguyen J.-P. Drilling data handbook [Buch]. Paris, 2006.

Gasda S. E., Bachu S. und Celia M. A. Spatial characterization of the location of potentially leaky wells penetrating a deep saline aquifer in a mature sedimentary basin [Buchabschnitt]. Environmental Geology. Vol. 46. 2004.

Gibb Fergus G. Deep Borehole Disposal: Options, Issues and Challenges [Konferenz]. Annual Waste Management Conference. Phoenix, 2016.

GRS Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Arbeitspaket 5 - Abschlussbericht [Bericht]. GRS-272. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2011.

Halliburton API Casing Chart [Online]. 2012. Abgerufen am: 09.04.2017. <http://www.nb-pipe.com/images/Casing%20Nominal%20Weight.pdf>.

Halliburton Borehole Seismic Services [Online]. 2017. Abgerufen am: 06.10.2017. http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data_Sheets/web/H/BHS-Downhole-Tools.pdf.

Heinze Thorsten Einfluss der Seilparameter auf das mechanische Verhalten [Konferenz]. 1. Mönchengladbacher Flecht-Kolloquium 2014. Chemnitz, 2014.

Heinze Thorsten und Speck Markus Textile Tragmittel in der Fördertechnik [Artikel]. Logistics Journal. Rostock-Warnemünde, 2010.

Heinze Thorsten Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus Polymerfasern [Bericht]. Dissertation. Chemnitz: TU Chemnitz, 2013.

Hepp H. [et al.] Tieflagerung radioaktiver Abfälle - Jahresbericht 1968 [Buch]. Karlsruhe: Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., 1969.

Heunisch Carmen [et al.] Erdgeschichte von Niedersachsen Geologie und Landschaftsentwicklung [Bericht]. Hannover, 2017.

IAEA Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste [Bericht]. IAEA-TECDOC-1208. Wien, 2001.

ITAG Tiefbohr GmbH Datenblatt: RIG 27, IDECO E-3000-AC [Bericht]. 2017.

Jobmann M., Meleshyn A. und Polster M. Qualifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tongestein [Bericht]. Peine: DBE TECHNOLOGY GmbH, 2015.

KCA Deutag Datenblatt: T-47, EMSCO C-3 III [Bericht]. 2015.

King E. R. und Valencia R. L. Environmental Risk and Well Integrity of Plugged and Abandoned Wells [Konferenz]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2014.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Abschlussbericht - Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes [Bericht]. Berlin, 2016.

Kravitz S. Mathematical Magazin, Packing cylinders into cylindrical containers [Journal]. Nr. 40. S. 65 - 71. 1967.

KTA Sicherheitstechnische Regel des KTA - Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken - KTA 3902. Salzgitter: Kerntechnischer Ausschuss, 2012.

LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen in den Ländern Niedersachsen. 2006.

Lotzwick G.-U. Zementationsarbeiten in Bohrungen [Bericht]. Auerbach: Verl. Wiss. Scripten, 2007.

Mammitzsch Jens Untersuchungen zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik [Bericht]. Dissertation. Chemnitz: TU Chemnitz, 2014.

Mensa-Wilmot G., Gagneaux J. und Woldtvedt G. Innovative Product Concept and Drilling Practices Improve Bit and Reamer Performances in Harsh Drilling Environments [Bericht]. Society of Petroleum Engineers, 2015.

Meschede Martin Geologie Deutschlands Ein prozessorientierter Ansatz [Buch]. Greifswald: Springer Spektrum, 2015.

mh wirth Mud Pump TPK 2200. 2017.

Miao S., Blackman M. und Luo J. Hybrit Bit Produces Breakthrough Performance in Heterogeneous Formations in China [Konferenz]. Offshore Technology Conference Asia. 2016.

Michael Markus Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen [Bericht]. Dissertation. Chemnitz: TU Chemnitz, 2011.

Miller G. und Childers R. Innovative Concentric Reamer Enhances Deepwater Drilling Operations [Bericht]. Society of Petroleum Engineers, 2003.

Minkley Wolfgang Integrität von Salzbarrieren und Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern in Salzformationen [Konferenz]. Proceedings of the Workshop 'Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety' Juni 2015. Berlin: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2016.

Minkley Wolfgang und Bollingerfehr Wilhelm Eutektische Salzschnmelzen als Verfüll- und Verschlussmaterial [Konferenz]. Fachgespräch Verschlussysteme: Konzepte, Baustoffe, Simulation, Demonstration und Anwendung am 03. und 04.05.2017 in Freiberg. Karlsruhe: Projektträger Karlsruhe, 2017.

Mönig J. [et al.] Sicherheits- und Nachweiskonzept - Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) [Bericht]. GRS-277. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2012.

Nagra Technischer Bericht 02-24 - SMA/WLB: Bohrlochversiegelung/-verfüllung SB4a/schräg [Bericht]. Wettingen: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2002.

National Oilwell Varco DuraDiamond Evolution [Online]. 2017. Abgerufen am: 10.03.2017. https://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Fixed_Cutter/DuraDiamond_Evolution.aspx.

NEA Nuclear Energy Agency of the OECD, Conclusion of the EC Themativ Network on The role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste [Bericht]. 2005.

NEA Nuclear Energy Agency: Reversibility and Retrievalability (R&R) for the Deep Disposal of High- Level Radioactive Waste and Spent Fuel Report [Bericht]. Paris, 2011.

NEA Reversibility and Retrievalability in Geologic Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level [Bericht]. Paris: OECD/NEA, 2001.

Nendel Klaus und Heinze Thorsten Neue textile Zug- und Tragmittel in der Fördertechnik [Konferenz]. Präsentation TU Chemnitz. Chemnitz, 2010.

NOROSK Well Integrity in Drilling and Well Operations [Bericht]. 2004.

NPC North American Resource Development Study "Well Plugging and Abandonment Paper of Oil and Gas Wells: Paper #2-25" [Bericht]. 2011.

NRC National Research Council, One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for high-Level Radioactive Waste [Bericht]. Washington DC, 2003.

Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld Richtlinie des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld über das verfüllen auflässiger Bohrungen. 1998.

Oil States Industries Merlin Connector [Online]. 2018. Abgerufen am: 15.06.2018. <http://oilstates.com/offshore/conductors/merlin/>.

Peiffer F. [et al.] Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis und Austieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben [Bericht]. GRS-278. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2011.

Peiffer Frank und McStocker Brigitta Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben - Bericht zum Arbeitspaket 12 - Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten [Bericht]. Köln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2012.

Press Frank und Siever Ramond Allgemeine Geologie Einführung in das System Erde [Buch]. München: Spektrum Akademischer Verlag, 3. Auflage. 2003.

Prof. Buske S. [Interview]. TU Bergakademie Freiberg, 02.10.2017.

Prof. Schreiber Ulrich, Ewert Thomas und Prof. Jentzsch Gerhard Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen [Bericht]. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen, 2015.

PSA, SFT, NSHD REGULATIONS RELATING TO DESIGN AND OUTFITTING OF FACILITIES ETC. IN THE PETROLEUM ACTIVITIES (THE FACILITIES REG.) [Bericht]. Petroleum Safety Authority Norway (PSA), Norwegian Pollution Control Authority (SFT) and Norwegian Social and Health Directorate (NSHD), 2001.

Pusch Roland, Börgesson Lennart und Ramqvist Gunnar Technical Report 87-25 - Final Report of the Borehole, Shaft, and Tunnel Sealing Test - Volume I: Borehole plugging [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1987.

Railroad Comission of Texas Texas Administrative Code, Title 16 (Economic Regulation), Part 1 (Railroad Comission of Texas), Chapter 3 (Oil and Gas Division), Rule § 3.14 (Plugging), Section (d - k) [Bericht]. 2017.

Rauche Henry Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert - Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände [Buch]. Berlin: Springer Verlag, 2015.

Reich Matthias Skript zur Vorlesung "Grundlagen der Bohrtechnik": API Durchmesserreihe. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, 2010.

Reich Matthias Auf Jagd im Untergrund [Buch]. Freiberg: Springer Verlag, 2015.

Reinhart F. M. Tech. Note No. N-900 [Bericht]. US Naval Civil Engineering Laboratory, 1967.

Reinhold Klaus [et al.] Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells Zwischenbericht [Bericht]. Hannover, 2013.

Reinhold Klaus Tiefenlage der "Kristallin - Oberfläche" in Deutschland [Bericht]. Berlin, 2005.

Reinhold Klaus, Dr. Hammer Jörg und Pusch Maximilian Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschieben in Deutschland (BASAL) Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland [Bericht]. Hannover, 2014.

Reinicke K. M. Bohrungsintegrität [Konferenz]. Niedersächsische Energietage. 2016.

Rockmore International Rockmore DTH (Down-the-Hole) Drilling Equipment [Online]. 2017. Abgerufen am: 10.03.2017. <http://www.rockmore-intl.com/DTH.html>.

Salzgitter Mannesmann Line Pipe Lieferprogramm Ölfeldrohre (OCTG) [Online]. 2017. Abgerufen am: 08.03.2017. http://www.smlp.eu/deutsch/oelfeldrohre_OCTG_2.php.

Schlumberger Big Reels at the Wellsite [Journal]. Oilfield Review. Bd. 26. 2014.

Schlumberger Oilfield Glossary: casing shoe [Online]. 2018. Abgerufen am: 30.04.2018. http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/c/casing_shoe.aspx.

Schlumberger Smith Bits Product Catalogue [Bericht]. 2017.

Schlumberger www.slb.com [Online]. 2017. Abgerufen am: 06.10.2017. http://www.slb.com/~media/Files/drilling/brochures/lwd/vision/seismicvision_br.pdf.

Seilbahn.net Garaventa baut Weltrekordbahn auf höchsten Berg Deutschlands [Online]. 2017. Abgerufen am: 20.04.2017. <http://www.seilbahn.net/sn/index.php?i=60&kat=&j=1&news=5926>.

SGD Geologische Information und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund [Bericht]. Wittenberg, 2012. www.infogeo.de.

SIEMAG TECBERG Technische Information - Blair-Doppeltrommel-Fördermaschine (Gold Fields, South Deep Gold Mines, Johannesburg, Südafrika). Haiger, 2013.

SKB Choice of method - evaluation of strategies and systems for disposal of spent nuclear fuel [Bericht]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010.

SKB Technical Report 93-04 - Project on Alternative Systems Study (PASS) - Final report [Bericht]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.

SNL Deep Borehole Field Test Conceptual Design Report [Bericht]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2016.

SNL Deep Borehole Field Test Specifications [Bericht]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2015.

SNL Deep Borehole Field Test Conceptual Design Report [Bericht]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2016.

Specht Eckard packomania [Online]. 2018. Abgerufen am: 11.01.2018. <http://www.packomania.com/cci/cci/html>.

StandAG Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. 2017.

Stober I. und Bucher K. Geothermie [Buch]. Berlin: Springer Spektrum, 2014.

StrlSchG Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. 2017.

StrlSchV Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen. 2017.

Studer Jost [et al.] Technischer Bericht 84-33 - Verfüllen und Versiegeln von Stollen, Schächten und Bohrlöchern - Band 2: Anhänge [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1984.

Tenaris Tenaris Hydril - Blue [Online]. 2018. Abgerufen am: 15.06.2018. <http://www.tenaris.com/en/Products/PremiumConnections/BlueSeries/Blue.aspx>.

Vallourec Oil and Gas France VAM Book: 50 Years of Meaningful Connections - VAM - A Vallourec Trademark [Bericht]. 2016.

VDI 2358 Drahtseile für Fördermittel. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2012.

Wikipedia Anerkannte Regeln der Technik [Online]. 2017. Abgerufen am: 22.05.2017. https://de.wikipedia.org/wiki/Anerkannte_Regeln_der_Technik.

Wolf Markus Technischer Bericht 89-14 - Mikrobieller Abbau von Bitumen [Bericht]. Baden: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 1989.

Ziegenhagen et al. Untersuchungen der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager [Bericht]. Peine, 2005.

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
ABergV	Allgemeine Bundesbergverordnung
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AP	Arbeitspaket
API	American Petroleum Institute
arom.	aromatisch
Art.	Artikel
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BBergG	Bundesberggesetz
BE	Brennelement(e)
BER	Berliner Experimentier-Reaktor
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMI	Bundesminister des Innern
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNFL	British Nuclear Fuels
BS	Brennstab
BSK	Brennstabkokille
BVG	Bundesverfassungsgericht
BVOT	Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicherung und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CaBr ₂	Calciumbromid
CaCl ₂	Calciumchlorid
ca.	circa
CPT	Critical Pitting Corrosion Temperature (Lochfraßtemperatur)
Cr	Chrom
CREATIEF	Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente

CrNi	Chrom-Nickel
CsCl	Cäsiumchlorid
CSD-B	Colis de Standard de Déchet Type B (Kokillen mit verglasten mittelradioaktiven Spülwässern)
CSD-C	Conteneur de Standard de Déchets Compacté (Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen)
CSD-V	Conteneur de Standard de Déchets Vitifiés (Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten / Feedklärschlämmen)
d. h.	das heißt
DBC-R	Deep Borehole Container - Retrievable
DBD	Deep Borehole Disposal
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
DBE TEC	DBE TECHNOLOGY GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWR	Druckwasser-Reaktor
DWR-BE	Druckwasser-Reaktor Brennelement(e)
e. V.	eingetragener Verein
EC	Eurocode
EDZ	Excavation Damage Zone (Englisch für Auflockerungszone)
ELV	Einlagerungsvorrichtung
EN	europäische Norm
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
Fe ²⁺	Eisenion (2-fach positiv)
Fe ₂ O ₃	Eisen(III)-oxid
Fe ₃ O ₄	Eisen(II,III)-oxid
FRM	Forschungsreaktor München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
FuE	Forschung und Entwicklung
ggf.	gegebenenfalls
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
G. v.	Gesetz vom
Ges.m.b.H	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
gGmbH	gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GMBI.	gemeinsames Ministerialblatt
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
H ₂ O	Wasser

HAW	High Active Waste
HM-HT	high modulus - high tenacity
HMPE	hochmodulares Polyethylen
i. V. m.	in Verbindung mit
IADC	International Association of Drilling Contractors
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Organisation)
Id.	Identifikation
ISO	Internationale Organisation für Normung
K ⁺	Kaliumion (positiv)
K ₂ CO ₃	Kaliumcarbonat
k _{eff}	Multiplikationsfaktor
k _f	Gebirgsdurchlässigkeit
KHCO ₃	Kaliumhydrogencarbonat
KNK	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
KNO ₃	Kaliumnitrat (Kaliumsalz der Salpetersäure)
KOSINA	Konzeptentwicklung für ein HAW-Endlager in flach lagernden Salzstrukturen in Deutschland und Überprüfung der Übertragbarkeit des für ein Endlager in Salzstöcken entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KTB	Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
LABRADOR	Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung / Lagerung
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LWD	Logging while Drilling
Ltd.	Limited (Bezeichnung für Kapitalgesellschaft)
Max.	Maximum
MgO	Magnesiumoxid
Min.	Minimum
Mio.	Million
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MONTANARA	Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen
MOX	Mischoxid
MWD	Measurement while Drilling
mWv	mit Wirkung von
Na	Natrium

Na ⁺	Natriumion (positiv)
NaCl	Natriumchlorid
Na ₂ CO ₃	Natriumcarbonat
NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat
NaNO ₂	Natriumnitrit (Natriumsalz der salpetrigen Säure)
NaNO ₃	Natriumnitrat (Natriumsalz der Salpetersäure)
NaPro	Nationales Entsorgungsprogramm
NEA	Nuclear Energy Agency
Ni	Nickel
Nr.	Nummer
NRC	National Research Council
OH ⁻	Hydroxidion (negativ)
QS	Qualitätssicherung
P	Phosphor
PBO	Poly-phenylene-benzobisoxazole
PDC	Polycrystalline-Diamond-Compact (Bohrmeißeltyp)
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number (Maßzahl für Korrosionsfestigkeit)
PTKA-WTE	Projekträger Karlsruhe - Bereich Wassertechnologie und Entsorgung
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
RGI	radiologischer Geringfügigkeitsindex
S	Schwefel
S.	Seite(n)
SF	Spent Fuel
Si	Silizium
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SNL	Sandia National Laboratories
SrF ₂	Strontiumfluorid
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasser-Reaktor
SWR-BE	Siedewasser-Reaktor Brennelement(e)
TAZ	Trichterauslaufzeit
THMC	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch(e)
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
Ti	Titan
T _{min}	minimale Teufe des ewGs
TU	Technische Universität

TUBAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
URL	Uniform Resource Locator (englisch für einheitlicher Ressourcenzeiger)
VDH	Very Deep Holes
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vol.	Volume
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor
WWER-BE	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor Brennelement(e)
u. a.	und andere
u. ä.	und ähnliches
UO ₂	Urandioxid
USA	United States of America
usw.	und so weiter
VEK	Verglasungseinrichtung Karlsruhe
ZnBr ₂	Zinkbromid
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

ρ Dichte

“ Inch (Zoll)

§ Paragraf

% Prozent

°C Grad Celsius

bar/m Bar pro Meter

cm Zentimeter

d Tag(e)

ft Foot (Fuß)

g/cm³ Gramm pro Kubikzentimeter

h Stunde(n)

ha Hektar

Hz Hertz

in Inch (Zoll)

K Kelvin

kg/l	Kilogramm pro Liter
kg/m	Kilogramm pro Meter
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
km	Kilometer
kN	Kilonewton
kNm	Kilonewtonmeter
kW	Kilowatt
l	Liter
lb	Pfund
lb/inch	Pfund pro Inch (Zoll)
l/min	Liter pro Minute
m	Meter
m ²	Quadratmeter
Mg	Megagramm
mm	Millimeter
mm/a	Millimeter pro Jahr
mol/l	Mol pro Liter
MPa	Megapascal
m/s	Meter pro Sekunde
m ³ /h	Kubikmeter pro Stunde
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter
s	Sekunde(n)
t	Tonne(n)
tSM	Tonne(n) Schwermetall

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konzept aus Schweden von der SKB: Very Deep Holes (SKB, 2010 S. 38)	22
Abbildung 2:	Konzept aus den USA von den SNL: Deep Borehole Disposal (SNL, 2015 S. 1-2).....	23
Abbildung 3:	Verrohrungsschema des amerikanischen DBD-Konzeptes (SNL, 2016 S. 3-4).....	24
Abbildung 4:	Behälter des amerikanischen DBD-Konzeptes mit zugehörigen Adaptern (nicht maßstäblich) (SNL, 2015 S. 2-58 und 2-59).....	25
Abbildung 5:	Übersicht der tektonostratigraphischen Einheiten des Grundgebirges in Deutschland, in grau dargestellte Flächen zeigen anstehendes Grundgebirge inklusive anstehendem Rotliegend (Reinhold, 2005)	39
Abbildung 6:	Geologisches Profil 1: Generische Referenzgeologie für die Einlagerung in tiefen Bohrlöchern	41
Abbildung 7:	Geologisches Profil 2: Stark vereinfachtes generisches Profil aus einer Region in Deutschland	42
Abbildung 8:	Auflösung, Reichweite und Frequenz (Bohrloch-) geophysikalischer Messverfahren (Baker Hughes, 2017)	48
Abbildung 9:	Aufbau einer Bohranlage (DTE Drilling, 2014)	49
Abbildung 10:	Vergleich: Rollenmeißel für weichere (rechts) und härtere (links) Formationen	53
Abbildung 11:	PDC-Meißel (Baker Hughes, 2017)	55
Abbildung 12:	Imprägnierter Diamantmeißel (Schlumberger, 2017)	55
Abbildung 13:	Hybridmeißel Kymera® von Baker Hughes (Baker Hughes, 2017).....	56
Abbildung 14:	Bohrhammer (Rockmore International, 2017).....	56
Abbildung 15:	Schachtbohrgerät mit Discs (Schlumberger, 2017).....	57
Abbildung 16:	Benötigter Meißelandruck im Hartgestein (4 000 - 9 000 lb pro Zoll)	58
Abbildung 17:	Konzeptionelles Bohrstrangdesign für die Tiefbohrung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	59
Abbildung 18:	Verrohrungsschema bei Beachtung des Poren- und Frac-Druckgradienten (nach (Drilling Formulas and Drilling Calculations, 2017))	60
Abbildung 19:	Verrohrungsschema	60
Abbildung 20:	Durchmesserreihe für die Verrohrung einer Tiefbohrung bis 3 000 m nach Standard API-Durchmesserreihe (Angaben in ") (Reich, 2010)	62
Abbildung 21:	Mögliches Verrohrungsschema der Bohrung ausgehend vom geologischen Profil 2.....	63
Abbildung 22:	Beispiel für ein Lean Casing Verrohrungsprogramm	64
Abbildung 23:	Geplantes Verrohrungs- und Zementierschema	65
Abbildung 24:	Spezifikationen der eingesetzten 14" Rohrtour	67
Abbildung 25:	Verrohrungsschema zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern (USA) (Brady, et al., 2015)	68
Abbildung 26:	Benötigte Hakenlasten beim Casingeinbau (links: trocken, rechts mit Flüssigkeitssäule).....	70

Abbildung 27:	Typische Verbindertypen für Casings, links: Muffenverbinder (Tenaris, 2018), rechts: Integralverbinder (Oil States Industries, 2018)	71
Abbildung 28:	Casings (Durchmesser: 16´´) - Blick auf Gewinde (Salzgitter Mannesmann Line Pipe , 2017)	72
Abbildung 29:	Prinzip der Zwei-Stopfen-Zementation (Schlumberger, 2018)	74
Abbildung 30:	Mögliche Fließwege in einem verfüllten Bohrloch (nach (Gasda, et al., 2004)).....	76
Abbildung 31:	Beispielhaftes Schema einer verfüllten Bohrung (Reinicke, 2016).....	78
Abbildung 32:	Entfernte Rohre und Zementstopfen in einer Salzformation	81
Abbildung 33:	Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für das System Fe-H ₂ O unter sauerstoff-freien Bedingungen bei einer Fe ²⁺ -Konzentration im Elektrolyten von 10 ⁻⁶ mol/Liter	91
Abbildung 34:	Korrosion von un- und niedriglegierten Stählen in der Tiefsee nach (Reinhart, 1967 S. 71).....	93
Abbildung 35:	DBC-R, Entwurf eines rückholbaren Abfallbehälters für die tiefe Bohrlochlagerung (Bracke, et al., 2016 S. 153)	95
Abbildung 36:	Schematische Darstellung der voneinander abhängigen Durchmesser im Einlagerungsbohrloch.....	98
Abbildung 37:	Mögliche Beladung eines Behälters mit 17,5 cm Innendurchmesser mit DWR-16x16-20 BE Brennstäben.....	100
Abbildung 38:	Vergleich der Behälterkonzepte im Schnitt. Links: Behälter für das Konzept eines 17,5“ Bohrloches, Rechts: Behälter für das Konzept eines 90 cm Bohrloches	100
Abbildung 39:	Typeneinteilung des ewGs nach AkEnd (AkEnd, 2002 S. 134 - 135).....	103
Abbildung 40:	EwG bei tiefen Bohrlochern bezogen auf das geologische Profil 2 (Schnitt nur in vertikale Richtung maßstäblich)	106
Abbildung 41:	Schema einer möglichen Bohrlochlagerung im Kristallin unter Salz und Ton-gestein nach (Bracke, et al., 2016); überlagernder ewG schematisch mit roten Linien angedeutet.....	112
Abbildung 42:	Bestandteile des Nachweiskonzeptes (Bertrams, et al., 2015)	113
Abbildung 43:	Gestuftes Verfahren für die Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im ewG (Bertrams, et al., 2015).....	115
Abbildung 44:	Skizze einer Einlagerungsvorrichtung mit Gestängen aus (Cochran, et al., 2015).....	120
Abbildung 45:	Beispiel für Stahldrahtseile nach DIN EN 12385-4 (Tabelle 7: Seilkasse 6 x 19) (DIN EN 12385-4, 2008 S. 11).....	124
Abbildung 46:	HM-HT-Faserstoffe und ihre Eigenschaften (Heinze, 2014 S. 4)	126
Abbildung 47:	Beispiel für Faserseile aus HMPE nach DIN EN ISO 10325 (Tabelle 1: 8- und 12-litzige geflochtene Seile) (DIN EN ISO 10325, 2010 S. 6)	127
Abbildung 48:	Modell einer neuartigen Tragmittelkonstruktion (Nendel, et al., 2010 S. 15).....	128
Abbildung 49:	Vorschlag für eine Seilklemme zur Seilzentrierung.....	129
Abbildung 50:	Demonstrationsversuchsstand der Einlagerungsvorrichtung für tiefe, vertikale Bohrlocher bis 300 m (Filbert, et al., 2010)	130
Abbildung 51:	Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochsleuse (GRS, 2011) ..	131

Abbildung 52:	Greifer der Einlagerungsvorrichtung für die Einlagerung von Behältern in 300 m tiefe Bohrlöcher (links) und 3D-Darstellung des Greifers (rechts) (Filbert, et al., 2010)	132
Abbildung 53:	„R-scale“ - Darstellung der charakteristischen Stadien während der Endlagerung und schematische Darstellung des steigenden Rückholungsaufwandes (NEA, 2011) (Schema an Terminologie nach (BMU, 2010) angepasst) (Bollingerfehr, et al., 2014)	136
Abbildung 54:	Konzept zur tiefen Bohrlochlagerung der Sandia National Laboratories (Arnold, et al., 2012 S. 3).....	138
Abbildung 55:	Supercontainer - verdichteter Bentonit im perforierten Behälter (Gibb, 2016 S. 11)	141
Abbildung 56:	Quellversuche an hochverdichtetem Na-Bentonit im perforierten Behälter nach 1 h (a), nach 8 h (b) und nach 24 h (c) (Pusch, et al., 1987 S. 4)	141
Abbildung 57:	Rekristallisierte eutektische Salzschnmelze (HITEC salt) (Minkley, et al., 2017 S. 104)	144
Abbildung 58:	Temperaturverteilung beim Rock Welding in einem Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,66 m bei einer 12 kW Heizung (Grenze fest-flüssig: ca. 700 °C) (Beswick, et al., 2014 S. 63).....	145
Abbildung 59:	Vorschlag für ein Bohrlochraster. Die weißen Punkte stellen Erkundungsbohrungen dar, die auch für Monitoringzwecke nutzbar sein sollen; blau und gelb Einlagerungsbohrungen. Der Abstand zwischen den Bohrungen beträgt immer 50 m. (Bracke, et al., 2016 S. 131)	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassende Gegenüberstellung der betrachteten Endlagerkonzepte	27
Tabelle 2:	Themen, die in mindestens einem Konzept nicht rechtskonform sind.....	35
Tabelle 3:	Zusammenstellung der Dreistufentheorie in der Rechtsprechung zur Technik	37
Tabelle 4:	Hakenlast, Tragkraft und Drehtischdurchgang verschiedener „großer“ Bohranlagen.....	50
Tabelle 5:	Volumenströme und Pumpendrucke für eine 5 000 m tiefe Bohrung mit verschiedenen Durchmessern	50
Tabelle 6:	IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 1	51
Tabelle 7:	IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 2	52
Tabelle 8:	IADC-Code für Rollenmeißel: Digit 3	52
Tabelle 9:	Rollenmeißel einiger Hersteller für Hartgestein mit max. erhältlichem Durchmesser und benötigtem Andruck.....	54
Tabelle 10:	Durchmesser eines PDC-Meißels für Hartgestein der Firma Schlumberger	55
Tabelle 11:	Ergebnisse der Festigkeitsbetrachtung der 14 „ Rohrtour	67
Tabelle 12:	Geometrische und mechanische Eigenschaften von Casings nach API (bis 20“) (Halliburton, 2012) und Casings der Firma Vallourec GmbH (24“ und 26“) (Vallourec Oil and Gas France, 2016)	69
Tabelle 13:	Tiefbohrzemente nach API: Verwendung und Zusammensetzung (Lotzwick, 2007)	73
Tabelle 14:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren nach (Peiffer, et al., 2011)	86
Tabelle 15:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren nach (Peiffer, et al., 2011) und (DBETEC, 2011)	87
Tabelle 16:	Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren nach (BMUB, 2015a)	88
Tabelle 17:	Chemische Zusammensetzung (in Massen-% nach (DIN EN 10088-3, 2014)) von Stahl der Sorte X6CrNiMoTi17-12-2	90
Tabelle 18:	Korrosionsversuche im Salzbergwerk. Proben im Salz bei 300 °C (Hepp, et al., 1969)	93
Tabelle 19:	Kenndaten des Behälters DBC-R für einen Bohrlochdurchmesser von 90 cm (Bracke, et al., 2016)	94
Tabelle 20:	Auswirkung der Endteufe des Bohrloches auf die Wandstärke des Endlagerbehälters (Werte übernommen aus (Bracke, et al., 2016))	96
Tabelle 21:	Anzahl von Brennelementen (BE) und Brennstäben (BS) aus DWR, SWR und WWER-Leistungsreaktoren	97
Tabelle 22:	Auslegung Bohrloch und Behälter für einen Bohrlochenddurchmesser von 17,5“ mit Vergleich zum 90 cm Bohrloch aus (Bracke, et al., 2016)	101
Tabelle 23:	Beispiel für die Parameter eines Stahldrahtseiles nach DIN EN 12385-4 ..	123
Tabelle 24:	Beispiel für die Parameter eines Faserseiles nach DIN EN ISO 10325	126
Tabelle 25:	Chancen und Risiken	152

Anhang 1: Berechnung benötigter Volumenströme und Pumpendrucke

Zur Berechnung des Volumenstroms, der für eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 0,5 m/s im Ringraum benötigt wird, wird folgende Formel verwendet:

$$\dot{V} = v_{RR} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{BL}^2 - D_A^2)$$

Formelzeichen	Parameter	Wert und Einheit
v_{RR}	Geschwindigkeit der Bohrspülung im Ringraum	0,5 m/s
D_{BL}	Innendurchmesser des Bohrloches	0,4445 m bzw. 1,0668 m
D_A	Außendurchmesser des Gestänges	0,127 m

Für eine Bohrung mit dem Durchmesser von 17 1/2" (44,45 cm, nach heutigem Stand der Technik im Hartgestein machbar) wird ein Pumpenvolumenstrom von 0,072 m³/s (259,2 m³/h) benötigt, für eine Bohrung mit dem Durchmesser von 42" (106,68 cm) ein Volumenstrom von 0,441 m³/s (1 587,6 m³/h).

Der benötigte Pumpendruck setzt sich zusammen aus den Druckverlusten, welche beim Pumpen der Bohrspülung durch das Bohrgestänge, die vorhandenen Verbinder, den Bohrmotor und die Meißeldüsen auftreten, sowie den nötigen Druck, um die Spülung durch den Ringraum wieder an die Oberfläche zu befördern:

$$p_{Pumpe} = \Delta p_{Gestänge} + \Delta p_{Verbinder} + \Delta p_{Motor} + \Delta p_{Meißel} + \Delta p_{Ringraum}$$

Der Druckverlust im Gestänge ergibt sich nach folgenden Formeln:

$$\Delta p_{Gestänge} = 0,81 \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho}{D_I^5}$$

$$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{1,46k}{D_I} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}$$

$$Re = \frac{\dot{V} \cdot 4 \cdot \rho}{\eta \cdot \pi \cdot D_I}$$

Formelzeichen	Parameter	Wert und Einheit
L	Länge des Gestänges	5 000 m
\dot{V}	Volumenstrom	0,072 m³/s bzw. 0,441 m³/s
ρ	Dichte der Bohrspülung	1 200 kg/m³
D_I	Innendurchmesser des Gestänges	0,11 m
k	Rauhigkeitsbeiwert des Gestänges	$4 \cdot 10^{-5}$ m
η	Viskosität der Bohrspülung	0,05 Pa·s

Der Druckverlust im Bohrgestänge beträgt in der 17 ½“-Bohrung etwa 42,7 MPa; in der 42“-Bohrung 1 124,4 MPa.

Der Druckverlust, welcher durch Durchmesserverringerungen innerhalb des Bohrgestänges im Bereich der Verbinder entsteht, wird vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass Verbinder verwendet werden, die nach außen verstärkt sind.

Der Druckverlust, welcher durch den Bohrmotor entsteht, wird dem Datenblatt (Baker Hughes, 2016) entnommen und beträgt 8 MPa.

Der Druckverlust an den Meißeldüsen wird wie folgt berechnet:

$$\Delta p_{\text{Meißel}} = \frac{\dot{V}^2 * \rho}{2 * \alpha^2 * A_D^2}$$

Formelzeichen	Parameter	Wert und Einheit
\dot{V}	Volumenstrom	0,072 m³/s bzw. 0,441 m³/s
ρ	Dichte der Bohrspülung	1 200 kg/m³
α	Durchflusszahl (zyl. Düse)	0,65
A_D	Düsenfläche	0,002 m²

An den Düsen des Bohrmeißels tritt in der 17 ½“-Bohrung ein Druckverlust von 1,8 MPa; in einer 42“-Bohrung von 69 MPa auf.

Der Druckverlust im Ringraum wird überschlägig wie folgt berechnet:

$$\Delta p_{\text{Ringraum}} = 0,81 * \frac{\lambda * L * \dot{V}^2 * \rho}{D_h^5}$$

$$\lambda = 0,02 + \frac{1,7}{\sqrt{Re_{RR}}}$$

$$Re_{RR} = \frac{\rho * v_{RR} * D_h}{\eta}$$

Formelzeichen	Parameter	Wert und Einheit
L	Länge des Gestänges	5 000 m
D_h	hydraulischer Durchmesser des Ringraumes ($D_h = D_{BL} - D_A$)	0,3175 m bzw. 0,9398 m
v_{RR}	Geschwindigkeit der Bohrspülung im Ringraum	0,5 m/s
η	Viskosität der Bohrspülung	0,05 Pa·s

Der Druckverlust im Ringraum beträgt für eine 17 ½“-Bohrung knapp 1,8 MPa und in einer 42“-Bohrung ca. 0,3 MPa.

Der Gesamtdruckverlust, welcher von den Spülpumpen bewältigt werden muss, beträgt in einer 17 ½“-Bohrung 54,3 MPa und in einer 42“-Bohrung 1 201,7 MPa.

Anhang 2: Werkstoffdatenblatt von Stahl - X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571 (Deutsche Edelstahlwerke, 2015)

Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571

NICHTTROTENDER AUSTENITISCHER STAHL

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH DIN EN 10088-3)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
min.	-	-	-	-	-	16,5	10,5	2,0	5xC
max.	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	18,5	13,5	2,5	0,7

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH ASTM A276)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	N
min.	-	-	-	-	-	16,0	10,0	2,0	5x(C+N)	-
max.	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	18,0	14,0	3,0	0,7	0,1

Kundenspezifische Einschränkungen der Normanalyse sind nach Rücksprache mit der Deutschen Edelstahlwerke GmbH möglich.

VERWENDUNGSHINWEISE

Acidur 4571 ist hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit und der mechanisch-technologischen Werte vergleichbar mit Acidur 4404. Falls hohe Festigkeiten bei hohen Temperaturen gefordert werden, ist Acidur 4057 der zu bevorzugende Werkstoff. Durch den geringen Kohlenstoffgehalt ist Acidur 4571 auch ohne eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen einsetzbar.

ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

Korrosionsbeständigkeit	sehr gut
Mechanische Eigenschaften	mittel
Schmiedbarkeit	gut
Schweißbarkeit	ausgezeichnet
Spanbarkeit	mittel bis schlecht

NORMEN UND BEZEICHNUNGEN

DIN EN 10088-3	1.4571 X6CrNiMoTi17-12-2
AISI	316Ti
UNS	S31635
B.S.	320S18, 320S31
JIS	SUS316Ti
AFNOR	Z6CNDT17-12
SS	2350
GOST	10Ch17N13M2T
UNE	F.3535

BESONDERE EIGENSCHAFTEN

- » magnetische Eigenschaften $\mu_r \leq 1,3$
- » für Tieftemperaturen geeignet
- » bis 550°C verwendbar

02/12/2015 2015-0050 Seite 01

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE
Providing special steel solutions



Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte in kg/dm ³	8,0
Elektrischer Widerstand bei 20°C in (Ω mm ²)/m	0,75
Magnetisierbarkeit	gering ¹
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C in W/(m K)	15
Spezifische Wärmekapazität bei 20°C in J/(kg K)	500
E-Modul in GPa bei	
» 20°C	200
» 100°C	194
» 200°C	186
» 300°C	179
» 400°C	172
» 500°C	165
Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient in 10 ⁻⁶ K ⁻¹	
» 20°C - 100°C	16,5
» 20°C - 200°C	17,5
» 20°C - 300°C	18,0
» 20°C - 400°C	18,5
» 20°C - 500°C	19,0

¹ Der Werkstoff kann im abgeschreckten Zustand leicht magnetisierbar sein. Mit steigender Kaltverformung nimmt die Magnetisierbarkeit zu.

VERARBEITUNG

Spangebende Verarbeitung	ja
Freiform- und Gesenkschmieden	ja
Kaltumformung	ja
Kaltstauchen	ja
Polierbarkeit	nein

TEMPERATUREN FÜR WARMUMFORMUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG

WARMUMFORMUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
1200 - 900	Luft

WÄRMEBEHANDLUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
Lösungsglühen (+AT) 1020 - 1120	Luft, Wasser

ANWENDUNGSGEBIETE

- » Apparate- und Rohrleitungsbau
- » Bauindustrie
- » Chemische Industrie
- » Lebensmittelindustrie
- » Maschinenbau
- » Medizinische und pharmazeutische Industrie
- » Schiffsbau

Hinweis: Lieferung gemäß bauaufsichtlicher Zulassung Z-30.3-6 und Druckbehälternorm DIN EN 10272.

02/12/2015 2015-0050 Seite 02

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571

KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT (PREN = 23,1 – 26,7)

Acidur 4571 zeigt eine gute Korrosionsbeständigkeit in den meisten natürlichen Wässern bei geringer bis mittlerer Konzentration von Chloriden, Salz und Salzsäure sowie organischen Säuren. Da Acidur 4571 auch nach dem Schweißen beständig gegen interkristalline Korrosion ist, genügt er folgenden genormten Prüfverfahren: AFNOR NF 05-159, ASTM A262 Practice E und DIN EN ISO 3651 Teil 2.

Angriffsmittel	Konzentration	Temperatur	Beständigkeit
NaCl	gesättigt	20°C	Gefahr der Lochkorrosion
Meerwasser	-	20°C	Gefahr der Lochkorrosion
Wasserdampf	-	400°C	beständig
Salpetersäure	7 %	20°C	beständig
Schwefelsäure	1 %	20°C	beständig
Ameisensäure	10 %	20°C	beständig

Grundlage dieser Korrosionsbeständigkeitsangaben sind Laborversuche mit reinen Angriffsmitteln und optimalen Probenkörpern. Hinweis: Bei diesen Ergebnissen handelt es sich um eine unverbindliche Angabe.

SCHWEISSEN

Acidur 4571 ist mit und ohne Zusatzwerkstoff mit allen üblichen Verfahren schweißbar. Ist ein Schweißzusatz notwendig, verwenden Sie 1.4430. Nach dem Schweißen ist keine Wärmebehandlung erforderlich. Die Zwischenlagentemperatur sollte 200°C nicht überschreiten. Anlauffarben müssen mechanisch oder chemisch entfernt werden.

SCHMIEDEN

Üblicherweise wird auf Temperaturen zwischen 1150°C und 1180°C vorerwärmt. Das Schmieden findet zwischen 1180°C und 950°C statt. Im Anschluss an das Schmieden erfolgt eine Abkühlung in Wasser.

02/12/2015 2015-0050 Seite 03

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT
X6CrNiMoTi17-12-2
1.4571
MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN BEI RAUMTEMPERATUR
IM LÖSUNGSGEGLÜHTEN ZUSTAND (+AT) NACH DIN EN 10088-3

Ø in mm	Härte in HB	$R_{p0,2}$ in MPa	$R_{p1,0}$ in MPa	R_m in MPa	A_5 in %		AV in J	
					längs	quer	längs	quer
≤ 160	≤ 215	≥ 200	≥ 235	500 - 700	≥ 40	-	≥ 100	-
160 < d ≤ 250	≤ 215	≥ 200	≥ 235	500 - 700	-	≥ 30	-	≥ 60

Für dickere Abmessungen (d > 250 mm) müssen die mechanischen Eigenschaften vereinbart werden oder die Lieferung geschieht in Anlehnung an die angegebenen Werte.

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN BEI RAUMTEMPERATUR
IM LÖSUNGSGEGLÜHTEN ZUSTAND (A) NACH ASTM A276

Ø in mm	$R_{p0,2}$ in MPa	R_m in MPa	$A_{2,0}$ in %	Z in %
alle	≥ 205	≥ 515	≥ 40	≥ 50

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN BEI ERHÖHTEN TEMPERATUREN
IM LÖSUNGSGEGLÜHTEN ZUSTAND (+AT) NACH DIN EN 10088-3

Temperatur in °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
$R_{p0,2}$ in MPa	≥ 185	≥ 175	≥ 165	≥ 155	≥ 145	≥ 140	≥ 135	≥ 131	≥ 129	≥ 127
$R_{p1,0}$ in MPa	≥ 215	≥ 205	≥ 192	≥ 183	≥ 175	≥ 169	≥ 160	≥ 160	≥ 158	≥ 157

Abweichend von den mechanisch-technologischen Eigenschaften der Norm sind kundenspezifische Werte nach der Abstimmung mit der Deutschen Edelstahlwerke GmbH möglich.

02/12/2015 2015-0050 Seite 04

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571

SPANENDE BEARBEITUNG

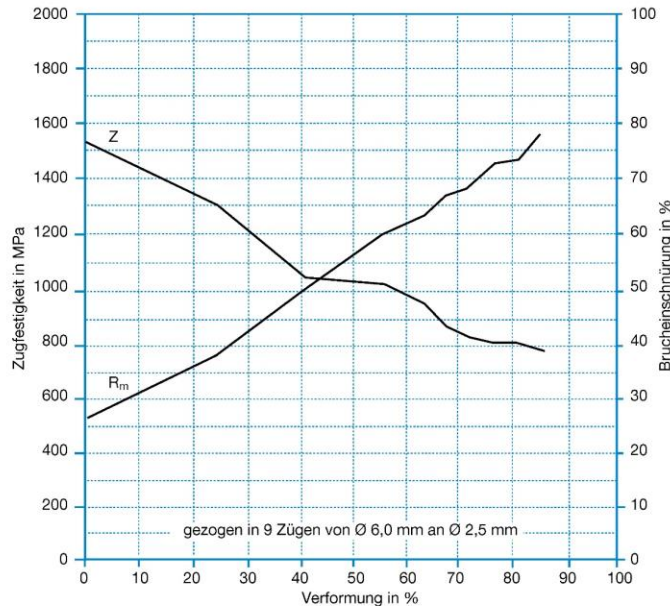
Durch das Zulegieren von Titan kommt es zur Bildung von Titankarbonitriden, wodurch der Werkzeugverschleiß bei der Zerspanung von Acidur 4571 erhöht wird.

SCHNITTBEDINGUNGEN

Bearbeitungsart	Schnittgeschwindigkeit in m/min	Spantiefe in mm	Vorschub in mm/U	Werkzeugwinkel		
				Spanwinkel	Freiwinkel	Neigungswinkel
Bohren	40 - 100	-	0,05 - 0,16	140° Spitzenwinkel	140° Spitzenwinkel	-
Drehen	70 - 175	6	0,1 - 0,5	10° - 16°	6° - 8°	-4° und 4°
Fräsen	125 - 260	-	0,15 - 0,3	-	-	-

Schnittdaten sind als Anhaltswerte zu sehen und dienen nur zu einer Einschätzung der Bearbeitungsparameter.
Analysevarianten zur Optimierung der Zerspanungseigenschaften auf Anfrage.

VERFESTIGUNGSDIAGRAMM



02/12/2015 2015-0050 Seite 05

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE



Acidur 4571

WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571

LIEFERMÖGLICHKEITEN

Walzdraht	Ø 5,5 - 30,0 mm
Stabstahl	Ø 7,0 - 500,0 mm
Blankstahl in Stäben	Ø 2,0 - 250,0 mm
Blankstahl in Ringen	Ø 2,0 - 20,0 mm

Ausführungen: lösungsgeglüht abgeschreckt, gebeizt, gezogen, geschmiedet, gewalzt, gerichtet, geschält und geschliffen.
Abmessungen > 500 mm nach Rücksprache.

Unser gesamtes Lieferprogramm (Rohblöcke, Strangguss etc.) finden Sie in der Broschüre „Hightech-Lösungen für die Welt von morgen“ auf unserer Homepage www.dew-stahl.com.

Wir behalten uns ausdrücklich vor, die Inhalte unserer Datenblätter ohne gesonderte Ankündigung jederzeit zu verändern, zu löschen und/oder in sonstiger Weise zu bearbeiten. Irrtümer und Druckfehler vorbehalten.

Deutsche Edelstahlwerke GmbH
Austr. 4
58452 Witten
Fon: +49 (0) 2302 29 - 0
Fax: +49 (0) 2302 29 - 4000

info@dew-stahl.com
www.dew-stahl.com

02/12/2015 2015-0050 Seite 06

SCHMOLZ + BICKENBACH GROUP



Anhang 3: Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis von BSK-Behältern nach EC 3

Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis von BSK-Behältern nach EUROCODE 3

Technische Daten:

Werkstoff: **austenitischer Stahl N° TK 1.4571**

E-Modul: $E := 210 \text{ GPa}$

Streckgrenze: $f_{yk} := 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Dichte Lösung im Bohrloch: $\gamma_{fluid} := 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Abmessungen: Behälter

Durchmesser: $D := 265 \text{ mm}$ $r := \frac{D}{2} = 0.133 \text{ m}$

Länge: $l := \frac{5.6 \text{ m}}{1} = 5.6 \text{ m}$

Dicke: $t := 4.5 \text{ cm}$ $V_b := \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l}{4} = 0.309 \text{ m}^3$

Bemessungswerte der axialen Spannungen:

Anzahl Behälter im Bohrloch: $n := 180$

Schwerkraft: $g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Masse eines Behälters: $m_b := 2.47 \text{ tonne}$

Gewicht unter Auftrieb: $G_{auftrieb} := m_b \cdot g - \gamma_{fluid} \cdot V_b \cdot g = 20.292 \text{ kN}$

Gesamtgewicht: $G_{tot} := n \cdot G_{auftrieb} = (3.653 \cdot 10^3) \text{ kN}$

Axialspannung im Behälterrering: $\sigma_{x.Ek} := \frac{G_{tot}}{\pi \cdot (2 \cdot r \cdot t) \cdot t} = 117.437 \text{ MPa}$

Bemessungswerte der Umfangsspannungen:

Teufe: $h := 5000 \text{ m}$

Flüssigkeitsdruck im Bohrloch: $E_{fluid} := \gamma_{fluid} \cdot g \cdot h = 63.765 \text{ MPa}$

Umfangsspannung im Behälterrering: $\sigma_{\theta.Ek} := E_{fluid} \cdot \frac{r}{t} = 187.753 \text{ MPa}$

Mit PTC Mathcad Express erstellt. Weitere Informationen finden Sie unter www.mathcad.com.

Einzelnachweis gegen Umfangsbeulen:

Dimensionsloser Längenparameter: $\omega := \frac{l}{\sqrt{r \cdot t}} = 72.523$

Wegen der massiven Deckel- und Bodenkonstruktion des Behälters kann von einer vollen Einspannung des zylindrischen Behältermantels ausgegangen werden. Somit gilt die Randbedingung BC 1 nach EC 3 Teil 1-6

Tabelle 4. Umfangsbeulfaktoren C_θ für mittellange und $C_{\theta s}$ für kurze Zylinder nach EN 1993-1-6

Fall	Zylinderende	Randbedingung	Wert von C_θ	Wert von $C_{\theta s}$
1	Ende 1 Ende 2	BC 1 BC 1	1,5	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$

Umfangsbeulfaktor: $C_\theta := 1.5$

Prüfung, dass es sich um einen "mittellangen" Zylinder handelt:

$$\frac{\omega}{C_\theta} = 48.348 > 20 \text{ eingehalten} \quad 1.63 \cdot \frac{r}{t} = 4.799 \text{ wird nicht eingehalten !!!!}$$

ideale Umfangsbeulspannung: $\sigma_{\theta Rcr} := 0.92 \cdot E \cdot \frac{C_\theta}{\omega} \cdot \frac{t}{r} = (1.357 \cdot 10^3) \text{ MPa}$

bezogene Schalenschlankheitsgrad: $\lambda_\theta := \sqrt[2]{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta Rcr}}} = 0.384$

elastischer Imperfektionsfaktor: $\alpha_\theta := 0.65$ für Umfangsdruck

teilplastischer Grenzsclankheitsgrad: $\beta := 0.6$ für Kreiszyylinder

$$\lambda_{\theta p} := \sqrt[2]{\frac{\alpha_\theta}{1 - \beta}} = 1.275$$

$\lambda_\theta < \lambda_0 = 0.4$ (für Umfangsdruck) $< \lambda_{\theta p}$: $\chi_\theta := 1$

Bemessungs-Umfangsbeulspannung: $\sigma_{\theta Rd} := \chi_\theta \frac{f_{yk}}{1.07} = 186.916 \text{ MPa}$

Nachweis des Widerstandes gegen Umfangsbeulen:

$\sigma_{\theta Ek} = 187.753 \text{ MPa} < \sigma_{\theta Rd} = 186.916 \text{ MPa}$ **Nachweis erfüllt**

$Ausnutzungsgrad := \frac{\sigma_{\theta Ek}}{\sigma_{\theta Rd}} = 1.004$

$Tragreserve := 1 - Ausnutzungsgrad = -0.004$

Mit PTC Mathcad Express erstellt. Weitere Informationen finden Sie unter www.mathcad.com.

Einzelnachweis gegen Meridianbeulen:

ideale Meridianbeulen: $\omega = 72.523$ $0.5 \cdot \frac{r}{t} = 1.472$

$\omega > 1,7$: Annahme eines mittellangen Zylinders

$\omega > 0.5 \cdot \frac{r}{t}$: Annahme nicht erfüllt !!!!

$$C_x := 1$$

$$\sigma_{x.Rcr} := 0.605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r} = (4.315 \cdot 10^4) \text{ MPa}$$

bezogene Schlankheitsgrad: $\lambda_x := \sqrt[2]{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x.Rcr}}} = 0.068$

elastischer Imperfektionsfaktor: $Q := 40$ Herstelltoleranz-Qualitätsklasse A

$$\alpha_x := \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{1}{Q} \cdot \sqrt[2]{\frac{r}{t}} \right)^{1.44}} = 0.608$$

teilplastischer Grenzsclankheitsgrad: $\lambda_{xp} := \sqrt[2]{\frac{\alpha_x}{1 - \beta}} = 1.232$ $\beta := 0.6$
für Kreiszylinder

$\lambda_x < \lambda_0 = 0.2$ (für Axialdruck) $< \lambda_{xp} = 1.233$, also: $\chi_x := 1$

Bemessungs-Meridianbeulspannung: $\sigma_{x.Rd} := \chi_x \frac{f_{yk}}{1.1} = 181.818 \text{ MPa}$

Nachweis des Widerstandes gegen Meridianbeulen:

$$\sigma_{x.Ek} = 117.437 \text{ MPa} < \sigma_{x.Rd} = 181.818 \text{ MPa} \text{ Nachweis erfüllt}$$

$$\text{Ausnutzungsgrad} := \frac{\sigma_{x.Ek}}{\sigma_{x.Rd}} = 0.646$$

$$\text{Tragreserve} := 1 - \text{Ausnutzungsgrad} = 0.354$$

Mit PTC Mathcad Express erstellt. Weitere Informationen finden Sie unter www.mathcad.com.

Interaktionsnachweis

$$k_x := 1.25 + 0.75 \cdot \chi_x = 2$$

$$k_\theta := 1.25 + 0.75 \cdot \chi_\theta = 2$$

$$k_i := (\chi_\theta \cdot \chi_x)^2 = 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{x.Ek}}{\sigma_{x.Rd}} \right)^{k_x} - k_i \cdot \left(\frac{\sigma_{x.Ek}}{\sigma_{x.Rd}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\theta.Ek}}{\sigma_{\theta.Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta.Ek}}{\sigma_{\theta.Rd}} \right)^{k_\theta} = 0.777 < 1 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

Mit PTC Mathcad Express erstellt. Weitere Informationen finden Sie unter www.mathcad.com.