

# Cigéo: the French deep geological repository for radioactive waste – excavation techniques and technologies tested in underground laboratory and forecasted for the future construction of the project

Cigéo is the French project for the repository of the high activity and intermediate long-lived radioactive waste. It will be situated at a depth of 500 m, in a clayish rock formation. An underground laboratory was built in the year 2000 and numerous tests are performed since 15 years, in order to know in detail the behavior

of the rock and its ability to confine radioactive elements. In addition, this underground laboratory has brought and will continue to bring many lessons on the excavation methods to be chosen for the construction of Cigéo.

# Cigéo: das französische Tiefenlager für radioaktive Abfälle – im Untertagelabor getestete und für den künftigen Bau des Projekts vorgesehene Vortriebs-techniken und -technologien

Cigéo bezeichnet das französische Projekt für ein Endlager für langlebige hoch- und mittelradioaktive Abfälle. Es wird in einer Teufe von 500 m in einer tonhaltigen Gebirgsformation angelegt. Im Jahre 2000 wurde ein Untertagelabor eingerichtet, und seit 15 Jahren werden dort zahlreiche Versuche

durchgeführt, um detailliert das Verhalten des Gebirges und dessen Fähigkeit zum Einschluss radioaktiver Elemente zu erforschen. Darüber hinaus liefert das Untertagelabor Erkenntnisse über geeignete Vortriebsmethoden für den Bau des Cigéo-Endlagers.

## 1 General presentation of Cigéo

The Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) in Châtenay-Malabry, France, is the French public body in charge of radioactive waste management. As such, ANDRA has the responsibility to imagine, design, and build the project Cigéo for the long term disposal of intermediate and high level long-lived waste packages (1). This particular mission was defined through a French law voted in the year 2006, after studies and finding of an adapted geological layer, leaktight enough for the purpose of long term containment.

At present date, the preliminary design is ongoing, first phase of this preliminary design is almost finished, which allows to give a general view of the project. The general view given lower is necessarily very short, compared to the content of all studies performed up to now. Nevertheless the authors will try to give a complete view of its underground structures.

## 1 Das Cigéo-Endlager – ein Überblick

Die Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Nationale Agentur für das Management radioaktiver Abfälle, ANDRA) in Châtenay-Malabry, Frankreich, ist die in Frankreich mit der Verwaltung radioaktiver Abfälle beauftragte staatliche Behörde. Demzufolge ist ANDRA dafür verantwortlich, das Cigéo-Projekt für die langfristige Entsorgung von mittel- und hochradioaktiven langlebigen Abfallgebänden zu konzipieren, zu entwerfen und zu bauen (1). Dieser spezielle Auftrag wurde durch ein im Jahr 2006 verabschiedetes französisches Gesetz festgelegt, nachdem Studien zum Auffinden einer geeigneten, für die Zwecke eines langfristigen Einschlusses ausreichend dichten geologischen Schicht geführt hatten.

Derzeit findet die Bauvorplanung statt. Die erste Phase dieser Bauvorplanung ist fast abgeschlossen, so dass eine generelle Einschätzung des Projekts möglich wird. Die nachfolgende allgemeine

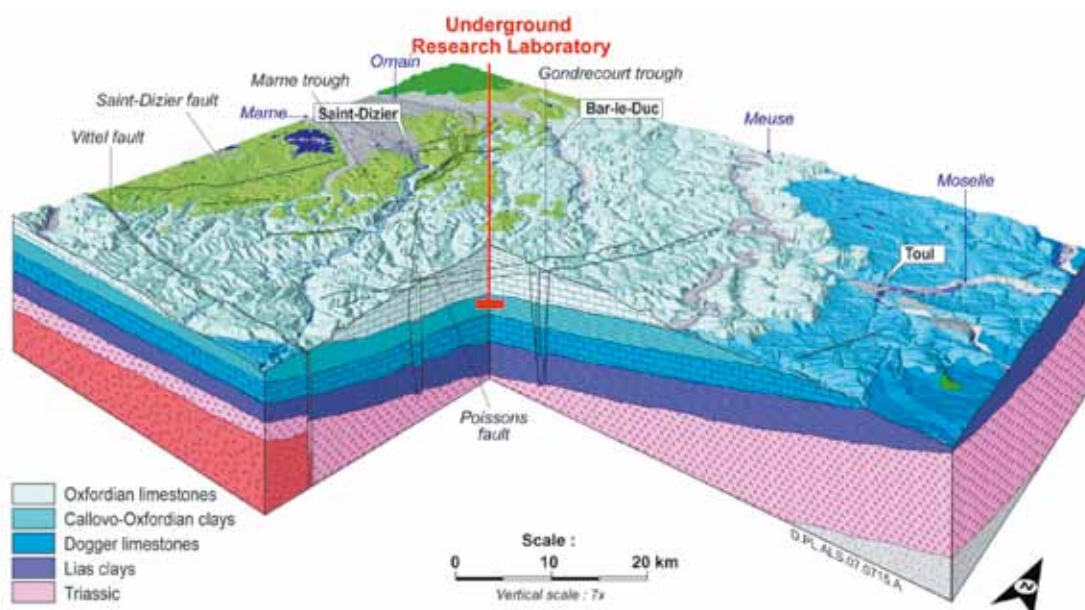


Fig. 1. Geology of Bure area (URL and Cigéo) // Bild 1. Geologie des Gebiets um Bure (URL und Cigéo)

The disposal structures are situated at a depth of 500 m towards the surface, in a layer of clayish rock – the Callovo-Oxfordian layer also called “Argillites”. Figure 1 shows the geological scheme of the region where Cigéo will be built.

The different parts of the project are the following:

- Two inclined tunnels (ramps), which permit access to the level of the disposal (-500 m). Both inclined tunnels are 8 m in diameter and 4,4 km long. Purpose of the first tunnel is the transport of waste packages to the repository, the second tunnel is a service tunnel for construction, service, safety, maintenance and so on.
- Five vertical shafts, 6 or 8 m in diameter and 500 m deep. The shafts are forecasted for two main uses: construction of underground facilities and operation of the repository.
- A disposal area for intermediate long live waste packages (say ILW or MAVL). This area includes two main access tunnels, connected to the bottom of inclined tunnels, 50 storage tunnels – 500 m long each, 8 m in diameter – and air return tunnels for nuclear ventilation of the MAVL area.
- A disposal area for high activity waste packages (say HLWO or HAO) which are old enough for having reached a temperature low enough for disposal. This area includes two access galleries, from which the disposal cells are bored (75 cells, 700 mm in diameter, 80 m long each, for a total of 6 km).
- Six disposal areas for exothermic high activity waste package (say HLW or HA1/2) which are presently too hot to be put in contact with the underground structures and the embedding rock. The total length of cells to be built in this area is about 148 km (1474 cells, 700 mm in diameter, 100 m long).
- Tens of connecting tunnels and technical rooms.
- Service galleries, forecasted for construction purpose, for instrumentation purpose, and for operation purpose.

Figure 2 gives a general 3D view of the underground structures.

Darstellung ist im Vergleich zu den Inhalten aller bisher durchgeführten Studien noch relativ kurz. Dennoch versuchen die Autoren die Untertagebauwerke vollständig darzustellen.

Die Endlagerbauwerke befinden sich in einer Tiefe von 500 m unter der Erdoberfläche in einer Schicht aus tonhaltigem Gestein – die auch als „Argillit“ bezeichnete Callovo-Oxfordian-Gesteinsformation. Bild 1 zeigt schematisch den geologischen Aufbau des Gebiets, in der das Cigéo-Endlager errichtet wird.

Das Gesamtprojekt besteht aus folgenden Teilen:

- Zwei tonnlägige Schächte (Rampen), die den Zugang zur Entsorgungsebene (-500 m) ermöglichen. Beide Schächte haben einen lichten Durchmesser von 8 m und eine Länge von 4,4 km. Die erste Rampe dient dazu, Abfallgebände zum Tiefenlager zu transportieren, die zweite ist eine Dienstleistungsstrecke für Bau-, Service-, Sicherheits-, Instandhaltungszwecke etc.
- Fünf seigeren Schächten mit einem Durchmesser von 6 bzw. 8 m und einer Teufe von 500 m. Die Schächte sind für zwei wichtige Nutzungen vorgesehen: den Bau der Untertage-Einrichtungen und den Betrieb des Tiefenlagers.
- Einem Lagerbereich für mittelradioaktive langlebige Abfallgebände, beispielsweise der Kategorien ILW oder MAVL. In diesem Bereich liegen auch zwei Hauptstrecken, die mit dem Fuß der Rampen verbunden sind, 50 Lagerräume – von jeweils 500 m Länge und 8 m Durchmesser – und Abwetterstrecken für die Bewetterung des MAVL-Bereichs.
- Einem Entsorgungsbereich für hochradioaktive Abfallgebände, beispielsweise der Kategorien HLWO oder HAO, die soweit abgekühlt sind, dass sie eine ausreichend niedrige Temperatur zur Entsorgung erreicht haben. Dieser Bereich umfasst auch zwei Zugangsstrecken, von denen aus die Entsorgungszellen gebohrt werden (75 Zellen von je 700 mm Durchmesser und 80 m Länge über eine Gesamtlänge von 6 km).
- Sechs Entsorgungsbereichen für exotherme hochradioaktive Abfälle, beispielsweise HLW oder HA1/2, die derzeit zu heiß sind, um sie mit den Untertagebauwerken und dem Umge-

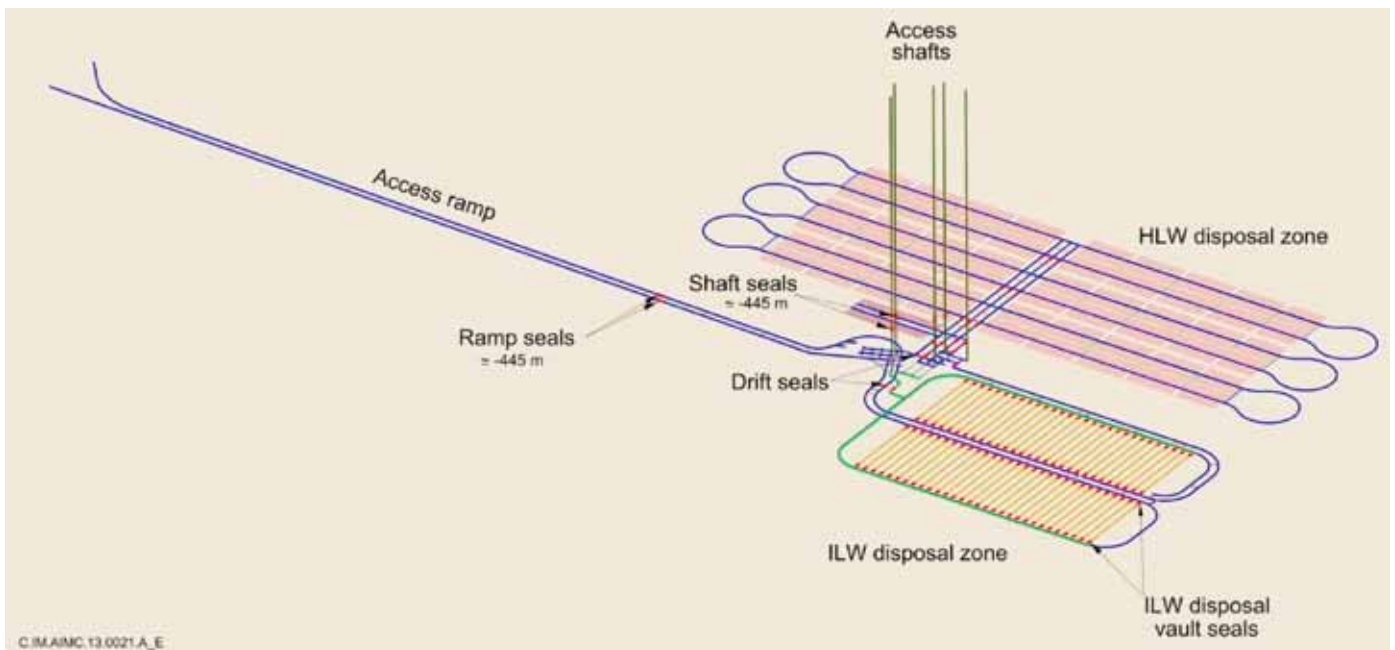


Fig. 2. General 3D view of underground structures // Bild 2. Allgemeine 3D-Ansicht der Untertagebauwerke

At time of closure of repository, all remaining galleries will be backfilled, then sealed for long term watertightness by means of gallery seals.

## 2 Bure Underground Research Laboratory

Since November 1999, ANDRA has been working at the Bure Underground Research Laboratory (URL) in order to investigate and qualify the Callovian-Oxfordian clayish formation (AKA the “argillites”) likely to receive in the year 2028 the first of many intermediate and high level long lived waste packages (2).

The Cigéo project must take into account all the data, knowledge and experience gathered over more than 15 years of activities in the URL.

The spectrum of activities concerned encompasses a wide array of subjects:

- Preliminary surface and subsurface scientific investigations.
- Construction of surface facilities and excavation works (shaft sinking, digging of drifts, drilling vertical, slanted and horizontal boreholes).
- Scientific experimentations (from geophysics to geomechanics, including geology, hydrogeology, geochemistry, corrosion, biology, diffusion, monitoring...).
- Maintenance and operations.
- Environmental monitoring.
- Communication and dialogue with the stakeholders to ease the social acceptance.

The Bure URL is site specific and constructed in the vicinity of the Cigéo site, since it is used to confirm the suitability of the selected host rock (the argillites), to guide the specific design and architecture of the future disposal facility and to validate some of the various technological construction methods in conditions that are particular to the site. Figure 3 gives an overview of the Bure URL architecture.

zungsgestein in Kontakt zu bringen. Die Gesamtlänge der in diesem Bereich zu bauenden Zellen beträgt etwa 148 km (1474 Zellen von 700 mm Durchmesser und 100 m Länge).

- Einer Vielzahl von Verbindungsstrecken und Technikräumen.
- Servicestrecken, die für Bau-, Instrumentierungs- und Betriebszwecke vorgesehen sind.

Bild 2 zeigt eine allgemeine 3D-Darstellung der Untertagebauwerke.

Zum Zeitpunkt der Schließung des Endlagers werden alle verbleibenden Grubenräume verfüllt und dann mithilfe von Streckenabdichtungen langfristig wasserdicht versiegelt.

## 2 Untertage-Forschungslabor Bure

Seit November 1999 arbeitet ANDRA am Untertage-Forschungslabor (Underground Research Laboratory, URL), um die Callovian-Oxfordian-Tongesteinsformation (auch als „Argillit“ bezeichnet) zu untersuchen und zu qualifizieren, die im Jahr 2028 wahrscheinlich die ersten von vielen Gebinden mit mittel- und hochradioaktiven langlebigen Abfällen aufnehmen wird (2).

Das Cigéo-Projekt muss alle Daten, das gesamte Wissen und die Erfahrungen berücksichtigen, die über mehr als 15 Jahre im URL gesammelt wurden.

Das Spektrum der diesbezüglichen Aktivitäten ist vielfältig:

- Wissenschaftliche Voruntersuchungen der Oberfläche und des Untergrunds.
- Bau von Übertage-Einrichtungen und Vortriebsarbeiten (Schachtabsenken, Strecken auffahren, Bohren von vertikalen, schrägen und horizontalen Löchern).
- Wissenschaftliche Versuche (von Geophysik bis Geomechanik, einschließlich Geologie, Hydrogeologie, Geochemie, Korrosion, Biologie, Diffusion, Überwachung ...).
- Instandhaltung und Betrieb.

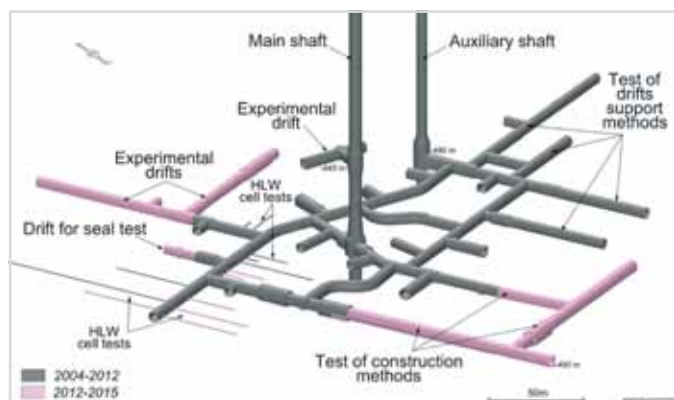


Fig. 3. Overview of the Bure URL architecture  
Bild 3. Überblick über die Auslegung des URL Bure

### 3 Bure URL technical and experimental drifts

The URL infrastructures are composed of two vertical shafts – for access and auxiliary – technical drifts, dedicated to access, escape routes, power supply, safety shelters, mechanical maintenance, ventilation or water exhaust, and experimental drifts per se.

All those underground components are shown in figure 3, also indicating the dates of construction. The shaft sinking operations started in 2000 and finished in 2005 with the completion of the shaft equipment. The drift excavation activities – mainly at a 490 m depth – started in 2005 and are planned to be still ongoing at least until 2030.

Indeed, there are practical limits to the engineering and construction work that can be carried out in the URL and transposed to the potential disposal site since the activities implemented in the site-specific underground laboratory were initially rather more focused on the qualification of the host formation to safely receive and contain (on a long term basis) radioactive waste than on construction technology development.

Furthermore, technical tests are somehow limited by the infrastructures of the Bure URL. The diameters of the shafts and drifts are at scale half of the work considered in Cigéo, excavation and transport means are also commensurate with the initially science-oriented needs. Those infrastructures were deliberately down-sized to comfort the stakeholders in the belief that the URL could never be transformed at a later stage in a repository. Technically speaking, this transformation is effectively not possible.

However, in the most recent years of URL operations, technical tests focusing on excavation technologies have been implemented and are still planned for the years to come. They are paving the way to the final choices of construction techniques considered for Cigéo.

The main excavating technologies experimented during the construction of URL and tests performed are the following:

- Excavation of shafts in limestones and clays by explosive (drill and blast) from the top to the bottom.
- Excavation of galleries: classical mining techniques (hydraulic hammer, road header, bolts, steel arches and shotcrete).
- Construction of galleries: thick shotcrete, with or without compressive nodes, and concrete poured in place.

- Umweltüberwachung.
- Kommunikation und Dialog mit Interessenvertretern, um die soziale Akzeptanz zu erhöhen.

Das URL Bure ist standortspezifisch und wurde in der Nähe des Cigéo-Standorts errichtet, um die Eignung des ausgewählten Wirtsgesteins – des Argillits – zu bestätigen, Hinweise für die spezielle Bauweise und Auslegung der künftigen Entsorgungseinrichtung zu liefern und einige der unterschiedlichen technischen Herstellungsverfahren unter den speziell für diesen Standort geltenden Bedingungen zu validieren. Bild 3 gibt einen Überblick über die Auslegung des URL Bure.

### 3 Technik- und Versuchsstrecken des URL Bure

Die Infrastruktur des URL besteht aus zwei seigeren Schächten – dem Zugangs- und einem Hilfsschacht – Strecken, die speziell dem Zugang-, der Evakuierung, Energieversorgung, als Schutzräume, für mechanische Instandhaltung, Bewitterung oder Wasserhaltung angelegt sind, sowie den eigentlichen Versuchsstrecken.

Bild 3 zeigt alle Untertageanlagen mit den Zeiträumen für ihre Herstellung. Das Abteufen der Schächte begann im Jahr 2000 und war 2005 mit der Fertigstellung der Schachteinrichtungen abgeschlossen. Die Arbeiten zur Auffahrung der Strecken – vorrangig in einer Teufe von 490 m – begannen im Jahr 2005, und werden planmäßig mindestens bis 2030 weiterlaufen.

Tatsächlich gibt es praktische Grenzen für die technischen und baulichen Arbeiten, die im URL durchgeführt und auf den potentiellen Endlagerstandort übertragen werden können, weil die im standortspezifischen Untertagelabor vorgenommenen Tätigkeiten sich anfangs eher auf die Qualifizierung der Wirtsgesteinsformation, die (langfristig) radioaktive Abfälle sicher aufnehmen und einschließen muss, als auf die Weiterentwicklung der Bautechnik konzentrieren.

Darüber hinaus werden die technischen Versuche in gewissem Maß durch die generelle Infrastruktur des URL Bure eingeschränkt. Die Durchmesser der Schächte und Strecken sind nur halb so groß wie bei den für den Cigéo-Standort geplanten, die Auffahr- und Transportmittel sind ebenfalls an die anfänglich wissenschaftlich ausgerichteten Bedürfnisse angepasst. Die Anlagen wurden mit Absicht kleiner gehalten, um die Stakeholder darin zu bestätigen, dass das URL keinesfalls später zu einem Endlager umgebaut werden könnte. Vom technischen Standpunkt her ist ein solcher Umbau tatsächlich nicht möglich.

Demnach wurden in den meisten der vergangenen Betriebsjahre des URL technische Versuche mit Schwerpunkt auf Auffahr- und Vortriebstechnik durchgeführt. Diese sind auch für die kommenden Jahre geplant. Sie bereiten den Weg für die endgültige Auswahl der für die Herstellung des Cigéo-Endlagers anzuwendenden Techniken.

Die während des Baus des URL und der dort durchgeführten Versuche geprüften wichtigen Auffahrtechniken sind:

- Abteufen von Schächten in Kalkstein und Tongestein mit Bohr- und Sprengarbeit.
- Streckenvortrieb: klassische Bergbautechniken (hydraulische Bohrhämmer, Teilschnittmaschinen, Anker, Stahlbögen und Spritzbeton).
- Streckenausbau: dicke Spritzbetonschicht mit oder ohne Verdichterstationen und vor Ort gegossener Beton.

- In addition, a test was successfully performed in gallery with a single head tunnel boring machine (TBM) and placing of concrete precast segments at the rear of the machine. Another test will be performed in the perpendicular direction, in order to have a better knowledge of the behavior of the TBM in that direction.
- During the construction of the gallery with a TBM, opportunity was taken to test compressive grouting at the extrados of the segments.
- For the construction of high activity package cells (HLW or HA), 700 mm diameter, a micro-TBM was tested in different configurations, in order to know more in detail the behavior of the "skin" of the excavated rock (spalling effect), and obtain precise elements for the grouting of annular space round the steel lining of the cell. A first test of annular space grouting will take place by the end of 2015.

#### 4 For the future project

The tests in URL are not finished yet, and will continue during some years, in order to maximize the knowledge on the best excavation techniques to be preferred for the different parts of Cigéo, before start of construction. Parallel to the URL tests the knowledge on behavior of Callovo-Oxfordian formation will continue to be improved.

As far as the general dimensions of the works are concerned, the diameter of the shafts, ramps and drifts in Cigéo will be somehow twice that of the existing Bure URL, but no main difference is expected, except the progress ratio of the works. Nevertheless the true ratio of progress will take into account the industrial type of construction of Cigéo, compared to the test type of the Laboratory.

Excavation techniques, presently forecasted for Cigéo, then are the following:

- Blasting for the shafts.
- TBM, full face, for both inclined tunnels, and setting of precast concrete segments in the TBM. When arriving at the bottom of those galleries, the TBMs will continue for a minimal length of 1 km, in order to prepare the following construction phase.
- Road header machine for all other galleries and ILW (MAVL) storage vaults. This method allows to work parallelly on different fronts. This will be important for the program of construction.
- Hydraulic hammer for local works, where a boring machine cannot be of any use.
- Micro-TBM for all HLW cells.

These methods represent a good range of excavation solutions. Nevertheless contractors are not already nominated for the works and would be able to propose betterments in relation with their habits, their knowledge and with industrial evolution of the excavating machines.

#### 5 Conclusion

The time spend in construction and all tests phases at the Underground Research Laboratory of Bure were a unique opportunity to precise a lot of choices, not only in relation to the behavior of the Callovo-Oxfordian formation and its capacity to confine radioactive elements, but also to obtain a precise knowledge on

- Außerdem wurde in einer Strecke erfolgreich ein Versuch mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) und dem Einbringen vorgefertigter Betonsegmente hinter der Maschine durchgeführt. Eine weitere Streckenauffahrung im rechten Winkel dazu soll dazu dienen, mehr Erkenntnisse über das Verhalten der TBM in dieser Richtung zu erlangen.
- Während der Streckenauffahrung mit der TBM wurde das Hinterfüllen des Streckenausbaus getestet.
- Für das Herstellen der Zellen für hochradioaktive Gebinde (HLW oder HA) mit einem Durchmesser von 700 mm wurde eine Mikro-Tunnelbohrmaschine in verschiedenen Konfigurationen getestet, um detaillierte Erkenntnisse zum Verhalten der „Haut“ des aufgebohrten Gebirges (Abplatzungen) zu gewinnen und die Elemente für das Verpressen des Ringraums an der Außenseite der Stahlauskleidung der Zellen genau zu untersuchen. Ein erster Versuch zum Verpressen des Ringraums wird Ende 2015 durchgeführt.

#### 4 Für das künftige Projekt

Die Versuche im URL sind noch nicht abgeschlossen und werden noch einige Jahre fortgesetzt, um vor Baubeginn die Erkenntnisse über die am besten geeigneten Vortriebstechniken für die verschiedenen Teile des Cigéo-Endlagers zu maximieren. Parallel zu den URL-Versuchen wird sich auch das Wissen über das Verhalten der Callovo-Oxfordian-Gesteinsformation weiter verbessern.

Was die generellen Abmessungen der Bauwerke angeht, werden die Durchmesser der Schächte, Rampen und Strecken im Cigéo-Endlager etwa doppelt so groß sein wie im bestehenden URL Bure. Es werden jedoch keine großen Unterschiede erwartet, wenn man von der Auffahrgeschwindigkeit absieht. Dennoch wird der tatsächliche Baufortschritt von der Bauweise des Cigéo-Endlagers im industriellen Maßstab im Vergleich zur Versuchsanlage beeinflusst werden.

Die derzeit für das Cigéo-Endlager vorgesehenen Vortriebstechniken sind daher:

- Sprengvortrieb für die Schächte.
- TBM, Vollprofil, für beide Rampen und Einbau von vorgefertigten Betonsegmenten hinter der TBM. Wenn die Sohle dieser Rampen erreicht ist, wird die TBM über eine Länge von min. 1 km weiter eingesetzt, um die nachfolgende Bauphase vorzubereiten.
- Einsatz einer Teilschnitt-Maschine für alle anderen Strecken und ILW(MAVL)-Lagerkammern. Mit dieser Methode kann man parallel an verschiedenen Stellen angreifen. Das wird für den Ablauf des Bauvorhabens von Bedeutung sein.
- Hydraulische Bohrhämmer für lokale Arbeiten, bei denen ein maschineller Vortrieb nicht sinnvoll ist.
- Einsatz einer Mikro-TBM für alle HLW-Zellen.

Es gibt somit eine große Bandbreite von Lösungen für die Vortriebstechnik. Bisher wurden jedoch noch keine Spezialfirmen für die Arbeiten unter Vertrag genommen. Diese werden später sicherlich auf Grund ihres Expertenwissens, ihrer Erfahrung und auch durch die Weiterentwicklung der Vortriebstechnik weiterführende Verbesserungsvorschläge unterbreiten.

the excavation methods which will be the best solutions for construction of Cigéo.

Additionally due to progressive arrival at Cigéo of the radioactive waste packages – for instance, first exothermic HLW packages will arrive by 2085 – the project was designed to be consistent with a progressive construction of disposal areas (panels), parallel with the operation activities. In such conditions the construction works could take place for more than a century – for an operational period of about 140 years. This will give some time for the future evolution of excavation equipment and technologies and their use for Cigéo.

#### References / Quellenverzeichnis

1. National Inventory of Radioactive Materials and Waste. Synthesis Report, 2012. <http://www.ANDRA.fr/download/ANDRA-international-en/document/editions/467va.pdf>.
2. French law 91-1381 of 30 December 1991 relating to research on the management of radioactive waste.

#### Authors / Autoren

François Chauvet, Director of Infrastructure Engineering Department, and Jean-Michel Bosgiraud, Technological Development Program Manager, DIP branch, Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France

## 5 Fazit

Die für den Bau und alle Versuchsphasen des Untertage-Forschungslabors Bure aufgewendete Zeit bot eine einzigartige Gelegenheit, um einerseits eine Vielzahl von Optionen nicht nur in Bezug auf das Verhalten der Callovo-Oxfordian-Gesteinsformation und deren Fähigkeit zum Einschluss radioaktiver Elemente zu präzisieren, sondern auch um genaue Kenntnisse über die Vortriebsmethoden zu erlangen, die die besten Lösungen für den Bau des Cigéo-Endlagers darstellen.

Die ersten exothermen HLW-Gebinde werden etwa im Jahr 2085 im Cigéo-Endlager ankommen. Wegen der danach zunehmenden Anzahl eintreffender Gebinde wurde das Projekt ausserdem so ausgelegt, dass der weitere Bau von Endlagerbereichen (Bauabteilungen) mit dem parallelen Betrieb des Lagers vereinbar ist. Unter diesen Bedingungen könnten die Bauarbeiten mehr als ein Jahrhundert andauern – für eine Betriebszeit von etwa 140 Jahren. Dies verschafft Zeit für die künftige Weiterentwicklung von Vortriebsmaschinen und -techniken sowie deren Nutzung im Cigéo-Endlager.