

Deep geological repositories in the UK

Current underground planning and competency requirements for waste packaging systems

Nuclear fission has been used for commercial electricity generation in the UK since 1956. This early (and world first) entry into the nuclear energy industry has created a huge challenge in the form of waste disposal and decommissioning, as many of the original facilities have left behind types of waste that by today's standards are both abnormal and also poorly documented. The UK has

already agreed on the concept of using deep geological formations for the permanent storage of this waste, and the material yet to be produced. However, the choice of site is still undecided. This paper outlines the main issues at stake and discusses the previous approach and future proposals for the construction of a permanent waste repository in the United Kingdom.

Geologisches Endlager in Großbritannien

Stand der Planungen unter Tage und Anforderungen an endlagerfähige Abfallgebinde

In Großbritannien wird seit 1956 die Kernspaltung zur kommerziellen Stromerzeugung genutzt. Dieser sehr frühe (weltweit erste) Einstieg in die Kernenergie erzeugt heute große Herausforderungen an Abfallentsorgung und Rückbau, da viele frühe Anlagen aus heutiger Sicht ungewöhnliche und auch schlecht dokumentierte Abfallarten zurückließen. Die Endlagerung dieser

und der weiterhin erzeugten Abfälle in einer tiefen geologischen Formation ist in Großbritannien ein beschlossenes Konzept. Ein Standort steht jedoch noch nicht fest. Dieser Beitrag gibt einen Überblick der Problemstellung und der bisherigen und zukünftigen Vorgehensweise beim Bau eines Endlagers im Vereinigten Königreich (UK).

Nuclear energy in the UK

MAGNOX

In the 1950s the UK broke new ground with its MAGNOX reactors, which were the first in the world to use the controlled fission of atomic nuclei to produce electricity on a commercial basis. Metallic uranium in naturally occurring isotope mixtures was used to fuel the system, while graphite was employed as a moderator to slow down the neutrons required for the fission process. The thermal energy produced by the nuclear fission was used to generate steam from carbon dioxide – a gas with a good mix of high heat capacity and chemical stability – compressed to 10 bar. The cladding material for the 1 m-long and 50 mm-thick fuel rods is a magnesium-aluminium alloy designed for thermal stability and low oxidation, a concept that gives the MAGNOX system its name (MAGnesium Non OXidising).

Typical benchmark data for MAGNOX power stations are as follows:

- number of units per plant: two to four (usually two)
- moderator: graphite bricks with an edge length of about 10 m
- fuel rods: about 20,000 per unit
- thermal output: approx. 500 MW per unit
- own consumption: approx. 60 MW per plant
- grid feed: about 250 MW per plant
- maximum burnup: approx. 3 GW-days/t fuel (GWd/t).

Kernenergie in UK

MAGNOX

Mit den MAGNOX-Reaktoren betrat Großbritannien in den 50er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts Neuland. Weltweit erstmalig wurde die kontrollierte Spaltung von Atomkernen zur kommerziellen Stromerzeugung genutzt. Als Brennstoff diente metallisches Uran in natürlich vorkommender Isotopen-Mischung. Zum Abbremsen der für die Kernspaltung notwendigen Neutronen kam Graphit als Moderator zum Einsatz. Die Wärmeenergie aus der Kernspaltung wurde durch auf 10 bar komprimiertes Kohlendioxid – ein Gas mit guter Mischung aus hoher Wärmekapazität und chemischer Stabilität – zur Dampferzeugung genutzt. Das Hüllmaterial der ca. 1 m langen und 50 mm dicken Brennstäbe ist eine auf thermische Stabilität bzw. geringe Oxidation optimierte Magnesium-Aluminium-Legierung, die bis heute dem Konzept den Namen „MAGNOX“ – „MAGnesium Non OXidising“ verleiht.

Die Eckdaten für ein MAGNOX-Kraftwerk variieren, sind aber typischerweise:

- Blöcke pro Kraftwerk: zwei bis vier, meistens zwei.
- Moderator: Graphit-Würfel mit ca. 10 m Kantenlänge.
- Brennstäbe: ca. 20.000 pro Block.
- Thermische Leistung: ca. 500 MW pro Block.

Although this technology, with its low burnup rate (light water reactors currently achieve about 45 GWt/d) and low thermal-electric efficiency of 20 % (modern installations achieve over 30 %), now appears somewhat outdated, the historical record of the MAGNOX power stations has been quite a successful one:

- nearly 60 years of power generation without any dangerous incidents
- inherently accident-proof because of low energy density level
- grid feed of 4,300 MW over an average of 40 years.

Because of the groundbreaking technology employed, some of the MAGNOX stations are still achieving impressive results:

- Calder Hall: the first commercial nuclear power station, grid synchronisation 1956.
- Bradwell: construction commenced in 1957, grid synchronisation 1962 after just five years in building what was still a very new concept for the time
- Wylfa: grid synchronisation 1971, shutdown expected in 2015.

In all, 26 reactors with a total output of 4,300 MW were put into service at 11 nuclear power stations during the years 1956 to 1971. When the last operational reactor, namely Wylfa I, is shut in 2015 or 2016 the MAGNOX power stations will have played a key role in UK power generation for some 60 years.

AGR

One of the main weaknesses in the MAGNOX system was its low thermal efficiency, which was due to the relatively low steam temperatures at the generator turbine. The second generation of British reactors – known as AGRs (advanced gas cooled reactors) – were supposed to eliminate this deficiency by running much higher temperatures in the primary coolant, and hence in the steam flow. While the fundamental principles remain the same, namely graphite as moderator and CO₂ for primary cooling, various modifications were needed to the original design. For example, stainless steel was used for the fuel-rod cladding material, as this was better suited to the high temperatures involved, while in order to compensate for the resulting higher neutron absorption the make-up of the fuel itself was changed from natural metallic uranium to a 3 % enriched uranium oxide. As a result, the very high temperature in the primary circuit (640 °C) now yields a thermal efficiency of about 41 %. By comparison, even modern pressurised water reactors operating at a primary-circuit temperature of 325 °C only achieve efficiency rates of about 35 %.

Between 1965 and 1988 the UK built a total of seven nuclear power stations each equipped with two reactor units. The total output from these installations was about 8,500 MW. Following a number of investigations to assess a possible lifetime extension it is now planned to close the last of these stations (Dungeness B) in 2028.

Current technology and newbuild capacity

The UK expected great things from the development of the AGR. It was hoped that the high thermal efficiency and the ability to replace the fuel during power operation would make the system an export success and provide strong competition for the light water reactors that were the preferred option in the USA.

- Eigenverbrauch: ca. 60 MW pro Kraftwerk.
- Netzeinspeisung: ca. 250 MW pro Kraftwerk.
- maximaler Abbrand: ca. 3 GW-Tage/t Brennstoff (GWd/t).

Obwohl diese Technologie aufgrund der niedrigen Abbrände – Leichtwasser-Reaktoren erzielen aktuell ca. 45 GWd/t – und der niedrigen thermisch-elektrischen Effizienz von ca. 20 % – heute mehr als 30 % – aus heutiger Sicht veraltet erscheint, ist die historische Bilanz der MAGNOX-Kraftwerke durchaus erfolgreich:

- Fast 60 Jahre Stromerzeugung ohne die Umgebung gefährdende Zwischenfälle.
- Inhärente Störfall-Festigkeit durch niedrige Energiedichte.
- Einspeisung von 4.300 MW über durchschnittlich 40 Jahre.

Einige Daten diverser MAGNOX-Anlagen sind aufgrund ihres bahnbrechenden Charakters aus heutiger Sicht noch immer beeindruckend:

- Calder Hall: Erstes kommerzielles Kernkraftwerk, Netzsynchro-nisation 1956.
- Bradwell: Baubeginn 1957, Netzsynchro-nisation 1962 nach nur fünf Jahren Bauzeit für ein damals noch sehr neues Konzept.
- Wylfa: Netzsynchro-nisation 1971, voraussichtliche Abschaltung 2015.

Insgesamt 26 Reaktoren mit einer Gesamtleistung von 4.300 MW wurden von 1956 bis 1971 in 11 Kernkraftwerks (KKW)-Komplexen in Betrieb genommen. Zum Zeitpunkt der Stilllegung des letzten noch stromerzeugenden Reaktors Wylfa I im Jahr 2015 oder 2016 werden MAGNOX-Kraftwerke 60 Jahre lang eine signifikante Funktion in der britischen Stromerzeugung erfüllt haben.

AGR

Eine wesentliche Schwäche des MAGNOX-Konzeptes war die, durch relativ geringe Dampftemperaturen an der Generatorturbine bedingte, niedrige thermische Effizienz. Mit der zweiten Generation britischer Reaktoren – dem Advanced Gas Cooled Reactor (AGR) – sollte durch wesentlich höhere Temperaturen des primären Kühlmittels und damit des Dampfes dieser Nachteil vermieden werden. Obwohl das Grundprinzip – Moderator Graphit, CO₂ Primärkühlung – dasselbe blieb, waren einige Anpassungen nötig. So wurde als Hüllrohrmaterial der Brennstäbe nun der für hohe Temperaturen besser geeignete Edelstahl verwendet. Zur Kompensation der damit verbundenen höheren Neutronenabsorption war der Brennstoff nun nicht mehr metallisches Natururan sondern auf ca. 3 % leicht angereichertes Uranoxid. Tatsächlich erlaubt die mit 640 °C sehr hohe Temperatur im Primärkreislauf eine thermische Effizienz von etwa 41 %. Selbst Druckwasser-Reaktoren heutiger Bauart erreichen bei einer Primärkreislauf-Temperatur von 325 °C nur eine Effizienz von etwa 35 %.

Insgesamt sieben Kraftwerksanlagen mit jeweils zwei Blöcken wurden von 1965 bis 1988 gebaut. Die Gesamtleistung beträgt ca. 8.500 MW. Nach diversen Untersuchungen möglicher Laufzeit-Verlängerungen ist inzwischen die letzte Stilllegung (Dungeness B) im Jahr 2028 vorgesehen.

Aktuelle Technik und Neubau

In Großbritannien wurden mit der Entwicklung der AGRs große Erwartungen verknüpft. Unter anderem die hohe thermische Effi-

In reality, however, the relatively low burnup (today still only 25 GWd/t at best, even after the last improvement) outweighs the high thermal efficiency. Moreover, this type of installation is complex and expensive to construct and no newbuild projects were started after 1980.

For the latest UK nuclear power station, Sizewell-B, the plans for which were first laid in 1969, it was ultimately decided – after all the available options had been considered – to employ a pressurised water reactor based on the Westinghouse Standard Nuclear Power Plant System (SNUPPS). Construction work began in 1988 and the first grid synchronisation took place in 1995. There has since then been no new nuclear build in the UK.

In recent years the UK Government has put forward plans of a more concrete nature for new construction projects in this sector. In 2006 a government body for the review of energy policy gave the formal go-ahead for a new generation of reactors equipped with up-to-date technology. Three investor groups are now planning to build a total of 16 GW of new capacity, which will be distributed over five locations already acquired for the purpose. Only light water reactors are being considered at present, with the focus on the Areva EPR, Westinghouse AP1000 and Hitachi-GE ABWR.

Each of these new sites will be located at or close to existing installations and will thereby benefit from infrastructure that is either already in place or can easily be extended. This makes the approval procedures much simpler, and local acceptance much more likely, than is the case when a new site has to be developed from scratch.

Permanent repository concept for radioactive waste

A near-surface storage facility, or Low Level Radioactive Waste Repository (LLWR), already exists at Drigg in Cumbria. First commissioned in 1959, and repeatedly extended with the construction of new storage vaults, Drigg is to date the UK's only low level radioactive waste repository. With decommissioning projects now under way all over the world, the technology available for separating radioactive waste from non-hazardous material is constantly improving. For the UK's LLWR this means that the prognoses for the date of the final waste storage operation are being continuously extended. Intermediate and high-level waste is to be placed in a geological repository.

Requirements for a geological waste repository

In the UK, responsibility for identifying a suitable location for a geological waste repository lies with the Nuclear Decommissioning Authority (NDA), a body that reports to the Department of Energy and Climate Change. The NDA has delegated various activities, including the search for a suitable location, the definition of competence specifications to be met by the waste packaging and the actual running of the repository facility itself, to its wholly owned subsidiary Radioactive Waste Management Ltd. (RWM Ltd., formerly RWMD). As well as actively searching for a storage site RWM Ltd. regularly publishes updated concept papers, requirements specifications (e.g. for waste packages), safety reports and other documents (1,2).

As the search for a suitable location is still open-ended, many of the parameters involved, such as type of host rock, storage depth and date of commissioning, remain unknown. However certain basic principles have been laid down and these serve to define the specifications to be met by the waste packaging. The storage

zienz und die Möglichkeit, während des Leistungsbetriebs Brennstoff zu erneuern, sollten das Konzept sogar zum Export-Erfolg und zu einer wichtigen Konkurrenz der in den USA bevorzugten Leichtwasserreaktoren machen.

In der Realität allerdings zeigte sich, dass die relativ niedrigen Abbrände – nach letzter Steigerung selbst heute nur maximal 25 GWd/t – die hohe thermische Effizienz aufwiegen. Auch ist der Anlagentyp komplex und teuer im Bau. Nach 1980 wurde mit keinem weiteren Neubau begonnen.

Für das neueste britische Kernkraftwerk Sizewell-B, dessen Planung bereits 1969 begann, wurde nach einigen betrachteten Optionen am Ende ein auf einem Westinghouse Standard Nuclear Power Plant System (SNUPPS) basierender Druckwasser-Reaktor gewählt. Baubeginn war 1988 und erste Netzsynchrosation 1995. Seitdem wurde kein weiterer KKW-Neubau mehr in Angriff genommen.

Seit einigen Jahren werden in UK Pläne für KKW-Neubauten konkreter. 2006 gab ein staatliches Gremium zur Neuausrichtung der Energiepolitik grünes Licht für neue Reaktoren mit aktueller Technik. Inzwischen planen drei Investorengruppen den Bau von insgesamt 16 GW neuer Kapazität, verteilt auf fünf bereits dafür erworbene Standorte. Dabei werden ausschließlich Leichtwasserreaktoren betrachtet und man konzentriert sich auf Areva EPR, Westinghouse AP1000 und Hitachi-GE ABWR.

Alle Neubaustandorte befinden sich auf oder neben bereits existierenden Anlagen und profitieren dadurch von bereits vorhandener oder einfach auszubauender Infrastruktur. Die Genehmigungsverfahren sind dadurch einfacher und die lokale Akzeptanz höher als bei neu zu erschließenden Geländen.

Endlagerkonzept für Radioaktive Abfälle

Für schwachradioaktive Abfälle existiert mit dem Low Level Radioactive Waste Repository (LLWR) bereits ein oberflächennahes Endlager in Drigg in der Grafschaft Cumbria. Bereits 1959 in Betrieb genommen und in verschiedenen Ausbaustufen immer wieder erweitert, ist Drigg das bisher einzige Endlager für schwachradioaktive Abfälle in UK. In den weltweit laufenden Rückbauprojekten werden die Technologien zur Trennung radioaktiver Abfälle von freigabefähigen Materialien ständig verbessert. Für das britische LLWR werden dadurch die Prognosen für die Zeit bis zur letzten Einlagerung immer weiter verlängert. Mittel- und hochradioaktive Abfälle sollen in ein geologisches Endlager verbracht werden.

Anforderungen an ein geologisches Endlager

Die Verantwortung für die Suche nach einem geeigneten Standort eines geologischen Endlagers liegt in UK bei der dem Ministerium für Energie und Klimawandel unterstellten Behörde Nuclear Decommissioning Authority (NDA). Die Aktivitäten um die Standort-suche, die Definition von Anforderungen an endlagerfähige Abfall-gebände und auch der Betrieb eines Endlagers hat die NDA an eine Tochtergesellschaft, die Radioactive Waste Management Ltd. (RWM Ltd., ehemals RWMD), delegiert. Neben der aktiven Standortsuche veröffentlicht RWM Ltd. dazu regelmäßig aktuelle Konzeptpapiere, Anforderungskataloge (z.B. für Abfallbehälter), Sicherheitsberichte und andere Dokumente (1,2).

Da z.Zt. noch völlig ergebnisoffen nach einem Standort gesucht wird, bleiben viele Parameter wie Wirtsgestein, genaue Teufe und Zeitpunkt der Inbetriebnahme vorerst unbekannt. Einige Grundprin-

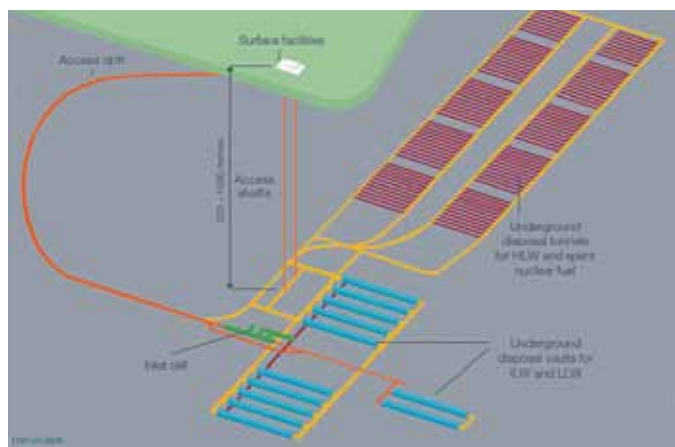


Fig. 1. Proposed layout of a geological disposal facility
Bild 1. Schema eines Endlagers über und unter Tage
Source/Quelle: NDA 2010 (1)

depth must not be less than 1,000 m, a requirement derived from the somewhat vague concept of being able to survive two ice ages. Every proposal put forward to date provides for a minimum distance of some 500 m between the intermediate level waste and the high level, heat generating material.

Access is to be via an inclined drift so as to impose as few restrictions as possible on the maximum dimensions of the waste packages. However, a vertical shaft is also being considered as a possible option for certain types of host rock. Figure 1 shows the surface and underground layout of such a repository (1).

It has already become clear that when dealing with high level radioactive waste in particular the current focus is on the triple barrier principle, a system that also features in the plans being laid in other countries. This technique ensures that for containers that have to meet certain criteria, according to type of waste and conditioning, the contents are completely isolated from the environment. Storage in deep tunnels helps maximise the life-span of the packages and provides as effective an enclosure as possible, in combination with the type of host rock and container design. Geological containment is optimised for maximum life-span stability in terms of the choice of rock, the storage depth and the tectonic environment.

The total area of the underground storage site will in turn depend on the host rock and will occupy something between 6 km² and 20 km². These estimates are currently being updated to incorporate new build projects. If access is to be via a surface drift, which is the preferred option, then the surface facilities can be located up to 10 km from the actual waste repository. This degree of flexibility could greatly simplify operations, for example in the case where the access facilities are sited within a complex such as Sellafield, where much of the waste is already being produced and processed. The underground repository would at the same time be very suitably located from a geological viewpoint, while waste shipments across public land would be greatly reduced as a result.

Host rock

As the location of the repository has not yet been fixed, a situation that should not be allowed to hamper decommissioning operations and other waste disposal activities, RWM is currently investigating the host rock possibilities from two equal points of view, namely as regards the challenges it will pose for mining en-

zipien sind jedoch festgelegt, was u. a. die Definition gewisser Anforderungen an endlagerfähige Abfallgebinde ermöglicht. Die Tiefe soll nicht weniger als 1.000 m betragen, was aus der etwas schwierig greifbaren Anforderung, zwei Eiszeiten überdauern zu können, hergeleitet wird. Alle bisher vorgestellten Konzepte sehen eine Mindestdistanz von ca. 500 m zwischen mittel- und hochradioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen vor. Der Zugang soll über eine Rampe erfolgen, um möglichst wenige Einschränkungen hinsichtlich Maximalmasse der Abfallgebinde zu erzeugen. Eine Schachthanlage wird jedoch auch als Option für einzelne Wirtsgesteine mit betrachtet. Bild 1 zeigt das Schema eines Endlagers über und unter Tage (1).

Weiterhin steht bereits jetzt fest, dass insbesondere bei hochradioaktiven Abfällen ein, auch in der Planung anderer Nationen zu findendes, Drei-Barrieren-Prinzip beachtet werden soll. Behälter, die, je nach Abfallart und Konditionierung, unterschiedlichen Kriterien genügen müssen, isolieren dabei den Inhalt bereits vollständig von der Umwelt. Der Versatz in den Einlagerungsstrecken dient der Maximierung der Behälterlebensdauer und sorgt für möglichst gute, auf Wirtsgestein und Gebinde abgestimmte Umschließung. Der geologische Einschluss ist hinsichtlich der Wahl von Gestein, Tiefe und tektonischer Umgebung auf eine maximale Langzeit-Stabilität optimiert.

Die Gesamtfläche unter Tage ist wiederum vom Wirtsgestein abhängig und wird zwischen 6 km² und 20 km² betragen. Gegenwärtig werden diese Abschätzungen unter Einbeziehung der Neubauprojekte aktualisiert. Wenn der Zugang, wie favorisiert, über eine Rampe erfolgt, kann die Anlage über Tage bis zu 10 km vom eigentlichen Endlager entfernt sein. Diese Flexibilität könnte den Betrieb erheblich vereinfachen, z. B. für den Fall, dass Zugangseinrichtungen innerhalb eines Komplexes wie Sellafield liegen, wo ein großer Teil der Abfälle ohnehin anfällt bzw. aufbereitet wird. Gleichzeitig befände sich das Endlager an einem geologisch optimalen Ort. Transporte durch öffentliches Gelände könnten stark eingeschränkt werden.

Wirtsgesteine

Da der Standort des Endlagers noch nicht feststeht, aber Rückbauprojekte und sonstige Abfallentsorgung dadurch nicht behindert werden sollen, betrachtet RWM die in Frage kommenden Wirtsgesteine parallel, sowohl hinsichtlich der daraus resultierenden Herausforderungen im Bergbau, als auch hinsichtlich der Anforderungen an Abfallbehälter (2). Für mittelradioaktive Abfälle sind sich die Einlagerkonzepte in den verschiedenen Wirtsgesteinen sehr ähnlich. Zylindrische oder kubische Gebinde werden mittels fest eingebauter Kräne in großen Kammern übereinander gestapelt. Dabei soll der normale Zugriff bis zu 150 Jahre lang gewährleistet sein. Die Behälter müssen so ausgelegt werden, dass eine Rückholbarkeit nach bis zu 500 Jahren nicht ausgeschlossen wird.

Bei der Endlagerung in sogenannten hochfesten Gesteinen (Granit) findet die Einlagerung von hochradioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen innerhalb von Kupfer-Verpackungen in vertikalen Bohrlöchern statt (Bild 2), die über parallel angeordnete Strecken (rechts oben in Bild 1) zugänglich sind. Die Verfüllung in den Bohrlöchern wird mit Bentonitringen um die Verpackungen vorgenommen. Die Strecken werden nach Besetzung aller Bohrlöcher mit dem beim Vortrieb angefallenen Haufwerk verfüllt. Diese Auslegung soll hinsichtlich Behälterwahl und Bentonitverfüll-

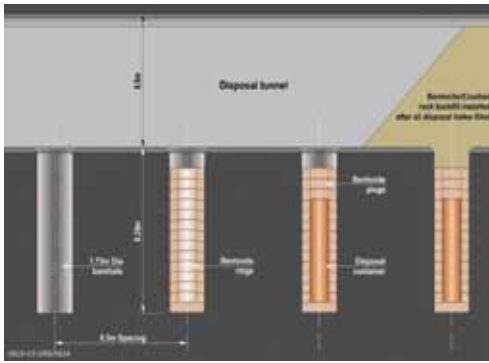


Fig. 2. Final storage in vertical boreholes in high-strength rock
Bild 2. Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern in hochfesten Gesteinen
Source/Quelle: NDA 2010 (2)

gineers and in terms of the requirements that will have to be met by the waste packaging (2). For intermediate level waste the storage concept to be employed in different types of host rock will be fairly similar. Cylindrical or cubical containers will be stacked one on top of the other in the storage vaults using fixed crane installations. This will ensure normal access for some 150 years to come. The containers must be laid out in such a way that they could potentially be recovered any time over the next 500 years.

Permanent storage in high-strength rock such as granite will involve the highly active, heat generating waste being enclosed in copper containers installed in vertical boreholes (Figure 2) that are accessed via a series of parallel tunnels (top right in Figure 1). Bentonite rings will be used to fill around the packages in the boreholes. When all the holes have been occupied in this way the tunnels themselves will be filled with the debris from the excavation process. This arrangement of containers and bentonite fill will be managed in such a way that the temperature of the packages never exceeds 100 °C.

In sedimentary rock, such as clay, the high level waste is to be stored horizontally in steel containers that are to be set 3 m apart along the storage tunnel (Figure 3). The containers will be placed on bentonite blocks positioned in the centre of the tunnel, whereby each tunnel will be backfilled in succession with bentonite pellets. This arrangement is designed to ensure uniform heat dissipation into the strata in all directions and the temperature should therefore not exceed 125 °C in the buffer mid-zone, namely halfway between the container casing and the side-wall.

Steel-encased packaging is also used for storing high level radioactive waste in evaporite rock, such as salt. The containers are positioned on the floor of the tunnel, which is then successively backfilled with crushed salt obtained from the excavation work (Figure 4). The high thermal conductivity of salt, as a host rock, permits a much higher initial temperature of maximum 200 °C at the outer surface of the packages.

Packaging for the storage of intermediate level waste

Now undergoing decommissioning, the MAGNOX installations alone have created some 5,000 m³ of intermediate level waste. The MAGNOX system distinguishes between 196 different solid and liquid waste streams. By 2021 all this waste will have been removed from the various sites, conditioned and placed in nearby interim storage depots using repository-standard packaging. The

lung so vorgenommen werden, dass die Temperatur am Gebinde 100 °C nicht überschreitet.

In Sedimentgesteinen (Ton) findet die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in Stahl-Umhüllungen waagrecht, in 3 m Abstand voneinander, in den Strecken statt (Bild 3). Die Abfallbehälter werden mit Hilfe von Bentonit-Podesten mittig in den Strecken platziert und diese sukzessive mit Bentonit in Pellet-Form verfüllt. Dieses Verfahren ermöglicht eine in alle Richtungen gleichmäßige Wärmeabfuhr in das umschließende Gestein. Die Temperatur soll dabei 125 °C im Puffermittelpunkt – halber Abstand zwischen Gebindehülle und Streckenstoß – nicht überschreiten.

Auch zur Einlagerung in Evaporit-Gesteinen (Salz) kommen für hochradioaktive Abfälle Gebinde mit Stahlumhüllungen zum Einsatz. Die Behälter werden auf der Sohle abgelegt und die Strecken sukzessive mit aus dem Haufwerk gewonnenem Salzgrus verfüllt (Bild 4). Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Salz als Wirtsgestein erlaubt eine deutlich höhere anfängliche Temperatur von maximal 200 °C an der Außenwand des Gebindes.

Endlagerfähige Abfallgebinde am Beispiel MAW

Allein auf den im Rückbau befindlichen MAGNOX-Anlagen fallen ca. 5.000 m³ mittelradioaktiver Abfall an. Es werden von MAGNOX insgesamt 196 feste und flüssige Abfallströme unterschieden. Bis 2021 soll der Abfall von den Entstehungsorten entfernt, konditioniert und in endlagerfähiger Form in Zwischenlagern standortnah eingelagert werden. Aufgrund der Wahl von robusten, selbstabschirmenden Behältern, wie z.B. den GNS-Behältern MOSAIK® und GNS Yellow Box® können einige dieser Zwischenlager als einfache Lagerhallen konzipiert werden. Die Behälter selbst stellen die mechanische Sicherheit und die radiologische Abschirmung sicher. Die NDA geht zurzeit davon aus, dass 2040 bis 2050 mit dem Abtransport in ein geologisches Endlager begonnen werden kann. Die Beurteilung, ob ein Abfallgebinde, d. h. ein Behälter mit geeignet konditioniertem Abfall, als endlagerfähig betrachtet werden kann, erfolgt dabei anders als in Deutschland.

Für das deutsche Endlager Konrad wurde bereits das Planfeststellungsverfahren durchlaufen. Der Standort mit Wirtsgestein und zu beachtenden Limitierungen hinsichtlich Gebinde-Eigenschaften

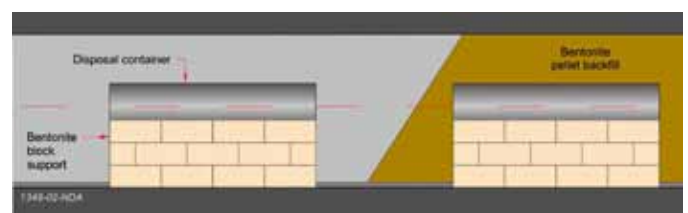


Fig. 3. Horizontal storage in sedimentary rock
Bild 3. Waagerechte Einlagerung in Sediment-Gesteinen

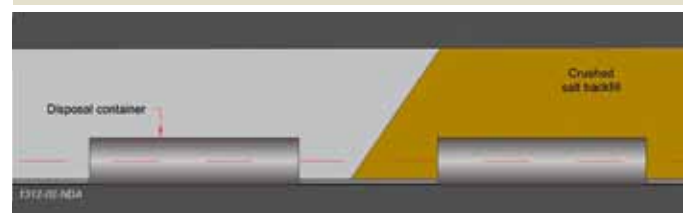


Fig. 4. Storage in evaporite rock
Bild 4. Einlagerung in Evaporit-Gesteinen
Source/Quelle : NDA 2010 (2)

choice of robust, self-shielded containers, such as GNS MOSAIK® casks and Yellow Boxes®, means that some of these interim storage facilities can be designed simply as warehouses. The containers themselves provide the required mechanical security and radiological screening. The NDA is currently working on the assumption that the operation to transport this material to a geological repository can commence in 2040 to 2050. The process for assessing whether the packaging, i.e. the container with its properly conditioned waste, can be regarded as ready for permanent storage is therefore different from that used in Germany.

The planning approval process for the Konrad waste repository has already been completed. The site and the host rock have been identified, along with the limitations that apply to the packaging characteristics. Rules have therefore been drawn up for the containers – the so-called Konrad criteria – that prescribe the specifications in terms of accident resistance and permitted categories of waste, along with the required waste end-status after conditioning. It is the responsibility of the waste producer to ensure that these conditions are observed. If the conditions have to be adjusted in any way by the relevant authorities the risk will rest solely with the waste owners.

The UK is still awaiting a decision on the site location, host rock and exact specifications of the repository. The guidelines that RWM Ltd. have published for the waste packaging therefore have to take account of all possible options. It is RWM's job to assess the suitability of a particular type of package for final storage. Here the owner of the waste has to consult with the authority in providing the necessary verification as to the requirements of the packaging and the state of the conditioned waste. The outcome is a letter of compliance (LoC) whereby the authority certifies the suitability of a particular type of packaging for permanent underground storage. While the LoC does not represent a guarantee – for example in the event that new findings raise questions as to the stability of the conditioned waste or the adequate robustness of the containers – this arrangement means that while there will still be a degree of risk, this will not be borne by the owner of the waste alone.

GNS has already carried out an initial project whereby waste – in this case ion-exchange resin from the Sizewell B nuclear plant – was placed in MOSAIK® casks and conditioned using a dehydration process. Figure 5 shows the packages in storage at the Sizewell B interim waste depot. All the necessary verification procedures, as outlined above, have been properly applied and when a decision has been taken as to how to get round the UK's Pressure Systems Safety Regulations (PSSR) – probably by employing a ventilation option – these 55 casks, which are the first of the robust, self-shielded type, will be issued with an LoC certifying them as suitable for permanent storage.

The search moves beyond Cumbria

Ever since nuclear energy was first used for both civilian and military purposes in the UK much of the research and waste-treatment activities have been concentrated at the Sellafield site in West Cumbria. Decommissioned reactor prototypes, reprocessing plant, storage ponds for spent fuel rods and some earlier facilities for extracting weapons-grade plutonium are either still operational or in the process of being dismantled. Given the huge assortment of waste of all grades and the lack of space in what has become a tightly packed area the decommissioning work has now become one of the most



Fig. 5. MOSAIK® casks in storage at the Sizewell B nuclear plant
Bild 5. Gebinde Typ MOSAIK® im KKW Sizewell-B
Source/Quelle: GNS 2014

ist also bekannt. Daher konnten Richtlinien für Behälter aufgestellt werden – die sogenannten Konrad-Kriterien – die Anforderungen an die Behälter hinsichtlich Störfallfestigkeit und zulässige Abfallarten mit jeweils zulässigen Endzuständen nach Konditionierung vorschreiben. Die Einhaltung dieser Bedingungen muss durch den Abfallverursacher sichergestellt werden. Im Falle einer Anpassung dieser Bedingungen durch die zuständigen Behörden liegt das Risiko allein beim Abfalleigentümer.

In UK sind Ort, Wirtsgestein und genaue Ausstattung des Endlagers noch unbekannt. RWM Ltd. hat daher Richtlinien für Behälter veröffentlicht, die alle möglichen Konstellationen berücksichtigen müssen. Die Beurteilung der Endlagerfähigkeit für eine konkrete Gebindeart wird von RWM Ltd. vorgenommen. Dabei muss der Abfalleigentümer in Absprache mit der Behörde Nachweise hinsichtlich Anforderungen an die Behälter und Zustand des konditionierten Abfalls führen. Das Resultat ist ein sogenannter Letter of Compliance (LoC), mit dem die Behörde die Endlagerfähigkeit einer Gebindeart zertifiziert. Zwar ist der LoC ausdrücklich keine Garantie – z.B. für den Fall, dass neue Erkenntnisse die Stabilität des konditionierten Abfalls oder die ausreichende Robustheit des Behälters in Frage stellen – das weitere Risiko verbleibt aber bei diesem Konzept nicht allein beim Abfalleigentümer.

GNS hat in einem ersten Projekt bereits Abfall – in diesem Fall Ionenaustauscherharze aus dem KKW Sizewell-B – in Behälter des Typs MOSAIK® gefüllt und durch ein Verfahren zur Entwässerung konditioniert. Bild 5 zeigt die im Zwischenlager am Standort Sizewell-B eingelagerten Gebinde. Alle Nachweise im obigen Sinne konnten erfolgreich geführt werden. Nachdem nun noch entschieden werden muss, wie die Anwendbarkeit der britischen Druckbehälterverordnung (PSSR) vermieden werden soll – wahrscheinlich durch Belüftungsoption – erhalten diese 55 Gebinde als erste der robusten, selbstabschirmenden Art einen LoC und sind damit als endlagerfähig zertifiziert.

Standortsuche – inzwischen nicht nur in Cumbria

In der Anlage Sellafield in West-Cumbria konzentriert sich seit Beginn der zivilen, aber auch militärischen Nutzung der Kernenergie in UK ein Großteil der Forschungs- und Abfallbehandlungsaktivitäten. Stillgelegte Reaktor-Prototypen, Wiederaufarbeitungsanla-

complex projects of its kind in the world. The background of military and civilian use, along with the age of some of the installations – 60 years ago radioactive waste records were not kept as systematically as they are today – means that decisions still have to be taken as to the best way to deal with some of the material involved. And all the while some of the decommissioning projects are taking on a real sense of urgency. In these particular cases a permanent repository close to the current site would be the best solution, if only because of the relatively large quantities of waste expected.

It is therefore understandable that the search for suitable geological formations should effectively be concentrated on the region of West Cumbria.

Detailed geological investigations have in fact been under way in the immediate vicinity of the Sellafield installation since 1975. These have revealed that the local geological structures are complex and that the long-term development of ground-water movements cannot be accurately predicted. In any case, the area extending some 15 km to the east and west of Sellafield and some 60 km to the north and south has been assessed as unsuitable for such a project. However, there are potentially suitable formations lying to the west of this zone beneath the nature conservation area of the Lake District National Park.

In 2012 an attempt was made to move to 'stage 4' in the process for exploring a possible site in Cumbria. This would have involved comprehensive geological surveys and a discussion of the socio-economic implications involved. Although the two local district authorities agreed to this development, the Cumbria Council voted against the project and so brought to an end any further search for a suitable storage site in this locality (3).

The UK Government therefore decided on a two-pronged approach, which involved improving the scientific procedures and the transparency and public accountability of the search process and at the same time establishing the legal provisions by which decisions can be taken, if need be without the consent of local governments, so that at the very least the exploration and investigation work could be undertaken.

Improved transparency is to be provided by way of the National Geological Screening Exercise (NGS), which is already up and running (4). The NGS systematically processes and collates all relevant geological information so that the various regions can be classified according to rock type, ground-water movements and the distribution of mineral and hydrocarbon resources. This means that the local people and communities have easy access to information about the geological characteristics of their region. It is explicitly not the aim of the project to use this stage to classify areas as suitable or unsuitable, or indeed to single out candidate regions as geological disposal sites.

The Infrastructure Planning (Radioactive Waste Geological Disposal Facilities) Order 2015 came into force on 27.03.2015. This amends the 2008 Planning Act 2008 and includes geological disposal facilities for radioactive waste in the list of nationally significant infrastructure projects. Borehole drilling projects, whose sole purpose is to explore geological structures in order to establish their suitability for such a disposal facility, are also included in the list. As decisions relating to the use of land have been transferred to the regional parliaments of the United Kingdom, this amendment only applies to England. What this signifies in simple terms is that it is now possible, by a decision of the Home Office, to arrange

gen, Lagerbecken für verbrauchten Kernbrennstoff und einige frühe Einrichtungen zur Gewinnung von waffenfähigem Plutonium befinden sich teilweise noch im Betrieb, teilweise im Rückbau. U. a. die Kombination aus Vielzahl der Abfallarten sowie Platzmangel in dem räumlich sehr dicht genutzten Areal, machen den Rückbau zu einem der komplexesten Projekte weltweit. Die Historie der militärischen und zivilen Nutzung, aber auch generell das hohe Alter einiger Einrichtungen – vor 60 Jahren wurde über radioaktiven Abfall noch nicht so systematisch wie heute Buch geführt – bedingt, dass die optimale Behandlung einiger Abfälle erst noch entschieden werden muss, bei gleichzeitig hoher Dringlichkeit einiger Rückbauprojekte. Für diese Projekte wäre, allein schon auf Grund der relativ großen zu erwartenden Mengen, ein dem Standort nahes Endlager optimal.

So ist nachvollziehbar, dass sich die Suche nach geeigneten geologischen Formationen faktisch bisher stark auf die Region West-Cumbria konzentrierte.

Bereits seit 1975 fanden ausführliche geologische Untersuchungen in unmittelbarer Umgebung des Standortes Sellafield statt, mit dem Ergebnis, dass die geologischen Strukturen dort kompliziert sind und sich die langfristige Entwicklung des Grundwassertransportes nicht gut vorhersagen lässt. Das Areal, welches sich um den Standort Sellafield ca. 15 km in ost-westlicher, sowie ca. 60 km in nord-südlicher Richtung erstreckt, ist damit in jedem Fall ungeeignet. Potentiell geeignete Formationen finden sich westlich dieser Zone unter dem Naturschutzgebiet Lake District National Park.

Im Jahr 2012 wurde ein Versuch unternommen, die Erforschung einer Region in Cumbria in das sogenannte Stadium 4 zu bringen. Damit wären detaillierte geologische Untersuchungen sowie Diskussionen der sozio-ökonomischen Implikationen möglich geworden. Obwohl die zwei für die Region zuständigen lokalen Bezirksregierungen (district-Ebene) zugestimmt hatten, stimmte der Cumbria-Council gegen das Vorhaben ab und beendete damit weitere Aktivitäten der Standortsuche (3).

Die britische Regierung entschied daraufhin, sowohl die wissenschaftliche Systematik und die Transparenz der Suche gegenüber der Bevölkerung zu verbessern, als auch andererseits gesetzlich die Möglichkeit zu schaffen, Entscheidungen notfalls auch nicht im Konsens mit Bezirksregierungen zu treffen, um zumindest Erkundungsvorhaben durchführen zu können.

Für verbesserte Transparenz soll der gegenwärtig laufende National Geological Screening Exercise (NGS) sorgen (4). Hierbei werden systematisch alle relevanten geologischen Informationen aufbereitet und zentral gesammelt, so dass Regionen hinsichtlich Gesteinsarten, Grundwasserbewegung und Verteilung von mineralischen und Kohlenwasserstoff-Ressourcen klassifiziert werden können. Bevölkerung und Kommunen haben dadurch einfachen Zugriff auf Informationen geologischer Eigenschaften in ihrer Region. Es ist ausdrücklich kein Ziel des Projekts, bereits in diesem Stadium Gegenden als geeignet oder ungeeignet zu klassifizieren, oder gar Kandidaten-Regionen für ein Endlager auszuwählen.

Am 27.03.2015 trat The Infrastructure Planning (Radioactive Waste Geological Disposal Facilities) Order 2015 in Kraft. Diese Erweiterung des Planungsgesetzes Planning Act 2008 nimmt das geologische Endlager für radioaktive Abfälle in die Liste der Infrastrukturprojekte von nationaler Bedeutung auf. Insbesondere werden auch Bohrvorhaben, die lediglich der Erkundung geologischer

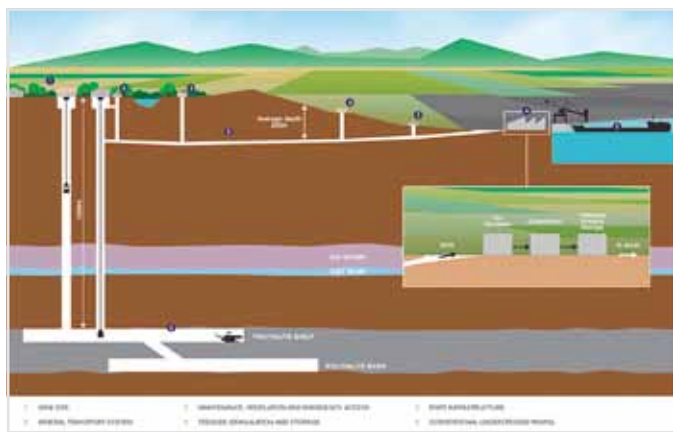


Fig. 6. Concept for 'minimally invasive mining'
Bild 6. Konzept eines „minimal invasiven Bergbaus“
Source/Quelle: York Potash 2015 (5)

for geological investigations to be carried out in areas that have been identified as potentially suitable for this purpose.

Relevant examples for the modern mining industry

The UK's geological disposal facility is to be set up at a site that is yet to be identified, though is likely to be located at a significant depth. If densely populated areas are to be avoided there is a high likelihood, in England at least, that a nature conservation area will be chosen for the role. Any surface impact, such as mining subsidence, will generally have to be avoided and this will present a real challenge when the extremely long operating life of such a repository is taken into account. The concepts being proposed at present provide for the option of retrievability over the course of the next 500 years, as the main tunnels and vaults for the intermediate-level waste will not be completely filled during this time-span.

RWM is therefore monitoring the development of applicable technologies by way of major projects currently under way that present the relevant mining aspects. Of particular interest here are, for example, modern roadway drivage methods and the avoidance of mining subsidence in real time. If necessary, the concepts being put forward for a geological repository will be adapted during subsequent revisions to take account of new developments.

The York Potash Project

The area lying to the south-east of the town of Whitby in North Yorkshire contains huge quantities of polyhalite at a depth of about 1,500 m. The deposit comprises 14 % potassium, 19 % sulphur, 6 % magnesium and 17 % calcium - making it an ideal fertiliser that is also approved for organic farming in the UK. This location is also part of the North York Moors National Park, a nature conservation area with a spectacular landscape and a popular destination for excursions.

York Potash Ltd., which was set up to extract the mineral deposits, hopes that its 'minimally invasive' mining concept will help gain approval for the project, in spite of the extremely delicate conditions involved (5). The most recent signals (as at 14.05.2015) from the National Park Authority, as the body responsible, were quite encouraging. A decision is expected on 30.06.2015.

Figure 6 shows in diagrammatic form the concept that the author has described as minimally invasive mining. A 37,5 km-long tunnel running about 250 m below the surface connects the processing

Strukturen hinsichtlich ihrer Eignung für ein solches Endlager zum Ziel haben, in die Liste aufgenommen. Da die Entscheidung über die Verwendung von Land den regionalen Parlamenten des vereinigten Königreiches übertragen wurde, gilt diese Erweiterung allerdings nur für England. Damit besteht nun, vereinfacht ausgedrückt, die Möglichkeit, per Entscheidung des Innenministeriums, zunächst geologische Untersuchungen in als potentiell geeignet identifizierten Regionen anzuordnen.

Relevante Beispiele für modernen Bergbau

Das geologische Endlager in UK wird an einem noch nicht festgelegten Ort, jedoch wahrscheinlich in großer Tiefe errichtet. Wenn dicht besiedelte Gebiete vermieden werden sollen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich dabei um ein Naturschutzgebiet handelt, zumindest in England recht hoch. Generell müssen jegliche Auswirkungen an der Oberfläche, auch in Form von möglichen Bergschäden, vermieden werden, was insbesondere dann eine Herausforderung werden kann, wenn man die wahrscheinlich sehr lange Betriebsdauer eines solchen Endlagers berücksichtigt. Gegenwärtig sehen die Konzepte eine Rückholbarkeit nach bis zu 500 Jahren vor. Über diesen Zeitraum könnten die Hauptstrecken und Kammern für mittelradioaktive Abfälle noch nicht verfüllt werden.

RWM beobachtet daher die Entwicklung der einsetzbaren Technologien anhand von aktuellen Großprojekten, die relevante bergbauliche Aspekte beinhalten. Interessant sind hierbei z.B. moderne Methoden des Streckenvortriebs und die Vermeidung von Bergschäden in Echtzeit. Gegebenenfalls werden aufgrund neuer Entwicklungen die Konzepte für ein geologisches Endlager in späteren Revisionen angepasst.

Das York Potash Projekt

Im nördlichen Teil der englischen Grafschaft Yorkshire befindet sich südöstlich der Stadt Whitby in ca. 1.500 m Tiefe ein großes Polyhalit-Vorkommen. Seine Zusammensetzung besteht aus 14 % Kali, 19 % Schwefel, 6 % Magnesium, 17 % Kalzium – ein ideales Düngemittel, welches sogar für den Bio-Anbau in UK zugelassen ist. An der Oberfläche befindet sich der North York Moors National Park, ein als Ausflugsziel beliebtes Naturschutzgebiet mit spektakulärer Landschaft.

Die York Potash Ltd., die zum Abbau des Mineralvorkommens gegründet wurde, will – trotz der sehr heiklen Rahmenbedingungen – mit einem „minimal-invasiven“ Bergbaukonzept die Genehmigung für das Bergbauvorhaben erhalten (5). Letzte Signale (Stand 14.05.2015) von der zuständigen National Park Authority sind vielversprechend. Mit einer Entscheidung wird am 30.06.2015 gerechnet.

Bild 6 zeigt schematisch das Konzept, das der Autor hier als minimal invasiven Bergbau bezeichnet hat. Ein 37,5 km langer Tunnel verbindet in einer Tiefe von durchschnittlich 250 m die Verarbeitungs- und Verladeanlagen im nahegelegenen Teeside (Middlesbrough) mit der Schachtanlage im Naturpark. Die Gebäude über Tage sind dort im landwirtschaftlichen Stil gehalten und für das ungeübte Auge von Stallungen schwer zu unterscheiden. Die Funktionalität dieser Gebäude befindet sich größtenteils unterirdisch. Durch den heute mittels moderner Bohrtechnik wesentlich billiger als noch vor einigen Jahren möglichen Streckenvortrieb können solche Projekte heute umgesetzt werden.



Fig. 7. Horizontal section through the London Crossrail link
Bild 7. Horizontaler Schnitt durch die London Crossrail

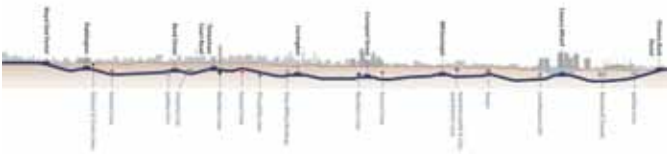


Fig. 8. Vertical section through the London Crossrail link
Bild 8. Vertikaler Schnitt durch die London Crossrail
Source/Quelle Crossrail 2015 (6)



Fig. 9. Tunnel boring machine from Herrenknecht
Bild 9. Tunnelbohrmaschine der Fa. Herrenknecht
Source/Quelle Crossrail 2015 (6)

London Crossrail

Das Nahverkehrsnetz in London wird zurzeit mit einer sehr ambitionierten unterirdischen Ost-West-Verbindung, der London Crossrail, erweitert (6). Dabei entstehen zehn neue Bahnhöfe und es werden 21 km Doppel-Tunnelstrecke angelegt. Nach Fertigstellung wird zusätzliche Kapazität für täglich bis zu einer Million Passagiere zur Verfügung stehen. Im Vergleich dazu ist die Gesamtkapazität aller Strecken im bisherigen U-Bahn-Netz etwa vier Millionen Passagiere pro Tag. Die größte Herausforderung sind dabei die im Untergrund bereits existierenden Strukturen.

Das wird durch die Streckenführung im horizontalen (Bild 7) bzw. vertikalen Schnitt (Bild 8) anschaulich – es fällt sofort die häufige Richtungsänderung auf.

Die Gesamtlänge der neuen Tunnel beträgt 42 km bei einem Röhrendurchmesser von 7 m. Der Vortrieb beträgt 90-150 m/Woche pro Strang. Es kommen acht Tunnelbohrmaschinen der Firma Herrenknecht (Bild 9) zum Einsatz. Bemerkenswert an dem Projekt ist u. a. die Vorgehensweise zur Vermeidung von Bergschäden, deren Auswirkungen in der dicht bebauten Londoner Innenstadt katastrophal wären. An vielen Stellen werden dazu Gebäude permanent automatisch vermessen. Bei beginnender Absenkung werden sofort Gegenmaßnahmen durch Einbringung von Füllmaterial in „Echtzeit“ ergriffen. Um schnell und ausreichend nachhaltig reagieren zu können, werden dazu ständig die doppelte der als notwendig geschätzten Menge an Füllmaterial im Tunnel vorgehalten.

References / Quellenverzeichnis

1. NDA Report no. NDA/RWMD/010, December 2010.
2. NDA Report no. NDA/RWMD/048, December 2010.
3. The Guardian 30.01.2013, West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership.
4. White Paper: Implementing Geological Disposal, UK Department for Energy and Climate Change, URN 14D/235, July 2014.
5. Bilder mit freundlicher Genehmigung der York Potash Ltd. www.yorkpotash.co.uk
6. Bilder mit freundlicher Genehmigung der Crossrail Ltd.

Authors/ Autor

Dr. Matthias Messer
Head of Projects UK
GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, Essen

and loading facilities at nearby Teeside (Middlesbrough) with the shaft installation in the nature park. The surface structures will be designed in an agricultural style and to the untrained eye will be indistinguishable from farmyard buildings. The infrastructure functions of these installations will be mostly sub-surface. Projects of this kind can now be executed very efficiently because modern drilling and boring technology enables roadway drivages to be undertaken at a much lower cost that was the case some years ago.

London Crossrail

The London local transport network is currently being extended by way of an ambitious underground east-west artery named London Crossrail (6). This will comprise ten new rail stations and some 21 km of twin-bore tunnels under central London. On its completion the new link will provide additional capacity for carrying up to one million passengers a day. This compares favourably with the four million passengers a day that represents the combined capacity of all the lines in the existing underground network. The main challenge facing the construction engineers is dealing with the structures forming part of the current underground system.

This problem is highlighted by the frequent changes in direction of the tunnels shown in the horizontal and vertical sections above (Figure 7 and 8).

The new tunnels will have a total length of 42 km and an overall diameter of 7 m. The rate of advance is 90 to 150 m a week in each line. The excavation work is being carried out by eight tunnel boring machines supplied by Herrenknecht (Figure 9). One noteworthy feature about the project is the solution being adopted to prevent surface subsidence, whose impact on a densely built-up area like central London would be simply catastrophic. Buildings located at numerous points along the route will therefore be automatically monitored for surface movement on a permanent basis. If any settlement or subsidence is detected countermeasures will immediately be taken by introducing fill material in ‚real time‘. To provide the capacity to react in a sufficiently swift and sustained manner the quantity of fill material held in the tunnel will always be maintained at twice the estimated requirement.