

## Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste – Results of the Project CREATIEF

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 considerations is the disposal of

spent fuel elements in “deep boreholes”. Within the scope 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, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, project numbers: 02E11526A and 02E11526B), “deep boreholes” were considered to be boreholes with a depth of 3,000 to 5,000 m from ground level where the emplacement area is located in crystalline rock (crystalline bedrock, Figure 1).

This article gives an overview of the results of the research project CREATIEF. It has undergone a peer review process.

## Endlagerung hochradioaktiver Abfallstoffe in tiefen Bohrlöchern – Ergebnisse des Projekts CREATIEF

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 einzigem 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.

Jedoch gab es im Ausland auch Überlegungen zu anderen Entsorgungsmöglichkeiten. Eine dieser Überlegungen zur Entsorgung ist die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in „tiefen Bohrlöchern“. Unter „tiefen Bohrlöchern“ wurden bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens CREATIEF (Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen Bohrlöchern, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen: 02E11526A und 02E11526B) Bohrlöcher mit einer Tiefe von 3.000 bis 5.000 m ab der Geländeoberfläche verstanden, bei denen der Einlagerungsbereich im Kristallingestein (kristallinen Grundgebirge) liegt (Bild 1).

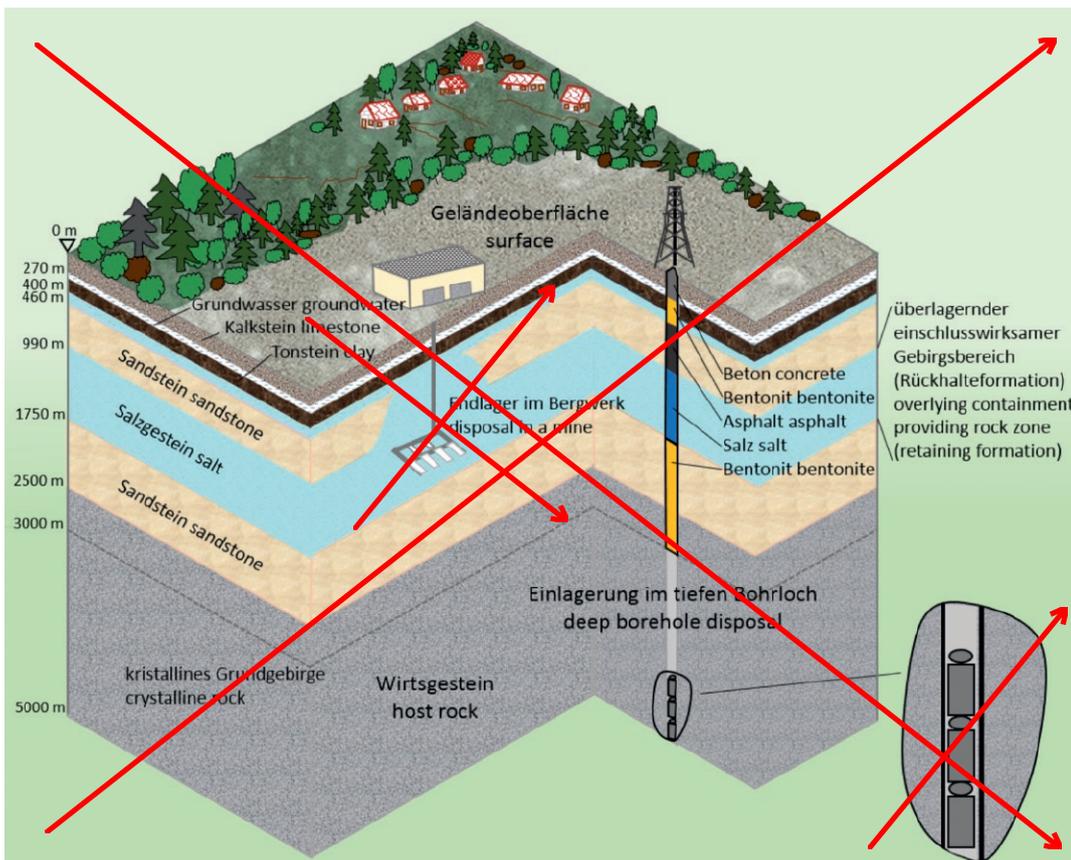
Der vorliegende Beitrag gibt eine Übersicht zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens CREATIEF. Er wurde einem Peer Review-Verfahren unterzogen.

### 1 Aim of the research project CREATIEF

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 German Commission on the Storage of High-Level Radioactive Waste (Endlagerkommission) broached due to the discussion that has been underway in the USA in recent years (1). Preliminary considerations and/or concepts regarding deep borehole disposal exist in Sweden and the USA and have been made in Germany by Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Within the scope of the research project

### 1 Ziel des Forschungsvorhabens CREATIEF

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 (1). Zur Einlagerung in tiefen Bohrlöchern gibt es Vorüberlegungen bzw. Konzepte in Schweden und den USA sowie in Deutschland von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Im Forschungsvorhaben CREATIEF wurde die Option „Endlagerung in



Peer Review Kritik von Ing. Goebel Endlager-Fachplaner. >>> CREATIEF – ein baulich NICHT durchführbarer Vorschlag !

Mit der Rotary Bohr-Technik der Erdöl-Industrie erreicht man NIEMALS Durchmesser von 90 cm in Teufen von – 5.000 Metern im Festgestein !

Und hört endlich auf uns mit Euren dämlichen unmasstäblichen Kinder-Zeichnungen zu belästigen !

~~CREATIEF, 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 previous research reports/studies;~~
- ~~2) description of the key aspects of deep borehole disposal and illustration of potential for improvement; and~~
- ~~3) conceptual assessment of the opportunities and risks of deep borehole disposal.~~

## ~~2 Legal requirements~~

~~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 (2, 3, 4 etc.) were listed 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. For detailed information, please refer to the research report (5).~~

## ~~3 Assumptions about the geological conditions~~

~~Within the scope of this research project, two geologic profiles were derived, which served as references for geologic conditions that may be considered as candidates for final disposal in Germany (Figure 2). Disposal takes place at depths between 3,000~~

tiefen Bohrlöchern“ weiter mit folgenden drei Zielen untersucht:

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

## ~~2 Rechtliche Vorgaben~~

Zunächst wurden die in Schweden von der Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), in 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 (u.a. (2, 3, 4)) 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. Für detaillierte Ausführungen hierzu wird auf den Forschungsbericht (5) verwiesen.



and 5,000 m in presumably fractured but stable crystalline rock. Just like for disposal in mines, it has to be demonstrated that radionuclides are not able to 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 (6)). Even though these layers have a lower stability, they are considered for final disposal in, e.g., France and Switzerland, because of their tightness. The clay or salt layer must be so widespread (Figure 1) 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 (Figure 1).

#### 4 The state of conventional deep drilling technology

After the geologic profiles for Germany 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 (7), 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 (8), would reduce the number of boreholes to an ac-

### 3 Annahmen zu den geologischen Verhältnissen

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden zwei geologische Profile abgeleitet, die als Referenz für mögliche geologische Verhältnisse in Deutschland bei den weiteren Überlegungen zur Einlagerung dienen (Bild 2). Die Einlagerung erfolgt in 3.000 bis 5.000 m im voraussichtlich klüftigen aber stabilen Kristallingestein. Auch bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern muss nachgewiesen werden, dass Radionuklide nicht bzw. nur in ausreichend geringem Maß aus dem Einlagerungsbereich entweichen können. Deshalb muss bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, wie auch bei der Endlagerung in einem Bergwerk, 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) (6)). Diese weisen zwar eine geringere Stabilität auf, werden aber aufgrund ihrer Dichtigkeit für die Endlagerung, z.B. in Frankreich und in der Schweiz, in Betracht gezogen. Die Ton- bzw. Salzschieht muss so flächig verbreitet sein (Bild 1), dass auch bei einer Umströmung im Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren keine bzw. nur in ausreichend geringem Maß 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 (Bild 1).

### 4 Zum Stand der Tiefbohrtechnik

Nachdem geologische Referenzprofile für Deutschland abgeleitet wurden, 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. Nach derzeitigem Stand der Technik sind Bohrungen bis zu einem Durchmesser von 17,5" (44,5 cm) in 5.000 m Tiefe im Kristallin möglich. Für noch größere Bohrungen müssten vor allem größere Rollenmeißel entwickelt werden. Alternativ müssten Bohrverfahren im Hartgestein, z. B. das Elektroimpulsverfahren (7), entwickelt bzw. weiterentwickelt werden. Ein Bohrdurchmesser von etwa 35,4" (90 cm), wie er im Bericht der GRS (8) als sinnvoll angesehen wurde, lässt erwarten, dass die Anzahl der Bohrungen auf ein akzeptables Maß beschränkt werden kann (voraussichtlich 31 Stück). Allerdings deckt der derzeitige Stand der Technik so große Bohrdurchmesser bis in eine Tiefe von 5.000 m nicht ab. Die Anpassung der tiefbohrtechnischen Ausrüstung an Bohrungen im Hartgestein und mit wesentlich größeren Durchmessern als 17,5" (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 Drilling (9) oder Mono Bore Verfahren (10)).

Zum Stand der Tiefbohrtechnik kann festgestellt werden, dass nahezu alle bisherigen Entwicklungen darauf abzielten, Öl- und

~~ceptable amount (presumably 31). However, such large borehole diameters up to a depth of 5,000 m 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 drilling (9) or mono-bore method (10)).~~

~~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 8½", i.e., approximately 10,2 cm to 21,6 cm.~~

~~For disposal in deep boreholes, 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.~~

## ~~5 Disposal container~~

~~Based on the waste amounts to be disposed of which consists of~~

- ~~• spent fuel of nuclear power plants;~~
- ~~• spent fuel of prototype and research reactors;~~
- ~~• vitrified waste from reprocessing of spent fuel of nuclear power plants, and~~
- ~~• structural components of spent fuel of nuclear power plants~~

~~taken from the National Waste Management Plan 2022 (11) – the disposal containers were considered. Regarding disposal at depths between 3,000 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; and~~
- ~~• requirements regarding the dimensions of the container due to the borehole diameter.~~

~~In the disposal area, temperatures between approximately 100 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 (2) cannot be met in deep borehole disposal. The pressure on the container as considered in the research project CREATIEF is a result of the load of the stacked containers (Figure 1) and the hydrostatic pressure of~~

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 8½", also ca. 10,2 bis 21,6 cm.

Bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern erfolgen alle Bohrarbeiten, bevor radioaktives Material zur Bohrung angeliefert wird. Die Bohrung kann damit vollständig ohne strahlenschutztechnische Einschränkungen abgeteuft 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.

## **5 Der Endlagerbehälter**

Auf Basis des einzulagernden Abfallmengengerüsts, welches aus

- ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren,
- ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototypkernkraftwerken und Forschungsreaktoren,
- Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren sowie
- Strukturteilen der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

besteht – ergibt sich aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm für das Jahr 2022 (11) – wurden Betrachtungen zum Endlagerbehälter durchgeführt. Die Anforderungen an den Endlagerbehälter bei einer Einlagerung in ~~3.000 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 und~~
- die Anforderungen an die Abmaße des Behälters aufgrund des Bohrlochdurchmessers.

Im Einlagerungsbereich sind Temperaturen zwischen etwa ~~100 und 160 °C~~ zu erwarten. Die derzeit im Standortauswahlgesetz (2) geforderte Grenztemperatur von 100 °C an der Behälteraußenfläche kann bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern systembedingt nicht eingehalten werden. Der im Rahmen des Forschungsvorhabens CREATIEF berücksichtigte Druck auf den Behälter ergibt sich aus der Auflast der gestapelten Behälter (s. Bild 1) und dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule (Bohrloch muss für den Betrieb aus Stabilitätsgründen flüderfüllt sein). Der Gebirgsdruck ist in dem Konzept nicht berücksichtigt, da angenommen wurde, dass das Casing in Verbindung mit dem flüderfüllten Bohrloch den Gebirgsdruck solange übernimmt, bis der Bohrlochverschluss vollständig in Funktion ist. Aufgrund der genannten Anforderungen wurden die Randbedingungen für einen Behälter abgeleitet und ein Behälter überschlägig bemessen. Danach werden die Behälter für ein 17,5"-Bohrloch voraussichtlich ~~26,5 cm Außendurchmesser und 17,5 cm Innendurchmesser aufweisen.~~ Für ein 35,4"-Bohrloch ergeben sich der Behälteraußen-

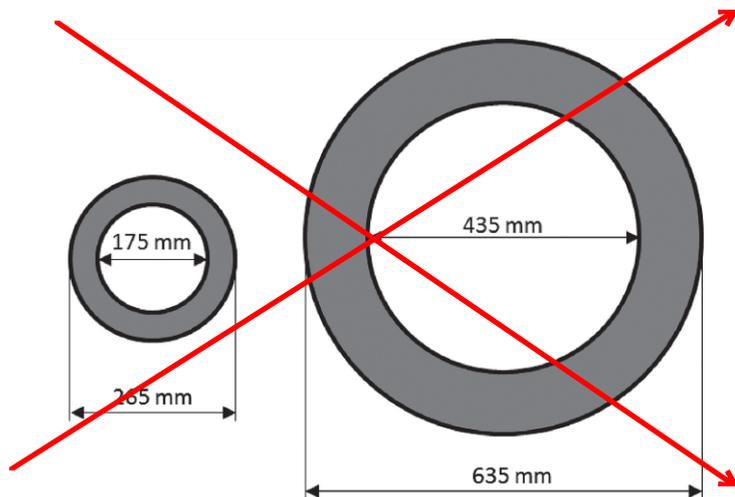


Fig. 3. Inner and outer diameters of the container for the 17.5" borehole (left) and 35.4" borehole (right).  
Bild 3. Behälterinnen- und Behälteraußendurchmesser für das 17,5" Bohrloch (links) und das 35,4" Bohrloch (rechts).

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 (Figure 3). 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.

## 6 Number of boreholes versus borehole diameter

Two concepts were considered for the disposal in deep boreholes. They are described below.

### 6.1 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 (Figures 3, 4). The length of the container was assumed to be 5.6 m based on the length of the fuel rods of spent fuel elements from power reactors. 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, approximately 130 to 150 boreholes would be required. The containers described above can be stacked to a height of approximately 1,000 m. A larger stack height, e.g. 2,000 m, was not possible in the design, as this would have led to an excessive, meaningless wall thickness in relation to the inner diameter of the container. Here, there is potential for further optimization.

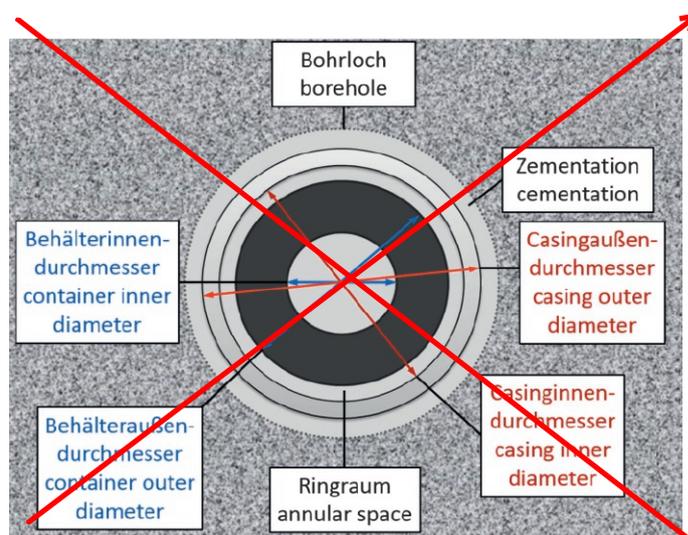


Fig. 4. Schematic representation of interdependent diameters in the emplacement borehole. // Bild 4. Schematische Darstellung der voneinander abhängigen Durchmesser im Einlagerungsbohrloch.

durchmesser zu 63,5 cm und der Behälterinnendurchmesser zu 43,5 cm (Bild 3). 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.

## 6 Anzahl der Bohrlöcher versus Bohrl Lochdurchmesser

Insgesamt wurden zwei Konzepte für eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern betrachtet, die nachfolgend beschrieben werden:

### 6.1 Konzept 1: Bohrdurchmesser 17,5" (44,5 cm) in 5.000 m Tiefe

Setzt man einen maximalen Bohrdurchmesser von 17,5" an, ist aufgrund des notwendigen Casings und des erforderlichen Ringraums nur ein Behälteraußendurchmesser von 26,5 cm (Innendurchmesser 17,5 cm) möglich (Bilder 3, 4). Die Länge des Behälters wurde zu 5,6 m angenommen, basierend auf der Länge der Brennstäbe von ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren. Bei einer Ausnutzung des Innendurchmessers des Behälters für die Einlagerung der Brennstäbe von 70 bis 80% werden etwa 23.000 bis 27.000 Behälter benötigt. 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. Eine größere Stapelhöhe, z.B. 2.000 m, war bei der Bemessung nicht möglich, da dies zu einer zu hohen, nicht mehr sinnvollen Wandstärke im Verhältnis zum Innendurchmesser des Behälters geführt hätte. Hier besteht weiteres Optimierungspotential.

Der Vorteil von Konzept 1 besteht darin, 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 aus-

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 and an additional repository for the waste from reprocessing would be required.

## 6.2 Concept 2: Borehole diameter 35.4" (90 cm) at a depth of 5,000 m

For concept 2, a borehole diameter of 35.4" at a depth of 5,000 m was assumed (8). 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.

## 7 Containment providing rock zone

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 (Figures 1, 2). 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.

## 8 Safety and safety demonstration concept

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 (8). The safety requirements issued by BMU in 2010 (3) 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 hydrological cycle outside of the CRZ.
- 4) The integrity of the CRZ has to remain intact throughout the reference period of 1 million years.

gedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren eingelagert werden und ein zusätzliches Endlager für die Wiederaufarbeitungsabfälle wäre erforderlich.

## 6.2 Konzept 2: Bohrdurchmesser 35,4" (90 cm) in 5.000 m Tiefe

Beim Konzept 2 wurde von einem Bohrdurchmesser von 35,4" in 5.000 m Tiefe ausgegangen (8). Unter Berücksichtigung der Casing-Wandstärke und des notwendigen Ringraums 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 von Konzept 2 besteht darin, dass die Anzahl der Bohrlöcher mit 31 erheblich geringer ist als im Konzept 1. Der Nachteil von Konzept 2 ist, dass ohne eine erhebliche Weiterentwicklung der Tiefbohrtechnik eine Umsetzung nicht möglich ist.

## 7 Der einschlusswirksame Gebirgsbereich

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 (Bilder 1 und 2). 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.

## 8 Sicherheits- und Nachweiskonzept

Für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Bohrlöchern wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept in Ansätzen entwickelt bzw. auf das in (8) dargelegte Konzept der GRS zurückgegriffen. In den Sicherheitsanforderungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) aus dem Jahr 2010 (3) sind die allgemeinen Schutzziele und die Sicherheitsprinzipien dargelegt. Das Sicherheitskonzept beschreibt, wie bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern der sichere Einschluss der Abfälle für 1 Mio. 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 hydrologischen Kreislauf teilnehmen.
- 4) Die Einschlusseigenschaften des ewG müssen über 1 Mio. 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:

~~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 barrier;~~
- ~~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.~~

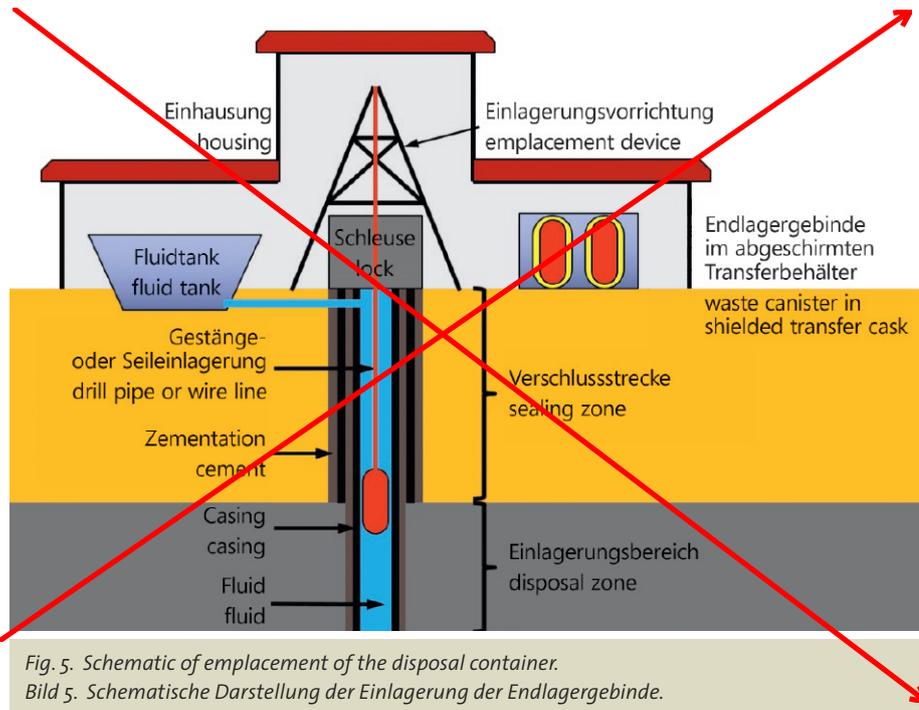
### ~~9 Emplacement and retrieval concept~~

~~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 (lock) above the borehole. The disposal container is transported to the borehole inside a transfer cask. There, it is placed above the emplacement borehole in vertical position (Figure 5). 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 (Figure 5). The processes related to retrieval are similar. While retrieval during the operating period of~~

- 1) die Mächtigkeit der Salz-/Tonbarriere,
- 2) die Integrität der geologischen Barriere,
- 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 radiologische Konsequenzenanalyse in der Biosphäre bei Freisetzung von Radionukliden,
- 7) Human-Intrusion-Szenarien.

### ~~9 Einlagerungs- und Rückholkonzept~~

~~Weiterhin wurde ein Einlagerungs- und Rückholkonzept 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 (Schleuse) vorgesehen werden. Das Endlagergebäude wird in einem geschlossenen Transferbehälter zum Bohrloch transportiert. Anschließend wird dieser vertikal über dem Einlagerungsbohrloch aufgestellt (Bild 5). 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 (Bild 5). 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. Unter Bergung der Abfälle wird die Rückholung der Abfälle nach einem Verschluss des Bohrlochs angesehen. Der Zeitraum, in dem eine Bergung nach den derzeitigen gesetzlichen Vorgaben möglich sein soll, beträgt 500 Jahre. Deshalb müsste für die Endlagerung in tiefen Bohrlochern rechtlich geprüft werden, ob diese gesetzliche Anforderung aufgegeben werden kann.

## 10 Abdichtung und Verschluss der Bohrlöcher

Hinsichtlich des Verfüllens und Verschlüssens der Einlagerungsbohrlöcher wurden verschiedene Möglichkeiten zu den Materialien im Forschungsbericht (5) dargelegt. In Konzeptstudien – beispielsweise (12, 13) – wurden bisher Bentonit, Bitumen/Asphalt, Zement und auch Salz-

suspensionen und eutektische Salzschnmelzen sowie Schwerspat/Baryt als Verfüll- bzw. Verschlussmaterialien genannt. Erste Überlegungen zu Einbringtechnologien wurden betrachtet. Sämtliche Einbringtechnologien müssen allerdings noch hinsichtlich der speziellen Bedingungen in Endlagerbohrungen entwickelt und erprobt werden. Für den Einbau der Verfüllmaterialien bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1) Die Verfüllmaterialien werden im Bohrlochfluid eingebaut.  
2) Das Bohrloch wird leergepumpt und die Verfüllmaterialien werden im Trockenen eingebaut. Ob diese Möglichkeit besteht, ist von der Bemessung des Casings abhängig.

### 10 Sealing and closure of the boreholes

Concerning the backfilling and closure of the emplacement boreholes, various possible materials have been listed in the research paper (5). So far, concept studies – e.g., (12, 13) – 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. There are basically two options for installing the backfill materials:

- 1) The backfill materials are installed in the borehole fluid.
- 2) The borehole is pumped dry and the backfill materials are installed dry. Whether this possibility exists depends on the dimensioning of the casing.

### 11 Opportunities and risks of disposal in deep boreholes

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

#### 11.1 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

## 11 Chancen und Risiken einer Endlagerung in tiefen Bohrlochern

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

### 11.1 Chancen

Die hinsichtlich der Radionuklide abschirmende Wirkung des Stützfluids und die Bremswirkung beim Ablassen der Gebinde erscheinen für die Einlagerung in tiefen Bohrlochern als voraussichtlich positiv und werden in die Kategorie „Chance“ eingeordnet. Das aufzufahrende gesamte Hohlräumvolumen ist im Vergleich zu einem Endlagerbergwerk wesentlich geringer. Zudem ist von einem geringeren Auflockerungsbereich auszugehen. Der Verschluss des einzelnen Bohrlochs kann direkt nach dem Einbringen der Endlagergebinde erfolgen und ist länger als bei einem Endlagerbergwerk. Es besteht dabei auch eine gute Chance, den Bohrungsverschluss in einem trockenen Bohrloch einzubringen. Ein Bohrloch mit einem Enddurchmesser von 17,5" kann nach dem Stand der Technik der Tiefbohrtechnik bis 5.000 m abgeteuft werden. 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.

excavated is much lower. In addition, a lower damage zone is assumed. Furthermore, sealing of the individual boreholes can start directly after the containers have been emplaced and the sealing zone is longer than in a repository mine. 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.

## 11.2 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 with a final diameter of 17,5". Accordingly, a repository, e.g. in a mine, must also be built. The permanent presence of the drilling fluid, which must be selected specifically for the casing used and the repository containers, 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.

## 11.3 Results of the opportunities/risks reflection

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:

- 1) The 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 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 con-

Allerdings müsste diese Entwicklung mit öffentlichen Mitteln gefördert werden, da innerhalb der Rohstoffindustrie kein direkter Bedarf an einer solchen Technologie besteht.

## 11.2 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 mit 17,5" Enddurchmesser nicht möglich. Dementsprechend muss zusätzlich ein Endlager, z.B. in einem Bergwerk, errichtet werden. Die Einlagerung in einem Schutzfluid, das gezielt für das verwendete Casing und die Endlagerbehälter ausgewählt werden muss, erfordert eine entsprechende Auswahl korrosionsresistenter Behältermaterialien und einen dichten Behälter, bis das Bohrloch dauerhaft verschlossen ist. Weitere risikobehaftete Themen, wie z.B. die Rückholung in der Betriebsphase des Bohrlochs oder die 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.

## 11.3 Ergebnis der Chancen/Risiken-Betrachtung

Derzeit kann aus der Abwägung der Chancen und Risiken keine Aussage getroffen werden, ob eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern eine sinnvolle Alternative zu einer Endlagerung in einem Bergwerk 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 darstellen und deren Lösung vom Projektteam auch bei großer finanzieller Unterstützung in den nächsten Jahren eher als unwahrscheinlich angesehen wird. Diese beiden Punkte betreffen:

- 1) Den Nachweis des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall Bb nach dem Bericht des AkEnd (flächig ausgedehnte überlagernde Salzschieht/Tonschieht):

Bei der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in 3.000 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 Maß 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. Salzschieht 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.

~~tainment 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 projects 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).~~

~~2) 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, e.g. 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.~~

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):

2) 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 Gebirgsdrucks, der 500 Jahre auf den Behälter eingewirkt hat, verformt. Nach Einschätzung des Projektteams bestehen große Zweifel, ob die Entwicklung solcher Bergungstechniken auch bei erheblicher finanzieller Förderung möglich ist.

#### References / Quellenverzeichnis

- (1) KOMMISSION: Abschlussbericht – Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 2016.
- (2) StandAG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). 2017.
- (3) BMU: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 2010.
- (4) StrlSchV: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV). 2001.
- (5) ~~Bollingerfehr, W.; Dieterichs, C.; Herold, M.; Kudla, W.; Reich, M.; Rosenzweig, T.: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in tiefen Bohrlöchern „CREATIEF“ – Abschlussbericht. Bericht, TU Bergakademie Freiberg und BGE Technology GmbH, Freiberg, 2018.~~
- (6) AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, 2002.
- (7) Kunze, G.; Anders, E.: Vortriebsystem zur Herstellung von tiefen Geothermiebohrungen im Festgestein mittels Elektroimpulsverfahren. Bericht, TU Dresden, Dresden, 2009.
- (8) Bracke, G.; Charlier, F.; Geckeis, H.; Harms, U.; Heidebach, O.; Kienzler, B.; Liebscher, A.; Müller, B.; Prevedel, B.; Röckel, T.; Schilling, F.; Sperber, A.: Tiefe Bohrlöcher. Bericht, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, 2016.
- (9) Calderoni, A.; Ligrone, A.; Molaschi, C.: The Lean Profile: A Step Change in Drilling Performance. Konferenzbeitrag, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1999.
- (10) Oppelt, J.; Lehr, J.: Innovative Drilling and Completion Concept for Geothermal Applications. In: Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 36, Davis, 2012.
- (11) BMUB: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Bericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, 2015.
- (12) Brady, P. V.; Arnold, B. W.; Freeze, G. A.; Swift, P. N.; Bauer, S. J.; Kanney, J. L.; Rechar, R. P.; Stein, J. S.: Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, Albuquerque und Livermore, 2009.

#### Authors / Autoren

Dr.-Ing. Tino Rosenzweig, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg,  
~~Dipl.-Ing. Wilhelm Bollingerfehr, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine,~~  
Dr.-Ing. Christin Dieterichs, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg,  
~~Dipl.-Ing. Maxi Herold, Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE),~~  
Peine, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla, TU Bergakademie Freiberg,  
Freiberg und Prof. Dr.-Ing. Matthias Reich, TU Bergakademie Freiberg,  
Freiberg

**DBHD dankt den Herren Professoren für den Versuch einer Beschreibung, warum DBD mit Rotary Bohr-Technik NICHT zu einem baubaren und sicheren Endlager führen kann ! DBHD ist die massgebliche Weiterentwicklung, und ermöglicht eine Lagerung in tiefen Bohrlöchern, die mit einer 12 Meter Schacht-Bohrtechnik von Fa. Herrenknecht AG erstellt werden. – DBHD hat gas-dichten Verschluss**