

## Disposal of Radioactive Waste in Germany – An Overview of Ongoing Projects

In the field of radioactive waste disposal, a particularly wide range of mining activities has to be carried out using state-of-the-art technology and high safety standards. This is especially true when a broad range of objectives is pursued under different site conditions, as is the case in Germany. If the focus is on waste with negligible heat generation, the Konrad project is an example of the conversion of a mine into a repository, which requires extensive reconstruction, expansion, conversion, and complex securing of shafts and drifts. The Morsleben repository, on the other hand, is currently being kept open and work on decommissioning the repository is progressing vigorously. A focal point is the design of the sealing structures. They, as well as backfilling measures for

stabilisation, are indispensable for the long-term isolation of the radionuclides from the biosphere. In the Schachtanlage Asse II, these precautionary measures are routine tasks to protect the emplacement chambers (radioactive waste) from saline solutions and to stabilise the mine workings. To arrange for the retrieval of the radioactive waste, extensive exploratory measures are carried out within the framework of the so-called fact finding survey. The progress and success of these projects is a primary corporate objective of the Federal Company for Radioactive Waste Disposal (BGE), Peine/Germany. It is supported in these projects by its subsidiary, BGE TECHNOLOGY GmbH.

## Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Ein Überblick der laufenden Projekte

Im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle sind in besonderem Maße vielfältige bergmännische Arbeiten mit modernster Technik und unter hohen Sicherheitsstandards durchzuführen. Dies gilt vor allem, wenn eine breite Palette an Zielstellungen bei unterschiedlichen Standortbedingungen verfolgt wird, wie es in Deutschland der Fall ist. Liegt der Fokus bei Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, so ist das Projekt Konrad ein Beispiel für die Umrüstung eines Bergwerks in ein Endlager, das umfangreiche Sanierungen, Erweiterungen, Umbauten und eine aufwendige Sicherung der Schächte und Strecken erfordert. Das Endlager Morsleben wird dagegen derzeit offengehalten und die Arbeiten für die Stilllegung des Endlagers gehen mit Nachdruck voran. Ein Schwerpunkt ist die Planung der Abdichtbauwerke.

Sie sind wie die Verfüllmaßnahmen zur Stabilisierung für die langfristige Isolierung der Radionuklide von der Biosphäre unverzichtbar. In der Schachtanlage Asse II zählen diese Vorsorgemaßnahmen zu den Routineaufgaben, um die Einlagerungskammern (radioaktive Abfälle) vor Salzlösungen zu schützen bzw. das Grubengebäude zu stabilisieren. Für die Planung der Rückholung der radioaktiven Abfälle erfolgen im Rahmen der sogenannten Faktenerhebung umfangreiche Erkundungsmaßnahmen. Der Fortschritt und Erfolg dieser Projekte ist ein primäres Unternehmensziel der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), Peine. Sie wird dabei von Fachleuten ihrer Tochtergesellschaft, der BGE TECHNOLOGY GmbH, unterstützt.

### 1 Introduction

As a result of the reorganisation of the organisational structure in the field of radioactive waste disposal (1), the operator responsibilities of the German disposal projects were bundled in the newly founded Federal Company for Radioactive Waste Disposal (Bundesgesellschaft für Endlagerung, BGE), Peine/Germany. With regard to the disposal of waste with negligible heat generation, BGE's tasks comprise the construction of the Konrad repository including product inspection of the radioactive waste, the operation and decommissioning of the Morsleben repository, and the retrieval of waste from the Schachtanlage Asse II.

All three sites are former extraction mines with large cavity volumes and complicated mine workings. In addition to the

### 1 Einleitung

Infolge der Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung (1) wurden die Betreiberaufgaben der deutschen Endlagerprojekte bei der neu gegründeten Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine, gebündelt. Ihr Aufgabenbereich umfasst bezüglich der Endlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung die Errichtung des Endlagers Konrad inklusive der Abfall-Produktkontrolle, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben sowie die Rückholung der Abfälle aus der Schachtanlage Asse II.

Bei allen drei Standorten handelt es sich um ehemalige Gewinnungsbetriebe, die über große Hohlraumvolumina und komplizierte Grubengebäude verfügen. Im Endlager Konrad sind ne-

mined iron ores, clayey and calcareous rocks are present in the Konrad mine, which behave very differently geomechanically. These general conditions place high demands on the support of the mine workings. Although both the Morsleben repository and the Schachanlage Asse II are located in the host rock salt, the geological and mining situations are very different. In combination with the often complicated and widely differing framework conditions, the above-mentioned objectives required the development of individual concepts and specific measures. This article is to give an impression of the progress and status of the projects and to provide an overview of the broad and varied range of activities in the field of radioactive waste disposal. The focus here is on the success of the mining work, which is accompanied by extensive geoscientific and geotechnical investigations and quality assurance measures.

## 2 Konrad Mine

Iron ore was formerly mined in the Konrad mine at a depth of 800 to 1,300 m below the earth's surface. The iron ore layer is covered extensively by a 160 m- to 400 m-thick layer of clayey rock. The mine workings, approximately 1.7 km wide and 3.0 km long, are accessed via two shafts. They are located approximately 1.5 km apart. Shaft Konrad 1 has a depth of approximately 1,232 m and shaft Konrad 2 has a depth of 998 m. Five main floors are connected to shaft Konrad 1 or shaft Konrad 2. The sixth level is connected to the rest of the mine via ramps and spiralling drifts. The mine is currently converted into the first repository for radioactive waste with negligible heat generation licenced in accordance with the Atomic Energy Act (2, 3). This requires extensive work in the shafts and in the mine workings.

Shaft Konrad 1 will continue to be used for the transportation of material and personnel. For this purpose, the shaft will be renovated and new hoisting systems will be installed, which includes the replacement of the wooden guiding devices with steel ones. The removal of the wooden shaft traverse beams, to which the guide rails to guide the hoisting cage were attached, reduced the fire load significantly.

After the decommissioning of the northern conveyor system in shaft Konrad 1, the associated material transport via trolley was also stopped, so that for the installation of a belt conveyor system, all equipment of the material conveyance was dismantled.

Shaft 2 will later be used for the transport of the waste containers. For this purpose, it will be equipped with a modern main rope hoisting system, a medium rope hoisting system, and an auxiliary hoisting system. The old hoisting system was decommissioned and the old shaft hoisting frame and associated equipment were dismantled. For this reason, a temporary hoisting system with shaft head frame is currently being operated. With this, it is possible to access a working platform that consists of six levels. The platform was used to remove old wooden and steel traverse beams. With the help of the platform, the shaft diameter could be increased from 7.0 to 9.5 m between 840 and 875 m depth. The diameter of the shaft landing station at the 850 m-level was also increased over a length of approximately 60 m to a current diameter of 13 m. Due to the clayey rock formation in this area, additional anchoring had to be carried out. The later clear diameter of around 10 m enables handling of the waste containers.

ben den abgebauten Eisenerzen ton- und kalkhaltige Gesteine aufgeschlossen, die sich geomechanisch sehr unterschiedlich verhalten. Die Rahmenbedingungen stellen hohe Anforderungen an den Ausbau der Grubenräume. Das Endlager Morsleben und die Schachanlage Asse II befinden sich zwar beide im Wirtsgestein Salz, jedoch unterscheiden sich die geologische und bergmännische Situation stark. Die genannten Zielstellungen erforderten im Verbund mit den häufig komplizierten und stark voneinander abweichenden Rahmenbedingungen die Erstellung individueller Konzepte und spezifischer Maßnahmen. Dieser Beitrag soll einen Eindruck über den Fortschritt und den Stand der Projekte vermitteln und einen Überblick der breiten und abwechslungsreichen Palette an Tätigkeiten im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle liefern. Der Fokus liegt dabei auf den Erfolgen der bergmännischen Arbeiten, die von umfangreichen geowissenschaftlichen und geotechnischen Untersuchungen sowie Maßnahmen der Qualitätssicherung begleitet werden.

## 2 Schachanlage Konrad

In der Schachanlage Konrad wurde ehemals Eisenerz abgebaut. Das Erzlager liegt in einer Teufe von 800 bis 1.300 m unter der Erdoberfläche und wird großflächig von einer 160 bis 400 m dicken Schicht aus tonigen Gesteinen überdeckt. Das Grubengebäude, ca. 1,7 km breit und 3,0 km lang, ist über zwei Schächte erschlossen. Sie sind ca. 1,5 km voneinander entfernt. Schacht Konrad 1 hat eine Teufe von ca. 1.232 m und Schacht Konrad 2 von 998 m. Fünf Hauptsohlen sind an den Schacht Konrad 1 oder den Schacht Konrad 2 angeschlossen. Die sechste Sohle ist über Rampen und Wendeln mit dem übrigen Grubengebäude verbunden. Die Schachanlage wird derzeit als erstes nach Atomgesetz (2, 3) genehmigtes Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung umgerüstet. Dies erfordert umfangreiche Arbeiten in den Schächten und im Grubengebäude.

Schacht Konrad 1 wird weiterhin der Materialförderung und der Seilfahrt von Personal dienen. Hierfür wird die Schachtröhre saniert und es sind neue Seilfahranlagen einzubauen, wobei auch die hölzernen gegen stählerne Führungseinrichtungen ausgetauscht werden. Durch das Entfernen der Holzeinriche, an denen die Spurlatten zur Führung des Korbs befestigt waren, konnte die Brandlast deutlich reduziert werden.

Nach der Außerbetriebnahme der nördlichen Förderanlage im Schacht Konrad 1 war auch die damit verbundene Materialförderung mit Förderwagen eingestellt worden, sodass für den Einbau einer Bandanlage sämtliche Einrichtungen dieser Materialförderung demontiert wurden.

Im Schacht Konrad 2 werden später die Abfallgebände befördert. Für diesen Zweck wird er mit einer modernen Hauptseilfahranlage, einer mittleren Seilfahranlage und einer Hilfsfahranlage ausgestattet. Die alte Förderanlage wurde außer Betrieb genommen und das alte Fördergerüst und die dazugehörigen Einrichtungen wurden zurückgebaut. Daher wird derzeit eine temporäre Seilfahranlage mit Fördergerüst betrieben. Damit ist es möglich, eine Arbeitsplattform/-bühne anzufahren, die aus sechs Ebenen besteht. Die Bühne wurde eingesetzt, um alte Holz- und Stahleinriche auszubauen. Zudem konnte mithilfe der Bühne zwischen 840 und 875 m Teufe der Schachtdurchmesser von 7,0 auf 9,5 m erweitert werden. Auch das Füllort der 850 m-Sohle wurde auf ei-



Fig. 1. View along the axis of a storage chamber with anchor and mesh wire retention at the time of excavation.

Bild 1. Blick entlang der Achse einer Einlagerungskammer mit Anker- und Maschendrahtsicherung zum Zeitpunkt der Auffahrung.

Photo/Foto: BGE TECHNOLOGY GmbH

The cylindrical concrete and cast iron containers as well as the cuboid containers (4) will then be transported via newly excavated and completed transport and access drifts to the emplacement chambers. These chambers have a height of about 6 m and a width of 7 m (Figure 1). Several chambers form partial fields of the two emplacement fields. The pillars between adjacent chambers are about 28 m thick. First, subfield 5.1 with five chambers and an effective volume of 63,000 m<sup>3</sup> was excavated near shaft Konrad 2. In total, the repository may hold up to 303,000 m<sup>3</sup> of low- and intermediate-level radioactive waste.

The containers will later be placed in approximately 50 m long sections of the chambers. After construction of a backfill wall made of shotcrete, they as well as the chamber endings will be backfilled with flowable building material. The remaining voids and drifts will be backfilled at the end of their service life using centrifugal or bulk backfilling methods. The materials for pumping and centrifugal stowing as well as the shotcrete are produced underground in a central mixing station, as excavated material will be used as aggregate. Thus, mine workings for crushing, screening, and storing the excavated material and other raw materials were excavated. For this purpose, a vertical material bunker with a capacity of approximately 200 m<sup>3</sup> was excavated. An important milestone was the breakthrough between the mine workings for the mixing and metering equipment and for the secondary crushing unit, which belong to the "backfill preparation plant" area. Cement and the premix of the shotcrete are conveyed in pneumatically.

For the transport of personnel, waste containers, and building materials, numerous vehicles are required in the controlled area, which have to be refuelled and cleaned. Furthermore, maintenance and repair work has to be carried out. Thus, a fuel tank, a washing area for vehicles and machines, spare parts stores, storage facilities for working materials and waste, and workshops will be built, as well as recreation and radiation protection rooms and a transformer room.

ner Länge von ca. 60 m auf einen Durchmesser von aktuell 13 m erweitert. Hier waren aufgrund des tonhaltigen Gebirges zusätzliche Verankerungen durchzuführen. Der spätere lichte Durchmesser von rd. 10 m ermöglicht das Umschlagen der Abfallgebände.

Die zylinderförmigen Beton- und Gussbehälter sowie quaderförmigen Container (4) werden dann über neu aufgefahrenen und fertiggestellte Transportstrecken und Zufahrten in die Einlagerungskammern gelangen. Diese Kammern haben eine Höhe von rd. 6 m und eine Breite von 7 m (Bild 1). Mehrere Kammern bilden Teilfelder der zwei Einlagerungsfelder. Pfeiler zwischen benachbarten Kammern sind rd. 28 m stark. Zunächst wurde nahe des Schachts Konrad 2 das Teilfeld 5/1 mit fünf Kammern und einem Nutzvolumen von 63.000 m<sup>3</sup> aufgefahren. Insgesamt darf das Endlager bis zu 303.000 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktive Abfälle aufnehmen.

Die Einlagerung der Gebinde wird später in ca. 50 m langen Abschnitten der Kammern erfolgen. Sie werden nach dem Erstellen einer Versatzwand aus Spritzbeton ebenso wie die Kammerabschlüsse mit einem fließfähigen Baustoff verfüllt. Die restlichen Grubenräume und Strecken werden dagegen nach Ende ihrer Nutzung mit Schleuder- bzw. Schüttversatz verfüllt. Der Pump- und Schleuderversatz sowie der Spritzbeton werden unter Tage in einer zentralen Mischstation hergestellt, da Haufwerk als Gesteinskörnung verwendet wird. Demzufolge wurden Grubenbaue für die Zerkleinerung, Siebung und die Bunkerung des Haufwerks und das Bevorraten von Ausgangsstoffen angelegt. Hierfür wurde ein vertikaler Versatzbunker mit ca. 200 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen aufgefahren. Ein wichtiger Meilenstein war der Durchschlag zwischen den Grubenräumen der Misch- und Dosiereinrichtung und der Nachzerkleinerung, die zum Bereich „Versatzaufbereitungsanlage“ gehören. Zement und die Vormischung des Spritzbetons werden pneumatisch eingefördert.

Für den Transport von Personal, Abfallgebänden und von Baustoffen werden im Kontrollbereich zahlreiche Fahrzeuge benötigt, die zu betanken und zu reinigen sind. Zudem sind Wartungs- und Reparaturmaßnahmen durchzuführen. Demzufolge werden auch Tanklager, ein Waschplatz für Fahrzeuge und Maschinen, Ersatzteillager, Lager für Betriebsstoffe und Betriebsabfälle und Werkstätten erstellt, zusätzlich Aufenthalts- und Strahlenschutzräume sowie der Traforaum.

Die Infrastrukturbereiche des Werkstattkomplexes, der Versatzaufbereitung und Baustoffherstellung erstrecken sich nahe des Schachts Konrad 2 auf der 2. und 3. Sohle (850 bis 900 m Teufe). Die geologischen Verhältnisse variieren im Auffahrungsbereich von Tonsteinen der Fladentonsteinserie, über Eisenoolithe des Unteren Erzlagere bis zu Kalk-Mergel-Wechselfolgen. Auch die geomechanische Situation mit Gebirgsdrücken von z.T. über 20 MPa und die Größe der Hohlräume mit Querschnitten zwischen ca. 60 und 150 m<sup>2</sup> stellen hohe Ansprüche an das Auffahren und Sichern der Grubenräume. So sind Sanierungsarbeiten auszuschließen.

Die Vortriebs- und Erweiterungsmaßnahmen während der Einlagerungsphase erfolgen zunächst gebirgsschonend mit Teilschnittmaschine bzw. Tunnelbagger. Die Vortriebsmethodik lehnt sich an die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) unter Anwendung der Beobachtungsmethode an (5). Der Standardausbau besteht in der Regel aus zwei bewehrten Spritzbetonschalen. In der ersten Ausbaustufe wird das Gebirge nach dem Ausbruch mit



Fig. 2. Shaft Konrad 2 in the area of the extension between 840 and 875 m depth. View from the working platform to top.

Bild 2. Schacht Konrad 2 im Bereich der Erweiterung zwischen 840 und 875 m Teufe. Blickrichtung von der Arbeitsplattform nach oben.

Photo/Foto: BGE TECHNOLOGY GmbH

The infrastructure areas for the workshop complex, the back-fill material preparation, and the construction material production are located near shaft Konrad 2 on the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> levels (850 to 900 m depth). The geological conditions in the excavation area vary from claystones (Fladentonsteinserie) to iron oolites of the Lower Ore Deposit to lime-marl alternations. The geomechanical situation with rock pressures of more than 20 MPa in parts and the size of the cavities with cross-sections between approximately 60 and 150 m<sup>2</sup> also place high demands on excavating and securing the mine workings. Thus, renovation work should not be carried out.

The tunnelling and extension measures during the time phase of waste emplacement will initially be carried out in a rock strength preserving manner using roadheaders or tunnel excavators. The tunnelling method is based on the New Austrian Tunneling Method using the monitoring method (5). The standard lining usually consists of two reinforced shotcrete shells. In the first construction stage, the rock is secured with rock bolts (anchors), furnished with a so-called consolidation layer before the first shotcrete layer or shell is applied. This layer is left with joints ("slotted shell") so that the rock can deform. Sliding head anchors are used as ductile securing elements. When the rock forces have subsided due to convergence, the joints are cleaned and closed

Gebirgsankern gesichert und nach einer sogenannten Konsolidierungsschicht die erste Spritzbetonschicht bzw. -schale aufgebracht. In dieser Schicht werden Fugen belassen („geschlitzte Schale“), damit sich das Gebirge verformen kann. Als duktile Sicherung werden Gleitkopfancker verwendet. Wenn durch Konvergenz die Gebirgskräfte nachgelassen haben, werden die Fugen gereinigt und geschlossen, sodass als starres Tragelement die zweite Spritzbetonschale erstellt werden kann. Auf diese Weise wird das temporär nachgiebige in ein starres Ausbausystem überführt. Dabei kommt grundsätzlich das Trockenspritzverfahren zur Anwendung. Die markante Struktur des geschlitzten Spritzbetons findet sich gegenwärtig in fast allen Grubenräumen des zukünftigen Kontrollbereichs, jedoch wird mit dem Aufbringen der Innenschale demnächst begonnen. Bild 2 und Bild 3 vermitteln einen Eindruck dieser Ausbaumart.

Auf der 1.000 m-Sohle wurden weitere Werkstätten und das Magazin zur Materialversorgung errichtet und eingerichtet. Hier sind zusätzlich eine Bremsprüfstrecke und ein Bremsenprüfstand vorhanden. Die alten Werkstattbereiche auf der 4. Ebene (Sohle) des Bergwerks in 1.100 m Teufe werden dagegen nicht mehr benötigt und werden mit Versatzmaterial stabilisierend verfüllt. Die 4. Sohle wird für den zukünftigen Endlagerbetrieb nicht mehr benötigt und kann daher abgeworfen werden. Eingesetzt wird Blasversatz, der mit zwei Versatzanlagen eingebracht wird (Bild 4).



Fig. 3. Warehouse for liquid waste on the 850 m level (workshop for maintenance and repair work).

Bild 3. Lager für flüssige Betriebsabfälle auf der 850 m-Sohle (Werkstatt für Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten).

Photo/Foto: BGE mbH



Fig. 4. Plant for pneumatic stowing in the old workshop drift 403 (4<sup>th</sup> level).

Bild 4. Blasversatzanlage in der alten Werkstatt-Strecke 403 (4. Sohle).

Photo/Foto: BGE mbH

so that the second shotcrete lining can be constructed as a rigid load-bearing element. This way, the temporary yielding lining system is converted into a rigid one. In this case, the dry-mix shotcreting procedure is always used. The distinctive structure of the "slotted shotcrete" is currently found in almost all mine workings of the future control areas, but the construction of the inner lining will begin soon. Figures 2 and 3 give an impression of this type of lining.

On the 1,000 m level, further workshops and a storage facility for material supply were constructed and furnished. A brake test track and a brake test stand are also available here. The old workshop areas on the 4<sup>th</sup> level (floor) of the mine at a depth of 1,100 m, on the other hand, are no longer needed and are back-filled with stabilising backfill material. The 4<sup>th</sup> level is no longer required for future operation and can thus be discarded. It will be backfilled using pneumatic stowing, where the material is applied by means of two backfilling plants (Figure 4).

Fresh air streams into the mine via shaft Konrad 1 and the connected mine floors. The air is sucked out of the emplacement chambers via boreholes, collection drifts, and main roadways. In addition to the return air collection drift in subfield 5/1, the ventilation boreholes have been completed. They are to be lined with sheet steel piping (diameter 1.2 m). Konrad 2 as the transport shaft for radioactive waste containers will continue to be the ventilation shaft for return air and will be equipped with a new mine ventilation fan.

### 3 Morsleben repository for radioactive waste

The Morsleben repository for radioactive waste, located east of Helmstedt in the federal state of Saxony-Anhalt, was constructed as a double shaft facility. The mine fields are named after the shafts Marie and Bartensleben. The southern area of Bartensleben, where large quantities of rock salt and potash salt were extracted commercially, can be divided into a central part and peripheral fields, where, with the exception of the southeastern field, almost the entire inventory of radioactive waste is located.

In the current phase of keeping the mine open, measures are taken primarily to ensure mine safety and radiation protection. In addition, the decommissioning process is being continued. In

Frischwetter strömen über den Schacht Konrad 1 und die dort angeschlossenen Sohlen in das Grubengebäude. Die Wetter werden aus den Einlagerungskammern saugend über Bohrlöcher, Sammelstrecken und Hauptwetterstrecken abgezogen. Fertiggestellt sind neben der Abwettersammelstrecke im Teilfeld 5/1 auch die Wetterbohrlöcher, die mit einer Verrohrung aus Stahlblech (Durchmesser 1,2 m) auszukleiden sind. Konrad 2 als Transportschacht radioaktiver Gebinde wird weiterhin der ausziehende Wetterschacht sein und mit einer neuen Hauptgrubenlüfteranlage ausgestattet.

### 3 Endlager für radioaktiver Abfälle Morsleben

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, das sich östlich von Helmstedt im Bundesland Sachsen-Anhalt befindet, wurde als Doppelschichtenanlage errichtet. Die Grubenfelder sind benannt nach den Schächten Marie und Bartensleben. Der südliche Bereich Bartensleben, in dem kommerziell große Mengen Stein- und Kalisalz gewonnen wurden, kann in einen Zentralteil und in periphere Felder gegliedert werden, in denen sich mit Ausnahme des Südostfelds nahezu das gesamte Inventar der radioaktiven Abfälle befindet.

In der derzeitigen Phase der Offenhaltung erfolgen vor allem Maßnahmen zur Gewährleistung der Grubensicherheit und des Strahlenschutzes. Zudem wird das Stilllegungsverfahren fortgesetzt. Im Verlauf der Stilllegung sind dann umfangreiche Verfüllmaßnahmen zur Verbesserung der Salzbarrierenintegrität durchzuführen, Strecken abzudichten sowie abschließend die Schachtabdichtungen zu errichten.

Um eine Schädigung des Gebirges infolge der Konvergenz zu minimieren, die Standsicherheit des Zentralteils zu gewährleisten und damit die Stilllegungsfähigkeit des Endlagers zu erhalten, wurden bereits in den Jahren 2003 bis 2011 Abbaue mit fast 1 Mio. m<sup>3</sup> Salzbeton verfüllt. Dieser Baustoff wurde über Tage angemischt und über Rohrleitungen in die Abbaue gepumpt. Die Erfahrungen zeigen, dass für den späteren Stilllegungsbetrieb eine leistungsfähige und zuverlässige Versatztechnik zur Verfügung steht, sodass auch verbleibende Resthohlräume verfüllt und damit langfristig stabilisiert werden können.

Trotz dieser Maßnahmen kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass Salzlösungen in das Grubengebäude zutreten können. Die Lösungszusammensetzung kann infolge

the course of decommissioning, extensive backfilling measures to improve the salt barrier integrity have to be carried out, drifts have to be sealed, and the shaft seals have to be constructed.

In order to minimise rock damage due to convergence, to ensure the stability of the central section and thus maintain the possibility of the repository to be decommissioned, mine workings were backfilled with almost 1 M m<sup>3</sup> of salt concrete between 2003 and 2011. This material was mixed above ground and pumped into the mine workings via pipelines. Experience shows that an efficient and reliable backfilling technique is available for the future decommissioning operation, so that residual voids can also be backfilled and thus stabilised in the long term.

Despite these measures, however, it cannot be completely ruled out that salt solutions may flow into the mine workings. The composition of the solutions can vary due to the spectrum of the evaporate rocks. This fact must be taken into account when selecting backfilling and sealing materials, because reactions with salt solutions alter the material properties of the construction material. A loss of the sealing effectiveness of sealing structures, e.g., would be possible.

In order to prevent this from happening, work is currently being carried out on predicting the solution composition at the sealing sites and on developing and optimising long-term stable construction materials. The work focuses on cement-based salt concretes and magnesia binders, which are classic construction materials in potash mining. In simplified terms, it can be assumed that magnesia binders in solutions that reacted with potassium salts meet the specified material requirements in the long term, while in the case of salt concretes, a possible corrosion has to be assessed in detail. Magnesia binders, on the other hand, corrode in solutions low in magnesium and potassium salts.

When planning, constructing, and demonstrating the effectiveness of sealing structures, consideration must be given not only to the properties of the sealing body made of construction material, but also to its contact with the rock, and to the excavation damaged zone of the rock. Rock convergence can contribute to the closure of pathways. Consequently, the convergence behaviour at the seal's site, which is significantly influenced by the creep behaviour of the rock, and the seal's "healing behaviour" must be taken into account. Thus, it must be differentiated whether the sealing construction is located in rock salt (Figure 5)

des Spektrums der aufgeschlossenen Gesteine variieren. Dieser Sachverhalt ist bei der Auswahl der Verfüll- und Abdichtmaterialien zu berücksichtigen, weil Reaktionen mit Salzlösungen Materialeigenschaften der Baustoffe verändern. So wäre beispielsweise ein Verlust der Abdichtwirkung von Bauwerken zu befürchten.

Um diesem Sachverhalt vorzubeugen, befassen sich derzeitige Arbeiten mit der Prognose der Lösungszusammensetzung an den Abdichtstandorten und der Entwicklung und Optimierung langzeitstabiler Baustoffe. Schwerpunkte der Untersuchungen sind zementbasierte Salzbetone und Magnesiabinder, bei denen es sich um klassische Baustoffe des Kalibergbaus handelt. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass Magnesiabinder in Lösungen, die mit Kalisalzen reagierten, die spezifizierten Materialanforderungen langfristig erfüllen, während bei Salzbetonen eine mögliche Korrosion im Detail zu bewerten ist. Magnesiabinder dagegen korrodieren in magnesium-/kalisalzarmen Lösungen.

Bei der Planung, Konstruktion und Nachweisführung von Abdichtbauwerken sind neben den Eigenschaften des Abdichtkörpers aus Baustoff, dessen Kontakt zum Gebirge und die Auflockerungszone des Gebirges zu berücksichtigen. Gebirgskonvergenz kann dazu beitragen, dass Wegsamkeiten geschlossen werden. Demzufolge ist das Konvergenzverhalten am Standort der Abdichtung, das maßgeblich vom Kriechverhalten der Gesteine beeinflusst wird und ihr „Verheilungsverhalten“ zu berücksichtigen. Es ist daher zu unterscheiden, ob sich die Abdichtung im Steinsalz (Bild 5) oder Anhydritgestein befindet. Nach Abschluss der Planungsarbeiten und dem Erstellen der Nachweiskonzepte sind weitere Bauwerke in situ zu erstellen und zum Nachweis der Funktionsfähigkeit zu prüfen.

Bohrungen sind ein unverzichtbarer Bestandteil von Erkundungsprogrammen, jedoch können sie mit zunehmender Länge die Abdichtwirkung des Wirtsgesteins beeinträchtigen und damit ein Umströmen von Abdichtbauwerken begünstigen. Die anforderungsgerechte Verfüllung dieser sicherheitsrelevanten Bohrungen hat daher ebenso eine Priorität und wird daher im Zuge der Stilllegungsplanung mit Nachdruck bearbeitet.

Das Konzept zur Stilllegung des Endlagers beinhaltet auch je drei Dichtelemente zur Abdichtung der Schächte. Das oberste Dichtelement soll aus Bentonit (Ton) bestehen. Die beiden unteren Elemente sind kombinierte Widerlager-Dichtelemente aus Schotter und Bitumen sowie aus Schotter und Asphalt (mit Zu-



*Fig. 5. Installation of measuring and injection technology as part of the construction of a drift seal in rock salt.  
Bild 5. Einbau der Mess- und Injektionstechnik im Rahmen der Erstellung eines Abdichtbauwerks im Steinsalz.  
Photo/Foto: BGE mbH*

or anhydrite rock. After completion of the planning work and the preparation of the demonstration concepts, further sealing structures are to be constructed in situ and tested to demonstrate their effectiveness.

Drilling is an indispensable part of exploration programmes, but with increasing length of the boreholes, they can impair the sealing effect of the host rock and thus enable solutions to bypass the sealing structures. The backfilling of these safety-relevant boreholes in line with the requirements thus also has priority and is therefore dealt with vigorously within the scope of decommissioning planning.

The concept for decommission the repository also includes three sealing elements for each shaft. The uppermost sealing element is to be constructed of bentonite (clay). The two lower elements are combined abutment-sealing elements made of gravel and bitumen as well as of gravel and asphalt (bitumen with additives). A large-scale in situ test (Figure 6) showed the manageability of the materials and the producibility of these elements under mining conditions.

#### 4 Schachanlage Asse II

The Schachanlage Asse II, south-east of Wolfenbüttel (Lower Saxony), is a former potash and rock salt mine. However, its mine workings were considerably expanded within the scope of research work regarding the disposal of radioactive waste. The cavities of the so-called "deep workings" were excavated below the original mine area and a so-called prototype cavern facility was excavated down to a depth of 996 m.

Between 1909 and 1925, the strongly creeping potassium salt carnallite was mined. Large cavities were also created by the subsequent mining of rock salt, especially in the southern flank. The differences to the Morsleben repository are the large vertical extension of the mine workings, with larger mine volumes underneath the levels containing low- and intermediate-level radioactive waste. In addition, the mine workings contain smaller amounts of the stabilising anhydrite rock than at Morsleben and no hard salt.

As a result of the large volume of unfilled cavities and the spatial arrangement of the shafts, drifts, and chambers, several areas of the mine converged very strongly. This convergence led to a loosening of the rock and to crack formation, so that a pathway to the adjoining rock and a saline solution inflow developed. Due to this rock-mechanical situation, it was decided to retrieve the emplaced radioactive waste (6).

The retrieval, however, requires the sinking of another shaft (Asse 5) and the excavation of new cavities (7). The time required for this and the condition of the only partially backfilled mine would result in progressive rock damage. For this reason, a catalogue of precautionary measures was developed. This includes measures to stabilise the mine workings and to protect the emplacement chambers against the consequences of solution inflow.

In order to stabilise the mine workings, cavities were first filled with crushed salt, which compacted due to its own weight, and the resulting "roof clefts" are filled with Sorel concrete (magnesia binder) in order to further reduce convergence (see page 485 to 496). This material is used in different variants also as "supporting backfill" and to backfill residual cavities, where this classification is a consequence of different material requirements.



Fig. 6. Unloading of gravel for the construction of an abutment sealing element with bitumen. // Bild 6. Einbau des Schotters zur Herstellung eines kombinierten Widerlager-Dichtelements mit Bitumen. Photo/Foto: BGE mbH

satzstoffen versehenes Bitumen). Ein in situ-Großversuch (Bild 6) zeigte die Handhabbarkeit der Materialien und die Herstellbarkeit dieser Elemente unter bergmännischen Bedingungen.

#### 4 Schachanlage Asse II

Die Schachanlage Asse II, südöstlich von Wolfenbüttel (Niedersachsen), ist ein ehemaliges Kali- und Steinsalzbergwerk, dessen Grubengebäude jedoch im Verlauf der Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle wesentlich erweitert wurde. So entstanden unterhalb des ursprünglichen Bergwerksbereichs die Hohlräume des sogenannten Tiefenaufschlusses sowie bis zu einer Teufe von 996 m eine sogenannte Prototyp-Kavernenanlage.

In den Jahren 1909 bis 1925 wurde das stark kriechfähige Kalisalzgestein Carnallitit abgebaut. Große Hohlräume entstanden auch durch den späteren Abbau von Steinsalz, vor allem in der Südflanke. Als Unterschied zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben ist die große vertikale Erstreckung des Grubengebäudes hervorzuheben, wobei sich größere Bergwerksvolumina unterhalb der Sohlen mit den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen befinden. Zudem sind im Grubengebäude geringere Anteile des stabilisierenden Anhydritgesteins vorhanden und auch kein Hartsalz.

Infolge des großen Volumens unverfüllter Hohlräume und der räumlichen Anordnung der Schächte, Strecken und Kammern konvergierten die Bereiche des Bergwerks sehr stark. Diese Konvergenz führte zu Auflockerungen und Rissbildungen im Salzgebirge, sodass auch eine Wegsamkeit zum Nebengebirge und ein Salzlösungszufluss entstanden. Aufgrund dieser gebirgsmechanischen Situation wurde beschlossen, die eingelagerten radioaktiven Abfälle rückzuholen (6).

Die Rückholung erfordert jedoch das Abteufen eines weiteren Schachts (Asse 5) und das Auffahren neuer Grubenräume (7). Die hierfür erforderliche Zeitspanne und der Zustand eines nur teilweise verfüllten Grubengebäudes hätte eine fortschreitende Gebirgsschädigung zur Folge. Aus diesem Grund wurde ein Katalog von Vorsorgemaßnahmen entwickelt. Hierzu zählen Maßnahmen, um das Grubengebäude zu stabilisieren und die Einlagerungskammern vor den Folgen eines Lösungszutritts zu schützen.

Zur Stabilisierung wurden zunächst Hohlräume mit Salzgrus versetzt, der infolge seines Eigengewichts kompaktierte, sodass zur weiteren Reduzierung der Konvergenz die resultierenden „Firstspalten“ mit Sorelbeton (Magnesiabinder) verfüllt werden



Fig. 7. Recutting at a planned barrier site.

Bild 7. Nachschneiden der Gebirgskontur am Standort eines Abdichtungsbauwerks (Strömungsbarriere). Photo/Foto: BGE mbH, Annette Parlitz

To protect the emplacement chambers, the construction of sealing structures (flow barriers) continues. In addition to backfilling measures, this work requires a re-cutting of the drift in order to remove the excavation damaged zone (Figure 7). The sealing structures consist of a core barrier, which is arranged between stable abutments and enclosed on both sides by backfill materials. As construction material, magnesia binder (Sorel concrete) is used, which is very free-flowing, swells during hardening, and meets the requirements for mechanical stability, bonding to the rock, and the sealing effect in the long term. The work programme also includes extensive injection measures. To demonstrate that the required properties are met, a comprehensive quality assurance programme was developed, which also includes production control and conformity checks. The work began in 2003, so that BGE and BGE TECHNOLOGY GmbH now have a unique wealth of experience in developing and detailed planning of sealing structures up to their routine construction.

With the aim of enabling the most detailed data basis and safe retrieval possible, which includes the planning of the mining excavations and the development of the recovery technology, the so-called fact-finding survey is carried out. Drilling is an elementary part of the exploration of the area where the emplacement chambers are located. One success, e.g., was the opening and exploration of chamber 7 on the 750 m level.

Shaft Asse 5, together with the adjacent mine areas, such as infrastructure areas and connecting drifts, is to form a retrieval mine, which will be connected with the parts of the mine workings still accessible at that time. A possible location for the shaft would be the saliferous formation east of the Schachanlage Asse II. Since 2013, this area has been explored by drillings from above and below ground (574 m and 700 m levels) (Figure 8). The 900 m deep Remlingen 15 borehole at the preferred location has provided knowledge and data for a general geoscientific assessment of the possible shaft collaring point, which are also used for shaft engineering evaluations.

The current conclusion is that it is feasible to construct the new shaft using a suitable sinking technology and rock stabilisation and supporting measures.

(s. Seite 485 bis 496). Dieser Baustoff wird in unterschiedlichen Varianten auch als „Stützender Versatz“ und für Resthohlraumverfüllungen verwendet, wobei diese Klassifikation eine Folge unterschiedlicher Materialanforderungen ist.

Als Schutz der Einlagerungskammern wird der Bau von Abdichtungsbauwerken (Strömungsbarrieren) fortgesetzt. Diese Arbeiten erfordern zusätzlich zu Verfüllmaßnahmen einen Nachschnitt der Strecken, um Auflockerungszonen zu entfernen (Bild 7). Die Bauwerke bestehen aus einer Kernbarriere, die zwischen stabilen Widerlagern angeordnet und beidseitig von Versatzstoffen umschlossen wird. Als Baustoff wird ein Magnesiabinder (Sorelbeton) verwendet, der sehr fließfähig ist, beim Erhärten quillt und langfristig die Anforderungen an die mechanische Stabilität, den Verbund zum Gebirge und die Abdichtwirkung gewährleistet. Bestandteil des Arbeitsprogramms sind zudem umfangreiche Injektionsmaßnahmen. Zum Nachweis der geforderten Eigenschaften wurde ein umfassendes Qualitätssicherungsprogramm entwickelt, das auch die Produktions- und Konformitätskontrolle umfasst. Die Arbeiten begannen im Jahr 2003, sodass die BGE und BGE TECHNOLOGY GmbH zwischenzeitlich über einen einmaligen Erfahrungsschatz in der Entwicklung und Detailplanung bis hin zur routinemäßigen Konstruktion von Abdichtungsbauwerken verfügen.

Mit dem Ziel, eine möglichst detaillierte und sichere Rückholung zu ermöglichen, die eine Planung der bergmännischen Aufahrungen und die Entwicklung der Bergungstechnik umfasst,



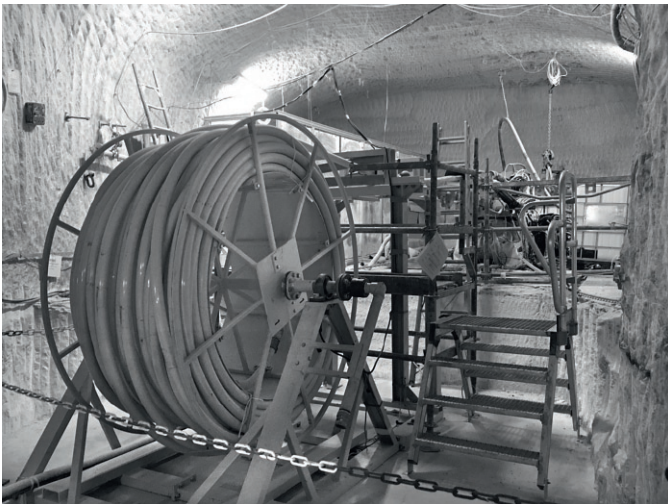


Fig. 8. Drilling site on the 700 m level of the Schachtanlage Asse II with the technical equipment required for drilling and sealing of the boreholes. // Bild 8. Bohrort auf der 700 m-Sohle der Schachtanlage Asse II mit den zum Teufen und zum Verfüllen der Bohrungen erforderlichen technischen Einrichtungen. Photo/Foto: BGE mbH

Further important information for the planning will be provided by 3D seismic measurements in the vicinity of the Schachtanlage Asse II. The measurements serve to obtain reliable data on the structure of the overburden and the geologic structure of the Asse ridge. They are thus another important step on the way to retrieving the radioactive waste. It is currently planned to first retrieve the waste packages from chamber 7 on the 725 m level.

In the southern flank, there is an inflow of solution saturated with halite. At present, it cannot be ruled out with certainty that the quantity of solution will increase until the end of work at the site. For the case that the work to keep the mine open and decommissioning operations can no longer be continued and with the aim of minimising the consequences of solution inflow, an emergency plan has been drawn up. The planned measures include, e.g., backfilling of the residual voids of the emplacement chambers and flooding the areas concerned with a solution with a high magnesium chloride content in order to minimise reactions of the rock and backfill material that would lead to their partial dissolution or recrystallisation. In addition to this, the surface shafts would have to be sealed.

#### References / Quellenverzeichnis

- (1) Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung vom 26. Juli 2016. BGBl. Teil I, Nr. 37 vom 29. Juli 2016, Seite 1843, ber. 2930.
- (2) Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959. Zuletzt geändert 10. Juli 2018, BGBl. Teil I, Nr. 25, S. 1122.
- (3) Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002.
- (4) Bundesamt für Strahlenschutz, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung: Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014). Endlager Konrad. SE-IB-29/08-REV-2.

wird die sogenannte Faktenerhebung durchgeführt. Elementarer Bestandteil der Erkundung des Bereichs der Einlagerungskammern sind Bohrungen. So war beispielsweise ein Erfolg das Anbohren und Erkunden der Kammer 7 auf der 750 m-Sohle.

Der Schacht Asse 5 soll zusammen mit den angrenzenden Grubenbereichen wie Infrastrukturräumen und den Anschlussstrecken ein Rückholungsbergwerk bilden, das mit Teilen des dann noch zugänglichen Grubengebäudes verbunden wird. Als Standort des Schachts kommt das Salinar östlich der Schachtanlage Asse II in Betracht. Dieser Bereich wird seit 2013 mithilfe von Bohrungen von über und unter Tage (574 m- und 700 m-Sohle) aus erkundet (Bild 8). So wurden mit der 900 m tiefen Bohrung Remlingen 15 an der Vorzugslokation Kenntnisse und Daten gewonnen, die in eine generelle geowissenschaftliche Bewertung des möglichen Schachtsatzpunkts und in die schachtbautechnische Bewertung eingehen.

Das derzeitige Fazit zeigt, dass es machbar ist, den neuen Schacht bei Anwendung einer geeigneten Teuftechnologie sowie von Gebirgssicherungs- und Ausbaumaßnahmen zu erstellen.

Weitere wichtige Informationen für die Planung werden 3D-seismische Messungen im Umfeld der Schachtanlage Asse II liefern. Die Messungen dienen dazu, belastbare Daten zum Aufbau des Deckgebirges und zur geologischen Struktur des Asse-Höhenzugs zu gewinnen. Somit sind sie ebenso ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Rückholung der radioaktiven Abfälle. Derzeit ist geplant, zuerst die Abfallgebinde aus der Kammer 7 der 725 m-Sohle rückzuholen.

In der Südflanke besteht ein Zutritt halitgesättigter Lösung. Derzeit kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass die Lösungsmenge bis zum endgültigen Ende der Arbeiten am Standort ansteigt. Für den Fall, dass der Offenhaltungs- und Stilllegungsbetrieb nicht mehr fortgeführt werden können und mit dem Ziel, die Konsequenzen des Zutritts zu minimieren, wurde eine Notfallplanung erarbeitet. Die vorgesehenen Maßnahmen umfassen beispielsweise eine Resthohlraumverfüllung der Einlagerungskammern und das Einleiten von Lösung mit hohem Magnesiumchloridgehalt, um An- und Umlöseerscheinungen der Gesteine und des Versatzes zu minimieren. Zusätzlich wären die Tagesschächte zu verschließen.

- (5) Dachroth, W.: Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. SpringerSpektrum, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- (6) Gesetz zur Beschleunigung der Rückholung radioaktiver Abfälle und der Stilllegung der Schachtanlage Asse II vom 20.04.2013; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 19, S. 921; ausgegeben zu Bonn am 24.04.2013.
- (7) BGE: Schachtanlage Asse II. Stand der Arbeiten zur Rückholung. Informationsschrift, 2018.

#### Author / Autor

Dr.-Ing. Hans-Joachim Engelhardt,  
BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine/Germany