Frank Charlier

# Comparative Survey of International Repository Projects

In 2011 the Federal Republic of Germany decided that it would completely phase out nuclear power by the end of 2022. However, nuclear energy continues to be developed at international level and this means the ongoing generation of radioactive waste. While many different disposal and storage solutions have been implemented around the world to deal with low and intermediate-level radioactive waste, there are as yet no final disposal facilities in operation for high-level radioactive waste. Nonetheless, the expectation is that in the course of the next ten years repositories will start operations in Finland, France and Sweden. Concrete plans and projects have also been developed in many other countries in the search for suitable sites for building repositories and initial decisions have been taken for a potential repository design. It can therefore be expected that somewhere in the region of 15 to 20 repositories for high-level radioactive waste will be in operation between the end of the current decade and the final years of this century.

# Internationale Endlagerprojekte im Vergleich

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich 2011 entschieden, aus der Nutzung der Kernenergie bis zum Ende des Jahres 2022 auszusteigen. Weltweit jedoch wird die Kernenergienutzung weiter ausgebaut. Durch diese Nutzung fallen radioaktive Abfälle an. Während für schwach- und mittelradioaktive Abfälle weltweit bereits viele Entsorgungs- bzw. Endlagerlösungen umgesetzt wurden, sind derzeit noch keine Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb. Allerdings ist zu erwarten, dass in den nächsten zehn Jahren erste Endlager in den Ländern Finnland, Frankreich und Schweden den Einlagerungsbetrieb aufnehmen. In vielen weiteren Ländern wurden konkrete Konzepte und Projekte zur Suche nach einem geeigneten Standort für ein Endlager entwickelt sowie erste Entscheidungen für ein mögliches Endlagerdesign getroffen. Es ist damit zu rechnen, dass ab den 2020er Jahren bis zum Ende dieses Jahrhunderts 15 bis 20 Endlager für hochradioaktive Abfälle den Betrieb aufnehmen werden.

## 1 Introduction

Nuclear energy has been used for many years both in Germany and around the world. While Germany, in the wake of the accident at the Japanese nuclear power plant of Fukushima Daiichi (INES level 7, the highest in the International Nuclear and Radiological Events Scale) – the most serious rector accident since Chernobyl – took the decision to phase-out nuclear energy completely by the end of 2022, nuclear generating capacity is still being developed and expanded elsewhere around the globe.

The question of how to dispose of radioactive waste is one that is inextricably linked to nuclear energy usage. High-level radioactive heat-generating waste is produced from research and power reactors, this generally being in the form of spent fuel elements. There is also the low and intermediate-level, non-heat-generating waste that is obtained, e.g., from nuclear power plants, medical facilities and research activities.

Storage in deep geological formations has long been favoured internationally as the most sensible solution for the permanent disposal of high-level radioactive waste. Facilities already exist, or are being planned, for storing low and intermediate-level radioactive waste both in surface and in near-surface facilities and deep geological formations.

## 1 Einleitung

Kernenergie wird in Deutschland und weltweit seit vielen Jahrzehnten genutzt. Während Deutschland sich unter den Eindrücken des schwersten Reaktorunfalls seit Tschernobyl (INES Stufe 7, höchste Stufe der „Internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse“) am japanischen Kernkraftwerksstandort Fukushima Daiichi entschlossen hat, aus der Nutzung der Kernenergie bis Ende des Jahres 2022 auszusteigen, wird weltweit die installierte Leistung weiter ausgebaut.

Mit der Nutzung der Kernenergie untrennbar verbunden ist die Fragestellung der Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle fallen an beim Betrieb von Forschungs- und Leistungsreaktoren, im Wesentlichen sind dies abgebrannte Brennelemente. Hinzu kommen mittel- und schwachaktive, nicht wärmeentwickelnde Abfälle, beispielsweise aus Betriebsabfällen der Kernkraftwerke, der Medizin oder der Forschung.

Für hochradioaktive Abfälle wird weltweit die Lagerung in tiefen geologischen Formationen als sinnvolle Lösung favorisiert. Die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen wird sowohl an der Oberfläche, oberflächennah oder in tiefen geologischen Formationen betrieben bzw. vorgesehen.

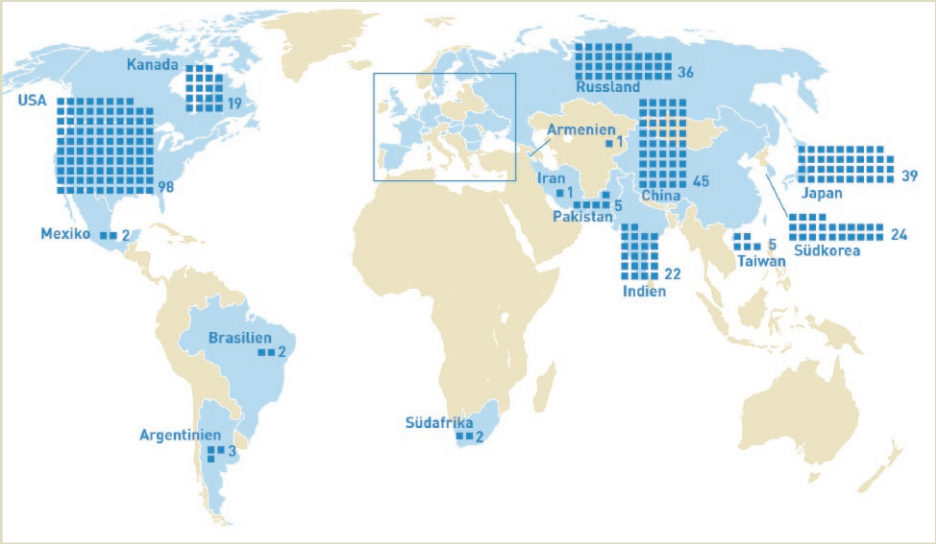


*Fig. 1. Nuclear power plants in operation worldwide excl. West/Central Europe (1).*
*Bild 1. Kernkraftwerke in Betrieb/weltweit ohne West-/Zentraleuropa (1).*

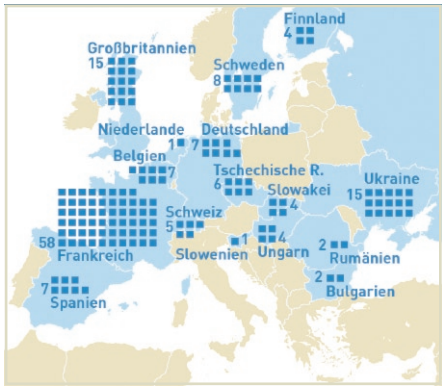


*Fig. 2. Nuclear power plants in West/Central Europe (1). // Bild 2. Kernkraftwerke in Betrieb in West-/Zentraleuropa (1).*

## 2 Nuclear energy usage in Germany and around the world

There are currently some 450 nuclear power stations operating in 31 countries with a total installed capacity of around 400,000 MW. Their global distribution is shown in Figures 1 and 2 (1). Germany's seven nuclear power plants are all to be shut down by 2022.

A total of 52 nuclear power plants are now under construction worldwide – with a further 122 being planned. The five countries with the largest number of nuclear power plants are (1):

- USA 98 units
- France 58 units
- China 45 units
- Japan 39 units
- Russia 36 units

All nuclear-energy generating countries are currently planning to dispose of their high-level radioactive waste in deep geological repositories located within the territory of origin. While in the European Union (EU) the export of radioactive waste is essentially permitted provided certain specific conditions are met, Germany has nevertheless declared itself in favour of final disposal within its own territory and indeed this policy has now been enshrined in law. The search for and choice of suitable final disposal sites for high-level radioactive waste is now regulated by the Repository Site Selection Act (StandAG) (2, 3). Germany, like other countries around the world, is focusing on the host rock formations clay, salt and crystalline as likely host rocks (Figure 3).

The following paper will initially present the repository projects currently under way in Germany before going on to review the international efforts being made in this area.

## 3 Final disposal projects in Germany

The final disposal projects now under way in Germany are reviewed elsewhere in this paper (see page 466 to 474) and so will only be briefly touched upon here.

## 2 Nutzung der Kernenergie in Deutschland und weltweit

Aktuell sind weltweit rd. 450 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von ca. 400.000 MW in 31 Ländern in Betrieb. Die Verteilung auf die Nutzerländer zeigen die Bilder 1 und 2 (1). Die in Deutschland befindlichen sieben Kernkraftwerke werden bis zum Jahr 2022 abgeschaltet.

Im Bau befinden sich weltweit 52 Kernkraftwerke – weitere 122 sind in Planung. Die fünf Länder mit der höchsten Anzahl von Kernkraftwerken sind (1):

- USA 98 Einheiten
- Frankreich 58 Einheiten
- China 45 Einheiten
- Japan 39 Einheiten
- Russland 36 Einheiten

Im Wesentlichen planen alle Kernenergieerzeugerländer, ihre hochradioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Endlagern im jeweiligen Verursacherland zu verbringen. In der Europäischen Union (EU) wäre zwar ein Export von radioaktiven Abfällen bei Erfüllung konkreter Randbedingungen grundsätzlich erlaubt, jedoch hat sich Deutschland für die Endlagerung der Abfälle im Inland ausgesprochen und dies gesetzlich verankert. Geregelt wird die Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland im Standortauswahlgesetz (StandAG) (2, 3). Weltweit, wie auch in Deutschland, wird

*Fig. 3. Sample images of clay, salt and crystalline rock (from left to right). // Bild 3. Beispielbilder für Ton-, Salz- und Kristallingestein (von links nach rechts).*

### 3.1 Search for and choice of suitable sites for the final disposal of high-level radioactive heat-generating waste

Germany does not at present possess a repository for high-level radioactive heat-generating waste, which essentially means spent fuel elements. This category of waste is currently held in interim storage at 16 different locations. The process of selecting a location as a potential disposal site was re-launched in 2017 and begins with what is referred-to as the "white geographical map" of Germany. Every region is analysed as to its particular suitability using a three-phase process based on a specific list of criteria. The objective is to identify the site that exhibits the "best possible safety level", this involving broad public participation.

*The international classification system is based on three categories of waste, namely LLW (low-level waste), ILW (intermediate-level waste) and HLW (high-level waste).*

*The German classification system uses the term "heat-generating waste", which is roughly equivalent to HLW. This comprises waste materials with high activity concentrations and a high thermal output, due to the radioactive decay. A further distinction is made for waste with negligible heat generation (approximately equivalent to LLW and ILW). This category of waste exhibits low to medium levels of radioactivity and a low level of decay heat.*

### 3.2 The Morsleben repository: closure of the facility for low and intermediate-level radioactive waste

The Morsleben Repository for Radioactive Waste (ERAM) was constructed at the former Bartensleben salt and potash mine, which lies on the border between the federal states of Saxony-Anhalt and Lower Saxony. The Morsleben repository was operated by the former GDR as a final disposal site for low and intermediate-level radioactive waste. Radioactive waste was stored there up until 1998. The facility is currently being prepared for closure.

ERAM is therefore the first storage site for radioactive waste in Germany to be safely closed in line with a nuclear-sector planning approval procedure. This operation includes the installation of sealing structures designed to act as geotechnical barriers in

*Fig. 4. In situ structural seal at the Morsleben repository (4).*
*Bild 4. In-Situ-Abdichtbauwerk im Endlager Morsleben (4).*

vorwiegend die Endlagerung in den Wirtsgesteinen Ton, Salz und Kristallin betrachtet (Bild 3).

Im Folgenden werden zuerst die Endlagerprojekte in Deutschland skizziert. Im anschließenden Kapitel werden internationale Endlagerprojekte dargestellt.

## 3 Endlagerung in Deutschland

Ein Überblick über die Endlagerprojekte in Deutschland wird an anderer Stelle in diesem Heft gegeben (s. Seite 466 bis 474) und soll daher hier nur kurz angespochen werden.

### 3.1 Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle

Für die hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle, im Wesentlichen abgebrannte Brennelemente, hat Deutschland derzeit kein Endlager. Diese Abfälle werden an 16 Standorten zwischengelagert. Der Prozess der Standortauswahl für einen möglichen Endlagerstandort wurde im Jahr 2017 neu gestartet und beginnt mit der sogenannten weißen Landkarte von Deutschland. Alle Regionen werden anhand eines Kriterienkataloges in einem dreiphasigen Verfahren auf ihre Eignung untersucht. Es soll ein Standort mit „bestmöglicher Sicherheit" unter umfassender Beteiligung der Öffentlichkeit ermittelt werden.

*International wird klassifiziert in schwachradioaktive Abfälle (Low level waste – LLW), mittelradioaktive Abfälle (Intermediate level waste – ILW) und hochradioaktive Abfälle (High level waste – HLW).*

*In Deutschland wird klassifiziert in wärmeentwickelnde Abfälle (entspricht ungefähr HLW). Dies sind Abfälle mit hoher Aktivitätskonzentration und aufgrund des radioaktiven Zerfalls mit hohen Wärmeleistungen. Weiterhin wird unterschieden in Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (entspricht ungefähr LLW und ILW). Dies sind Abfälle mit geringer bis mittlerer Radioaktivität und geringerer Zerfallswärmeleistung.*

### 3.2 Endlager Morsleben: Stilllegung des Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde im ehemaligen Steinsalz- und Kalibergwerk Bartensleben aufgefahren. Es liegt an der Grenze der Bundesländer Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Das Endlager Morsleben wurde in der ehemaligen DDR als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle betrieben. Radioaktive Abfälle wurden dort bis zum Jahr 1998 eingelagert. Derzeit wird die Anlage zur Stilllegung vorbereitet.

Das ERAM ist somit das erste Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland, das nach einem atomrechtlichen Planfeststellungsverfahren sicher stillgelegt wird. Zu sehen in Bild 4 ist ein Versuchs-Abdichtbauwerk (in-situ) mit einer Länge von 25 m. Abdichtungsbauwerke gehören zu den geotechnischen Barrieren in einem Endlager.

### 3.3 Schachtanlage Asse II: Rückholung der dort lagernden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle

In Teilen des untertägigen Bergwerks Schachtanlage Asse II, einem ehemaligen Salzbergwerk (Raum Wolfenbüttel in Nieder-

underground repositories. Figure 4 depicts an experimental (in situ) barrier seal of this kind some 25 m in length.

### 3.3 Asse II mine: retrieval of low and intermediate-level radioactive waste

Up until 1978 low and intermediate-level radioactive waste was stored in certain parts of the Asse II former salt mine at Wolfenbüttel in Lower Saxony. The photo in Figure 5, taken in 1975, shows "lost shielding containers" being placed in a storage chamber. Here the waste is being placed in permanent storage along with the "lost" concrete shielding.

Following a leach inflow observed in 1998, along with cases of instability identified in some parts of the mine workings, it was decided that the stored waste should be retrieved from the underground repository. The "Act to Accelerate the Retrieval of Radioactive Waste and the Decommissioning of the Asse II mine"(the Lex Asse) subsequently came into force in April 2013.

### 3.4 Konrad mine: construction and subsequent operation of a repository for low and intermediate-level radioactive waste

Konrad mine, which is a disused iron-ore mine near Salzgitter, is currently being converted for use as a repository for radioactive waste with negligible heat generation (low and intermediate-level radioactive waste). Around 90 % of Germany's radioactive waste is to be stored at the Konrad disposal facility. This quantity of material contains about 1 % of the radioactivity of all the radioactive waste produced in Germany. The disposal operation is due to commence in 2027. Figure 6 gives an idea of the kind of preparations now being made below ground. This photo shows a material transport tunnel leading from Konrad 2 shaft to the storage chambers.

## 4 Countries with final disposal projects for high-level radioactive waste

In order to undertake an international comparison of the repository projects currently under way we have first carried out a review of all the countries that operate nuclear power plants, have operated nuclear power plants or intend to operate them at some time in the future. A search was then undertaken to determine

*Fig. 6. Material transport tunnel leading from Konrad 2 shaft to the storage chambers (4). // Bild 6. Einlagerungstransportstrecke von Schacht Konrad 2 zu den Einlagerungskammern (4).*

*Fig. 5. Storage of "lost shielding containers" in 1975 (4).*
*Bild 5. Einlagerung von VBA-Behältern im Jahr 1975 (4).*

sachsen), wurden bis zum Jahr 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Beispielhaft ist in Bild 5 die Einlagerung von VBA-Behältern im Jahr 1975 in eine Einlagerungskammer zu sehen (VBA: Verlorene Betonabschirmung; die Abfälle werden zusammen mit der Abschirmung endgelagert).

Wegen eines im Jahr 1998 festgestellten Laugenzuflusses sowie aufgrund von Instabilitäten in einigen Bereichen des Grubengebäudes sollen die eingelagerten Abfälle des Endlagers zurückgeholt werden. Im April 2013 trat hierfür die Lex Asse, das „Gesetz zur Beschleunigung der Rückholung radioaktiver Abfälle und der Stilllegung der Schachtanlage Asse II", in Kraft.

### 3.4 Schacht Konrad: Errichtung und im Anschluss Betrieb eines Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Das Bergwerk Schacht Konrad ist ein stillgelegtes Eisenerz-Bergwerk in der Region Salzgitter, das aktuell zum Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (schwach- und mittelradioaktive Abfälle) umgerüstet wird. Ungefähr 90 % der radioaktiven Abfälle in Deutschland sollen im Endlagerbergwerk Schacht Konrad eingelagert werden. Diese 90 % beinhalten ungefähr 1 % der Radioaktivität aller in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle. Der Beginn der Einlagerung soll ab 2027 erfolgen. Bild 6 gibt einen Eindruck über die derzeitigen Vorbereitungsarbeiten unter Tage. Hier gezeigt ist eine Einlagerungstransportstrecke, die von Schacht Konrad 2 zu den Einlagerungskammern führt.

## 4 Länder mit Endlagerprojekten für hochradioaktive Abfälle

Um einen internationalen Vergleich der aktuellen Endlagerprojekte zu ermöglichen, wurden für diesen Beitrag zuerst alle Länder betrachtet, die Kernkraftwerke betreiben, betrieben haben oder zukünftig betreiben möchten. Für diese 38 Länder wurde im Anschluss recherchiert, ob konkrete Endlagerprojekte bzw. Vorhaben existieren. Man kann die Länder grob in fünf Gruppen unterteilen:

- Länder mit benanntem Endlagerstandort,
- Länder mit langfristigen konkreten Endlagerprojekten,
- Länder mit langfristigen, unspezifischen Endlagervorhaben,
- Länder mit einem multinationalen Ansatz und
- Länder ohne erkennbare Endlagervorhaben.

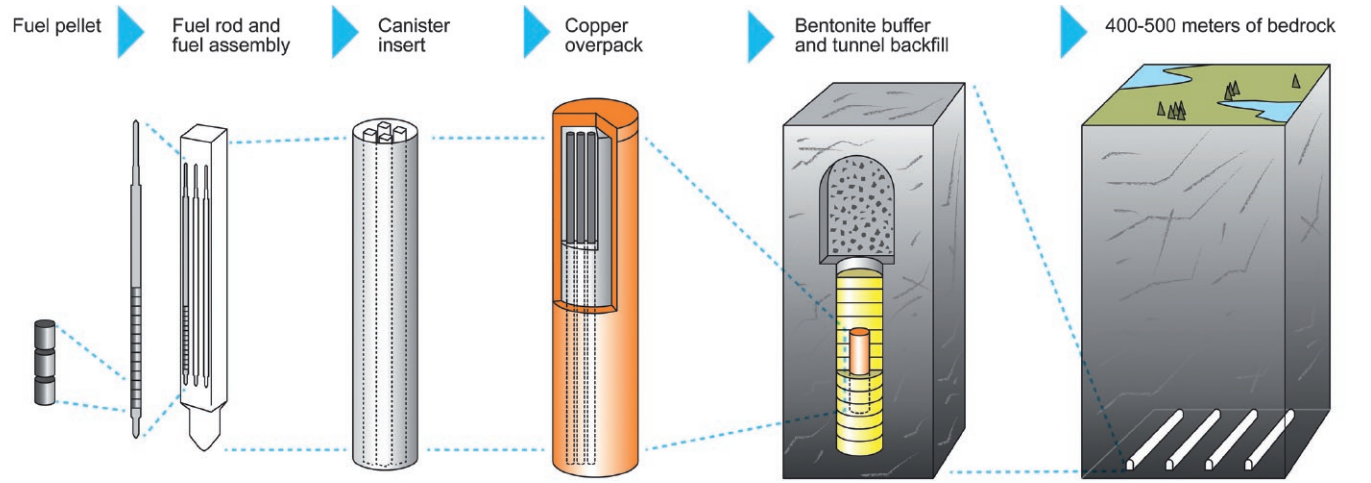


*Fig. 7. The multi-barrier concept (5). // Bild 7. Multibarrierenkonzept (5).*

whether specific final disposal projects or plans exist in the 38 countries in question. The countries involved can be broken down roughly into five groups:

- countries with a specified final disposal site;
- countries with definite long-term final disposal projects;
- countries with unspecified long-term final disposal projects;
- countries with a multinational approach; and
- countries with no discernible waste storage plans.

*These five groups represent the author's attempt to provide a better summary oversight of the individual country data obtained from the study. The groupings are based on the collected data and search results.*

A survey of the host rock formations that have been selected or are under consideration in the respective countries shows that 17 countries have opted for, or are considering, crystalline rock (usually metamorphic rock or unmetamorphosed plutonite), nine are in favour of clay rock (clastic sedimentary rock) and three favour salt rock (chemical sedimentary rock). The USA also has a repository project based on volcanic tuff as the host formation (this project is currently on standby, see Table 1). 17 of the countries in question either have still not decided on the nature of the host rock, have no repository project or plans under way or were in no position to provide reliable information for the study.

It is important to note that the global distribution of preferred host rock formations does not allow definitive conclusions to be drawn as to their potential suitability as locations for the siting of repositories. However, this breakdown does reflect the geological situation as it exists in the different countries. The host rocks selected for the task exhibit different characteristics that can be used to derive specific requirements for the design of the containers and underground storage facilities.

All the acquired data on the countries in question is compiled in Table 1.

### 4.1 Countries with identified repository sites

Finland, France and Sweden lead the field when it comes to repository projects with identified storage sites, rock laboratories and significant progress in the construction phase (see Table 1).

*Diese fünf Gruppen stellen den Versuch des Autors dar, die recherchierten Angaben zu den einzelnen Ländern zu einer besseren Übersicht zusammenzufassen. Die Eingruppierungen sind anhand der erhobenen Datenlage bzw. der Rechercheergebnisse erfolgt.*

Betrachtet man die in den Ländern bereits ausgewählten oder betrachteten Wirtsgesteine, stellt man fest, dass in 17 Ländern Kristallingestein – meist Metamorphite oder unmetamorphe Plutonite – in neun Ländern Tongestein – klastisches Sedimentgestein – und in drei Ländern Salzgestein – chemisches Sedimentgestein – ausgewählt wurde oder untersucht wird. In den USA gibt es zudem ein Endlagerprojekt im Vulkanit Tuff (derzeit Projekt im „Standby", s. Tabelle 1). 17 Länder haben entweder noch keine Entscheidung bezüglich eines Wirtsgesteins getroffen, haben kein Endlagerprojekt bzw. Vorhaben oder es konnten bei der Recherche keine belastbaren Angaben gefunden werden.

Wichtig festzustellen ist, dass sich aus der beschriebenen weltweiten Verteilung der favorisierten Wirtsgesteine keine Rückschlüsse auf eine etwaige bessere oder schlechtere Eignung der betrachteten Wirtsgesteine für ein Endlager ziehen lassen. Vielmehr spiegelt diese Verteilung die vorhandenen geologischen Situationen der jeweiligen Länder. Die ausgewählten Wirtsgesteine haben unterschiedliche Eigenschaften, aus denen sich spezifische Anforderungen an Behälter- und Endlagerdesignkonzepte ableiten lassen.

Alle erhobenen Informationen zu diesen Ländern sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

### 4.1 Länder mit benanntem Endlagerstandort

Weltweit Vorreiter für Endlagervorhaben mit benannten Endlagerstandorten, Felslaboren und großem Fortschritt bei der Errichtung sind die Länder Finnland, Frankreich und Schweden (s. Tabelle 1).

In Finnland und Schweden soll im Wirtsgestein Kristallin eingelagert werden, in Frankreich wurde als Wirtsgestein Ton ausgewählt. Der Start der Einlagerung der ersten Endlagerbehälter ist geplant in den nächsten zehn Jahren. Beginnen wird voraussichtlich Finnland Anfang der 2020er Jahre, gefolgt von Frankreich mit einem projektierten Start der Einlagerung im Jahr 2025. Schweden plant den Beginn für das Jahr 2030. Exemplarisch ist im Folgenden kurz das finnische Endlagerprojekt am Standort Olkiluoto erläutert.

Finland and Sweden have opted for crystalline as the host rock, while France has chosen clay rock. Disposal operations with the first batch of containers is due to commence in the course of the next ten years. Finland is expected to begin this work in the early 2020s, to be followed by France with a projected storage start-date in 2025. Sweden is planning to begin its disposal operation in 2030. Finland's final disposal project at its Olkiluoto facility is briefly described below.

A permanent storage facility for high-level radioactive waste is designed to prevent any prohibited release of radionuclides. This aim is achieved by installing a multi-barrier system capable of containing the waste material. This system is composed of technical, geotechnical and geological barriers.

As Figure 7 shows, the fuel pellet is encased within a fuel rod. Several such rods are combined to create the fuel assembly. After having served their use spent fuel elements are first stored underwater in wet tanks at the nuclear power plant. They are then put into wet or dry intermediate storage before being transferred to a final disposal facility. In the Finnish and Swedish concept these containers are also enclosed within a copper "overpack". The latter is both gas-tight and corrosion-resistant (Figures 7 middle and 8). The storage container protects the fuel elements from mechanical stress.

Figure 8 shows a typical container designed to hold twelve spent fuel elements. At the Olkiluoto facility all the storage containers are to be installed vertically in the host rock at depths of between 400 and 450 m (Figures 9 and 10). The copper-enclosed container represents the technical barrier within the multi-barrier system.

All the excavated cavities are completely filled in. In the area of the container itself this is done using bentonite blocks (Figure 9, no. 2), while the access tunnels are also filled with clay or bentonite buffer blocks and additionally with bentonite pellets (Figure 9, no. 3). Once the disposal operation has been completed and the containers are in place all the connecting tunnels and shafts are backfilled with bentonite. This prevents any flow paths

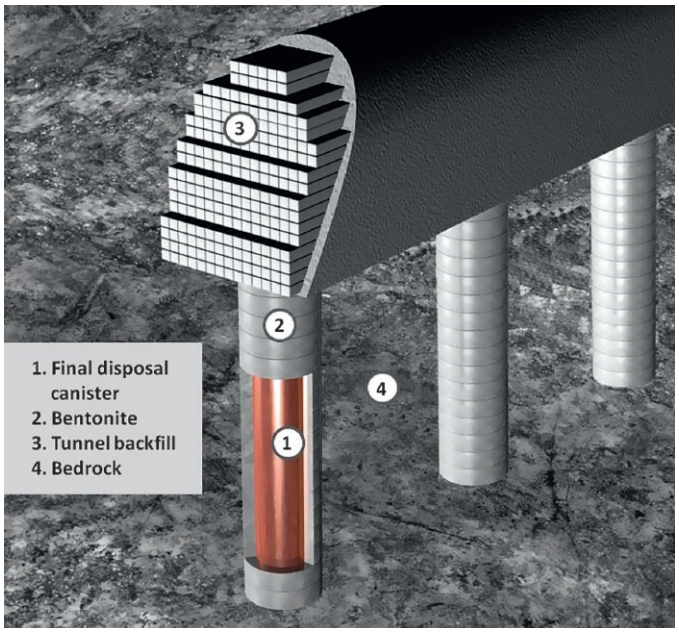


*Fig. 9. Storage and backfill arrangement (5).*
*Bild 9. Einlagerungs- und Versatzschema (5).*

*Fig. 8. Container for spent fuel elements (5).*
*Bild 8. Behälter für abgebrannte Brennelemente (5).*

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle soll verhindern, dass es zu einer unzulässigen Freisetzung von Radionukliden kommt. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein Multibarrierenkonzept zum Einschluss der Abfälle verfolgt. Hierzu gehören technische, geotechnische und geologische Barrieren.

In Bild 7 ist zu sehen, dass der Kernbrennstoff (fuel pellet) in einem Hüllrohr (fuel rod) angeordnet ist. Mehrere dieser Hüllrohre werden zu einem Brennelement (fuel assembly) zusammengefasst. Nach der Verwendung werden abgebrannte Brennelemente zuerst im Kernkraftwerk in Becken nass gelagert. Im Anschluss werden diese abgebrannten Brennelemente zunächst trocken oder nass zwischengelagert, bevor sie in einen Endlagerbehälter umgelagert werden. Im finnischen und schwedischen Konzept werden diese Behälter zusätzlich mit einem „Overpack" aus Kupfer ummantelt. Dieser ist gasdicht und korrosionsbeständig (Bilder 7 Mitte, 8). Der Endlagerbehälter schützt die Brennelemente vor mechanischer Beanspruchung.

Bild 8 zeigt einen Beispielbehälter für zwölf abgebrannte Brennelemente. Alle Endlagerbehälter sollen im Wirtsgestein von Olkiluoto in einer Teufe von etwa 400 bis 450 m vertikal eingelagert werden (Bilder 9, 10). Der kupferummantelte Endlagerbehälter stellt die technische Barriere im Multibarrierenkonzept dar.

Alle aufgefahrenen Hohlräume werden verfüllt. Im Bereich des Endlagerbehälters selbst werden hierfür Bentonitblöcke verwendet (Bild 9, Nr. 2). Im Bereich der Zugangsstrecken werden ebenfalls Ton-/Bentonitblöcke und zusätzlich Bentonitpellets verwendet. (Bild 9, Nr. 3). Nach Beendigung der Einlagerung von Endlagerbehältern werden alle Strecken und Schächte mit Bentonit versetzt. Dies verhindert, dass Fließwege für Wasser bzw. Laugen entstehen und dient zusätzlich der Stabilität des Grubengebäudes. Der Versatz bzw. die beschriebene Hohlraumverfüllung und die Abschlussbauwerke bilden die geotechnischen Barrieren im Endlagersystem.

*Bentonit ist ein Ton, der sein Volumen bei Kontakt mit Wasser vervielfacht, jedoch fast kein Wasser leitet. Durch das Aufquellen des Bentonits füllt sich der Raum zwischen Wirtsgestein und den Endlagerbehältern. Es wird so verhindert, dass Wasser an die Abfallbehälter gelangt. Im Fall eines Lecks eines Behälters wird der Transport von Radionukliden zum Wirtsgestein bzw. in die Biosphäre verhindert.*

developing for water and leaches and also helps maintain the stability of the mine infrastructure. The bentonite buffer, backfill and sealing structures combine to create the geotechnical barriers required for the final disposal site.

*Bentonite is a clay whose volume expands fourfold when in contact with water, yet which allows almost no water to pass through. As it swells the bentonite fills up the cavity space between the host rock and the storage containers. This prevents water getting to the canisters. In the event of a leakage at one of the containers there is no possibility of radionuclides being transferred into the host rock or into the biosphere.*

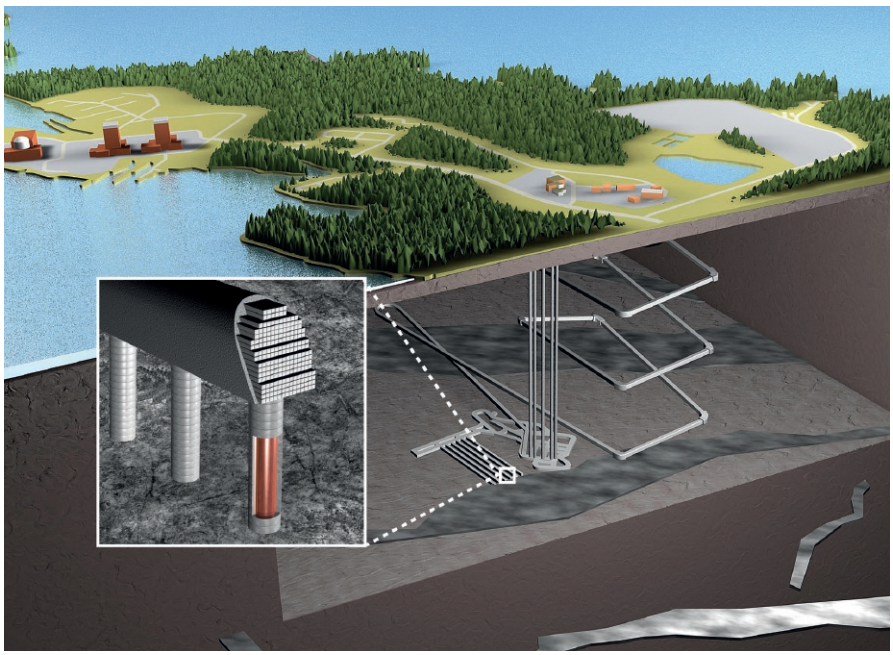

*Fig. 10. Underground layout and location of the waste storage area (5).*
*Bild 10. Grubengebäude und Lage des Einlagerungsbereichs (5).*

The bedrock in the Olkiluoto area (gneiss) is somewhere between 1,800 and 1,900 million years old (Figure 9, no. 4). This rock should protect the containers from external elements and also creates mechanically and chemically stable conditions for the repository in general. The host rock forms the geological barrier within the multi-barrier concept.

Figure 10 shows the underground layout of the repository. Access is provided by several surface shafts and a spiral tunnel. The diagram shows the general infrastructure along with the location of the waste storage area where the containers are to be kept.

### 4.2 Countries with definite long-term final disposal projects

This group comprises 13 countries that have real intentions of organising final disposal facilities in deep geological formations. Here too clay, salt and crystalline rocks are being considered as the potential host environment. Geological data are being collected for the site decision-making process, though in varying degrees of detail.

In some of the countries, such as Switzerland, the site selection process is already well advanced and a location is expected to be chosen within a few years. The plan is to commence the disposal process in 2060. Germany has still a long way to go before the decision is made on a suitable disposal site. The aim is to reach a decision by 2031. We are therefore lagging one or two decades behind Switzerland in terms of the site selection process.

Switzerland and Germany now find themselves in a procedure in which the public has been, or will be, heavily involved. In the other countries that feature in this group it is likely that the storage site will be selected by the national government without any significant participation formats. Here it is anticipated that the site decision-making processes and the construction of the repository will generally be completed at a faster pace. In Russia, e.g., the site is expected to be chosen by 2025 and the waste disposal operation is likely to commence by the year 2035.

Countries that have definite long-term waste disposal projects can be listed as: Belgium, Bulgaria, China, Germany, the UK, India, Japan, Canada, Russia, Switzerland, the Czech Republic, Hungary and the USA (see Table 1).

Das Wirtsgestein in der Region Olkiluoto (Gneis) ist ungefähr 1.800 bis 1.900 Mio. Jahre alt (Bild 9, Nr. 4). Es soll die Endlagerbehälter vor äußeren Einflüssen schützen und schafft mechanisch und chemisch stabile Bedingungen für das Endlager. Das Wirtsgestein bildet die geologische Barriere im Multibarrierenkonzept.

In Bild 10 wird das Grubengebäude veranschaulicht. Erschlossen wird das Grubengebäude über mehrere Schächte sowie eine Wendel. Neben der notwendigen Infrastruktur ist auch die Lage des Einlagerungsbereichs der Endlagerbehälter zu sehen.

### 4.2 Länder mit langfristigen konkreten Endlagerprojekten

Diese Ländergruppe umfasst 13 Nationen, in denen die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen konkret beabsichtigt ist. Als mögliche Wirtsgesteine werden auch hier Ton, Salz und Kristallin betrachtet. Geologische Daten für die Standortentscheidung wurden erhoben, jedoch in sehr unterschiedlichen Detailierungsgraden.

In einigen Ländern, wie beispielsweise in der Schweiz, ist der Standortauswahlprozess schon weit vorangeschritten. Hier soll innerhalb der nächsten Jahre ein Standort ausgewählt werden. Der Beginn der Einlagerung ist für das Jahr 2060 geplant. In Deutschland sind wir noch weit entfernt von einer Standortentscheidung. Angestrebt ist diese Entscheidung für das Jahr 2031. Der Schweiz „hinken“ wir demnach circa ein bis zwei Jahrzehnte im Verfahren hinterher.

Die Schweiz und Deutschland befinden sich in einem Prozess, in dem die Bevölkerung stark mit einbezogen wurde bzw. werden soll. In anderen Ländern dieser Ländergruppe ist zu erwarten, dass die Standortauswahl von den jeweiligen Regierungen ohne größere Beteiligungsformate erfolgt. Hier ist abzusehen, dass die Standortentscheidungen und die Errichtung der Endlager insgesamt zügiger erfolgen. Beispielsweise soll in Russland der Standort bis zum Jahr 2025 ausgewählt werden und die Einlagerung soll bereits im Jahr 2035 beginnen.

### 4.3 Countries with unspecified long-term final disposal projects

The countries listed below are giving initial considerations to the development of a final disposal project. Some have carried out design studies for a site selection process and have engaged in exploration programmes. In some individual cases potential dates have been named for the possible commencement of disposal operations. However none of these activities could yet be qualified as "planning in-depth". This group comprises: Argentina, Brazil, Lithuania, Mexico, Romania, Slovenia, Slovakia, Spain, Taiwan, Ukraine (see Table 1).

### 4.4 Countries with a multinational approach

The idea of adopting a multinational approach to final disposal projects dates back to the 1970s. There are several considerations that may lie behind this thinking, including:

- lack of resources for establishing an independent geological final disposal facility;
- insufficient technical know-how for constructing a geological final disposal facility;
- international cooperation offers economic benefits;
- international cooperation has ecological advantages.

Adopting a multinational approach to repository projects with a view to finding common solutions is also an acceptable policy within the EU, though this does require a legally binding international agreement between the partner countries involved. Moreover, such an arrangement raises a number of questions with regard to:

- safeguards (monitoring the nuclear material);
- governance (control and regulation systems);
- national and international (public) acceptance;
- cross-border transport; and
- national and international law.

According to research, the countries that have been identified as considering a multinational approach comprise Latvia, Slovenia, Slovakia and the United Arab Emirates.

However, there are still no tangible signs that the nations in question are engaged in specific studies or are making visible efforts in this area.

### 4.5 Countries with no discernible final disposal plans

The following countries either currently have, or in future will have, high-level radioactive waste from nuclear power plant operations: Egypt, Armenia, Iran, Italy, Kazakhstan, the Netherlands, Pakistan, South Africa, Turkey, Uzbekistan, the United Arab Emirates and Belarus. However, these countries either have no discernible final disposal projects or plans or were not open to survey.

### 4.6 Final disposal in deep boreholes

As shown in the table 1, the possibility of storing radioactive waste in deep boreholes is also being examined in some individual cases. Germany too has explored the potential of this particular option (see page 475 to 484). The example given in Figure 11 shows the basic features of such a storage system (6).

Nachfolgend zusammengefasst sind die Länder mit langfristigen konkreten Endlagerprojekten: Belgien, Bulgarien, China, Deutschland, Großbritannien, Indien, Japan, Kanada, Russland, Schweiz, Tschechien, Ungarn, USA (s. Tabelle 1).

### 4.3 Länder mit langfristigen, unspezifischen Endlagervorhaben

In den folgenden Ländern sind erste Überlegungen zu Endlagervorhaben vorgenommen worden: Argentinien, Brasilien, Litauen, Mexiko, Rumänien, Slowenien, Slowakei, Spanien, Taiwan, Ukraine (s. Tabelle 1). Konzeptionelle Studien für einen Standortauswahlprozess sowie Erkundungsprogramme wurden in Teilen durchgeführt. Auch wurden vereinzelt Zeitpunkte für einen möglichen Beginn der Einlagerung benannt. Der „Tiefgang" der Planungen für ein Endlager ist aber noch nicht als konkret einzustufen.

### 4.4 Länder mit einem multinationalen Ansatz

Die Idee, einen multinationalen Ansatz für Endlagervorhaben zu verfolgen, geht bis in die 1970er Jahre zurück. Mehrere Überlegungen können diesem Gedanken zugrunde liegen, u.a.:

- fehlende Ressourcen, um eigene geologische Endlager zu errichten,
- fehlendes Fachwissen, um eigene geologische Endlager zu errichten,
- internationale Zusammenarbeit bietet wirtschaftliche Vorteile,
- internationale Zusammenarbeit bietet ökologische Vorteile.

Der Ansatz, dass Länder ein multinationales Endlagervorhaben vorantreiben, um gemeinsame Lösungen zu finden, ist beispielsweise auch in der EU möglich, setzt allerdings einen völkerrechtlich verbindlichen Vertrag zwischen den Partnerländern voraus. Dies wirft jedoch Fragen auf in Bezug auf:

- Safeguards (Kernmaterialüberwachung),
- Governance (Steuerungs- und Regelungssysteme),
- nationale und internationale (öffentliche) Akzeptanz,
- grenzüberschreitenden Verkehr und
- nationales und internationales Recht.

Identifizierte Länder, bei denen laut Recherche ein multinationaler Ansatz in Betracht gezogen wird, sind Lettland, Slowenien, Slowakei und die Vereinigten Arabischen Emirate.

Konkrete Aktivitäten über Studien hinaus bzw. Bemühungen hin zu einem multinationalen Ansatz sind bei diesen Ländern aktuell nicht erkennbar.

### 4.5 Länder ohne erkennbare Endlagervorhaben

Folgende Länder haben aktuell oder zukünftig hochradioaktive Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken: Ägypten, Armenien, Iran, Italien, Kasachstan, Niederlande, Pakistan, Südafrika, Türkei, Usbekistan, Vereinigte Arabische Emirate, Weißrussland. Es sind jedoch keine Endlagerprojekte bzw. Vorhaben erkennbar oder sie konnten nicht recherchiert werden.

### 4.6 Endlagerung in tiefen Bohrlöchern

Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass international vereinzelt die Option der Einlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern betrachtet wird. Auch in Deutschland wurde diese Option

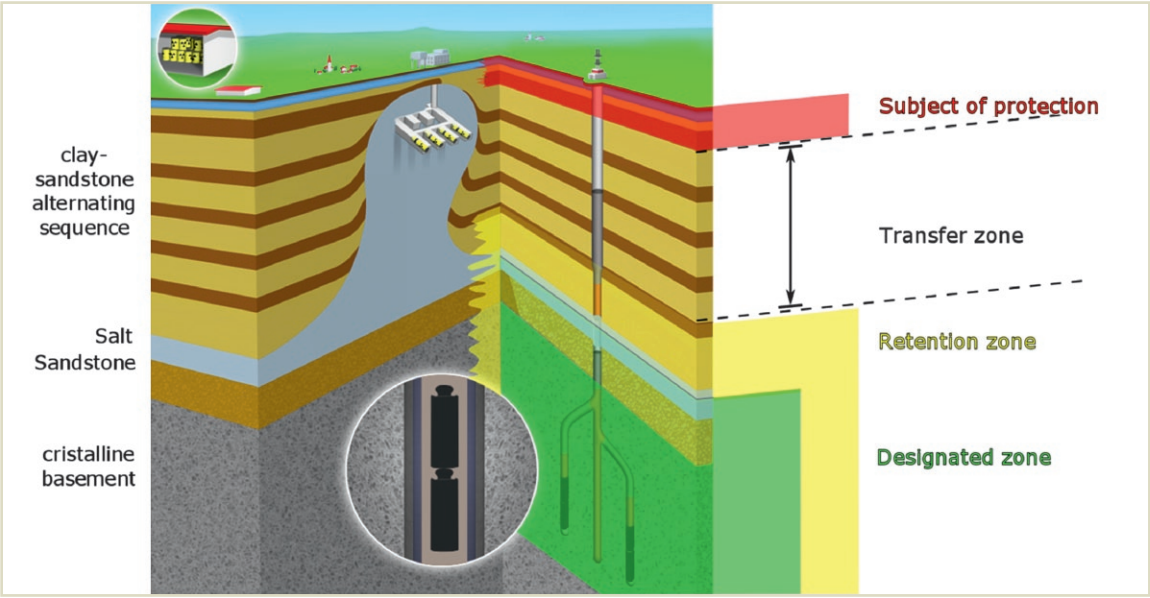


*Fig. 11. Schematic example of borehole disposal (6). // Bild 11. Mögliches Schema für eine Bohrlochlagerung (6).*

While this particular option is being given further consideration in the USA, e.g., and is currently the subject of active research and development activities, Germany has now decided – following a recommendation from the Commission for the Storage of High-level Radioactive Waste – that it will no longer actively pursue this particular disposal route (7).

## 5 Summary

If we look beyond the borders of Germany it is clear that nuclear energy will continue to play a major role in electricity generation for years to come. But Germany has opted for a different pathway and after 2022 nuclear power will no longer feature as part of the national energy mix. What remains is the challenge of disposing of and storing the radioactive waste. The search for a suitable site for the final disposal of high-level radioactive waste has been regulated by the Repository Site Selection Act that came into force in 2017 (3). Clay, crystalline and salt rock formations have all been investigated as potential host rocks. This selection process, and the work of constructing the repository itself, is likely to last for many decades to come.

On an international level the progress achieved and the efforts being made in the development of repositories for the disposal of radioactive waste can be broken down as follows: three countries have identified final disposal sites (Finland, France and Sweden), 13 countries have definite long-term final disposal projects and ten countries have long-term, though unspecified, final disposal plans. There are also twelve countries that are using, have used or would like to use nuclear energy, but as yet have no discernible plans for dealing with the resulting radioactive waste.

As a conclusion it can be said that the storage of highly radioactive waste in final disposals is well underway at international level. In the decades to come further final disposal projects will follow. In Germany, the Repository Site Selection Act provides for a decision-taking route to a repository. We are, however, only at the beginning of a long process.

untersucht (s. Seite 475 bis 484). Hierzu zeigt Bild 11 eine Beispielskizze für ein mögliches Einlagerungsschema (6).

Während speziell in den USA diese Einlagerungsoption weiter betrachtet wird und auch aktiv Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten stattfinden, wird in Deutschland dieser Entsorgungspfad nach einer Empfehlung der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ nicht aktiv weiterverfolgt (7).

## 5 Zusammenfassung

Der Blick über die Landesgrenzen von Deutschland hinaus zeigt, dass Kernenergie in den nächsten Jahrzehnten weiter eine wesentliche Rolle bei der Energieerzeugung spielen wird. In Deutschland gehen wir einen anderen Weg. Ab dem Jahr 2022 wird die Kernenergie für den Energiemix keinen Beitrag mehr leisten. Was bleibt, ist die Herausforderung der Entsorgung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle. Seit dem Jahr 2017 regelt in Deutschland das neue Standortauswahlgesetz die Suche nach einem geeigneten Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (3). Als mögliche Wirtsgesteine werden Ton-, Kristallin- und Salzformationen untersucht. Dieser Auswahlprozess und die Errichtung eines Endlagers werden noch viele Jahrzehnte andauern.

International kann man die Fortschritte bzw. Bemühungen zur Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in einem Endlager unterteilen in drei Länder mit benanntem Endlagerstandort (Finnland, Frankreich und Schweden), 13 Länder mit langfristigen konkreten Endlagerprojekten und zehn Länder mit langfristigen, jedoch unspezifischen Endlagervorhaben. Ohne erkennbare Endlagervorhaben sind aktuell zwölf Länder, welche die Kernenergie nutzen, genutzt haben bzw. nutzen möchten.

Abschließend lässt sich feststellen, dass international der Beginn der Einlagerung von hochradioaktiven Abfälle in ein Endlager kurz bevorsteht. Es werden in den nachfolgenden Jahrzehnten weitere Endlagerprojekte folgen. In Deutschland ist der Weg zur Standortentscheidung für ein Endlager durch das Standortauswahlgesetz skizziert, wir befinden uns jedoch erst am Anfang eines langen Prozesses.

| Country<br>Land | Potential or chosen host rock<br>Mögliches oder ausgewähltes Wirtsgestein | Project status of final disposal projects for high-level radioactive waste (HLW)<br>Projektstatus Endlager für hochradioaktive Abfälle (HLW) | No. of NPP in operation / planned or under construction / shut down<br>Anzahl KKW in Betrieb / geplant oder in Bau / stillgelegt |
|---|---|---|---|
| Egypt / Ägypten | | No data / Keine Angaben | 0 / 4 / 0 |
| Argentina<br>Argentinien | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site identified as yet. Possible areas have been designated. Development work on a repository has been postponed by the CNEA (Atomic Energy Authority) for the time being. Reprocessing is now being discussed. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Mögliche Regionen wurden benannt. Die Bemühungen für ein Endlagerprojekt wurden von der Atomenergiebehörde CNEA vorerst zurückgestellt. Wiederaufarbeitung wird diskutiert. | 3 / 1 / 0 |
| Armenia<br>Armenien | | No data<br>Keine Angaben | 1 / 0 / 1 |
| Belgium<br>Belgien | clay<br>Ton | No final disposal site designated as yet. Underground rock laboratory in boom clay at Mol at a depth of 220 m. Repository may be commissioned in 2080. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Felslabor im Ton (Boom Clay) am Standort Mol in 220 m Teufe. Inbetriebnahme eines Endlagers ggf. 2080. | 7 / 0 / 0 |
| Brazil<br>Brasilien | | No final disposal site designated as yet. Rules are to be put in place for a site selection process.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Regularien für einen Standortauswahlprozess sollen entwickelt werden. | 2 / 1 / 0 |
| Bulgaria<br>Bulgarien | clay<br>Ton | No final disposal site designated as yet. A provisional, criteria-based site selection process has identified five areas for further investigation. Also: reprocessing in Russia. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Ein vorläufiger kriterienbasierter Standortauswahlprozess hat fünf Gebiete für weitere Untersuchungen identifiziert. Auch: Wiederaufarbeitung in Russland. | 2 / 0 / 4 |
| China | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. 3-phase plan for site selection. Exploration holes are being drilled in three regions. An underground rock laboratory is planned. Government aims: storage site to be designated by 2020 and facility constructed by 2050. Reprocessing also planned.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. 3-Phasen-Plan zur Standortentscheidung. Explorationsbohrungen wurden in drei Regionen abgeteuft. Felslabor ist geplant. Regierungsziel: Endlagerstandort benannt bis 2020, errichtet bis 2050. Wiederaufarbeitung geplant. | 47 / 53 / 0 |
| Germany<br>Deutschland | clay, salt, crystalline<br>Ton Salz, Kristallin | No final disposal site designated as yet. Search has recommenced for a suitable site. Various surface and underground exploration programmes are planned. A 3-phase, criteria-based process with public involvement. The option for waste retrieval is provided for in law. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Neustart der Suche nach einem geeigneten Standort. Diverse übertägige und mehrere untertägige Erkundungsprogramme geplant. 3-phasiger, kriterienbasierter Prozess mit Beteiligung der Öffentlichkeit. Die Option der Rückholung der Abfälle ist gesetzlich vorgesehen. | 7 / 0 / 25 |
| Finland<br>Finnland | crystalline<br>Kristallin | Final disposal project with triple-barrier concept at Olkiluoto (KBS 3 concept). Storage depth 400 to 450 m. The waste is stored in a container within a copper casing. The storage area is backfilled with bentonite. The rock laboratory is in place. Disposal is due to commence in the 2020s. The disposal process is expected to take around 100 years. / Endlagerprojekt mit Drei-Barrieren-Konzept in Olkiluoto (KBS-3-Konzept). Teufe des Endlagers in 400–450m. Die Abfälle werden in einen Behälter mit einer Kupferummantelung gelagert. Versatz des Einlagerungsbereiches mit Bentonit. Felslabor ist vorhanden. Start der Einlagerung geplant für die 2020er Jahre. Einlagerungszeitraum: ca. 100 Jahre. | 4 / 2 / 0 |
| France<br>Frankreich | clay<br>Ton | Final disposal in Meuse/Haute-Marne selected in 1998. Disposal is planned to start in 2025. Final disposal at a depth of 500 m. The facility is to operate for 120 years. The option for waste retrieval is provided for in law. Rock laboratories at Tournemire, Meuse/Haute-Marne. Also: reprocessing of the waste.<br>Endlagerstandort in Meuse/Haute-Marne, ausgewählt 1998. Start der Einlagerung geplant 2025. Endlager in 500 m Teufe. Betrieb für 120 Jahre geplant. Die Option der Rückholung der Abfälle ist gesetzlich vorgesehen. Felslabore in Tournemire, Meuse/Haute-Marne. Auch: Wiederaufarbeitung der Abfälle. | 58 / 1 / 10 |
| UK<br>Großbritannien | | No final disposal site designated as yet. Geological data are being gathered from a depth of 200 to 1,000 m for a potential site. The choice of site is to be made in conjunction with "interested" communities. Disposal is planned to commenced in 2075.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Aktuell Erhebung von geologischen Daten von 200 – 1.000 m Teufe für einen möglichen Endlagerstandort. Die Standortauswahl soll in Zusammenarbeit mit „interessierten" Gemeinden erfolgen. Start der Einlagerung geplant für 2075. | 6 / 15 / 28 |
| India<br>Indien | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. Geological data are being gathered and analysed for a potential storage site. Disposal is planned at a depth of 500 to 600 m. An underground laboratory is to be set up. / Endlagerstandort benannt. Aktuell Erhebung und Auswertung von geologischen Daten für einen möglichen Endlagerstandort. Einlagerung in 500–600 m Teufe geplant. Ein Untertagelabor soll errichtet werden. | 22 / 27 / 0 |
| Iran | | No known final disposal project. / Kein Endlagerprojekt bekannt. | 1 / 2 / 0 |
| Italy<br>Italien | | No known final disposal project. HLW kept in interim storage. Reprocessing in France.<br>Kein Endlagerprojekt bekannt. HLW wird zwischengelagert. Wiederaufarbeitung in Frankreich. | 0 / 0 / 4 |
| Japan | | No known final disposal project at present. Feasibility of a facility is being investigated. Key technologies for a repository are being developed and tested. Studies are under way into the present state-of-the-art worldwide. A site selection programme has been launched.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Die Machbarkeit eines Endlagers wird untersucht. Schlüsseltechnologien für ein Endlagerprojekt werden entwickelt und getestet. Studien zum Stand der Technik weltweit werden durchgeführt. Ein Standortauswahlprogramm wurde gestartet. | 37 / 11 / 21 |
| Canada<br>Kanada | crystalline, sedimentary rock<br>Kristallin, Sedimentgestein | No final disposal site designated as yet. The plan is to install a multi-barrier system for a repository in a deep geological formation. The waste is to be enclosed in a container within a copper casing. The storage area to be backfilled with a buffer of bentonite blocks. The current process is one of Adaptive Phased Management (APM). Nine communities in Ontario are being considered as potential repository sites. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Geplant ist ein Multibarrierenkonzept für ein Endlager in einer tiefen geologischen Formation. Die Abfälle sollen in einen Behälter mit einer Kupferummantelung gelagert werden. Versatz des Einlagerungsbereichs geplant mit Bentonitblöcken. Aktuell Prozess des „Adaptive Phased Management (APM)"; 9 Kommunen in Ontario können sich derzeit ein Endlager vorstellen. | 19 / 0 / 5 |

*Table 1. Countries with final disposal projects for high-level radioactive waste and/or nuclear power plants (1, 8, 9, 10).*
*Tabelle 1. Länder mit Endlagerprojekten für hochradioaktive Abfälle und/oder Kernkraftwerken (1, 8, 9, 10).*

| Country<br>Land | Potential or chosen host rock<br>Mögliches oder ausgewähltes Wirtsgestein | Project status of final disposal projects for high-level radioactive waste (HLW)<br>Projektstatus Endlager für hochradioaktive Abfälle (HLW) | No. of NPP in operation / planned or under construction / shut down<br>Anzahl KKW in Betrieb / geplant oder in Bau / stillgelegt |
|---|---|---|---|
| Kazakhstan<br>Kasachstan | | No known final disposal project. HLW is placed in interim storage.<br>Kein Endlagerprojekt bekannt. HLW wird zwischengelagert. | 0 / 0 / 1 |
| Latvia<br>Lettland | | Latvia does not produce nuclear energy and has no plans to do so. Latvia is considering a conceptual approach to the development of a multinational repository. No storage site has been designated as yet. / Lettland erzeugt keine Kernenergie und plant dies auch nicht. Lettland erwägt einen konzeptionellen Ansatz für die Entwicklung eines multinationalen Endlagers. Derzeit kein Endlagerstandort benannt. | 0 / 0 / 0 |
| Lithuania<br>Litauen | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. Potential geological formations have been investigated. The Swedish KSB 3H concept (horizontal disposal) is being used as a model.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Mögliche geologische Formationen wurden untersucht. Das schwedische KSB-3H-Konzept (horizontale Einlagerung) dient als Vorlage. | 0 / 0 / 2 |
| Mexico<br>Mexiko | clay, salt, crystalline<br>Ton, Salz, Kristallin | No final disposal site designated as yet. Options under consideration include using an existing mine and excavating a new repository mine. The site selection process is to take place between 2045 and 2055. The disposal operation could start in 2065.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Ein bestehendes Bergwerk ebenso wie das Neuauffahren eines Endlagerbergwerks werden in Betracht gezogen. Die Standortauswahl soll zwischen 2045 und 2055 erfolgen. Möglicher Beginn der Einlagerung geplant für 2065. | 2 / 0 / 0 |
| Netherlands<br>Niederlande | | No final disposal site designated as yet. HLW is placed in interim storage. Reprocessing in France.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. HLW wird zwischengelagert. Wiederaufarbeitung in Frankreich. | 1 / 0 / 1 |
| Pakistan | | No final disposal project as yet. HLW is placed in interim storage.<br>Derzeit kein Endlagerprojekt. HLW wird zwischengelagert. | 3 / 5 / 0 |
| Romania<br>Rumänien | crystalline<br>Kristallin | No final disposal project designated. Provisional investigations have been conducted in green schist (metamorphic rock) as a potential site. HLW is placed in interim storage.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Vorläufige Untersuchungen für einen geeigneten Standort wurden in Grünschiefer (Metamorphit) durchgeführt. HLW wird zwischengelagert. | 2 / 2 / 0 |
| Russia<br>Russland | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. The government has tested a number of potential storage sites. The selection decision is expected by 2025. Disposal is due to begin in 2035. A rock laboratory is planned. Some waste was stored in deep boreholes prior to 2011. Waste was also taken in from other countries. Reprocessing carried out at several sites.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Die Regierung hat mögliche Standorte für ein Endlager geprüft. Standortentscheidung bis 2025. Beginn der Einlagerung geplant für 2035. Felslabor geplant. Bis 2011 wurde teilweise in tiefen Bohrlöchern eingelagert. Es werden auch Abfälle anderer Länder angenommen. Wiederaufarbeitung an mehreren Standorten. | 36 / 23 / 7 |
| Sweden<br>Schweden | crystalline<br>Kristallin | Final disposal project with triple-barrier concept in Forsmark (KBS 3 concept). Storage facility at a depth of 400 to 700 m. The waste is stored in a container enclosed in copper. The storage zone is backfilled with a bentonite buffer. Disposal is due to commence in 2030. The waste disposal phase will last 40 years. Underground rock laboratory at Äspö.<br>Endlagerprojekt mit Drei-Barrieren-Konzept in Forsmark (KBS-3-Konzept). Teufe des Endlagers: 400–700 m. Die Abfälle werden in einem Behälter mit einer Kupferummantelung gelagert. Versatz des Einlagerungsbereichs mit Bentonit. Start der Einlagerung geplant für 2030. Einlagerungszeitraum: 40 Jahre. Felslabor in Äspö. | 8 / 0 / 4 |
| Switzerland<br>Schweiz | clay<br>Ton | Project aimed at geological deep storage. Horizontal storage with bentonite buffer. Depth about 600 m. An announcement is expected in 2022 as to where the deep storage facility is to be built. The siting decision and the general licence from the Federal Council are expected in 2029. The plan is to commence the disposal operation in 2060. Rock laboratories have been established at Mont Terri and Grimsel.<br>Projekt zur geologischen Tiefenlagerung. Horizontale Einlagerung und Versatz mit Bentonit. Teufe: ca. 600 m. 2022 wird voraussichtlich bekannt gegeben, wo das Tiefenlager gebaut werden soll. Der Standortentscheid und die Rahmenbewilligung des Bundesrats werden für 2029 erwartet. Start der Einlagerung geplant für 2060. Felslabore: Mt. Terri, Grimsel. | 5 / 0 / 0 |
| Slovenia<br>Slowenien | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. The current concept is based on the Swedish KBS 3V system (vertical storage). Disposal is planned to commence in 2065. Possible involvement in a multinational facility. / Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Das aktuelle Konzept ist an das schwedische KBS-3V-Konzept (vertikale Einlagerung) angelehnt. Beginn der Einlagerung geplant für 2065. Die Beteiligung an einem multinationalen Endlager wird in Betracht gezogen. | 4 / 2 / 3 |
| Slovakia<br>Slowakei | clay, crystalline<br>Ton, Kristallin | No final disposal site designated as yet. Options being investigated include a national repository and a multinational facility. Disposal at a national repository is scheduled to commence in 2065.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Die Optionen nationales Endlager oder multinationales Endlager werden untersucht. Beginn der Einlagerung bei nationalem Endlager geplant für 2065. | 1 / 0 / 1 |
| Spain<br>Spanien | | No final disposal site designated as yet. Interim storage of waste currently being given priority. No active efforts being made as yet to develop a repository project.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Die Zwischenlagerung der Abfälle wird prioritär verfolgt. Ein Endlagerprojekt wird noch nicht aktiv angestrebt. | 7 / 0 / 3 |
| South Africa<br>Südafrika | | No final disposal site designated as yet. Options being considered are "direct disposal" (repository mine) and borehole disposal. Reprocessing also being discussed.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. „Direct Disposal" (Endlagerbergwerk) und Bohrlochlagerung wird in Betracht gezogen. Wiederaufarbeitung wird diskutiert. | 2 / 0 / 0 |
| Taiwan | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. Feasibility study has been set up. The site selection process is expected to run until 2028. Disposal scheduled to commence in 2055.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Eine Machbarkeitsstudie wurde erstellt. Der Standortauswahlprozess soll bis 2028 andauern. Beginn der Einlagerung geplant für 2055. | 4 / 2 / 2 |

*Table 1. Countries with final disposal projects for high-level radioactive waste and/or nuclear power plants (1, 8, 9, 10).*
*Tabelle 1. Länder mit Endlagerprojekten für hochradioaktive Abfälle und/oder Kernkraftwerken (1, 8, 9, 10).*

| Country<br>Land | Potential or chosen host rock<br>Mögliches oder ausgewähltes Wirtsgestein | Project status of final disposal projects for high-level radioactive waste (HLW)<br>Projektstatus Endlager für hochradioaktive Abfälle (HLW) | No. of NPP in operation / planned or under construction / shut down<br>Anzahl KKW in Betrieb / geplant oder in Bau / stillgelegt |
|---|---|---|---|
| Czech Republic<br>Tschechien | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. Two potential sites are to be identified by 2020. The final selection is due for 2025. Disposal is scheduled to commence in 2065.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Bis 2020 sollen zwei mögliche Standorte ausgewiesen werden. Bis 2025 der endgültige Standort. Beginn der Einlagerung geplant für 2065. | 6 / 2 / 0 |
| Turkey<br>Türkei | | No final disposal site designated as yet. Options: national solution or return of fuel elements to the country of origin (Russia).<br>Derzeit kein Endlagerprojekt. Optionen: nationale Lösung oder Rückgabe der Brennelemente an das Produktionsland (Russland). | 0 / 8 / 0 |
| Ukraine | crystalline<br>Kristallin | No final disposal site designated as yet. Investigations carried out in the past few decades have focused on geological formations. The site selection process is at an early stage. Final disposal concepts have not yet been developed in any detail. Reprocessing in Russia.<br>Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Mögliche geologische Formationen wurden in den letzten Jahrzehnten untersucht. Die Standortauswahl befindet sich in einem frühen Stadium. Endlagerkonzepte wurden noch nicht vertieft entwickelt. Wiederaufarbeitung in Russland. | 15 / 2 / 4 |
| Hungary<br>Ungarn | clay<br>Ton | No final disposal site designated as yet. The concept provides for a repository at a depth of between 500 and 800 m. Site selection to be made by 2030. Disposal scheduled to commence by 2065. Derzeit kein Endlagerstandort benannt. Das Konzept sieht ein Endlager in 500–800 m Teufe vor. Die Standortauswahl soll bis 2030 erfolgen. Beginn der Einlagerung geplant für 2065. | 4 / 2 / 0 |
| USA | clay, salt, crystalline<br>Ton, Salz, Kristallin | No final disposal site yet designated for spent fuel elements. Transuranic material (waste from military sources with a long half-life) is currently stored at a depth of 600 m in rock salt formations at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico. The plan was to store HLW in volcanic tuff host rock at a depth of 200 to 425 m at the Yucca Mountain site in Nevada. Surface and underground infrastructure has been established. This repository project has now been put "on hold" by the government. The option of waste disposal in deep boreholes is being investigated.<br>Derzeit kein Endlagerstandort für abgebrannte Brennelemente benannt. Im Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), New Mexico, werden Transurane (Abfälle aus militärischen Bereichen mit großen Halbwertszeiten) in einer Teufe von 600 m in einer Salzformation eingelagert. In Nevada, am Standort Yucca Mountain, wurde in einem Teufenbereich von 200–425 m im Wirtsgestein Tuff die Einlagerung von HLW geplant. Infrastruktur über und unter Tage wurde errichtet. Dieses Endlagerprojekt wurde politisch in „Standby" versetzt. Die Option der Einlagerung in tiefen Bohrlöchern wird geprüft. | 97 / 6 / 26 |
| Uzbekistan<br>Usbekistan | | No data.<br>Keine Angaben. | 0 / 2 / 0 |
| United Arab Emirates<br>Ver. Arab. Emirate | | No final disposal project as yet. Options: national and multinational repository or return of fuel elements to country of origin.<br>Derzeit kein Endlagerprojekt. Optionen: nationales und multinationales Endlager oder Rückgabe der Brennelemente an das Produktionsland. | 0 / 4 / 0 |
| Belarus<br>Weißrussland | | No final disposal project as yet. Option: return of fuel elements to country of origin (Russia).<br>Derzeit kein Endlagerprojekt. Option: Rückgabe der Brennelemente an das Produktionsland (Russland). | 0 / 2 / 0 |

*Table 1. Countries with final disposal projects for high-level radioactive waste and/or nuclear power plants (1, 8, 9, 10).*
*Tabelle 1. Länder mit Endlagerprojekten für hochradioaktive Abfälle und/oder Kernkraftwerken (1, 8, 9, 10).*

**References / Quellenverzeichnis**


(1) NUC19: Bilder und Informationen des Nuklearforum Schweiz/nuclearplanet.ch (mit freundlicher Genehmigung der Verwendung); Informationsabruf am 30.08.2019; https://www.nuklearforum.ch. 2019.

(2) EURATOM11: Richtlinie 2011/70/EURATOM des Rates der Europäischen Union über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, 2011.

(3) StandAG17: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Bonn, 2017.

(4) BGE19: Pressebilder und Informationen der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (mit freundlicher Genehmigung der Verwendung); Informationsabruf am 30.08.2019; https://www.bge.de/bge/presse/pressebilder. 2019.

(5) POS19: Pressebilder und Informationen der Posiva Oy Olkiluoto (mit freundlicher Genehmigung der Verwendung); Informationsabruf am 30.08.2019; http://www.posiva.fi/en/media/image_gallery. 2019.

(6) DBD16: Bracke, G.; Charlier, F.; Geckeis, H.; Harms, U.; Heidbach, O.; Kienzler, B.; Liebscher, A.; Müller, B.; Prevedel, B.; Röckel, T.; Sperber, A.: Gutachten Tiefe Bohrlöcher für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT52. 2016.

(7) KOM17: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268. 2016.

(8) DOE16: Faybishenko, B.; Birkholzer, J.; Sassani, D.; Swift, P.: International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation – Fifth Worldwide Review. United States. doi:10.2172/1353043. 2016.

(9) IRSN16: Storage of nuclear spent fuel: concepts and safety issues. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). IRSN Report No 2019-0181. 2019.

(10) WNA19: Informationen der World Nuclear Association/ world-nuclear.org; Informationsabruf am 04.09.2019; https://www.world-nuclear.org/our-association/who-we-are/contact-us.aspx. 2019.



**Author / Autor**

Dr.-Ing. Frank Charlier, Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET), RWTH Aachen University, Aachen