

Smart Repositories – BGE Goes Digital

The Federal Company for Radioactive Waste Disposal (Bundesgesellschaft für Endlagerung BGE), based in Peine/Germany, is in charge of, among other things, the conversion of the former Konrad iron ore mine into a repository for low to intermediate level

radioactive waste and the decommissioning of the Asse II mine, after retrieval of the radioactive waste. The following report deals with digitisation for these projects. It discusses digital planning tools and how they are linked to each other.

Smarte Endlager – BGE wird digital

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mit Sitz in Peine ist u. a. mit der Umrüstung des ehemaligen Eisenerzbergwerks Konrad zum Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle und der Stilllegung der Schachtanlage Asse II, nach Rückholung der

radioaktiven Abfälle beauftragt. Im folgenden Bericht wird auf die Digitalisierung für diese Projekte eingegangen. Es wird erörtert, mit welchen digitalen Instrumenten die entsprechenden Arbeiten geplant sind und wie die Zusammenarbeit miteinander verbunden ist.

1 History

1.1 Konrad repository

Shaft sinking of Konrad 1 shaft of the former Konrad iron ore mine began in autumn 1957. Construction of Konrad 2 shaft, which is located about 1.8 km southeast of Konrad 1, then began on the grounds of Salzgitter Hütte (today: Salzgitter AG). Ore extraction began even before the two shafts were connected underground.

The diameter of the Konrad 1 shaft is 7 m. The lining system consists of concrete blocks. The final depth was reached at 1,232.5 m and shaft stations were made at 1,000 m (3rd level), 1,100 m (4th level) and 1,200 m (5th level) depth. Men riding and material hauling were operated with the southern shaft hoisting system with a payload of 4.6 t. With the more powerful northern cage hoisting up to 18 t could be moved. This hoisting system finally brought 6.7 M t of Jura iron ore to the surface until it was shut down in 1976..

It quickly becomes apparent that the expenses incurred prior to operation were in no relation to the low amount of production. Due to the good geological conditions, first attempts to use the mine as nuclear waste deposit came up before mine closure. The subsequent positive investigations finally culminated in a nuclear law planning approval procedure for the construction of a repository for low and intermediate radioactive substances in 1982.

The conversion of the iron ore mine into a repository mainly consists of the renewal of the open-cast facilities and shaft hoisting equipment Konrad 1 (Figure 1), the construction of a new underground infrastructure on the 2nd level and, above all, the construction of the nuclear facility at the Konrad 2 emplacement

1 Historie

1.1 Endlager Konrad

Die Abteufarbeiten für den Schacht Konrad 1 des ehemaligen Eisenerzbergwerks Konrad wurden im Herbst 1957 begonnen. Der Bau von Schacht Konrad 2, der rd. 1,8 km südöstlich von Konrad 1 liegt, begann anschließend auf dem Gelände der Salzgitter Hütte (heute: Salzgitter AG). Noch bevor die Verbindung zwischen den beiden Schächten unter Tage bestand, begann die Erzförderung.

Der Schachtdurchmesser Konrad 1 beträgt 7 m. Der Ausbau erfolgte mit Betonformsteinen. Die Endteufe wurde bei 1.232,5 m erreicht und es entstanden Sohlenanschlüsse in Teufen von 1.000 m (3.Sohle), 1.100 m (4.Sohle) und 1.200 m (5.Sohle). Seilfahrt und Förderung wurden mit der südlichen Schachtförderanlage bei einer Nutzlast von 4,6 t betrieben. Mit der leistungsfähigeren nördlichen Gestellförderanlage für Seilfahrt und Erzförderung konnten bis zu 18 t bewegt werden. Über diese Anlage wurden schließlich 6,7 Mio. t Jura-Eisenerz von 1964 bis 1976 zu Tage gefördert.

Es fällt schnell auf, dass die im Vorfeld des Abbaus getätigten Aufwendungen in keinem Verhältnis zur geringen Gesamtfördermenge stehen. Bedingt durch die guten geologischen Ausgangsbedingungen gab es bereits vor der Schließung erste Ansätze, das Bergwerk zum Einlagern radioaktiver Abfälle zu nutzen. Die nachfolgenden positiven Untersuchungen mündeten schließlich 1982 in ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren für den Bau eines Endlagers für schwach- und mittelradioaktive Stoffe.

Die Umrüstung des Eisenerzbergwerks zum Endlager besteht im Wesentlichen aus der Erneuerung der Tagesanlagen und Schachtförderanlagen Konrad 1 (Bild 1), der Errichtung einer



Fig. 1. Aerial view of Konrad 1 shaft (2021). // Bild 1. Luftbild Schacht Konrad 1 (2021). Photo/Foto: BGE



Fig. 2. Aerial view of Konrad 2 shaft (2022). // Bild 2. Luftbild Schacht Konrad 2 (2022). Photo/Foto: BGE

shaft (Figure 2). This consists of a fan building, a reloading hall, a buffer hall and other operating and auxiliary buildings. In addition, a new winding tower with new shaft hoisting equipment is being erected. The transition from the pit to the emplacement shaft in the area of the insert of the 2nd level and the transition from the shaft to the surface in the area of the shaft cellar are particularly challenging. The construction sites underground and in the shafts are operated simultaneously. The construction measures take into account the old stockpile; for these reasons, complex intermediate construction states result.

After the planning approval procedure (1982 to 2002) and obtaining the necessary legal certainty, work on converting the mine was allowed to begin on 3rd April 2007.

1.2 Asse II mine

The Asse 2 shaft was sunk to a depth of 765 m between 1906 and 1908. In order to realise the greatest possible extraction, three construction fields were set up for the mine. In the northern part, carnallite was mined (1 M m³ excavated, 1909 to 1925), in the southern part (Leine) rock salt (3.4 M m³, 1916 to 1964) and in



Fig. 3. Aerial view of Asse II. // Bild 3. Luftbild Asse II. Photo/Foto: BGE

neuen Infrastruktur unter Tage auf der 2. Sohle und vor allem der Errichtung der kerntechnischen Anlage am Einlagerungsschacht Konrad 2 (Bild 2). Diese besteht aus Lüftergebäude, Umladehalle, Pufferhalle und weiteren Betriebs- und Hilfsgebäuden. Darüber hinaus wird ein neuer Förderturm mit neuen Schachtförderanlagen errichtet. Besonders herausfordernd ist dabei der Übergang von der Grube in den Einlagerungsschacht im Bereich des Füllorts der 2. Sohle und der Übergang vom Schacht zur Tagesoberfläche im Bereich des Schachtkellers. Die Baustellen unter Tage und in den Schächten werden gleichzeitig betrieben. Die Errichtungsmaßnahmen berücksichtigen den Altbestand, aus diesen Gründen ergeben sich komplexe Bauzwischenzustände.

Nach dem Planfeststellungsverfahren (1982 bis 2002) sowie Erlangung der erforderlichen Rechtssicherheit durften die Arbeiten zur Umrüstung des Bergwerks am 3. April 2007 aufgenommen werden.

1.2 Schachanlage Asse II

Der Schacht Asse 2 wurde zwischen 1906 und 1908 bis in eine Tiefe von 765 m abgeteuft. Um eine größtmögliche Gewinnung zu realisieren, wurden für das Bergwerk drei Baufelder angelegt. Im nördlichen Teil fand der Abbau von Carnallit (1 Mio. m³ Ausbruch, 1909 bis 1925), im südlichen Teil (Leine-)Steinsalz (3,4 Mio. m³, 1916 bis 1964) und im Kern des Salzstocks (Stäbfurt-)Steinsalz (0,5 Mio. m³, 1927 bis 1964) statt. Der Salzbergbau wurde 1964 auf der Asse II beendet. Der Durchbauungsgrad im Bereich der Südflanke des Bergwerks Asse II beträgt mehr als 50%. Die Abbauhohlräume sind zunächst nicht versetzt worden, deshalb ging das Tragwerk des Bergwerks seit den 1980er-Jahren zunehmend in den Zustand der Bruchverformung über.

Im Jahr 1965 kaufte der Bund das Bergwerk und nutzte es als Forschungsbergwerk für die Einlagerung radioaktiver Abfälle.

In das ehemalige Kali- und Steinsalzbergwerk Asse II (Bild 3) wurden im Zeitraum von 1967 bis

the core of the salt dome (Staßfurt) rock salt (0.5 M m^3 , 1927 to 1964). Salt mining was terminated at Asse II in 1964. The degree of exploitation in the area of the southern flank of the Asse II mine is more than 50%. Initially, the mine openings were not relocated, which is why the mine's support structure increasingly entered a state of fractured deformation from the 1980s onwards.

In 1965, the federal government bought the mine and used it as a research mine for the storage of radioactive waste.

In the former potash and rock salt mine Asse II (Figure 3), low and intermediate level radioactive waste was emplaced in 13 emplacement chambers between 1967 and 1978. Since 1988, solution inflow from the surrounding rock mass into the mine have been observed, resulting from the damage to the surrounding rock mass and the loss of barrier integrity due to many years of rock salt mining. These currently amount to about 12 to $14 \text{ m}^3/\text{d}$. It cannot be ruled out that the solution influxes will increase in the future and that there is a risk of the mine flooding. On 20th April 2013, the Bundestag passed the Act to Accelerate the Retrieval of Radioactive Waste and the Decommissioning of the Asse II Mine. According to this law, the Asse II mine must be decommissioned immediately after retrieval of the radioactive waste, in accordance with § 57b (2) of the Atomic Energy Act (AtG). The retrieval of radioactive waste, and thus its planning, is thus a legal mandate.

2 Geological 3-D modelling

An important basis for many tasks and processes of the BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, is a good knowledge of the geological situation in the respective repository projects. Accordingly, processing in 3-D space by means of modern methods of geological 3-D modelling is well developed and firmly established. The modelling projects are processed in close cooperation with the specialist geologists at the sites in the cross-sectional geoscientific department in Peine. Depending on the site, this task is characterised by in-house work or the coordination and support of external contractors or cooperation partners. In all projects, the geological 3-D modelling process starts with the management of the geoscientific data. Information from exploratory drillings, geophysical measurement campaigns and geological mapping is systematically processed and prepared for evaluation in 3-D space. However, the different geological situations at the sites require very different approaches in the further procedure during the modelling process. For example, modern methods of semi-automated, implicit geological 3-D modelling are applied at the Konrad mine site due to the relatively simple situation of a little deformed horizontal layer sequence. However, this method is not suitable to model the complex deformed salt deposits of the Asse and Morsleben. Special expert knowledge and a high degree of pre-interpretation of the data in connection with conventional, so-called explicit modelling approaches are still necessary with regard to the processing of the internal structure of these salt structures (Figure 4).

1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle in 13 Einlagerungskammern eingelagert. Seit 1988 werden Lösungszutritte aus dem Nebengebirge in die Schachanlage beobachtet, die aus der Schädigung des Nebengebirges und dem Verlust der Barriereintegrität infolge der langjährigen Steinsalzgewinnung resultieren. Diese betragen aktuell etwa 12 bis $14 \text{ m}^3/\text{d}$. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Lösungszutritte in Zukunft zunehmen und ein Absaufen des Bergwerks droht. Am 20. April 2013 wurde im Bundestag das Gesetz zur Beschleunigung der Rückholung radioaktiver Abfälle und der Stilllegung der Schachanlage Asse II beschlossen. Demzufolge ist nach § 57b Abs. 2 Atomgesetz (AtG) die Schachanlage Asse II nach Rückholung der radioaktiven Abfälle unverzüglich stillzulegen. Die Rückholung und damit auch deren Planung sind somit gesetzlicher Auftrag.

2 Geologische 3D-Modellierung

Eine wichtige Grundlage für viele Aufgaben und Prozesse der BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, ist eine gute Kenntnis der geologischen Situation in den jeweiligen Endlagerprojekten. Entsprechend ist die Bearbeitung im 3D-Raum mittels moderner Methoden der geologischen 3D-Modellierung weit entwickelt und fest etabliert. Die Modellierungsprojekte werden in enger Zusammenarbeit mit den Fachgeologen auf den Standorten in der geowissenschaftlichen Querschnittsabteilung in Peine bearbeitet. Je nach Standort ist diese Aufgabe durch Eigenleistung oder die Koordination und Begleitung von externen Auftragnehmern oder Kooperationspartnern gekennzeichnet. In allen Projekten gleichermaßen steht am Anfang der geologischen 3D-Modellierung das Management der geowissenschaftlichen Fachdaten. Informationen aus Erkundungsbohrungen, geophysikalischen Messkampagnen und geologischen Kartierungen werden systematisch aufbereitet und für die Auswertung im 3D-Raum vorbereitet. Die unterschiedliche geologische Situation an den Standorten erfordert im Verlauf des Modellierungsprozesses jedoch ganz unterschiedliche Ansätze in der weiteren Vorgehensweise. So finden in der Eisenerzlagerstätte Schacht Konrad aufgrund der relativ einfachen Situation einer wenig deformierten horizontalen Schichtabfolge moderne Methoden der teilautomatisierten, impli-

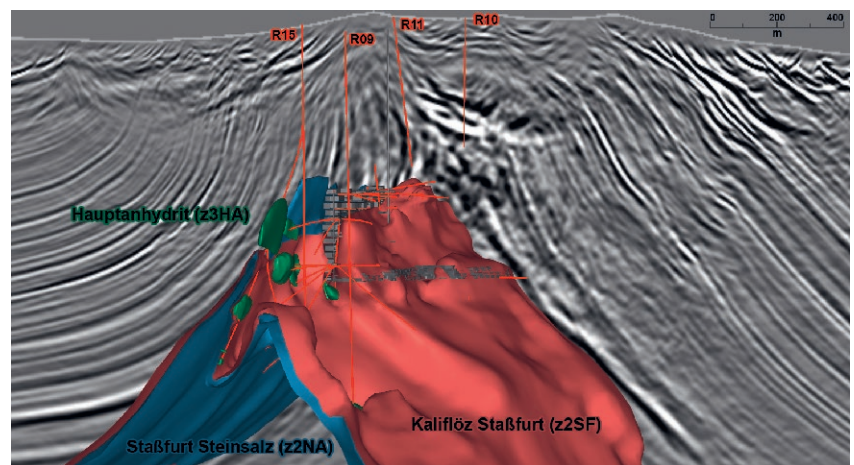


Fig. 4. Geological 3-D reservoir model with view to the east on a 3-D seismic line in the level of the deep boreholes Remlingen10 (R10) and Remlingen11 (R11). // Bild 4. Geologisches 3D-Lagerstättenmodell mit Blick Richtung Osten auf eine 3D-Seismiklinie im Niveau der Tiefbohrungen Remlingen10 (R10) und Remlingen11 (R11). Source/Quelle: BGE

Due to the different questions, the necessary target resolution and the respective situation-related approach, the overburden and the repository are processed in separate, but closely co-ordinated modelling projects. This is also true for the Asse. The overburden model is the basis for long-term safety verifications to be provided within the framework of rock mechanics and flow and transport modelling. In order to be able to realise such a representation for the assessment, 44,677 receiver points > 420 TB of data were registered on a total measurement area of 36.5 km², with 36,137 excitation points, of which 6,364 were blast excitations and 29,773 vibro-excitations.

The repository model primarily forms the basis for planning the retrieval of the emplaced low- and intermediate-level radioactive waste. Both sub-models are currently being fundamentally revised according to the large amount of new surface and underground exploration data. Two new deep boreholes (R10 and R11) and two deflectors from an existing deep borehole (R15) as well as a high-resolution 3-D seismic measurement enable a consistent mapping of the main structural elements of the overburden. The integral evaluation of two exploratory boreholes on the 574 m and 700 m levels as well as various geophysical measurements such as electromagnetic reflection measurements (EMR) results in a complex deformed 3-D layer model in the area of the planned retrieval mine. The continuous comparison between overburden and reservoir model leads to a consistent understanding of the structural genesis and thus to a validation of the generated geometries in both models. Remaining uncertainties can thus be minimised and the quality of planning bases can be improved.

Once the geological data have been determined and created, the focus shifts to the buildings and underground structures. Building Information Modelling (BIM) is used for this purpose.

3 The BIM method

Following initial successful projects in building construction, the BIM method is now also being used underground at BGE. The method describes how the information relevant to the entire life cycle of a structure is recorded, managed, structured and exchanged between the parties involved. This means that all those involved in the construction project in planning, execution and operation no longer work with individual documents and drawings, but link the information with each other via a central information model. Collaboration is moving away from document-centred to data-centred information exchange. This allows information to be coordinated more efficiently and reduces the room for interpretation, misunderstandings and errors.

In the planning phase, the technical models of the individual disciplines are merged into a coordination model. Collision checking tools are then used to ensure, on a rule-based basis, that the objects are placed correctly. For conventional construction projects, this check is an essential step towards improving the quality of planning. For BGE underground projects, however, the logistical measures for driveways and the necessary temporary structures are decisive in the planning. The spatial collision check is therefore not applicable for these purposes alone; the temporal component must be taken into account. For this purpose, the activities from the schedules are linked with the 3-D components in the coordination model, so that an interactive

ziten geologischen 3D-Modellierung Anwendung. Diese Methode ist jedoch nicht geeignet, um die komplex deformierten Salzlagerstätten der Asse und von Morsleben abzubilden. Nach wie vor ist bezüglich der Bearbeitung des Internbaus dieser Salzstrukturen besonderes Expertenwissen und ein hoher Grad an Vorinterpretation der Daten in Verbindung mit herkömmlichen, sogenannten expliziten Modellierungsansätzen notwendig (Bild 4).

Aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen, notwendigen Zielaufklärung und der jeweiligen situationsbedingten Vorgehensweise werden das Deckgebirge und die Lagerstätte in separaten, jedoch eng miteinander abgestimmten Modellierungsprojekten bearbeitet. Dies ist auch für die Asse zutreffend. Das Deckgebirgsmodell ist die Grundlage für zu erbringende Langzeitsicherheitsnachweise im Rahmen von gebirgsmechanischen sowie Strömungs- und Transportmodellierungen. Um eine solche Darstellung für die Assessmentik realisieren zu können, wurden auf einer Gesamtmesfläche von 36,5 km² mit 36.137 Anregungspunkten, davon 6.364 Sprenganregungen und 29.773 Vibro-Anregungen, 44.677 Empfangspunkte > 420 TB Daten registriert.

Das Lagerstättenmodell bildet in erster Linie die Grundlage für die Planung zur Rückholung der eingebrachten schwach- und mittelradioaktiven Abfälle. Beide Teilmodelle werden aktuell entsprechend der Vielzahl an neuen über- und untertägigen Erkundungsdaten grundlegend überarbeitet. Zwei neue Tiefbohrungen (R10 und R11) und zwei Ablenker aus einer bestehenden Tiefbohrung (R15) sowie eine hochauflösende 3D-seismische Messung ermöglichen eine konsistente Abbildung der wesentlichen Strukturelemente des Deckgebirges. Die integrale Auswertung von zwei Erkundungsbohrfächern auf der 574 m- und der 700 m-Sohle sowie diverser geophysikalischer Messungen wie u. a. Elektromagnetische Reflexionsmessungen (EMR) ergeben ein komplex deformiertes 3D-Schichtmodell im Bereich des geplanten Rückholbergwerks. Der kontinuierliche Abgleich zwischen Deckgebirgs- und Lagerstättenmodell führt zu einem konsistenten Verständnis der Strukturgenese und somit zu einer Validierung der erzeugten Geometrien in beiden Modellen. Verbleibende Ungewissheiten können so minimiert und Planungsgrundlagen in ihrer Qualität verbessert werden.

Sind die geologischen Daten ermittelt und erstellt, legt sich der Fokus auf die Hochbauten und die Untertagebauwerke. Hierzu wird das Building Information Modeling (BIM = Informationsmodellierung für Bauwerke) angewandt.

3 Die BIM-Methode

Die BIM-Methode wird bei der BGE nach ersten erfolgreichen Vorhaben im Hochbau nun auch unter Tage eingesetzt. Die Methode beschreibt, wie die für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks relevanten Informationen erfasst, verwaltet, strukturiert und zwischen den Beteiligten ausgetauscht werden. Das bedeutet, dass alle am Bauvorhaben beteiligten Personen in Planung, Ausführung und Betrieb nicht mehr mit einzelnen Dokumenten und Zeichnungen arbeiten, sondern die Informationen über ein zentrales Informationsmodell miteinander verknüpfen. Die Zusammenarbeit entwickelt sich weg vom dokumenten- hin zum datenzentrierten Informationsaustausch. Dadurch können Informationen effizienter abgestimmt und der Raum für Interpretationen, Missverständnisse und Fehler verringert werden.

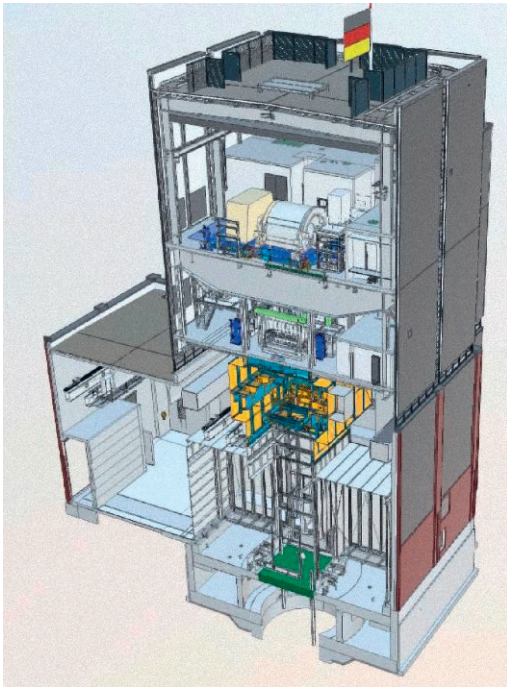


Fig. 5. Final SFA for emplacement. // Bild 5. Endgültige SFA für die Einlagerung. Source/Quelle: BGE

sequence simulation is created (Figures 5, 6). The visualisation is used in the planning meetings to identify interactions and dependencies of the different systems in time. The spatial and temporal consequences of the construction progress can be viewed directly from any perspective. It can also be used to check and assess the consequences of schedule changes on further construction progress.

In parallel, BGE is working on the concept of virtual commissioning of a virtual repository.

4 Virtual commissioning

The BGE is pursuing the vision of an autonomous repository for radioactive waste. The motivation here is to relocate people-related jobs outside potentially radiation-exposed areas. This process already begins with the planning of repository operations and continues in the operational phase with waste treatment, waste transport or sampling. The development of applications here is structured, based on the three pillars of virtualisation, automation and data infrastructure.

The examination of virtualisation technologies aims at the commissioning and predictive maintenance of plants, systems and components (ASK). The approaches to automation pursue the goal of realising operational activities remotely or autonomously. A corresponding data infrastructure must ultimately offer ways that advantages of networking can also be used in repository operation and ways found to take safety requirements into account. In the following, the first pillar of virtualisation will be addressed.

Repository operations are special facilities in the industrial sense. Their uniqueness requires a high degree of coordination in the phases of construction and verification. On the basis of a feasibility study, the BGE is addressing the issue of virtual commissioning in this context. Essential questions are based in the first step on



Fig. 6. Konrad 2 Shaft repository with surface facilities. // Bild 6. Endlager Schacht Konrad 2 mit Übertageanlagen. Source/Quelle: BGE

In der Planungsphase werden die Fachmodelle der einzelnen Disziplinen zu einem Koordinationsmodell zusammengeführt. Mit Kollisionsprüfungswerkzeugen wird dann regelbasiert sichergestellt, dass die Objekte korrekt platziert sind. Für konventionelle Bauvorhaben ist diese Prüfung ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Planungsqualität. Bei den untertägigen Projekten der BGE sind aber in der Planung die logistischen Maßnahmen für Auffahrungen und die erforderlichen temporären Bauwerke entscheidend. Die räumliche Kollisionsprüfung ist also für diese Zwecke allein nicht anwendbar, es muss die zeitliche Komponente berücksichtigt werden. Hierzu werden die Aktivitäten aus den Terminplänen mit den 3D-Bauteilen im Koordinationsmodell verknüpft, sodass eine interaktive Ablaufsimulation entsteht (Bilder 5, 6). Die Visualisierung wird in den Planungsbesprechungen genutzt, um Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der unterschiedlichen Systeme rechtzeitig zu erkennen. Die räumlichen und zeitlichen Folgen des Baufortschritts lassen sich direkt aus beliebiger Perspektive betrachten. Auch die Konsequenzen von Terminplanänderungen auf den weiteren Baufortschritt lassen sich damit prüfen und beurteilen.

Parallel arbeitet die BGE am Konzept der virtuellen Inbetriebnahme eines virtuellen Endlagers.

4 Virtuelle Inbetriebnahme

Die BGE verfolgt die Vision eines autonomen Endlagers für radioaktive Abfälle. Die Motivation hierbei liegt in der Verlagerung personenbezogener Arbeitsplätze außerhalb potentiell strahlenexponierter Bereiche. Dieser Prozess beginnt bereits bei der Planung von Endlagerbetrieben und setzt sich im operativen Betrieb bei der Abfallbehandlung, dem Abfalltransport oder der Probennahme fort. Die Entwicklung von Anwendungen erfolgt hierbei strukturiert, basierend auf den drei Säulen Virtualisierung, Automatisierung und Dateninfrastruktur.

Die Auseinandersetzung mit Virtualisierungstechnologien zielt auf die Inbetriebsetzung und vorausschauende Wartung von Anlagen, Systemen und Komponenten (ASK) ab. Die Ansätze zur Automatisierung verfolgen das Ziel, operative Tätigkeiten fernhantiert oder autonom zu realisieren. Eine entsprechende Dateninfrastruktur muss letztlich Wege bieten, dass auch im Endlagerbetrieb Vorteile der Vernetzung genutzt und Wege gefunden werden, den Sicherheitsanforderungen Rechnung zu tragen. Im Folgenden wird auf die erste Säule der Virtualisierung eingegangen.

- the structured representation of plants, systems and components in the form of digital twins,
- changes in the working method for the development of plants, systems and components, and
- possibilities for verification and documentation of the proper commissioning of a repository.

The focus of a digital twin in virtual commissioning is on the functionality and physical behaviour of an ASK. The BGE strives to follow a standardised, marketable approach for the construction of its digital twins. This simplifies cooperation with BGE's industrial partners, even over longer periods of time. As of today, a number of promising approaches to building digital twins are under development, e.g. organised by the Industrial Digital Twin Association e.V. (IDTA). However, there is still no established structure to be able to digitally map ASK in its breadth in a standardised way.

The working method between clients and contractors should develop towards a more cooperative approach in the course of virtual commissioning (Figure 7). Instead of a primary focus on commissioning and acceptance of a service, development steps should be carried out in iterative coordination with each other. In this way, potential weaknesses in the commissioning or implementation should be identified and remedied at an early stage. In addition to the development on the specific model, the client has the possibility to validate the integrity of that digital twin in a virtual overall system of his plant. In this way, potential interface problems between individual ASKs from different suppliers can also be addressed. In the operating phase of a plant, it is also possible to check the effects of upcoming company and software updates on an overall system before they are installed on the real plant.

Finally, the virtual commissioning tool makes it possible to run through test scenarios together with experts and approving authorities before the plant is physically commissioned. In this way, procedures and processes can be pre-tested and potential points for improvement can be identified and rectified at an early stage. In this way, BGE expects a more efficient commissioning process and a minimisation of delays due to rework after

Endlagerbetriebe stellen im industriellen Sinn Sonderanlagen dar. Deren Einmaligkeit erfordert in den Phasen der Errichtung und Nachweisführung einen hohen Abstimmungsbedarf. Anhand einer Machbarkeitsuntersuchung setzt sich die BGE in diesem Kontext mit dem Thema der virtuellen Inbetriebsetzung auseinander. Wesentliche Fragestellungen basieren im ersten Schritt auf

- der strukturierten Abbildbarkeit von Anlagen, Systemen und Komponenten in Form von digitalen Zwillingen,
- Veränderungen in der Arbeitsweise zur Entwicklung von Anlagen, Systemen und Komponenten sowie
- Möglichkeiten zur Nachweisführung und Dokumentation über die ordnungsgemäße Inbetriebsetzung eines Endlagers.

Der Fokus eines digitalen Zwillings in der virtuellen Inbetriebnahme liegt auf der Funktionalität und dem physikalischen Verhalten einer ASK. Die BGE ist bestrebt, für den Aufbau ihrer digitalen Zwillinge einen normierten, marktgängigen Ansatz zu verfolgen. Dies vereinfacht die Kooperation mit Industriepartnern der BGE auch über längere Zeiträume hinweg. Zum heutigen Datum befinden sich eine Reihe vielversprechender Ansätze zum Aufbau digitaler Zwillinge in der Entwicklung, z. B. organisiert durch die Allianz Industrial Digital Twin Association e.V. (IDTA). Noch gibt es jedoch keine etablierte Struktur, um ASK in ihrer Breite standardisiert digital abbilden zu können.

Die Arbeitsweise zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern soll sich im Zuge einer virtuellen Inbetriebnahme hin zu einem kooperativeren Ansatz entwickeln (Bild 7). Anstelle einer primären Fokussierung auf Beauftragung und Abnahme einer Leistung, sollen Entwicklungsschritte in iterativer Abstimmung zueinander durchgeführt werden. Dergestalt sollen potentielle Schwachstellen in der Beauftragung oder Umsetzung frühzeitig identifiziert und behoben werden. Neben der Entwicklung am spezifischen Modell hat der Auftraggeber die Möglichkeit, die Integrität jenes digitalen Zwillings in einem virtuellen Gesamtsystem seiner Anlage zu validieren. Dergestalt lassen sich auch potentielle Schnittstellenproblematiken zwischen einzelnen ASK verschiedener Lieferanten adressieren. In der Betriebsphase einer Anlage lassen sich hierüber auch Auswirkungen anstehender Firmen- und Softwareupdates auf ein Gesamtsystem überprüfen, bevor die Aufspielung an der realen Anlage erfolgt.

Letztlich ermöglicht das Werkzeug der virtuellen Inbetriebnahme die Möglichkeit, gemeinsam mit Sachverständigen und genehmigenden Behörden Prüfscenarien durchzuspielen, bevor die Anlage physisch in Betrieb genommen wird. So können Verfahrens- und Prozessabläufe vorgeprüft und potentielle Punkte zur Nachbesserung frühzeitig identifiziert und umgesetzt werden. Dergestalt erwartet sich die BGE einen effizienteren Inbetriebnahmeablauf und eine Minimierung von Verzögerungen aufgrund anfallender Nachbesserungen nach Errichtung der Anlage. Die Kombination von digitalen Zwillingen und einer virtuellen Inbetriebnahme erlaubt zudem für Dokumentationszwecke den Aufbau von Lebenszyklusmodellen einer ASK. Über die Entwicklung, Nut-

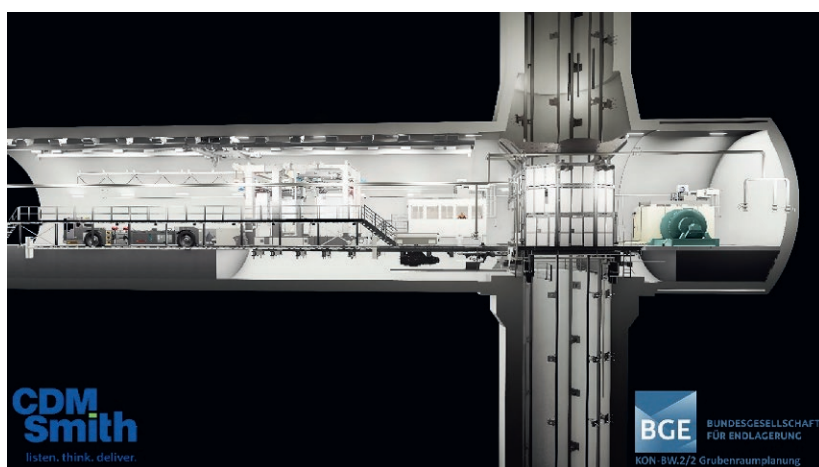


Fig. 7. Konrad project, insert 2nd level, example of feasibility study virtual commissioning. Bild 7. Projekt Konrad, Füllort 2. Sohle, Beispiel für Machbarkeitsuntersuchung virtuelle Inbetriebnahmestudie. Source/Quelle: BGE

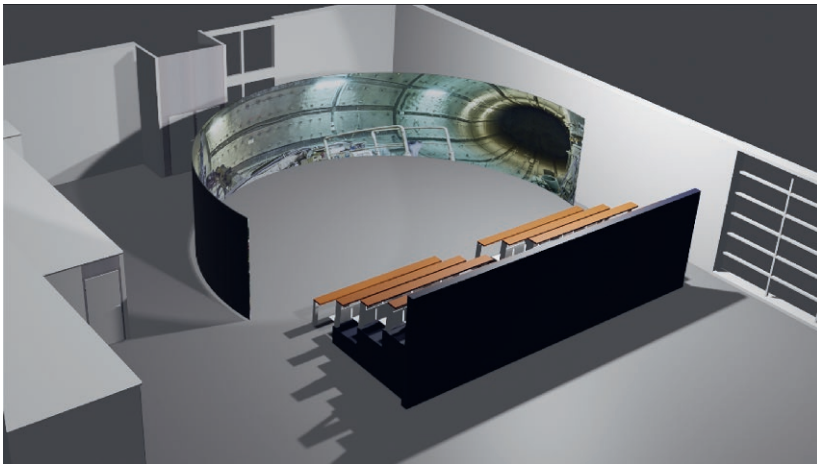


Fig. 8. Virtual forum in planning for the presentation of technical/geological issues in the form of virtual reality. Bild 8. In Planung befindliches virtuelles Forum zur Darstellung technisch/geologischer Sachverhalte in Form virtueller Realität. Source/Quelle: BGE

construction of the plant. The combination of digital twins and virtual commissioning also allows the construction of life cycle models of an ASK for documentation purposes. Measures taken and events occurring during the development, use and decommissioning of an ASK can be documented.

The BGE combines this functional approach with a visual representation within a virtual forum (Figure 8). In this forum, also referred to as immersive space, ASK can be shown in large format as a virtual reality (VR) representation. This should enable specialist planners (geologists, engineers, etc.) to immerse themselves in a virtual model across all trades. The approach is interesting for the BGE, among other things, because the VR representation of an ASK can be coupled with its control behaviour, which is depicted in its virtual commissioning model.

The feasibility study initiated by the BGE will run until April 2023. Among other things, the questions still to be clarified are at what stage of the project the discussion of virtual commissioning is still expedient and what degree of adaptation is required for a corresponding software platform for the purposes of final disposal. However, it can already be assumed that the use of such a tool will lead to an improvement in the timely and high-quality implementation of project plans.

5 Summary

As in industry worldwide, the final disposal sector is also shaping the digital transformation. The most important current fields of action are the autonomisation of processes and the digitalisation of engineering services.

A special feature is the handling of radioactive waste, which brings with it a particular urgency for remote handling or autonomous processes. The nuclear licensing procedure with its special requirements for IT security and plant safety must always be taken into account. Due to the special requirements for repository technology, large-scale solutions are often not available. Therefore, individual solutions will continue to be necessary in the future.

Authors / Autoren

Dr.-Ing. Thomas Lautsch, Dr. rer. nat. Ralf Holländer, Dipl.-Inf. Christian Wilkens, Dipl. Wirt.-Ing. David Horner, Olga Grobe, BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

zung und Außerdienststellung lassen sich erbrachte Maßnahmen und Ereignisse einer ASK dokumentieren.

Die BGE verbindet diesen funktionalen Ansatz mit einer visuellen Darstellung innerhalb eines virtuellen Forums (Bild 8). In diesem Forum, auch bezeichnet als Immersive Space, können ASK großformatig als Virtual-Reality (VR)-Darstellung gezeigt werden. Dies soll Fachplaner (Geologen, Ingenieure, etc.) in die Lage versetzen, sich gewerkeübergreifend in ein virtuelles Modell hineinzuversetzen. Interessant ist der Ansatz für die BGE u. a. deshalb, weil sich die VR-Darstellung einer ASK mit deren steuerungstechnischem Verhalten koppeln lässt, welches in dessen virtuellem Inbetriebnahmeverhalten abgebildet ist.

Die von der BGE angestoßene Machbarkeitsstudie läuft noch bis April 2023. Zu klären sind u. a. noch die Fragestellungen, zu welchem Projektstand die Auseinandersetzung mit der virtuellen Inbetriebnahme noch zielführend ist und welchen Grades der Adaptierung eine entsprechende Softwareplattform für die Zwecke der Endlagerung bedarf. Bereits heute darf aber von einer Verbesserung der termin- und qualitätsgetreuen Durchführung von Projektvorhaben infolge der Anwendung eines solchen Werkzeugs ausgegangen werden.

5 Resümee

Wie die Industrie weltweit gestaltet auch die Branche der Endlagerung die digitale Transformation. Dabei sind die wichtigsten derzeitigen Handlungsfelder die Autonomisierung der Prozesse und die Digitalisierung der Ingenieurleistungen.

Eine Besonderheit ist der Umgang mit radioaktiven Abfällen, der eine besondere Dringlichkeit für Fernhandlung bzw. autonome Prozesse mit sich bringt. Immer muss dabei das atomrechtliche Genehmigungsverfahren mitgedacht werden mit seinen speziellen Anforderungen an IT- und Anlagensicherheit. Aufgrund der speziellen Anforderungen an die Endlagertechnik stehen oftmals keine Großserienlösungen zur Verfügung. Daher werden individuelle Lösungsansätze auch in Zukunft erforderlich sein.