

Andreas Hucke
Nadine Kohl
Carsten Scior
Daniela Gutberlet

Disposal facility building also is mining engineering – Germany can tap into this expertise and planning potential

The conventional mining industry has a rich tradition and as mining is practised all over the world under a whole range of different conditions the industry has witnessed all kinds of technical developments aimed at controlling strata behaviour and winning the target mineral as efficiently as possible. The proposed use of deep geological deposits as disposal facilities for nuclear waste has transformed the role of the mining industry and instead of extracting material from the ground mining engineers are now focussing more on how to store waste material safely deep below the earth's surface. Nevertheless, this new remit retains many of

the key aspects of conventional mining and the experience that the industry has built up over the years is still of vital importance when it comes to selecting a suitable disposal site and planning a final waste disposal facility in deep geological formations. These processes benefit from the support of specialists with a mining engineering background, as this can help to avoid unnecessary delays, additional costs and potential damage to public image. The following paper describes some of the expertises and methods developed by the conventional extraction industry that are also of relevance for the construction of disposal facilities.

Endlagerbergbau ist auch Bergbau – Erfahrungs- und Planungspotential in Deutschland

Der konventionelle Bergbau hat eine lange Tradition. Über die weltweite Verbreitung und die unterschiedlichsten Bedingungen unter denen Bergbau betrieben wurde, entwickelten sich vielfältigste Techniken zur sicheren Beherrschung des Gebirges und zur effizienten Gewinnung von Rohstoffen. Die geplante Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen dreht die bisherige Aufgabe des Bergbaus um. Nicht mehr die Gewinnung von Materialien im Gebirge, sondern die sichere Verbringung von Material in das Innere des Gebirges steht nun im Vordergrund. Und doch bleiben die wesentlichen Merkmale des

konventionellen Bergbaus nahezu vollständig erhalten. Schon bei der Standortauswahl und in der gesamten Planung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen sind die Erfahrungen des konventionellen Bergbaus von wesentlicher Bedeutung. Die Begleitung dieser Prozesse durch Fachleute mit bergmännischer Erfahrung hilft, unnötige Verzögerungen, Mehrkosten und Imageschäden zu vermeiden. Eine Auswahl von Erkenntnissen und Methoden aus dem konventionellen Gewinnungsbergbau, die auch für die Errichtung eines Endlagers relevant sind, werden in dem vorliegenden Beitrag beschrieben.

The question of how and where the radioactive waste should be stored was already being raised when nuclear energy was first used in Germany for industrial purposes in the 1960s. While there is now in Germany a general consensus about storing radioactive waste in deep geological formations, the question of site selection and the specification of the host rock remain completely open. This applies especially to the storage of high activity radioactive waste (HAW), but also concerns the low to medium-level radioactive material that cannot be stored at the Konrad disposal facility and the waste material that is now to be retrieved from the Asse II mine site.

Spätestens mit Beginn der industriellen Nutzung der Kernenergie in Deutschland in den 1960er Jahren geht die Frage einher, wie und wo die radioaktiven Abfälle entsorgt werden sollen. Während in Deutschland inzwischen Konsens über die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen besteht, ist die Standortfrage bzw. die Festlegung auf ein Wirtsgestein für eine Endlagerung wieder völlig offen. Dies gilt insbesondere für die Lagerung der hochradioaktiven Abfälle (HAW) aber auch für die nicht im Endlager Konrad einlagerbaren schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sowie für die aus der Schachanlage Asse II zurückzuholenden Abfälle.

Any decision on the final storage of radioactive waste in deep geological formations – irrespective of the choice of host rock and the disposal site – requires the construction and operation of an underground disposal facility. The international nuclear industry has often used near-surface disposal facilities for storing low to medium-level radioactive waste, though deep geological formations tend to be preferred, and indeed prescribed, for the permanent storage of HAW material. Here too there is a preference for certain types of host rock. While relatively little experience has been acquired relating to the establishment of permanent underground disposal facilities for storing HAW in deep geological formations, the deep mining industry has, over hundreds of years, built up a significant body of know-how in constructing and operating facilities for mining all kinds of minerals, and in decommissioning these sites at the end of their useful life. This pool of experience should be used for identifying suitable storage sites and planning the underground disposal facility structures.

The extraction of raw materials from all kinds of geological formations – lodes and veins, sedimentary deposits and ore impregnations – has proved a technical challenge for miners for hundreds of years. While striving to maintain safety standards at the highest level the mining industry has succeeded in working deeper and deeper below ground and in overcoming the most difficult of conditions, including high rock pressures, friable strata and heaving formations, geological faults and high water-pressure zones. With ever higher production levels and exploitation factors now very much in demand, mining today has become a high-tech branch of industry.

Only the conventional extractive industry has the know-how needed to ensure that radioactive waste can be safely stored in deep geological formations. This expertise therefore has to be exploited when searching for a suitable storage site and commissioning and operating the facility itself.

Shaft sinking – gaining access to the underground site

Shafts provide the connection between the surface and the underground workings and in the conventional mining industry they are used for mineral winding and for transporting men and materials, as well as providing a ventilation route and a means for escape and rescue. Where a former mining site is to be used as an underground storage or disposal facility the shafts will also be needed as a transport route for the hazardous waste or radioactive material. Most mine shafts are vertical in direction, though other forms of access also exist, including inclined shafts, drifts and spiral roadways.

Modern mine shafts are constructed to a finished diameter of up to 10 m, according to specified requirements. The trend is towards ever larger diameters, with the cost of the construction and support work rising disproportionately in relation to the increase in diameter. Sinking a mine shaft usually involves working through different lithological strata, frequently exhibiting widely varying rock characteristics and bed thicknesses within the stratigraphic formations. In the northern Ruhr coalfield, for example, the overburden is based on a wide range of unconsolidated material such as gravels, sands and clays. Below this we find semi-solid and solid sandstones, clay marls, calcareous marls and limestone beds, some including anhydrite. As well as encountering a wide

Die Entscheidung für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen erfordert – unabhängig von der Wahl des Wirtsgesteins und des Standortes – die Errichtung und den Betrieb eines Endlagerbergwerks. International werden schwach- und mittelradioaktive Abfälle bisher häufig oberflächennah eingebracht, für die Endlagerung von HAW-Abfällen wird jedoch auch hier zukünftig die Lagerung in tiefen geologischen Formationen präferiert bzw. vorgeschrieben werden, wobei unterschiedliche Wirtsgesteine favorisiert werden. Während zur Errichtung von Endlagerbergwerken zur Lagerung von HAW-Abfällen in tiefen geologischen Formationen bislang kaum Erfahrungen vorliegen, gibt es weltweit ein über Jahrhunderte gesammeltes Know-how über die Errichtung, den Betrieb und die Schließung von Bergwerken für die Gewinnung unterschiedlichster Rohstoffe. Diesen Erfahrungsschatz gilt es, für die Festlegung eines geeigneten Standortes und die Planungen für ein Endlagerbergwerk zu nutzen.

Der Abbau der Rohstoffe in unterschiedlichsten Lagerstätten-typen – Ganglagerstätten, sedimentäre Vorkommen oder Imprägnationen – erfordert seit Jahrhunderten das Beherrschen einer Vielzahl von technischen Herausforderungen. Unter Wahrung höchster Sicherheitsstandards ist es gelungen, in immer größere Teufen vorzudringen und auch schwierigste Randbedingungen, wie hohe Gebirgsdrücke, gebrüche oder quellende Gesteinsschichten, geologische Störungen sowie Bereiche mit erhöhtem Wasserdruck zu beherrschen. Mit der damit einhergehenden Forderung nach höherer Produktion und Ausnutzung der Lagerstätte ist der heutige Bergbau eine Hochtechnologiebranche.

Erst die Erfahrung aus dem konventionellen Gewinnungsbergbau macht es überhaupt möglich, dass radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen eingelagert werden können. Diese Erfahrung sollte bei der Suche nach einem geeigneten Standort und dem Betrieb eines Endlagers unbedingt herangezogen werden.

Schachtbau – der Zugang nach unter Tage

Schächte stellen die Verbindung des untertägigen Grubengebäudes zur Tagesoberfläche her und dienen im konventionellen Bergbau der Rohstoffförderung, dem Materialtransport, der Personenbeförderung, der Bewetterung der Bergwerke sowie als Flucht- und Rettungsweg. Im Zuge der Nutzung von Bergwerken als Untertagedeponie bzw. als Endlager werden Schächte auch zur Verbringung von Sonderabfällen und radioaktiven Abfällen nach unter Tage genutzt. Überwiegend handelt es sich bei Schächten um seigere Verbindungen, Alternativformen stellen Schrägschächte und Stollen bzw. Wendelstrecken dar.

Je nach Anforderung werden Schächte heute mit einem lichten Durchmesser von bis zu 10 m ausgeführt. Die Tendenz geht dabei zu immer größeren Schachtdurchmessern, wobei der Aufwand für die Herstellung und Sicherung des Schachtes mit zunehmendem Durchmesser überproportional steigt. Beim Abteufen von Schächten werden in der Regel unterschiedliche lithologische Gebirgsschichten mit z.T. stark wechselnden Gesteinseigenschaften und Mächtigkeiten innerhalb der stratigraphischen Formationen angeschnitten. So ist beispielsweise das Deckgebirge über der Steinkohlenlagerstätte nördlich der Ruhr im oberen Bereich aus verschiedensten Lockergesteinen wie Kiesen, Sanden und To-

range of rock types the shaft sinking will also have to work safely through water-bearing horizons that often contain water under high pressure, or aquifers. Alternate layers of water-bearing and impermeable rock, such as sands and water-sensitive clays, sandstones and mudstones, require special attention from planning and shaft sinking engineers, while plastic clays and rock with a high creep-distortion rate, such as mudstones and salts, or areas of anhydrite with a high swelling potential, call for specialist knowledge both when selecting the shaft location and during the planning and execution phase.

The art of the mining engineer has come up with potential solutions for all these challenges and has often succeeded in finding the right answer. The freeze sinking technique, for example, is employed in loose water-bearing ground and in unstable, porous, permeable and jointed rock beds. Freeze zones can now be reliably created from the surface down to depths of as much as 800 m.

Along with freeze sinking the industry has successfully developed various strata injection techniques using media such as polyurethane and silicate resins and mineral-based building materials. Deep-level strata injection can be practised from the surface, as well as during the shaft sinking operation. The advantage of this method is that the time required for the injection material to set is significantly shorter than that needed to establish the ice wall when freeze sinking.

Today's mine shafts can be sunk conventionally by drilling and blasting, by semi-mechanised means using shaft milling machines or by using fully-mechanised shaft drilling machines. The conventional sinking technique is still employed most frequently because of its flexibility. Shaft milling machines (Figure 1) and shaft drilling machines are used, for example, when sinking through weak, brittle and for the most part homogeneous rock, such as rock salt formations.

Increasing depth brings with it an increase in rock pressure and as a result the shaft walls are subjected to a higher level of stress. As strength levels are gradually exceeded this means that unless support and reinforcement measures are taken the supporting ring of rock will start to crumble away and/or become distorted, this ultimately leading to a complete collapse of the excavation.

During the sinking phase, and before the final shaft lining is installed, a rock reinforcement system is therefore often put in place to relieve the rock stress in a controlled manner. The type of shaft support system employed will generally depend on the geological, geomechanical and hydrological conditions present in the rock. Single-skin (e.g. steel reinforced concrete) and multi-skin (e.g. tubbing rings with backfill) support systems can be used for this purpose and the support structure may be attached to the rock surface (e.g. bolt-anchored shotcrete or steel concrete) or may be free floating in that the inner lining is separated from the outer lining by a layer of bitumen or some other fluid material (sliding linings). The shaft construction industry has therefore developed individual solutions for practically every type of strata situation.

Underground roadway networks and special-purpose excavations – a prerequisite for accessing the deposits

Irrespective of the intended purpose of the underground project, the rock mass can only be opened up by driving a series of mostly horizontal roadways out from the shaft or surface drift. This net-



Fig. 1. Shaft sinking with a shaft milling machine.

Bild 1. Beispiel einer Schachtherstellung mit Schachtfräse.

Source/Quelle: Thyssen Schachtbau GmbH

ten aufgebaut. Darunter folgen halbfeste und feste Sandsteine, Ton- und Kalkmergelsteine und Kalksteine, z.T. auch Anhydrite. Neben den unterschiedlichsten Gesteinseigenschaften, die beim Schachtbau beherrscht werden müssen, sind auch wasserführende Horizonte mit oftmals unter hohem Druck stehendem Wasser, sogenannte Aquifere, sicher zu durchörtern. Wechsellagen von wasserführenden und undurchlässigen Gebirgsschichten – z.B. von Sanden und wassersensitiven Tonen bzw. Sandsteinen und Tonsteinen – bedürfen bei der Planung und den Teufarbeiten erhöhter Aufmerksamkeit. Plastische Tone und Gesteine mit hoher Kriechverformung, wie z.B. Tonsteine oder Salze sowie Bereiche von Anhydriten mit hohem Quellpotential, erfordern eine hohe Fachkompetenz sowohl bei der Auswahl eines Standortes als auch in der Planungs- und Ausführungsphase.

Die Ingenieurskunst im Bergbau hat für all diese Herausforderungen Lösungen erarbeitet und sie vielfach erfolgreich realisiert. In wasserführenden Lockergesteinen und in nicht standfesten porösen, durchlässigen und klüftigen Festgesteinen kommt beispielsweise das Gefrierverfahren zur Anwendung. Heutzutage können Gefrierkörper von der Tagesoberfläche aus bis in Teufen über 800 m zuverlässig hergestellt werden.

Neben der Gefriertechnik haben sich auch verschiedene Injektionsverfahren mit unterschiedlichen Medien, wie beispielsweise Polyurethan- und Silikatharze oder mineralische Baustoffe, bewährt. Injektionen können sowohl von über Tage bis in große Teufen als auch während der Teufarbeiten eingesetzt werden. Ihr Vorteil liegt darin, dass der Zeitraum bis zur Aushärtung des Injektionsgutes deutlich kürzer als die Erstellung des Frostkörpers beim Gefrierverfahren ist.

Das Teufen eines Schachtes erfolgt heute entweder konventionell durch Bohr- und Sprengarbeit oder teilmechanisch mit Schachtfräsen bzw. vollmechanisch mittels Schachtbohrmaschinen. Das konventionelle Teufen wird auf Grund seiner Flexibilität bis heute am häufigsten angewandt. Schachtfräsen (Bild 1) bzw. Schachtbohrmaschinen kommen i. a. bei geringer festen, spröden und vor allem homogenen Gebirgsbereichen zum Einsatz (z.B. in Salzgesteinen).

Mit zunehmender Teufe steigt der Gebirgsdruck und die Beanspruchung des Gebirges nimmt zu. Dies führt bei fortschreitender



Fig. 2. Shotfired tunnel in an old gravity-wall dam.
 Bild 2. Sprengvortrieb in einer alten Schwergewichtsmauer einer Talsperrenanlage.
 Source / Quelle: Spreng- und Erschütterungssachverständigenbüro
 Dipl.-Ing. Josef Hellmann, Dortmund

work of mine roadways can often be more than 100 km in length, while the roadways themselves now tend to be over 30 m² in cross section in order to meet the underground logistic requirements, such as materials transport, manriding, ventilation, supply lines, etc. Various special-purpose excavations and structures are also required, such as shaft landings and insets, roadway crossings and profile extensions, and other underground chambers. The roadways and other structures are either excavated by mechanised equipment, such as roadheaders and tunnelling machines, or are created by conventional drilling and shotfiring methods.

Where the mine workings have to exhibit high levels of stability in order to achieve an operating life of several decades, as is the case for disposal facilities, the underground cavities must be excavated carefully and with minimum degradation. Experience from the mining and extractive industry has long been used for tunnel and cavern construction projects, where it is also very important that the surrounding rock is not unduly compromised by cracks and fissures initiated by the excavation work. For impressive examples of careful and precise rock blasting we can look to the tunnelling work carried out at a number of German reservoirs. These tunnels run through the bottom of the old gravity-wall dams and were blasted out only 2 to 4 m from the water side with a fully backed-up water level (Figure 2). These tunnelling projects placed extremely high demands on the shotfiring teams, who had to ensure not only profile accuracy but also minimal damage to the surrounding brickwork so as to prevent cracks forming even in the near-field of the blasting profile.

Because of the challenging conditions under which underground cavities are excavated in all kinds of rock types, special cavity support measures have to be put in place as soon as the excavation work has been completed. As well as providing pro-

festigkeitsüberschreitung ohne Stütz- und Ausbaumaßnahmen zu Nachbrüchen und/oder Verformungen des Gebirgstragringes bis hin zum vollständigen Verbruch. Zur kontrollierten Entspannung des Gebirges wird deshalb während des Abteufens häufig eine Gebirgssicherung eingebracht, bevor der Schachtausbau eingebaut wird. Die Wahl der Ausbaukonstruktion hängt von den geologischen, gebirgsmechanischen und hydrologischen Verhältnissen des Gebirges ab. Zu unterscheiden sind einschalige (z.B. Stahlbeton) und mehrschalige Ausbausysteme (z.B. Tübbingausbau mit Baustoffhinterfüllung), ein mit dem Gebirge verbundener Ausbau (z.B. Ankerspritzbeton, Stahlbeton) und ein nicht verbundener Ausbau, bei dem der Innenausbau durch eine Flüssigkeitsschicht (z.B. Bitumen) von dem Außenausbau getrennt ist (Gleitschächte). Somit stehen für nahezu alle Gebirgssituationen individuelle Lösungen für den Schachtbau zur Verfügung.

Untertägige Streckensysteme und Sonderbauwerke – Voraussetzung für die Erschließung einer Lagerstätte

Unabhängig von der geplanten Nutzung werden Gebirgskörper ausgehend vom Schacht oder einem anderen Tageszugang mit weitgehend horizontalen Grubenbauen erschlossen. Das untertägige Streckennetz eines Bergwerks erreicht häufig mehr als 100 km Länge. Um die untertägige Logistik – Materialtransport, Personenbeförderung, Wetterführung, Versorgungsleitungen etc. – effektiv realisieren zu können, sind heute Querschnitte von über 30 m² üblich. Zusätzlich zu den Strecken werden Sonderbauwerke hergestellt, wie Füllörter, Streckenkreuzungen und -aufweitungen oder auch kammerartige Hohlräume. Die Auffahrung der Strecken und Sonderbauwerke erfolgt maschinell mit Teil- oder Vollschnittmaschinen oder konventionell durch Bohr- und Sprengarbeit.

Bei Grubenbauen, die zur Sicherstellung einer langen Lebensdauer über mehrere Jahrzehnte eine hohe Standsicherheit aufweisen müssen – wie z.B. im Endlagerbergbau – ist eine gebirgsschonende Herstellung der Grubenräume erforderlich. Die Erfahrungen aus dem Gewinnungsbergbau werden seit langer Zeit im Tunnel- und Kavernenbau genutzt, wo ebenfalls großer Wert darauf gelegt wird, dass das umgebende Gebirge bei der Auffahrung möglichst wenig durch induzierte Risse beeinträchtigt wird. Eindrucksvolle Beispiele für die Leistungsfähigkeit präziser und schonender Sprengarbeit sind eine Reihe von Stollenvortrieben, die in Deutschland an Talsperrenanlagen mit alten Schwergewichtsmauern jeweils längs durch den Mauerfuß mit Abständen von 2 m bis 4 m zur Wasserseite unter Vollstau ausgeführt wurden (Bild 2). Bei diesen Vortrieben wurden hohe Anforderungen an die Qualität der Sprengarbeit in Hinblick auf Profildgenauigkeit und Schonung des umgebenden Mauerwerks gestellt, um Rissbildungen auch im Nahbereich um den Sprengvortrieb sicher auszuschließen.

Aufgrund der anspruchsvollen Randbedingungen, unter denen Grubenbaue in den unterschiedlichsten Gesteinsarten aufgeföhren werden, sind nach der Herstellung des Hohlraums Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Neben einer Sicherung gegen herabfallendes Gestein gehört dazu auch ein Ausbau zur Unterstützung der Gebirgstragfähigkeit. Dieser muss in Abhängigkeit von den Nutzungsanforderungen an die Strecken – z.B. deren Lebensdauer und Querschnittsbedarf – dimensioniert werden und über



Fig. 3. Constructing a shaft inset on mine level 7 at Prosper-Haniel colliery.

Bild 3. Herstellung eines Füllortes auf der 7. Sohle des Bergwerks Prosper-Haniel. Source/Quelle: RAG AG

tection against falling rock this also includes the installation of supports to maintain the load-bearing capacity of the strata. The support system has to be designed according to the usage specifications of the roadway or tunnel in question, such as operating life and profile requirements, and must be capable of delivering the specific supporting pressure over the entire useful life of the excavation. To achieve this, the industry has developed a wide range of support systems for all kinds of applications based on both rigid and yielding supports of varying load-bearing capacity and using standing arch units in combination with rockbolts of different stiffness.

If the excavation is to be usable for a long period of time no deformation of the roadways or underground structures can be tolerated, except in very limited circumstances. When working at great depth, or when the surrounding rock is very prone to deformation, as is the case with evaporite rock and mudstone, the stipulation that deformation must be almost completely prevented will place very high demands on the support system. In such situations there are two options available, namely to reconfigure existing elements to create suitable support systems or to develop new systems and to assess and improve their effectiveness using existing, tried and tested planning tools such as numerical model tests.

Underground structures that are destined for a long service life, such as shaft landings and insets (Figure 3), main roadway systems and roadway crossings, sometimes have to be dimensionally large and because of the cramped working conditions present in the mining industry often have to be positioned in extremely unfavourable geological zones. These excavations are often sited in highly stratified ground containing large amounts of friable silts and clays, a situation that places huge demands on the support technology and on the construction techniques employed. And here there are obvious

die gesamte Nutzungsdauer den geforderten Ausbaustützdruck aufbringen. Dazu wurden starrer und nachgiebiger Ausbau unterschiedlicher Tragkraft mit unterstützendem und gebirgsverbindendem Ausbau unterschiedlicher Steifigkeit zu einer Vielzahl von Ausbausystemen für verschiedenste Anwendungen entwickelt.

Für eine lange Nutzungsdauer ist die Verformung der Strecken bzw. Sonderbauwerke nicht oder nur in sehr begrenztem Umfang tolerabel. In Kombination mit großen Teufen bzw. Gebirgstypen mit ausgeprägten Verformungseigenschaften, wie z.B. Salz- oder Tonsteinen, führt die Forderung, Verformungen nahezu vollständig zu verhindern, zu sehr hohen Anforderungen an den Ausbau. In Abhängigkeit davon können entweder vorhandene Ausbauelemente zu geeigneten Ausbausystemen neu konfiguriert oder neue Ausbausysteme entwickelt werden und deren Wirkungsweise mit vorhandenen und bewährten Planungswerkzeugen – z.B. numerischen Modellversuchen – beurteilt und verbessert werden.

Bauwerke mit langer Nutzungsdauer, wie Füllörter (Bild 3), Hauptstreckensysteme und Streckenkreuzungen erfordern teilweise sehr große Dimensionen und müssen z.B. auf Grund der ungünstigen Platzverhältnisse innerhalb eines Gewinnungsbergwerks oft in sehr schlechter Gebirgsumgebung erstellt werden. Vielfach stehen solche Bauwerke in stark geschichtetem Gebirge mit hohem Anteil an gebrächen Silt- und Tongesteinen, was höchste Anforderungen an die Ausbautechnik und die Herstellung der Bauwerke stellt. Hier ergeben sich deutliche Analogien zu den Gegebenheiten, welche für ein Endlager im Tongestein präferiert werden.

Es gibt zahlreiche Beispiele für erfolgreich umgesetzte Ausbaukonzepte unter den unterschiedlichsten Randbedingungen. Beispielhaft ist in Bild 4 ein Füllortausbau mit Verformungselementen in Form von Stauchstempeln dargestellt, der unter Abbaueinwirkung und den daraus resultierenden Zusatzbelastungen seine Funktionstauglichkeit im gebrächen Gebirge über die geplante Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten hinaus behalten hat.

Neben Fragen der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit spielen auch Aspekte wie Rückbaubarkeit oder Schneidbarkeit von



Fig. 4. Shaft landing with concrete segment supports and deformation elements (yellow row of props).

Bild 4. Füllort mit Betonsegmentausbau und Verformungselementen (gelbe Stempelreihen).

Source/Quelle: Forschungsbericht Preussag AG Kohle

similarities with the preferred conditions for the construction of a permanent disposal facility in clay rock.

There are many examples where new support concepts have been developed very successfully for a whole range of operating conditions. One such case is depicted in Figure 4, where a shaft inset support system has been created using deformation elements in the form of compression props. Though affected by the additional stresses generated by coal winning operations, this system has retained its functional ability under friable rock conditions over the course of a planned lifetime of several decades.

As well as exhibiting stability and fitness for purpose, support elements that are employed in the coal face area must also be salvageable or machine cuttable. These latter factors, as well as saving on costs through re-use, help make the coal winning process more efficient.

Many different techniques are now available that form a good basis for the specific requirements of mining engineering for disposal facilities. The steel-free, fibre-reinforced rockbolts that are used for roadway support can be cut through by the winning machine as it extracts the coal. Even without the use of steel these bolts have a high load-bearing strength. Cement-free building materials, such as the polymer spray membranes designed for strata coating applications, are now also being widely used. It is therefore obvious that mining operations for disposal facilities have much to gain by using the wide-ranging know-how available to the conventional mining industry.

Winding and conveying systems – keeping things moving

Mine conveying systems are used to transport personnel to and from their place of work and to deliver various cargoes to their underground destinations or back to the surface, as required. This includes goods of all kinds, machines and equipment, vehicles, building materials, auxiliary supplies, fuels and consumables, as well as waste products and other materials to be held in storage. A clear distinction can be drawn between shaft winding and roadway transport systems, while inclined shafts and ramps can be regarded as a combination of both.

Winding installations, which are employed in main surface shafts and in staple shafts, are used to transport men and materials to the different horizons located between the mine surface and the lower working levels. Shaft winding installations can operate to depths of 3,000 m. They have a high payload capacity and can achieve speeds of up to 12 m/s when man-winding and 20 m/s when transporting materials. They do not use keps for decking the shaft conveyance.

Offset mine winders, which consist of two winding installations positioned one beneath the other in the same shaft, can be used to operate to even greater depths. Modern winding systems can carry payloads of as much as 150 t and there are plans to increase the payload capacity to 175 t.

Winding installations intended for transporting general cargo items are now mainly designed as large skip-counterweight systems. The winder is usually controlled automatically and the loading and unloading of the transport units is also a fully-automatic or part-automatic process.

The general ban on keps, which was introduced in Germany back in 1950, can be attributed to the many serious accidents

Ausbau-elementen im Gewinnungsbergbau eine Rolle. Die Gründe dafür liegen neben Kosteneinsparungen durch Wiederverwendung vor allem in einer effizienteren Gewinnungstechnik.

Heute sind bereits viele Techniken verfügbar, die eine gute Basis für die spezifischen Erfordernisse des Endlagerbergbaus darstellen. So werden stahlfreie, glasfaserverstärkte Kunststoffanker zur Streckensicherung eingesetzt, die von den Gewinnungsmaschinen mitgeschnitten werden können. Diese Anker erreichen auch ohne die Verwendung von Stahl hohe Tragkräfte. Auch z.T. zementfreie Baustoffe, wie z.B. die für das Coating des Gebirges verwendeten Polymerspritzfolien, werden in verschiedensten Bereichen eingesetzt. Es ist also naheliegend, dass der Endlagerbergbau von dem umfangreich vorhandenen Know-how des konventionellen Bergbaus profitieren kann.

Fördertechnik – weil alles bewegt werden muss

Die fördertechnischen Systeme innerhalb eines Bergwerks dienen zum Transport von Personen sowie aller unter Tage benötigten oder nach über Tage zu verbringenden Gütern. Zu diesen Gütern zählen Materialien aller Art, Maschinen, Geräte, Fahrzeuge, Bau-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Abfälle oder auch einzulagernde Stoffe. Zu unterscheiden ist die Schachtförderung von der Streckenförderung. Eine Mischform stellt die Förderung in Schrägschächten oder Rampen dar.

Schachtförderanlagen dienen dem Transport von Personen und Gütern zum einen zwischen der Tagesoberfläche und den untertägigen Grubenbauen und zum anderen in Blindschächten. Technische Merkmale von Schachtförderanlagen sind zu überwindende Teufen von bis zu 3.000 m, hohe Nutzlasten, Fahrgeschwindigkeiten bis zu 12 m/s bei Personenseilfahrt und bis zu 20 m/s bei Güterförderung sowie der Verzicht auf Fangvorrichtungen.

Mit sogenannten abgesetzten Förderungen, also zwei Schachtförderanlagen untereinander im selben Schacht, können auch noch größere Teufen erschlossen werden. Technisch realisierbar sind derzeit Schachtförderanlagen mit bis zu 150 t Nutzlast. Aktuell gibt es Überlegungen zur Förderung von Lasten bis zu 175 t im Schacht.

Schachtförderanlagen für Stückguttransport werden heute überwiegend als Großkorb-Gegengewichtsanlagen ausgeführt. Der Betrieb der Fördermaschine erfolgt meist automatisch, das Auf- und Abschieben der Transporteinheiten ebenfalls oder zumindest teilautomatisiert.

Grundlage für das bereits 1950 in Deutschland ausgesprochene generelle Verbot von Fangvorrichtungen waren zahlreiche schwere Unfälle mit Personenschäden, die durch diese ausgelöst wurden. Dem standen nur sehr wenige Seilfahrtunfälle gegenüber, bei denen Förderseile gerissen sind. Nachweislich war in keinem dieser Fälle ein mangelhafter Zustand des Förderseils die auslösende Ursache. Ähnlich wie bei Luftseilbahnen gelten die Förderseile in der Sicherheitsbetrachtung einer Schachtförderanlage seitdem als ein Anlagenteil, dessen Versagen ausgeschlossen wird. Der sichere Zustand der Seile wird durch regelmäßige Prüfungen gewährleistet. Weltweit werden zwar schon heute diese Erfahrungen bei der Planung von Endlagern teilweise einbezogen, dennoch können vor allem in diesem Bereich die Erkenntnisse aus dem konventionellen Bergbau stärker berücksichtigt werden.

and personal injuries caused by this type of shaft decking system. This contrasts with the very few manwinding accidents caused by winding rope failure. It has been demonstrated that none of these incidents were brought about by a deficiency in the winding rope. As with cablecar systems, the ropes fitted to shaft winding equipment have, ever since, been included in the safety assessment as part of the installation, thereby eliminating the possibility of rope failure. Regular checks are carried out to ensure that the ropes are always in a safe condition. This experience is still being used to a certain degree around the world when planning permanent disposal facilities, yet this is one area in which know-how from the conventional mining industry can be put to much greater use.

All kinds of technical systems are employed for mine roadway transport operations, including belt conveyors for moving bulk goods, rail-bound systems operating on horizontal tracks (wheel-on-rail systems), trackless systems (tyre-mounted vehicles of all kinds) and captive rail installations (overhead monorails and rope-hauled or self-propelled floor-mounted rail systems). The potash and salt mining industries tend to use mainly trackless vehicles for roadway transport and conveying work, while train-hauled systems are also employed in the ore mining industry and for main road transportation in coal mines. The coal industry, which is often affected by severe floor-lift problems, almost always uses rope-hauled, diesel or battery-powered overhead monorail systems for material transport operations in in-seam roadways, while coal and dirt are moved by belt conveyor. Overhead monorail installations can operate as many as five 25-t transport units at one time.

Bulk goods, which include rock and dirt from roadway drivages as well as mineral, are now frequently transported by interconnected belt conveyor systems. This means that the product can be conveyed directly from the working faces to the shaft bottom, passing first through a crushing station if size reduction is required. Fully-automatic skip winding installations are often used for shaft transport operations.

Pipeline systems are used to transport free-flowing products in mine shafts and along mine roadways. It is now common practise to employ pipelines for transporting cooling water, process water, compressed air and building materials.

The conventional mining industry therefore already has tried and tested technologies to meet the challenging transport requirements of an underground disposal facility.

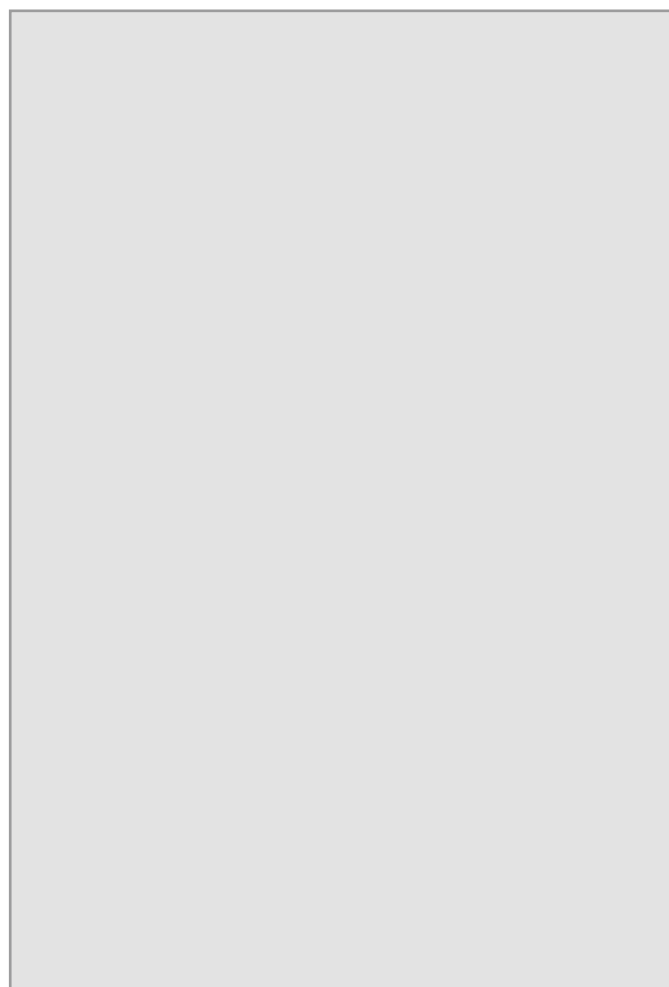
Ventilation – providing air below ground

A mine's ventilation system, whose role is to supply all the underground workings with fresh air and to remove used air along with dangerous gases and other substances, ensures that the environment prevailing in every part of the mine is permanently maintained in a way that poses no risk to the health and safety of the mineworkers. Harmful gases, such as methane and blackdamp escaping from the strata, pose a special threat to the workforce and must be safely channelled away by ensuring that minimum air velocities are maintained at all times. Even larger escapes of gas over very short periods of time, as can occur when a gas pocket is breached, can be safely managed in this way. Additional measures, such as preliminary gas drainage from the rock, help to

Zu den Einrichtungen für die Streckenförderung werden vielfältige Technologien genutzt, z.B. Gurtförderanlagen für Schüttgutförderung, gleisgebundene söhlige Förderung (Rad-Schiene-System), gleisungebundene söhlige Förderung (Radfahrzeuge aller Art) oder zwangsgeführte Fördersysteme (Einschienehängbahnen und Schienenflurbahnen mit Seilantrieb oder Eigenantrieb). Im Steinsalz- und Kalibergbau werden im untertägigen Streckensystem vorwiegend Gleislosfahrzeuge, im Erzbergbau und auf den Hauptstrecken des Kohlenbergbaus auch Zugbetrieb, eingesetzt. Im Kohlenbergbau erfolgt der Materialtransport in Flözstrecken aufgrund der starken Hebungen der Streckensohle fast ausschließlich über seil-, diesel- oder batteriebetriebene Einschienehängbahnen (EHB), die Förderung von Kohle und Nebengestein über Gurtförderer. Mit EHB werden bis zu fünf jeweils 25 t schwere Transporteinheiten gleichzeitig bewegt.

Die Schüttgutförderung, z.B. von Haufwerk aus Streckenauffahrungen oder von gewonnenen Rohstoffen, erfolgt heute häufig mit Gurtförderern über durchgehend vernetzte Schüttguttransportsysteme. Vom Gewinnungsort werden die erforderlichenfalls von Brecheranlagen zerkleinerten Materialien zum Schacht transportiert. Die Förderung im Schacht erfolgt häufig mit vollautomatischen Gefäßförderanlagen (Skipförderung).

Fließfähige Medien werden im Schacht und in der Strecke durch Rohrleitungen gefördert. Rohrleitungen für Kühl- und Nutzwasser, Druckluft, Baustoff u. ä. sind Stand der Technik.



reduce the gas emission potential. As well as managing the gas threat it is important to ensure effective dust suppression and extraction in critical areas.

In some geological formations there is also a need to evacuate the radioactive gases naturally occurring in the rock. In these areas the mine ventilation system therefore helps to reduce the level of radiation to which the workforce is exposed due to naturally occurring substances. This is a major factor in underground disposal facilities, where the personnel is exposed not only to natural geological radiation but also to the dangers presented by the storage of radioactive waste material.

The climatic conditions prevailing in a mine also provide another assessment criterion for establishing the ventilation system. According to the geothermal gradient, the natural rock temperature at a depth of 1,200 to 4,000 m is already about 50 to 60 °C. The ventilating air current has to dissipate the natural heat of the rock as well as the waste heat produced by the machines in order to keep underground temperatures to a level of about 28 °C. This situation can be compared to that of having to transport and store HAW containers when operating a permanent disposal facility.

A specific airflow is calculated for each mine and this has to be channelled through the underground workings. Additional structures, such as ventilation boreholes, airways and staple shafts, can be added where necessary to improve the ventilation flow. The air is distributed through the mine via a series of air doors with adjustable openings that can be adapted to meet the airflow requirement. This process is governed by various mining regulations and ordinances and by provisions laid down by the German mining standardisation committee (FABERG). The airflow in dead ends and single-access workings is provided by auxiliary fan systems.

The flow of air is created by exhaust fans that are usually positioned above ground at the mouth of the upcast shaft. The mine can maintain its underground airflow even in the event of an unscheduled stoppage of the main fans as the ventilation system is designed redundantly or is provided with reserve fan units that are constantly on standby. For safety reasons the ventilation conditions must be kept stable throughout the mine, which means that operational processes – such as opening air locks, running the conveyances in the shaft or even disruptions to the ventilation system – should not cause significant changes in the volume of air passing through the workings. Limiting the size of the ventilation districts and/or providing auxiliary ventilation for critical zones, along with other precautionary measures, has proved to be an effective way to mitigate the impact of a ventilation outage. This risk mitigation system is developed during the initial planning phase and has proved to be effective time and time again for dealing with dangerous and explosive gases and reducing dust make levels. The ventilation concept devised for an underground disposal facility will follow the same safety guidelines.

Crucial to the ventilation planning and monitoring system are the ventilation network programs that were originally developed for the Ruhr collieries, but which are now employed in a wide range of fields. This IT program is used by mine planning engineers to calculate the airflow and pressure distribution in different areas of the mine. It is also a useful tool for analysing malfunctions in the ventilation system and planning measures aimed at maintaining air-current stability.

Damit bietet der konventionelle Bergbau schon heute bewährte Technologien für die anspruchsvollen Transportaufgaben in einem Endlagerbergwerk.

Wettertechnik – Luft für unter Tage

Die Bewetterung eines Bergwerks, also die Versorgung des gesamten Grubengebäudes mit frischer Luft bzw. die Ableitung verbrauchter Luft sowie gefährlicher Gase oder Stoffe, stellt sicher, dass an jedem Arbeitsort im Grubengebäude gesundheitlich und sicherheitstechnisch unbedenkliche Umgebungsbedingungen geschaffen und ständig aufrechterhalten werden. Schädliche Gase, wie z.B. aus dem Gebirge zutretendes Methan-gas oder Stickgas, müssen auf Grund des besonderen Risikos für die Beschäftigten durch die Einhaltung von Mindestwettergeschwindigkeiten zuverlässig abgeführt werden. Hierbei sind auch größere Austrittsmengen innerhalb kürzester Zeitspannen, beispielsweise beim Antreffen einer Gasblase, sicher zu beherrschen. Zusätzliche Maßnahmen, wie die Gasvorabsaugung aus dem Gebirge, vermindern die potentiell austretenden Mengen. Neben den Gasen sind auch Stäube zu verdünnen und aus den kritischen Bereichen abzuführen.

In bestimmten geologischen Formationen ist die Abführung von aus dem Gebirge austretenden natürlichen radioaktiven Gasen von Bedeutung. Durch die Bewetterung gelingt es dort, die Strahlenexposition des Betriebspersonals durch die natürlich vorkommenden Stoffe zu reduzieren. Dies ist insbesondere im Endlagerbergbau von hohem Interesse, da dort neben der Exposition des Personals durch die natürliche Strahlung, die aus der Einlagerung von radioaktiven Abfällen resultierende Belastung hinzukommt.

Ein weiteres Bemessungskriterium für die erforderliche Bewetterung sind die klimatischen Verhältnisse eines Bergwerks. So beträgt die natürliche Gesteinstemperatur je nach geothermischer Tiefenstufe in 1.200 bis 4.000 m Teufe bereits etwa 50 bis 60 °C. Die Wetterströme müssen sowohl die Gebirgswärme, aber auch die Abwärme von Maschinen abführen, um die Temperaturen auf etwa 28 °C zu reduzieren. Hier besteht eine Analogie zu den zu transportierenden und einzulagernden HAW-Gebinden beim Betrieb eines Endlagers.

Der Wetterstrom ist in für jeden Grubenbau festgelegten Mengen durch das Grubengebäude eines Bergwerks zu leiten. Bei Bedarf können auch Sonderbauwerke, wie Wetterbohrungen, Wetterstrecken oder Blindschächte erstellt werden, die ausschließlich der Wetterführung dienen. Die Verteilung der Wetter erfolgt durch Wetterbauwerke mit verstellbaren Öffnungen, die eine Anpassung an die jeweils erforderlichen Wettermengen ermöglichen. Hierfür existieren anerkannte Regelwerke, wie Bergverordnungen oder die Festlegungen des Normenausschusses Bergbau (FABERG). Nicht durchschlägige Grubenräume und Strecken mit nur einem Zugang werden mit Sonderbewetterungsanlagen wettertechnisch versorgt.

Der Wetterzug wird durch saugende Hauptventilatoren erzeugt, die in der Regel an den Ausziehschächten über Tage angeordnet sind. Selbst bei unplanmäßiger Unterbrechung des Betriebs von Hauptventilatoren bleibt eine Wetterbewegung im Bergwerk erhalten, da die Bewetterungseinrichtungen redundant ausgelegt oder ständig einsatzbereite Reserveventilatoren vorhanden sind.



Fig. 5. Testing a conveyor belt in the DMT fire testing gallery to determine its suitability for use underground in accordance with DIN EN 12881-2.

Bild 5. Prüfung eines Fördergurtes im Brandversuchstunnel der DMT für die Anwendung im untertägigen Bergbau nach DIN EN 12881-2.

Source/Quelle: DMT GmbH & Co. KG

Fire and explosion protection – dealing safely with a potential threat

The art of fire and explosion protection has its roots in the coal mining industry. As mining operations became more widespread in the late 19th and early 20th centuries many of the coalfields switched over from shallow workings to deep-level mining. The underground workings went deeper and deeper and spread out to cover much wider areas. Fires and firedamp explosions became a constant threat and caused increasing numbers of casualties. Fire and explosion prevention techniques were continuously developed in response. The preventive measures that sought to avoid such incidents and reduce their impact were devised over many years of practical experience with the help of specific research projects.

Reducing the fire load and thereby curtailing the speed at which the fire can propagate is a major factor in fire protection. By this means it is possible to reduce the risk associated with smoke release, and the temperature impact, to acceptable levels. The efforts made in this area include the introduction of flame-resistant synthetic materials for conveyor belting and air ducting and the use of special hydraulic fluids, all of which dramatically reduce the rate at which a mine fire can propagate (Figure 5). Equipment and systems have also been developed specifically to provide explosion protection by quenching the explosion in its emergent phase.

Underground vehicles differ from normal all-terrain vehicles in that they have a much reduced fire load. Because of this latter factor diesel-powered vehicles usually present the greatest fire risk and require special protection measures. Large transport vehicles may contain up to 3 t of combustible material, including diesel fuel, hydraulic oil, tyres, cables and other plastics. Here the risk of a fire outbreak is reduced by using twin-skinned tanks for diesel fuel and hydraulic oil, fitting a fire extinguishing system to protect the engine, monitoring the brake temperatures and using flame-resistant rubber compounds for the tyres.

As well as conventional safety measures, which are aimed at protecting employees and visitors, each disposal facility will be subject to radiological workplace safety regulations designed to prevent the release of radionuclides as a result of an underground fire or explosion.

Aus Gründen der Grubensicherheit müssen im gesamten Grubengebäude eines Bergwerks stabile Bewetterungsverhältnisse vorliegen, d. h., die Größe von Wetterströmen darf sich durch betriebliche Vorgänge – z. B. Betätigung von Wetterschleusen, Treiben der Förderkörbe im Schacht oder durch Störungen im Bewetterungssystem – nicht wesentlich verändern. Eine Begrenzung der Wetterbereiche bzw. eine gesonderte Wetterführung für gefährdete Bereiche hat sich in Kombination mit weiteren Vorsorgemaßnahmen als probates Mittel zur Verringerung der Auswirkungen im Schadensfall herausgestellt. Diese Risikominimierung wird bereits in einem frühen Planungsstadium berücksichtigt und hat sich im Umgang mit gefährlichen, explosiven Gasen und zur Reduzierung der Belastungen durch Stäube vielfach bewährt. Das Bewetterungskonzept eines Endlagers folgt denselben sicherheitlichen Leitlinien.

Ein wesentlicher Bestandteil der Wetterplanung und -überwachung sind Wetternetzprogramme, die ursprünglich für den Steinkohlenbergbau an der Ruhr entwickelt wurden, heute aber in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Mit einem solchen EDV-Programm lassen sich die Wetterstrom- und Druckverteilung im Grubengebäude für Planungsaufgaben unterschiedlichster Art berechnen. Darüber hinaus lässt sich dies auch zur Analyse einer Störung in der Bewetterung sowie für Maßnahmen zur Erhaltung der Stabilität von Wetterströmen nutzen.

Brand- und Explosionsschutz – der sichere Umgang mit einer potentiellen Gefahr

Der Brand- und Explosionsschutz hat seinen Ursprung im Steinkohlenbergbau. Im Zuge der Ausdehnung des Steinkohlenbergbaus Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts vollzog sich in vielen Bergbaurevieren der Übergang vom oberflächennahen Bergbau zum Tiefbau. Die Betriebe drangen in immer größere Teufen vor und die Ausdehnung der Grubengebäude nahm erheblich zu. Schlagende Wetter und Brände forderten immer wieder Opfer. Derartige Ereignisse haben zu einer steten Weiterentwicklung des Brand- und Explosionsschutzes geführt. Die Präventivmaßnahmen zur Vermeidung von Bränden und Explosionen bzw. die Einschränkung der Auswirkungen wurden im Rahmen zahlreicher Forschungsvorhaben und durch langjährige Praxis erarbeitet.

Ein wesentlicher Beitrag zum Brandschutz ist die Reduzierung der Brandlast bzw. die Verringerung der schnellen Brandausbreitung. Damit sollen die mit der Rauchfreisetzung verbundenen Risiken und die Temperatureinwirkung auf ein akzeptables Maß begrenzt werden. Dafür werden u. a. schwer entflammbare Kunststoffe, z. B. für Fördergurte und Lutten zur Wetterführung, oder spezielle Hydraulikflüssigkeiten eingesetzt, die die Brandausbreitungsgeschwindigkeit erheblich senken (Bild 5). Außerdem wurden speziell für den Schlagwetterschutz Anlagen und Systeme entwickelt, die die Explosion bereits in der frühen Entstehungsphase löschen sollen.

Untertagefahrzeuge unterscheiden sich von handelsüblichen Geländefahrzeugen dadurch, dass sie eine geringere Brandlast aufweisen. Auf Grund ihrer hohen Brandlast stellen dieselbetriebene Fahrzeuge in der Regel das größte Brandrisiko dar und erfordern besondere Schutzmaßnahmen. Große Transportfahrzeuge können bis zu 3 t brennbare Stoffe – Dieselkraftstoff, Hydrauliköl, Reifen, Kabel und weitere Kunststoffe – enthalten. Hier führt die

A key factor when it comes to establishing safety measures for employees and visitors is to provide escape and rescue routes of the specified number and type. These arrangements have to be laid down during the initial planning phase and must take account of all aspects associated with the mine layout, fire and explosion protection, ventilation and – in the case of disposal facilities – radiation protection. Here it is also important to consider the risks associated with the propagation of hazardous gases and radioactively contaminated air and dust. As well as the measures needed to prevent fires and explosions during the actual storage phase a disposal facility project also has to take account of long-term processes, such as the build-up of hydrogen as a result of steelwork corrosion.

Building and stowing material – keeping the workings stable

The large-scale application of building and stowing material for securing and stabilising mine workings, sealing off underground chambers and containing objects in cavities began more than 30 years ago. This practice is now widely used for all kinds of mining operations, not only in the coal and mineral extraction industries but also, increasingly, in special fields such as waste disposal and final repository engineering. In coal mines this kind of product is mainly employed for building large-sized structures that are designed to transfer loading forces, selectively redistribute stresses, reduce surface subsidence and seal off particular areas of the mine to protect against in-situ strata pressure and harmful gases. Specifically, the material is used to build roadside packs to protect longwall coal faces, to fill open cavities so as to stabilise the strata and reduce ground settlement and subsidence, and to seal off disused mine workings and shafts.

Managing the controlled rise of groundwater is a vital safety and economic consideration when planning to withdraw from an inactive mine or a worked-out district. Structural barriers (or 'stoppings') are built to protect active workings from inflowing water and in this way to reduce the cost of water drainage and pumping operations in those districts that remain in operation. In deep mine workings in particular the large amount of water back-up means that high-pressure stoppings have to be constructed to cope with dynamic pressures of as much as 110 bar. In order to ensure that the barrier remains absolutely watertight, especially in the case of high-pressure stoppings, its location has to be carefully chosen and the structure and building materials used must be of the highest quality. Not only must the material and the method of construction be capable of withstanding the static water pressure that is anticipated, but the design of the stopping and the choice of building material, along with remedial measures carried out at the rock face, should effectively prevent any passage of water through or around the contact zone between the barrier and the strata. The complexity of these high-pressure structures, and the demands placed on them, means that the conventional structural calculations used at the planning stage have to be supported by special numerical design techniques. The example in Figure 6 shows the planning work for a high-pressure stopping being built in an area of steeply dipping strata. The stopping in question is designed in the shape of a truncated cone. This construction ensures that the stresses created by the water pressure

Verwendung doppelwandiger Dieselmotoren- oder Hydrauliköltanks, die Installation einer Löschanlage zum Motorenschutz, die Temperaturüberwachung der Bremsen und die Verwendung schwer entflammbarer Gummimischungen für die Reifen zu einer Risikominimierung in Hinblick auf die Entstehung eines Brandes.

In Bezug auf die konventionelle Sicherheit, die die Ziele der Sicherheit von Beschäftigten und Besuchern verfolgt, kommt im Endlagerbergbau noch die radiologische Sicherheit, also die Verhinderung der Freisetzung von Radionukliden durch Brand- und Explosionsereignisse hinzu.

Zur Verfolgung des Schutzziels Sicherheit der Beschäftigten und Besucher ist die Festlegung der Anzahl und Ausgestaltung der Flucht- und Interventionswege von zentraler Bedeutung. Diese Festlegung muss bereits in der frühen Planungsphase Berücksichtigung finden und alle Facetten des Zuschnitts, des Brand- und Explosionsschutzes, der Wettertechnik und – im Falle eines Endlagers – auch des Strahlenschutzes einbeziehen. Wesentlich sind hierbei die zu erwartende Ausbreitung gefährlicher Gase oder radioaktiv belasteter Wetter bzw. Stäube. Zusätzlich zu den erforderlichen Maßnahmen zur Vermeidung von Brand- und Explosionsereignissen während der Einlagerungsphase selbst, sind in einem Endlager auch langfristige Prozesse zu berücksichtigen. Ein Beispiel dafür ist die Bildung von Wasserstoff durch Korrosionsprozesse von eingebrachtem Stahl.

Bau- und Versatzstoffe – Für die Stabilität des Grubengebäudes

Der großtechnische Einsatz von Bau- und Versatzstoffen im Bergbau zur Sicherung und Stabilisierung oder zum Verschluss untertägiger Hohlräume sowie zum sicheren Einschluss von Gegenständen in Hohlräumen begann vor mehr als 30 Jahren. Heute ist die Verwendung von Bau- und Versatzstoffen in allen Betriebsphasen eines Bergwerks selbstverständlich, sowohl im Gewinnungsbergbau als auch vermehrt in Spezialbereichen, wie dem Deponie- oder Endlagerbergbau. Genutzt werden Baustoffe vorzugsweise zur Herstellung großvolumiger Bauelemente innerhalb des Bergwerks zur Lastabtragung, gezielten Spannungsumlagerung, Verringerung von Senkungen an der Tagesoberfläche oder zur Abdichtung von Bergwerksbereichen gegen anstehende Drücke bzw. gefährliche Gase. So werden Abbaubegleitdämme im Flözabbau gesetzt, offene Grubenräume zur Stabilisierung des Gebirges oder zur Verringerung von Senkungen mit Baustoff verfüllt oder stillgelegte Bergwerke und Schächte mit Baustoff verschlossen.

Ein wesentlicher Aspekt beim Rückzug aus stillgelegten Bergwerken bzw. aus ausgebeuteten Grubenbereichen ist aus sicherheitstechnischer sowie wirtschaftlicher Sicht der kontrollierte Wiederanstieg des Grundwassers. Zur Sicherung noch benötigter untertägiger Hohlräume werden sogenannte Abdichtungsbauwerke (Wasserdämme) errichtet, die noch benutzte Grubenräume vor zufließendem Wasser schützen und gleichzeitig die Wasserhaltungskosten des aktiven Bereichs reduzieren. Speziell in tiefen Bergwerken kommen auf Grund großer Überstauhöhen Hochdruckdämme zum Einsatz, die auf Staudrücke von beispielsweise 110 bar ausgelegt sein müssen. Zur Gewährleistung der Abdichtwirkung, werden – speziell bei Hochdruckdämmen – neben der optimalen Standortwahl, hohe qualitative Anforderungen an das Bauwerk und die verwendeten Baustoffe gestellt. Einer-

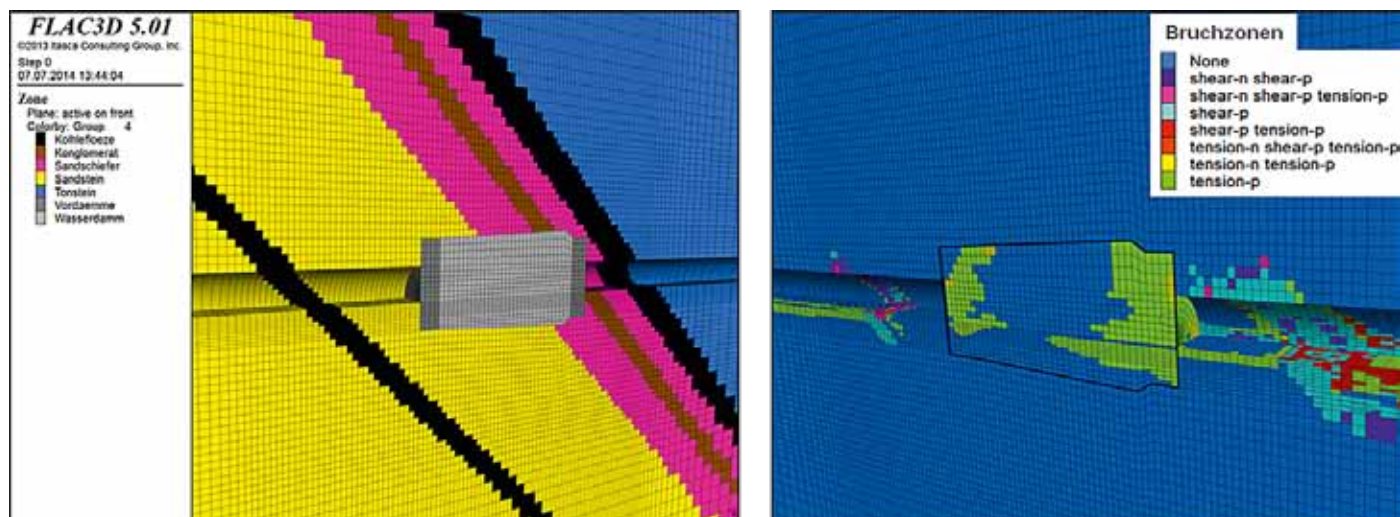


Fig. 6. Planning for a high-pressure stopping using numerical simulation.

Bild 6. Planungsbeispiel eines Hochdruckdammes mittels numerischer Simulationstechnik. Source/Quelle: DMT GmbH & Co. KG

are effectively transferred into the surrounding strata while at the same keeping water permeability to an absolute minimum.

Building structures of this kind requires large quantities of material to be transported below ground. As the mining industry began to use more and more material of this type the demand grew for process equipment specially designed for mixing the material and transporting it to its place of use. Suitable on-site placement systems also had to be developed. This requirement ultimately led to the development of technology that today goes far beyond the original remit of material pumping and conveying. The technology in question is tailored to meet the specific aims involved and includes individual processes such as material formulation development, all kinds of equipment for material reception, handling and storage, process-specific preparation and conditioning, the selection and layout of the optimum transport method and the final processing stage itself. While hands-on experience and a broad knowledge of the overall conditions prevailing in a mining environment are of course essential for this work, the actual process-engineering solution itself is largely based on physical principles and is not dependent on a certain type of geology.

Stoppings designed to seal off certain areas of the mine in order to create a barrier against in-situ water under high dynamic pressure are now used not only in conventional collieries but also in environments containing radiologically contaminated waste. Such hydraulic barriers are currently operating at the Asse II mine facility for the selective control and management of long-term flow paths. The process-engineering equipment used for preparing, transporting and installing the building material is based on expertise developed from assignments carried out for the conventional mining industry. Here there are clearly synergies to be exploited by transferring the know-how and experience acquired from conventional mining practices to meet the demands imposed when establishing a permanent disposal facility in deep geological formations.

Automation – always an important factor for improving safety and efficiency in the mining industry

Pressure on costs and increasing safety requirements have compelled mining companies to introduce automation technology on

seits müssen der Baustoff und die Konstruktion in der Lage sein, die auftretenden statischen Wasserdrücke aufzunehmen. Andererseits müssen durch das Design des Damms und die Auswahl eines geeigneten Baustoffs sowie Vergütungsmaßnahmen des Gebirges Durch- bzw. Umströmungsprozesse im Kontaktbereich zwischen Damms und Gebirge verhindert werden. Auf Grund der Komplexität sowie der hohen Anforderungen kommen bei der Planung solcher Hochdruckdämme neben klassischen baustatischen auch numerische Verfahren zur Anwendung. Bild 6 zeigt das Planungsbeispiel für einen Hochdruckdamm in einem Gebirge mit steilem Schichteinfallen. Dargestellt ist ein Hochdruckdamm mit einer Kegelstumpfform. Diese Bauweise gewährleistet einen guten Lasteintrag der durch den Wasserdruck auftretenden Spannungen in das Gebirge und eine geringe Wasserdurchlässigkeit zum offenen Grubenbereich.

Für die Herstellung solcher Bauwerke werden große Mengen an Bau- und Versatzstoffen unter Tage benötigt. Mit zunehmendem Einsatz von Baustoffen unter Tage wuchsen auch die Anforderungen an die verfahrenstechnischen Einrichtungen zum Anmischen und zum Transport der Baustoffe zur Einbaustelle sowie die Notwendigkeit geeigneter Einbringtechniken vor Ort. Aus dieser Aufgabenstellung resultierte die Entwicklung von Verfahrenstechniken, die heute weit über die ursprünglich reine Förderaufgabe hinausgehen. Die Verfahrenstechnik wird auf die konkrete Aufgabenstellung zugeschnitten und umfasst u.a. die Rezepturenentwicklung der Baustoffe, die verschiedenen Einrichtungen für die Materialannahme und -lagerung und die verfahrensspezifische Aufbereitung und Konditionierung sowie die Auswahl und Auslegung des optimalen Förderverfahrens bis hin zur Endverarbeitung. Hierbei sind zwar Erfahrungen und umfassende Kenntnisse der bergbauspezifischen Randbedingungen unabdingbar, die verfahrenstechnische Lösung selbst basiert aber weitestgehend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und ist lagerstättenunabhängig.

Dammbauwerke zur Abdichtung bestimmter Bergwerksbereiche gegen anstehendes Wasser mit hohem Staudruck werden außer in konventionellen Gewinnungsbergwerken schon heute in der Umgebung von radiologisch belastetem Abfall zum Bau hydraulischer Barrieren zur gezielten Steuerung bzw. Beeinflussung

an ever increasing scale. These systems are based on IT technology that enables machine parameters and ambient conditions to be accurately captured and relayed in real time to the mine control room for processing and display purposes. The automation process begins with the remote control of machines and vehicles from a safe distance and can be extended to include teleoperation (remote control from a surface station) and even the full automation of vehicles – which are still monitored from the mine control room but are now able to negotiate their way through the workings of their own accord. Mining companies and equipment suppliers around the world are now investing huge sums of money into the development and application of automated machines and stand-alone vehicles.

When a Swedish mining company was modernising its underground operations in the 1980s it decided to work closely with an internationally recognised equipment manufacturer to develop drilling machines and systems that could be operated at a safe distance from the working zone. Nowadays these machines can also be operated in fully automatic mode without human supervision and only require a surface control room to be in attendance in case intervention is needed. A modularly structured safety system allows large working districts to be subdivided into individual zones in order, for example, to separate underground personnel from the automatic loaders. Certain modern mining methods would now be inconceivable without a separation system of this kind in place.

A number of manufacturers have already developed systems for the reliable operation and monitoring of free-steered loaders and truck fleets. This technology enables the vehicles to be operated and unloaded using a fully automated regime. An integral navigation system plots the vehicle position on a continuous basis, while laser scanners register the profile of the roadway walls so as to check the position of the machine.

Automation has also gained a foothold in the area of mine transportation and shaft winding operations and underground train movements have all been fully automatic for many years.

However, it is widely agreed by experts in the field that human intervention will still be required in this area for the foreseeable future. Even when employing ‚artificial intelligence‘ to organise the interaction of vehicles in a ‚robot ecosystem‘ it will still be necessary to have human involvement at some points. The operator defines the travel routes, takes care of fault diagnosis and error handling, analyses the reporting data and takes complex decisions that are beyond the capability of the robotic system. Repetitive actions and operations requiring a high degree of precision are especially suitable for automation, while complicated tasks tend to call for human skills such as critical thinking and decision making.

Research projects are ongoing to develop automation systems for the mining industry. One of their aims is to investigate the potential application of mobile, intelligent robots below ground and to drive this development forward so as to come closer to the vision of the ‚manless mine‘. Automation technology has real potential when it comes to the permanent storage of radioactive waste, particularly for the transport and handling of the containers. However, other tasks, such as monitoring chemotoxic, radiological and atmospheric data, the documentation of imag-

ung von langfristigen Fließpfaden auf der Schachtanlage Asse II eingesetzt. Die verfahrenstechnischen Elemente zur Herstellung, Verbringung und zum Einbau der Baustoffe basieren dabei auf den Erkenntnissen aus Aufgabenstellungen des konventionellen Gewinnungsbergbaus. Hier zeigen sich Synergien, die sich aus der Übertragung von Fachwissen und Erfahrung des konventionellen Bergbaus auf die Anforderungen einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen gewinnen lassen.

Automatisierung – Zur Steigerung der Sicherheit und Effizienz schon immer ein Thema im Bergbau

Kostendruck und steigende Sicherheitsanforderungen zwingen die Bergbauunternehmen zu einer stetigen Erhöhung des Automatisierungsgrades. Die Basis dazu liefert die IT-Technik, welche es ermöglicht, Betriebs- und Umgebungszustände präzise zu erfassen und in Echtzeit in die Kontrollräume moderner Bergwerke zu übertragen, aufzubereiten und zu visualisieren. Die Automatisierung beginnt bei der Fernsteuerung von Maschinen und Fahrzeugen aus sicherer Entfernung (Remote-Control) und geht über die Steuerung aus übertägigen Kontrollräumen (Teleoperation) bis hin zur vollständigen Automatisierung der Fahrzeuge, die zwar aus Kontrollräumen überwacht werden, ihren Weg durch das Grubengebäude aber alleine finden. Weltweit investieren Bergbauunternehmen und die Zulieferindustrie große Summen in die Weiterentwicklung und den Einsatz automatisierter Maschinen und autonomer Fahrzeuge.

Als die Bergwerke eines schwedischen Bergbauunternehmens in den 1980er Jahren modernisiert wurden, arbeitete man eng mit einem international anerkannten Bergbaugerätehersteller zusammen, um Bohrgeräte und -systeme zu entwickeln, die in sicherem Abstand vom Abbaubereich bedient werden können. Heutzutage werden diese Geräte auch im vollautomatischen Modus ohne menschliche Überwachung betrieben und nur noch über eine übertägige Warte begleitet oder bei Bedarf bedient. Ein modular aufgebautes Sicherheitssystem ermöglicht die Unterteilung großer Abbaubereiche in unterschiedliche Zonen, um z.B. untertägiges Personal von den automatisierten Ladern zu trennen. Bestimmte moderne Abbaumethoden sind überhaupt nicht denkbar ohne eine entsprechende Trennung.

Verschiedene Hersteller haben bereits Systeme für den zuverlässigen Betrieb und die Überwachung automatisierter Radlader oder LKW-Flotten entwickelt. Sie bieten die Möglichkeit, Fahrzeuge vollautomatisiert fahren und entladen zu lassen. Ein integriertes Navigationssystem bestimmt kontinuierlich den Standort und Laserscanner erfassen die Profile der Streckenstöße, um die Position der Maschine zu überprüfen.

Auch in der Fördertechnik hat die Automatisierung Einzug gehalten. Der vollautomatische Betrieb des gesamten Schachtes ist seit langem Standard, ebenso der vollautomatische Zugbetrieb unter Tage.

Einigkeit herrscht unter allen Experten dennoch darüber, dass auf den Menschen auf absehbare Zeit nicht verzichtet werden kann. Selbst der Einsatz von künstlicher Intelligenz, welche die Interaktion der Fahrzeuge in einem „robot ecosystem“ gestaltet, erfordert die Mitarbeit des Menschen. Der Operator definiert die Fahrwege, kümmert sich um die Fehlerdiagnose/-behandlung, analysiert Berichtsdaten und trifft komplexe Entscheidungen, zu denen

ing processes, scanning and classical measuring and surveying work, will be of critical importance in a permanent underground disposal facility and operations of this kind can be carried out on a largely automated basis for personnel protection purposes. Radiation exposure levels, for example, can be greatly reduced by the automation and remote control of transport and handling processes.

Conclusions – what can we learn from this?

The conventional mining industry has a long tradition. As mining is practised all over the world under a whole range of different conditions the industry has developed all kinds of technology aimed at controlling strata behaviour and winning the target mineral as efficiently as possible. The proposed use of deep geological deposits as final disposal facilities for nuclear waste has transformed the traditional role of the mining industry. Instead of extracting material from the ground, mining engineers are now focussing more on how to store waste material safely deep below the earth's surface. Nevertheless, this new remit retains many of the key aspects of conventional mining practice.

The "key" skills of conventional mining engineering, which range from gaining access to the deposits via a shaft or drift and a series of underground roadways and other infrastructure, the active control and management of the mining operations, provisions for adequate ventilation and measures to protect against underground fires and explosions right through to the safe decommissioning of the mine workings, can also be used for the planning and construction of permanent underground disposal facilities. High-tech mechanisation and automation systems have played a key role in the modern mining industry for many years. While this new field of application naturally has to take account of additional factors such as radiation protection, it still has its basis in the mining industry – and this applies to all kinds of strata, regardless of the choice of host rock.

The experience that the industry has built up over the years is also of vital importance when it comes to selecting a suitable disposal site and planning a final disposal facility in deep geological formations. These processes benefit from the support of specialists with a mining engineering background, as this can help to avoid unnecessary delays, additional costs and potential damage to public image.

This paper could not have been produced without the help and cooperation provided by many experts and specialists representing a whole range of mining disciplines. The authors therefore wish to thank all those colleagues whose professional knowledge and expertise has made such a vital contribution.

Authors / Autoren

Dr. Andreas Hucke,
Dipl.-Ing. Nadine Kohl,
Dipl.-Ing. Carsten Scior,
Dr. Dipl.-Wirt. Ing. Daniela Gutberlet,
DMT GmbH & Co KG, Essen

der Roboter nicht fähig ist. Wiederkehrende Tätigkeiten oder solche mit hoher Präzisionsanforderung eignen sich besonders für die Automatisierung, während komplexe Aufgaben menschliche Stärken wie kritisches Denken und Entscheidungsfindung erfordern.

Aktuelle Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit der Automatisierung im Bergbau. Sie haben u. a. zum Ziel, die Einsatzmöglichkeiten mobiler, intelligenter Roboter im Bergbau zu untersuchen und diesbezügliche Entwicklungen voranzubringen, um der Vision des „mannlosen Bergwerks“ näherzukommen. Im Hinblick auf eine Endlagerung von radioaktiven Abfällen zeigen sich Automatisierungspotentiale, vor allem für den Transport und die Handhabung von Gebinden. Aber auch Aufgaben, wie die Überwachung chemotoxischer, radiologischer und atmosphärischer Daten, sowie die Dokumentation, z. B. über bildgebende Verfahren, Scanning oder klassische Vermessung, werden in einem Endlager von wesentlicher Bedeutung sein und können zum Schutz der Mitarbeiter weitgehend automatisiert ausgeführt werden. So kann die Strahlenexposition des Betriebspersonals durch die Automatisierung bzw. Fernbedienung von Transport- und Handhabungsprozessen stark reduziert werden.

Fazit – Was lernen wir daraus?

Der konventionelle Bergbau hat eine lange Tradition. Über die weltweite Verbreitung und die unterschiedlichsten Bedingungen, unter denen Bergbau betrieben wurde, entwickelten sich vielfältige Techniken zur sicheren Gebirgsbeherrschung und zur effizienten Gewinnung von Rohstoffen. Die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen dreht die bisherige Aufgabe des Bergbaus um. Nicht mehr die Gewinnung von Materialien aus dem Gebirge, sondern die sichere Verbringung von Material in das Gebirge steht nun im Vordergrund. Und doch bleiben die wesentlichen Merkmale des konventionellen Bergbaus nahezu vollständig erhalten.

Vom Zugang über einen Schacht oder eine Rampe über die untertägigen Streckensysteme und Sonderbauwerke für die Infrastruktur, die aktive Steuerung des Betriebs, die Vorkehrungen zur Bewitterung sowie den Brand- und Explosionsschutz bis hin zum sicheren Verschluss eines Bergwerks finden die Kernkompetenzen des konventionellen Bergbaus auch für die Planung und Errichtung eines Endlagers Anwendung. Die fortgeschrittene Technisierung und Automatisierung im Bergbau ist längst wesentlicher Bestandteil eines jeden modernen Bergwerkes. Natürlich müssen zusätzlich die Randbedingungen des Strahlenschutzes berücksichtigt werden, die bergmännische Basis existiert aber bereits – und das für jede Gesteinsart, unabhängig vom gewählten Wirtsgestein.

Schon bei der Standortauswahl und in der gesamten Planung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen sind die Erfahrungen des konventionellen Bergbaus von wesentlicher Bedeutung. Die Begleitung dieser Prozesse durch Fachleute mit bergmännischer Erfahrung hilft, unnötige Verzögerungen, Mehrkosten und Imageschäden zu vermeiden.

Die Erstellung des Beitrags wäre ohne die Mitarbeit zahlreicher Experten aus den verschiedensten bergbaulichen Disziplinen nicht möglich gewesen. Daher danken die Autoren allen Mitstreitern, die durch ihre fachliche Expertise dazu beigetragen haben.