

Jens Köhler  
Lutz Teichmann  
Matthias Heydorn  
Paul Eric Wolff

## Application of Sorel Concrete for Barrier Construction and Cavity Stabilisation at Schachtanlage Asse II

Schachtanlage Asse II is a former salt and potash mine that was taken over by the Federal Government when production came to an end in 1965. Between 1967 and 1978 low- and medium-level radioactive waste was placed there in underground storage chambers on behalf of the German Government. However, current information indicates that the long-term safety of this waste material will be compromised due to a number of factors, including the extended lifetime of the storage chambers, the inadequate distance between them and the overburden and the undersized structural design of the load-bearing components. The concern is that this will result in geomechanical degradation and that an inflow of solution from the overburden rock has been taking place since 1988 or even before (1). Given the current state of knowledge long-term security can only be guaranteed by the retrieval of the radioactive waste and indeed this became a statutory obligation in 2013. As an escalation of inflow into the mine workings cannot be entirely ruled out, extensive backfilling and sealing measures are being carried out

below ground as an emergency precaution in order to provide a sufficient degree of security for the planned retrieval operation. The backfilling measures are designed both to stabilise the supporting system and to enclose the storage areas for the radioactive containers. This will help avoid further damage to the load-bearing system, while the construction of barriers will also prevent any penetration of the storage chambers in the event of the solution inflow developing on a “beyond-design basis”. This will minimise the discharge of radionuclides from the storage areas. The backfilling operation is mainly based on the use of a magnesia binder (Sorel concrete) that has been specially developed and tested for use at Schachtanlage Asse II. The following paper describes the results of the operation to employ Sorel concrete for barrier construction and stabilisation work at the facility, as presented at the 3rd Freiberg International Colloquium on “Using Sorel concrete for constructing sealing barriers and stabilisation at Asse II”, which was held in Freiberg on 5th October 2017 (2).

## Einsatz von Sorelbeton für Verschlussbauwerke und Stabilisierungsmaßnahmen in der Schachtanlage Asse II

Die Schachtanlage Asse II ist ein altes Kali- und Steinsalzbergwerk, welches nach Einstellung der Rohstoffgewinnung 1965 von der Bundesregierung übernommen wurde. Von 1967 bis 1978 wurden im Auftrag der Bundesregierung schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Einlagerungskammern (ELK) eingelagert. Nach heutigem Stand besteht allerdings keine langzeitliche Sicherheit für die Abfälle, da es aufgrund der langen offenen Standzeit der erstellten Hohlräume, des geringen Abstands zum Deckgebirge sowie der Unterdimensionierung der Tragelemente zu gebirgsmechanischen Schädigungsprozessen und spätestens seit 1988 zu Lösungszutritten aus dem Deckgebirge kommt (1). Nach heutigem Kenntnisstand kann die Langzeitsicherheit des Bergwerks nur durch die Rückholung der radioaktiven Abfälle gewährleistet werden. Diese ist seit 2013 gesetzlicher Auftrag. Da eine Eskalation des Lösungszutritts in das Grubengebäude nicht ausgeschlossen werden kann, werden unter Tage umfangreiche Verfüll- und Abdichtmaßnahmen zur Notfallvorsorge umgesetzt, um ein ausreichendes Sicherheitsniveau für die ge-

plante Rückholung zu erreichen. Die Verfüllmaßnahmen sollen einerseits das Tragsystem stabilisieren und andererseits die Einlagerungsbereiche der radioaktiven Gebinde kapseln. Somit können weiteren Schädigungen der Tragelemente entgegengewirkt werden und bei einer auslegungsüberschreitenden Entwicklung des Lösungszutritts (Aül) durch Erstellung von Verschlussbauwerken eine Durchströmung der ELK verhindert werden. Somit kann der Austrag von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen minimiert werden. Für die Verfüllmaßnahmen kommt vorrangig ein Magnesiabinder (Sorelbeton), der speziell für die Verwendung in der Schachtanlage Asse II entwickelt und geprüft wurde, zum Einsatz. Im Folgenden werden die im Rahmen des 3. Internationalen Freiburger Fachkolloquiums „Einsatz von Sorelbeton für Verschlussbauwerke und Stabilisierungsmaßnahmen in der Asse II“ am 05. Oktober 2017 in Freiberg präsentierten Ergebnisse zur Erstellung von Verschlussbauwerken und Stabilisierungsmaßnahmen auf Sorelbetonbasis in der Schachtanlage Asse II beschrieben (2).

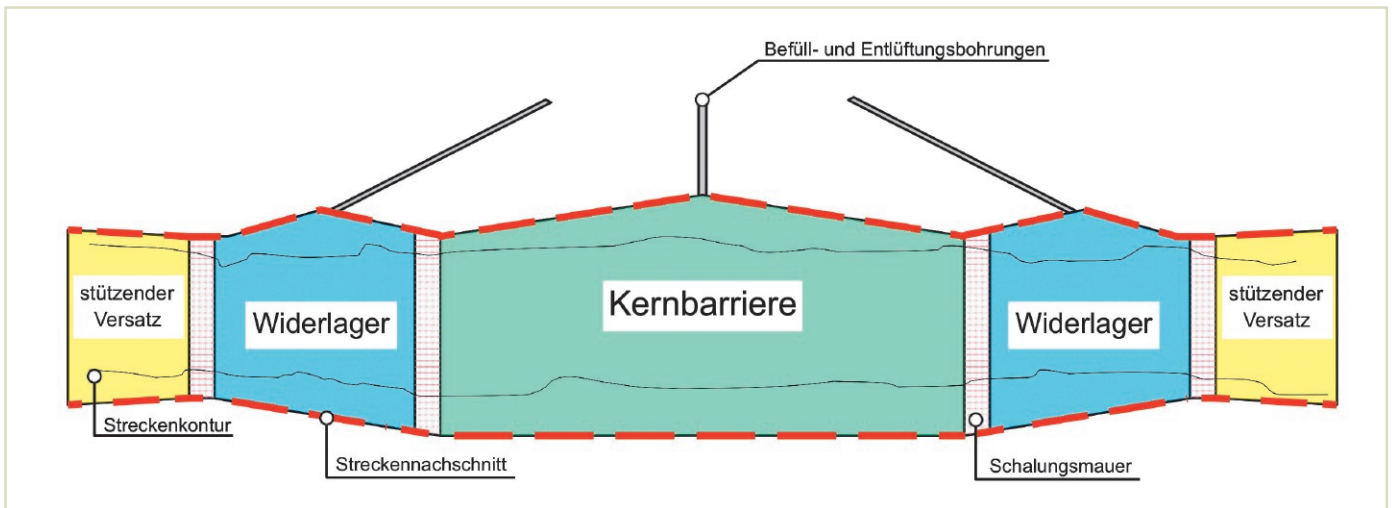


Fig. 1. Basic concept for a horizontal flow barrier at Schachtanlage Asse II.

Bild 1. Grundkonzept einer horizontalen Strömungsbarriere in der Schachtanlage Asse II. Source/Quelle: BGE

## 1 Site conditions

During the operating lifetime of the Schachtanlage Asse II salt and potash mine, which was in production from 1908 to 1964, a total cavity volume of around 5 M m<sup>3</sup> was excavated, of which some 3,5 M m<sup>3</sup> was left unstowed. The remaining cavity areas remained unfilled for many years. Because of the undersized design of the load-bearing elements supporting the mine workings there has been a progressive deterioration that has affected the pillars and roof levels and also the measures attached to the solution-bearing overburden. As a result, salt solution from the overlying strata has been entering the mine since 1988. In order to counteract this, stabilisation measures were commenced in 1995 with the open cavity spaces being filled initially with salt waste and the other remaining cavity areas with Sorel concrete.

When planning the backfilling and sealing measures it was important to recognise that the structural barriers in question were to be erected in disused and partly-stowed sections of gallery, as well as in staple shafts and winzes. These sites were located both in rock salt and in carnallitic strata, with MgCl<sub>2</sub>-predominant solutions occasionally present in the floor. The surrounding rock body has been damaged by geomechanical stress and the disaggregated zone can only be partially removed in order to create an effective seal.

## 2 Basic concept of flow barriers at Schachtanlage Asse II

A special concept was developed for the construction of the flow barriers that were needed to cope with the particular conditions pertaining at Schachtanlage Asse II (Figure 1). This essentially comprised a core barrier zone that was enclosed by salt rock and solid abutments. The mine cavities directly adjacent the flow barrier were filled with stowing material to create extra stability and provide additional functionality. A specially adapted "Sorel concrete" was used for all the flow barriers, and also for the stowing of the mine cavities in general. This material was considered to be sufficiently rigid, compact and volumetrically stable and, in addition, was capable of slight expansion during setting.

The construction of a flow barrier begins with a survey of the proposed location followed by site-specific planning. After the

## 1 Standortbedingungen

In der Schachtanlage Asse II wurde in den Jahren 1908 bis 1964 für die Gewinnung von Stein- und Kalisalz ein Hohlraumvolumen von ca. 5 Mio. m<sup>3</sup> aufgefahren, wovon ca. 3,5 Mio. m<sup>3</sup> unversetzt blieben. Die restlichen Hohlräume blieben für eine lange Zeit unverfüllt. Aufgrund der geringen Dimensionierung der Tragelemente im Grubengebäude findet eine fortschreitende Schädigung der Pfeiler und Schweben sowie der Anbaubank zum lösungsführenden Deckgebirge statt. Seit 1988 dringt Salzlösung aus dem Deckgebirge in das Bergwerk ein. Deshalb werden seit 1995 die offenen Hohlräume zur Stabilisierung zuerst mit Salzversatz und die verbleibenden Resthohlräume mit Sorelbeton verfüllt.

Zur Planung der Verfüll- und Abdichtmaßnahmen ist zu berücksichtigen, dass die Verschlussbauwerke in alten und zum Teil bereits (teil-)versetzten Streckenabschnitten sowie in Blindschächten und Gesenken zu erstellen sind. Diese Standorte liegen sowohl im Steinsalz als auch in carnallitischen Gesteinen und zum Teil stehen in der Sohle MgCl<sub>2</sub>-dominierte Lösungen an. Die umgebenden Gebirgsbereiche sind durch gebirgsmechanische Beanspruchung geschädigt und die umgebende Auflockerungszone (ALZ) kann zur Erreichung der Dichtwirkung nur teilweise entfernt werden.

## 2 Grundkonzept der Strömungsbarrieren in der Schachtanlage Asse II

Für die besonderen Standortverhältnisse der Schachtanlage Asse II wurde ein spezielles Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren (SB) entwickelt (Bild 1). Der Aufbau besteht grundsätzlich aus einem Kernbarrierenbereich, der vom Salzgestein und massiven Widerlagern eingeschlossen ist. Die direkt an die Strömungsbarriere anschließenden Grubenbereiche werden zur Stabilisierung und weiteren Funktionalität mit stützendem Versatz verfüllt. Für alle Strömungsbarrieren, und in der Regel auch für die Verfüllung der Grubenbereiche mit stützendem Versatz, wird ein speziell angepasster, hinreichend steifer, dichter und volumenstabiler bzw. bei der Erhärtung leicht expansionsfähiger Sorelbeton verwendet.

Der Bau einer Strömungsbarriere beginnt mit der Standorterkundung und einer standortspezifischen Planung. Nach Ab-

planning work has been completed filling and ventilation holes are drilled into the roadway section. The original contour is then re-shaped using selective-cut heading machines to achieve a geomechanically favourable “target profile”. This reduces the thickness of the disaggregated zone as much as is effectively possible, with particular attention being paid to achieving a seamless transition between the side-walls and the roof and floor, respectively. The next step is to construct formwork walls of Sorel concrete that will serve to divide the individual sections of the flow barrier. The abutments can then be concreted into place. The solid design of the abutment sections means that these do not have to be shaped in any particular way in order to transfer the axial loads. The transition from the previous roadway cross section to the much larger “target profile” inevitably creates a favourable wedge-shaped abutment. The core barrier is then continuously concreted from a higher level, i.e. without any lengthy interruptions to the pumping regime. This ensures that a sufficient suspension pressure is built up as the material sets.

The combination of selected material and application technology, working in conjunction with the convergence processes, results in a relatively rapid build-up of radial stresses and this in turn helps dissipate any hydraulic pressure differences (with salt solution used in emergency cases).

### 3 Development of the barrier material

The geotechnical structures were built using special magnesia binder formulations known as “Sorel concrete”. This process made allowances for the local geology, the anticipated  $MgCl_2$ -predominant solution and the structural engineering requirements. When employed in saline environments Sorel concrete provides long-term resistance against  $MgCl_2$ -predominant solutions and therefore contributes significantly to maintaining the functional capability of the structure. Sorel concrete preparations also exhibit low levels of porosity (permeability factor  $< 5,0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ), interact well with salt formations, e.g., they develop high adhesive strength in combination with salt rock, and display good volumetric properties (their volume increases on setting) and good mechanical qualities, e.g., strength and rigidity. Sorel concrete has long been employed in the salt and potash industry and was used for the construction of roadway stoppings at Leopoldshall mine as long ago as 1898. This material has also been chosen for the quality-assured filling of boreholes in the salt industry and for creating sealing barriers for hydraulic stowing operations (3).

The Sonderhausen-based firm K-UTEC AG Salt Technologies developed a special magnesia binder (Sorel concrete 29.6) for the roadway barriers being planned for the Morsleben radioactive-repository (ERAM). This formulation was specifically adapted to meet the particular conditions prevailing in the underground workings of the Schachanlage Asse II. The mix in question, known as Sorel concrete 29.6 A2, comprises as its main constituents magnesium oxide (MgO), semi-burnt dolomite (HBO), slate powder, rock salt and magnesium chloride solution ( $MgCl_2$  solution) as the mixing liquid. As this material becomes compacted and loses its original porosity when subjected to stress – as is explained below – pilot test PSB A2 indicated that it was not capable of achieving the level of radial stress required. A different formulation was therefore developed (Sorel concrete A1) with a

schluss der Planung werden zunächst die Befüll- und Entlüftungsbohrungen in den Streckenabschnitt gestoßen. Anschließend wird die ursprüngliche Streckenkontur bis auf ein gebirgsmechanisch günstiges, sogenanntes Sollprofil, mit Teilschnittmaschinen nachgeschritten und so die Mächtigkeit der Auflockerungszone bestmöglich minimiert. Dabei wird auf harmonische Übergänge zwischen den Stößen und der Firste bzw. der Sohle geachtet. Im nächsten Schritt werden Schalungsmauern aus Sorelbeton erstellt, welche die einzelnen Bereiche der Strömungsbarriere unterteilen. Im Anschluss erfolgt die Betonage der Widerlager. Eine besondere Formgebung zur Abtragung axialer Lasten ist durch die vorgesehenen massiven Widerlager nicht erforderlich. Aufgrund des Übergangs vom vorherigen Streckenprofil auf das deutlich größere Sollprofil ergibt sich zwangsläufig eine günstige keilförmige Formgebung der Widerlager. Als Abschluss erfolgt die Betonage der Kernbarriere durchgehend, d.h. ohne größere Unterbrechungen, von einer höheren Sohle. Somit kann der Aufbau eines ausreichenden Suspensionsdrucks bei der Erhärtung des Baustoffs gewährleistet werden.

Die Kombination aus Baustoffauswahl und Einbringtechnologie führt in Verbindung mit den Konvergenzprozessen zu einem relativ schnellen Aufbau von Radialspannungen und ermöglicht somit einen Abtrag von hydraulischen Druckdifferenzen (Salzlösung bei einem Notfall).

### 3 Baustoffentwicklung

Die geotechnischen Bauwerke werden unter Berücksichtigung der anstehenden Geologie, der später zu erwartenden anstehenden  $MgCl_2$ -dominierten Lösung sowie der bautechnischen Anforderung aus speziellen Magnesiabinderrezepturen, sogenannten Sorelbetonen, erstellt. Diese bieten eine Langzeitbeständigkeit im salinaren Milieu gegenüber einer  $MgCl_2$ -dominierten Lösung und tragen somit zum Erhalt der Funktionsfähigkeit der Bauwerke maßgebend bei. Zusätzlich zeichnen sich Sorelbetone durch eine geringe Durchlässigkeit (Permeabilität  $< 5,0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ), guten Wechselwirkungseigenschaften mit Salzgesteinen, z.B. hohe Haftzugfestigkeit an Salzgesteinen, guten volumetrische Eigenschaften (Volumenzunahme beim Abbinden) sowie guten mechanische Eigenschaften, z.B. Steifigkeit und Festigkeit, aus. Der Einsatz von Sorelbeton im Kali- und Steinsalzbergbau hat eine lange Tradition und wurde bereits im Jahr 1898 im Bergwerk Leopoldshall für die Errichtung von Streckenverschlüssen, im weiteren zur qualitätsgerechten Verfüllung von Bohrungen im Salzbergbau und im Spülversatzbetrieb für Abdämmungen verwendet (3).

Für im Endlager für radioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM) geplante Streckenabdichtungen wurde von der K-UTEC AG Salt Technologies, Sonderhausen, ein Magnesiabinder (Sorelbeton 29.6) entwickelt. Diese Rezeptur wurde für die besonderen Standortbedingungen des Grubengebäudes der Schachanlage Asse II entsprechend angepasst (Sorelbeton 29.6 A2). Der Sorelbeton 29.6 A2 besteht aus den Hauptkomponenten Magnesiumoxid (MgO), Halbbranntdolomit (HBO), Schiefermehl, Steinsalz und als Anmachflüssigkeit Magnesiumchloridlösung ( $MgCl_2$ -Lösung). Da der Baustoff – wie im Folgenden erläutert – bei Beanspruchung kompaktiert bzw. seine Porosität verringert, konnte im Pilotversuch PSB A2 keine ausreichende Radialspannungsentwicklung belegt werden. Daher wurde eine Sorelbetonrezeptur (Sorel-

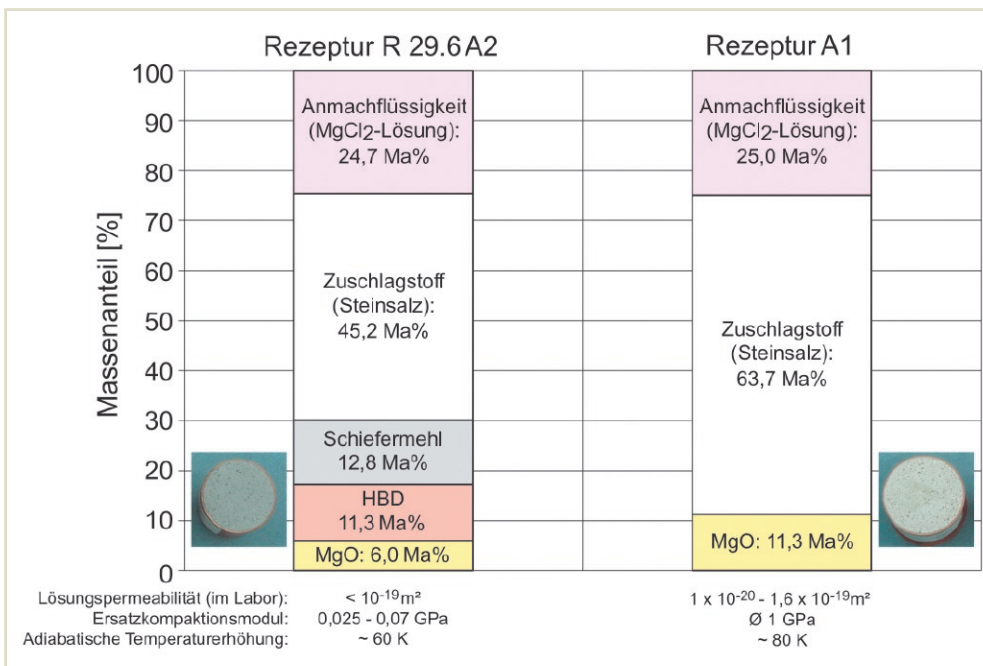


Fig. 2. Average composition and mechanical properties of Sorel concretes most frequently used at Schachtanlage Asse II. // Bild 2. Mittlere Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der auf der Schachtanlage Asse II am häufigsten verwendeten Sorelbetone. Source/Quelle: BGE

significantly higher rigidity factor. This new composition did not include slate powder or HBO.

Figure 2 shows an average composition and various mechanical properties to draw up a comparison between the Sorel concretes used at Schachtanlage Asse II for constructing flow barriers and those employed for residual-cavity filling work. Since 2003 approximately 1,700 material samples have been analysed and their specific properties recorded. Suitable injection techniques and injection media have also been developed for the supplementary sealing of the disaggregated zone, e.g. in the case of vertical flow barriers, and these have proved to be effective, as will be described below.

#### 4 Laboratory tests and pilot projects

In order to confirm the technical viability and functionality of the Sorel concrete an extensive series of tests was carried out and a number of pilot building projects undertaken with a view to resolving various issues. These projects were of several years duration and in some cases the pilot structures were tested for leak-tightness under fluid pressure.

The mechanical properties were first tested on a laboratory scale and then on a reduced scale using a test rig. Full-scale trials with pilot barriers then followed at four underground locations, the aim here being to prove the technical practicability and functionality of the flow barriers through the use of measurement technology (Figure 3) (4, 5, 6).

The first 40 m-long pilot barrier (PSB A2) was constructed in the western part of the 775 m horizon in a roadway that was first driven in 1975 and in stratigraphic terms is part of the Leine sequence (Na3β). This structure comprised a 30 m-long core barrier and two 5 m-long abutments. The roadhead area was used as a pressure loading chamber. The equipment available, and the fairly short pumping distances, determined that this was a fairly low-performance operation, with concreting rates no higher than 6 m<sup>3</sup>/h. This meant that there was no significant difference in elevation to overcome. The subsequent pressure application phase

beton A1) mit signifikant höherer Steifigkeit entwickelt. Dabei wurde auf die Zusätze von Schiefermehl und HBO verzichtet.

In Bild 2 sind die mittleren Zusammensetzungen und einige mechanische Eigenschaften der auf der Schachtanlage Asse II zum Bau von SB und für die Resthohlraumverfüllung verwendeten Sorelbetone gegenübergestellt. Insgesamt wurden seit 2003 ca. 1.700 Proben für die Materialentwicklung untersucht und die Eigenschaften dokumentiert. Zusätzlich wurden zur zusätzlichen Abdichtung der ALZ z.B. bei vertikalen Strömungsbarrieren geeignete Injektionstechniken und Injektionsmittel entwickelt und deren Eignung – wie im Folgenden beschrieben – belegt.

#### 4 Laborversuche und Pilotbauwerke

Zum Nachweis der technischen Machbarkeit und Funktionalität der Sorelbetone wurden umfangreiche Laborversuche und Pilotbauwerke für verschiedene Fragestellungen erstellt und zum Teil unter Flüssigkeitsdruck über mehrere Jahre auf Dichtigkeit getestet.

Die mechanischen Eigenschaften wurden zunächst im Labormaßstab und im Technikum im kleinen Maßstab bestimmt. Weiterführend wurden im Grubengebäude an vier Lokationen Pilotbauwerke im Maßstab 1:1 errichtet, um die technische Machbarkeit und auch die Funktionalität der SB exemplarisch messtechnisch zu belegen (Bild 3) (4, 5, 6).

Im westlichen Bereich der 775 m-Sohle wurde in einer Strecke, die 1975 aufgefahren und stratigraphisch der Leine-Folge (Na3β) zugeordnet werden kann, die erste insgesamt 40 m lange Pilotströmungsbarriere (PSB A2) erstellt. Sie besteht aus einer 30 m langen Kernbarriere und zwei 5 m langen Widerlagern. Der Bereich der Ortsbrust wurde zur Druckbeaufschlagung als Druckkammer ausgeführt. Die Betonage erfolgte anlagentechnisch bedingt mit einer vergleichsweise geringen Betonierleistung von max. 6 m<sup>3</sup>/h und die Transportwege waren gering. Somit musste kein nennenswerter Höhenunterschied überwunden werden. Die anschließende Druckbeaufschlagung mit MgCl<sub>2</sub>-Lösung erfolgte in mehreren Teilschritten, wobei sich Aufsättigungsphasen, Drucksteigerungsphasen und Druckhaltephasen miteinander ab-



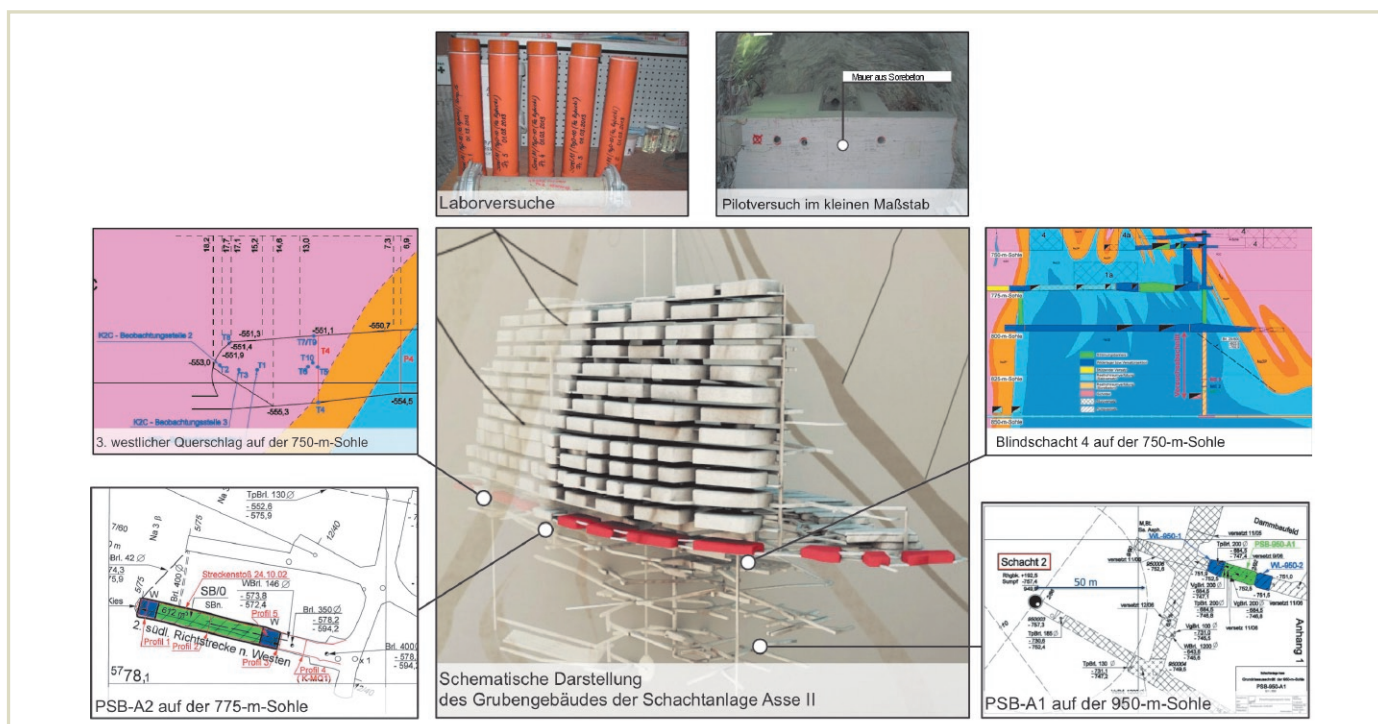


Fig. 3. Images showing Sorel concrete undergoing laboratory and pilot-scale trials and the location of the pilot barriers set up in the underground workings at Schachanlage Asse II. // Bild 3. Sorelbeton im Laborversuch und Technikum sowie die Lage der Pilotbauwerke im Grubengebäude der Schachanlage Asse II. Source/Quelle: BGE

with  $MgCl_2$  solution was organised in several stages with the different individual phases (saturation, pressure raising and pressure maintenance) alternating with each other. The main findings from the construction project and the structural monitoring of PSB A2 confirmed that the barrier was a technically practicable proposition and that it continued to meet the relevant requirements when pressure was applied. However, the radial stresses in and around the core barrier did not increase to the expected degree. As a result, it was not possible to confirm that the structure was sufficiently tensioned against the rock walls. In order to improve this situation the material formulation was adjusted, as explained above, to create a stiffer mix. In addition, by moving the concrete delivery station to a higher level it was hoped that the setting process would take place at a higher suspension pressure, thereby achieving a higher “launching level” for the radial stresses.

It also had to be assumed that some several hundred thousand cubic metres of Sorel concrete would eventually have to be pumped into the remaining underground cavities. A concrete pumping installation with a delivery capability of up to  $20\text{ m}^3/\text{h}$  was therefore developed and procured, though this still has to be tested under real operating conditions.

A second pilot flow barrier (PSB A1) was then constructed on the strength of this initial trial. The site chosen for this project was on the 950 m horizon in a section of roadway driven in rock salt in the Stassfurt sequence (Na $\beta$ ). Accompanying geotechnical measurements taken before the actual construction work began showed that a process of convergence, amounting to between 0.3 and 0.4%/a, had been taking place at a constant rate over a period of several years due to the effect of rock pressure. This was deemed to be an advantage for developing the required radial stresses, and hence for the integrity of the contact zone,

wechselten. Die wesentlichen Ergebnisse aus der Erstellung und bautechnischen Überwachung der PSB A2 waren, dass die technische Machbarkeit und, durch die Druckbeaufschlagung, eine anforderungsgerechte Erstellung nachgewiesen werden konnte. Allerdings stiegen die Radialspannungen im Bereich der Kernbarriere nicht im erwarteten Maß an. Somit konnte eine ausreichend schnelle Verspannung mit dem Gebirge nicht belegt werden. Um dies zu verbessern, war, wie oben erläutert, eine Rezepturanpassung hin zu einem steiferen Baustoff notwendig. Zusätzlich sollte durch die Betonage von einer höheren Sohle die Erhärtung unter einem erhöhten Suspensionsdruck erfolgen und damit ein höheres „Startniveau“ für die Radialspannungen erreicht werden.

Weiterhin war davon auszugehen, dass zukünftig mehrere hunderttausend Kubikmeter Sorelbeton in die noch verbleibenden Hohlräume des Grubengebäudes eingebracht werden müssen. Somit wurde eine Anlagentechnik mit einer Leistung von bis zu  $20\text{ m}^3/\text{h}$  entwickelt und beschafft, die jedoch noch unter realen Einsatzbedingungen zu testen war.

In einem weiteren Schritt wurde daraufhin noch eine Pilotströmungsbarriere (PSB A1) erstellt. Als Versuchsort wurde ein im Steinsalz aufgefahrener Streckenabschnitt in der Staßfurt-Folge (Na $\beta$ ) auf der 950 m-Sohle gewählt. Die baubegleitenden geotechnischen Messungen zeigten vor Beginn der Bauphase einen über mehrere Jahre konstanten durch den Gebirgsdruck verursachten Konvergenzprozess mit Konvergenzraten von ca. 0,3 bis 0,4%/a, welche von Vorteil für die Radialspannungsentwicklung und damit für die Integrität der Kontaktzone bei hydraulischen Druckdifferenzen der Strömungsbarriere sind. Die Betonage erfolgte von einer ca. 60 m oberhalb auf der 900 m-Sohle gelegenen Strecke. Bei der Ausführung waren vor allem die Temperatur- und Spannungsentwicklung im Bauwerk und an der Bauwerkskontur

given the hydraulic differences that would be acting on the flow barriers. Concreting was organised from a roadway lying some 60 m above on the 900 m horizon. During execution major attention was focused on the temperature and stress development within the barrier and around the contours as well as on the technically attainable level of hydraulic resistance. The latter was determined using an extensive programme of geotechnical measurements taken within the structure and around the contours of the remaining disaggregated zone. The location of the construction site also meant that the section of roadway behind the flow barrier could be used as a pressure chamber, thereby providing an opportunity to check the leaktightness of the barrier structure. PSB A1 has now been under solution pressure (about 2 MPa) since 2008 and is still being monitored using special measurement technology (4).

The temperature profile both during and after the barrier concreting phase was typical for this type of Sorel concrete and showed good comparability with measurements taken during the test-rig and laboratory investigations. In the area of the north face, e.g., the maximum temperature measured was 105 °C, this being quite in line with expectations based on preliminary tests under controlled laboratory conditions. The actual radial stresses were between 13 and 14 MPa, thus confirming the much higher rigidity of the Sorel concrete. Overall, the PSB A1 project demonstrated that it is possible to produce the new building material on an industrial scale and in line with requirements using the newly installed material supply system, to transport it over longer distances and to achieve a form- and friction-locked concrete mass while operating from a 60 m-higher delivery level. The material was able to achieve sufficient rigidity and the integral leaktightness of the barrier has been verified after several years in a pressurised state. The structure has also exhibited the minimum integral permeability of  $5 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2}$  that is demanded in such cases (5).

Routine operations were then resumed at the mine, these involving the completion of horizontal geotechnical structures in the rock salt and the filling of residual cavities. Because of the carnallitic rock (K2C) present in the mine workings and the large number of vertical shafts and staple pits, some of which also had to be filled hydraulically, two further projects were launched in parallel with the day-to-day operations. In order to examine the technical feasibility of installing barrier seals in the carnallite another barrier (designated K2C-750-1) was constructed in a cross-cut on the 750 m level. Geotechnical measurements indicated a sufficiently low level of permeability at the contact zone and this confirmed Sorel concrete type A1 as a suitable material for the construction of stoppings in carnallitic rock (7).

In order to examine the settlement stability of Sorel concrete for vertical mine workings, something that would also be of interest for the subsequent pre-filling of the Asse 2 and Asse 4 surface shafts, staple pit number 4 was filled with this material. Staple shaft number 4, which was excavated in about 1933, had a total length of some 112 m and provided a connection between the 750 m and the 850 m levels. The results of the concreting operation fully confirmed the assumptions made on the load-bearing behaviour of the cohesive Sorel-concrete column and demonstrated that a high settlement stability could be achieved when

sowie der technisch erreichbare hydraulische Widerstand von großem Interesse. Letzterer wurde mit einem umfangreichen geotechnischen Messprogramm im Bauwerk sowie an der Kontur der noch verbleibenden ALZ bestimmt. Zusätzlich ermöglichte der Standort die Nutzung des hinter der SB gelegenen Streckenabschnitts als Druckkammer und somit die Dichtigkeit der SB zu überprüfen. Seit 2008 steht die PSB A1 unter Lösungsdruck (ca. 2 MPa) und wird bis heute messtechnisch überwacht (4).

Der Temperaturverlauf während und nach der Betonage der SB war typisch für den verwendeten Sorelbeton und zeigte gute Vergleichbarkeiten mit Messungen im Technikum bzw. Laborversuch. So konnte im Bereich des Nordstoßes mit 105 °C eine Maximaltemperatur gemessen werden, die auf Grundlage der Vorversuche unter kontrollierten Laborbedingungen zu erwarten war. Die aktuellen Radialspannungen liegen bei 13 bis 14 MPa, die eine deutlich höhere Steifigkeit des Sorelbetons belegen. Insgesamt konnte mit der PSB A1 gezeigt werden, dass es möglich ist, den neuen Baustoff mit einer neu installierten Baustoffanlage im großtechnischen Maßstab qualitätsgerecht zu produzieren, über längere Strecken zu transportieren und eine form- und kraftschlüssige Betonage von einem ca. 60 m höheren Niveau zu realisieren. Der Baustoff erreichte eine ausreichende Steifigkeit und die integrale Dichtigkeit wurde durch mehrjährige Druckbeaufschlagung bewiesen und die benötigte integrale Permeabilität von mindestens  $5 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2}$  konnte nachgewiesen werden (5).

Daraufhin wurden der Routinebetrieb für die Erstellung der horizontalen geotechnischen Bauwerke im Steinsalz und die Resthohlraumverfüllung aufgenommen. Aufgrund der im Grubengebäude anstehenden carnallitischen Gesteine (K2C) und einer Vielzahl von vertikalen Schächten und Gesenken, die auch zum Teil mit hydraulischen Anforderungen verfüllt werden müssen, wurden neben dem Routinebetrieb noch zwei weitere Pilotbauwerke initiiert. Zur technischen Machbarkeit von Abdichtbauwerken im Carnallitit wurde die K2C-750-1 in einem Querschlag auf der 750 m-Sohle erstellt. Die geotechnischen Messergebnisse zeigten eine ausreichend geringe Permeabilität des Kontaktbereichs und somit die Anwendbarkeit von Sorelbeton A1 für die Erstellung von Abdichtbauwerken im Carnallitit (7).

Für die Überprüfung der Setzungsstabilität des Sorelbetons für seigere Grubenbereiche und auch in Bezug auf eine spätere Vollverfüllung der Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 wurde der Blindschacht 4 mit Sorelbeton verfüllt. Der Blindschacht 4 wurde um 1933 von der 750 m- bis zur 850 m-Sohle mit einer Gesamttiefe von ca. 112 m erstellt. Die Ergebnisse aus der Betonage zeigen, dass die Annahmen zum Tragverhalten der kohäsiven Sorelbeton-Füllsäule in vollem Umfang bestätigt wurden und mit der Betonage der seigeren Grubenbaue und Schächte mit dieser Art der Schachtverfüllung eine hohe Setzungsstabilität demonstriert werden konnte (8). Weiterhin ergab sich aus den Standortuntersuchungen für vertikale Abdichtbereiche, dass eine Entfernung der Auflockerungszone aufgrund der erheblichen Ausdehnung in der Regel nicht sinnvoll umsetzbar ist. Daher wurde hierfür ein Verfahren zur Abdichtung von Auflockerungszonen und Prüfung der Dichtigkeit mittels Injektionen entwickelt, technisch erprobt und in den Routinebetrieb überführt.

Insgesamt konnte mit der Erstellung der Pilotbauwerke der generelle Einsatz von Sorelbeton für die Erstellung von Abdichtbauwerken belegt werden.

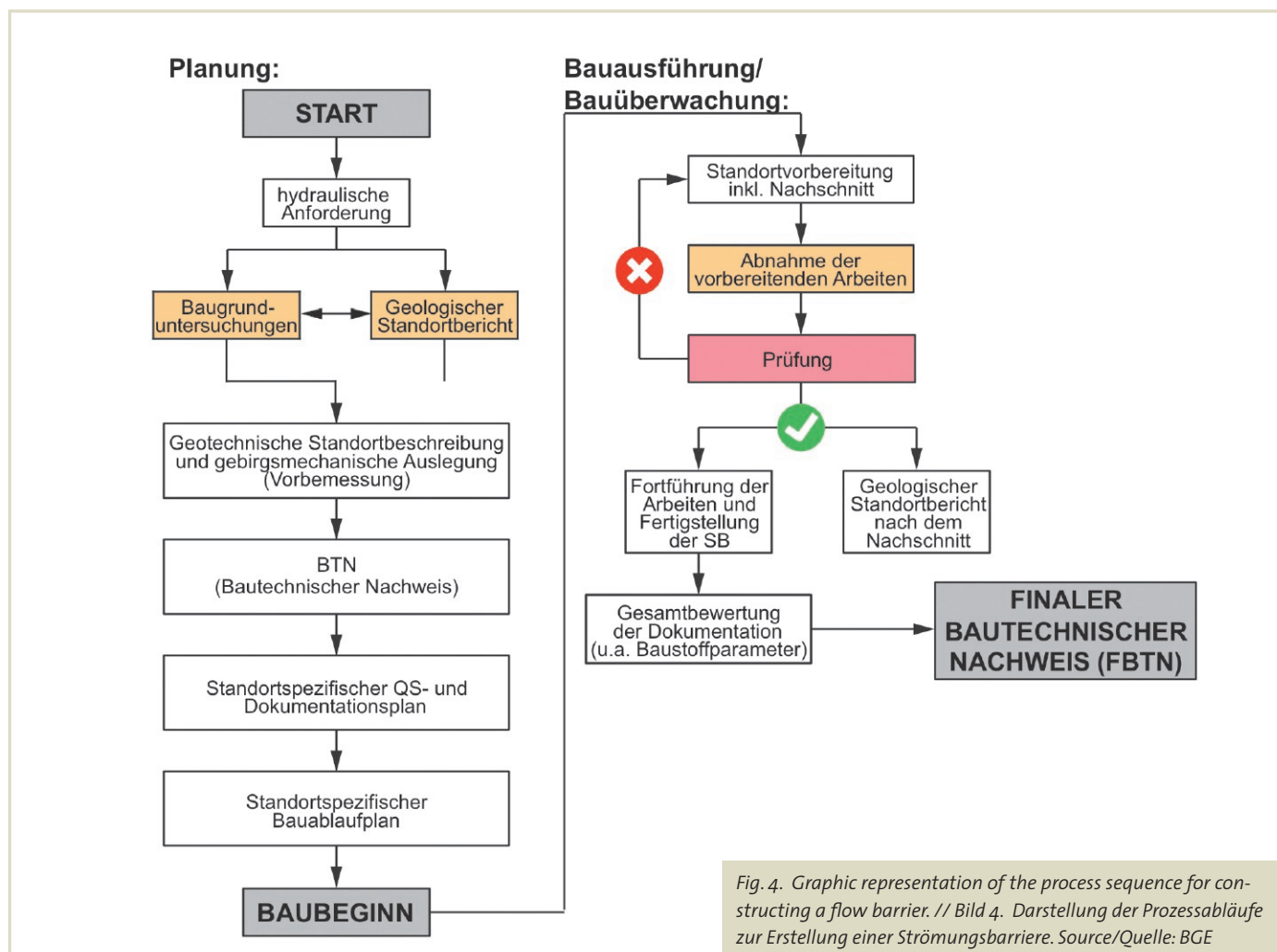


Fig. 4. Graphic representation of the process sequence for constructing a flow barrier. // Bild 4. Darstellung der Prozessabläufe zur Erstellung einer Strömungsbarriere. Source/Quelle: BGE

this type of shaft backfill was used to concrete vertical shafts and cavities (8). On site investigations carried out on vertical sealing areas also indicated that it was not generally possible in practice to remove the disaggregated zone because of its considerable expanse. A method was therefore developed for sealing the disaggregated zones and testing the resulting leaktightness by using injection technology. This system then underwent technical trials and subsequently became part of routine operations.

In summary it can be said that the erection of the pilot structures served to confirm the general effectiveness of Sorel concrete for the construction of sealing barriers.

## 5 Planning process with subsurface investigations

The scale of the geomechanical damage and the varying nature of the site conditions meant that extensive geotechnical measurements were required in order to build up a picture of the flow barrier zones. An appropriately structured planning process was subsequently developed for each barrier and this has now become established practice (Figure 4).

The position of the barrier seal and the structural geometry of the mine workings were first established in a preliminary study based on the mine plans and the available site data. A structural model was then produced on this basis as part of safety assessment required for the building work. This model reproduces the system status of the mine workings and, in addition, takes ac-

## 5 Planungsprozess mit Baugrunduntersuchung

Aufgrund der erheblichen gebirgsmechanischen Schädigung und der teilweise sehr unterschiedlichen Standortbedingungen sind umfangreiche geotechnische Messungen zur Charakterisierung der Bereiche der SB erforderlich. Hierfür ist ein entsprechend strukturierter und inzwischen etablierter Planungsprozess für jede SB entwickelt worden (Bild 4).

Die Lage der Abdichtbauwerke und Bauwerksgeometrien im Grubengebäude wurde in einem ersten Schritt mit einer Vorstudie anhand des Risswerks und vorliegender Standortdaten hergeleitet. Auf dieser Grundlage wurde im Rahmen von Sicherheitsbewertungen für die baulichen Maßnahmen ein Strukturmodell erstellt. Mit dem Modell wird einerseits der Systemzustand des Grubengebäudes abgebildet, andererseits werden die relevanten Prozesse und Ereignisse im Grubengebäude berücksichtigt, welche die Strömungsverhältnisse und den Transport von Radionukliden im Fall eines AÜL oder nach der Stilllegung beeinflussen können. Das Ergebnis der Berechnungen sind Bereiche im Grubengebäude, an die hydraulische Anforderungen gestellt werden, um einer unkontrollierten und schnellen Ausbreitung von Radionukliden entgegenzuwirken. Daraus leiten sich die Lage und ein hydraulischer Mindestwiderstand ( $W_{\min}$  in  $\text{m}^{-3}$ ) für die einzelnen SB ab und diese bilden die grundlegende Anforderung an die Bauplanung und -ausführung.

Die Bauplanung beginnt mit einer detaillierten Baugrunduntersuchung (Bild 5). Hierfür werden geotechnische Messungen (Kon-



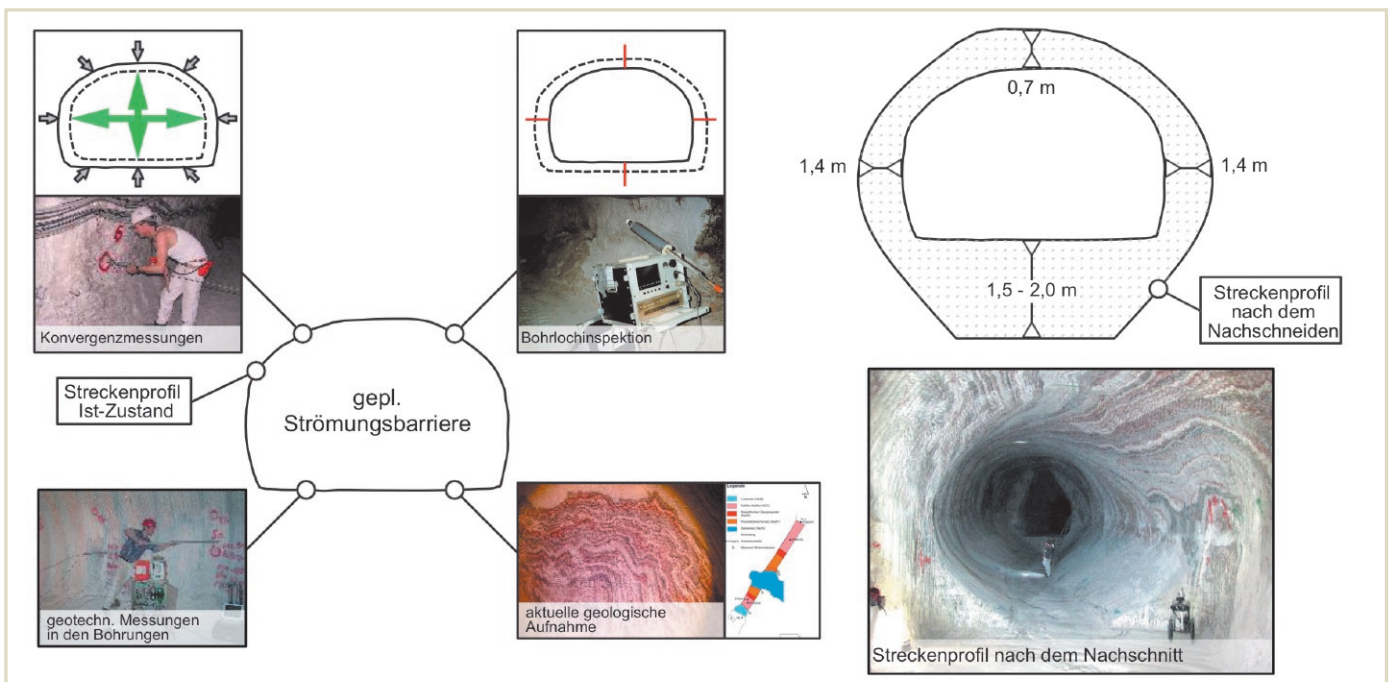


Fig. 5. Subsurface investigations (left) and derived re-profiling of the roadway contours (right).

Bild 5. Darstellung der Baugrunduntersuchungen (links) und daraus abgeleitete Nachschnitt der Streckenkontur (rechts). Source/Quelle: BGE

count of the relevant processes and events taking place below ground that might affect the flow conditions and the transport of radionuclides in the event of solution inflow developing on a beyond-design basis, or following the closure of the mining facility. These model calculations serve to identify those underground areas that are subject to special hydraulic requirements aimed at counteracting any uncontrolled or rapid propagation of radionuclides. From this it is possible to derive the position of the individual flow barriers and the minimum hydraulic resistance level ( $W_{\min}$  in  $\text{m}^{-3}$ ) to be achieved – these criteria being fundamental to the planning and execution of the project.

Project planning starts with a detailed investigation of the construction base (Figure 5). This involves carrying out geotechnical measurements (convergence measurements, borehole surveys, permeability measurements, stress measurements) and an up-to-date geological ground survey. All disused boreholes that are of relevance in and around the barrier zone also have to be documented and filled-in, ahead of the construction work, in line with requirements. The geotechnical measurements will then be used to generate a design calculation and the geometry of the barrier structure (target cross section for the roadway profile cut and required hydraulic length) will be derived from this on the basis of the respective hydraulic specifications (9). The next step is to produce a design verification. This will show that the requirements for hydraulic resistance as defined from the modelling work can be met on the basis of the geomechanical constraints applying at the site in question. Here the target parameter for hydraulic resistance is usually one order of magnitude higher than the minimum requirement in order to ensure that the barrier seal measures up to the required standards and is of the optimum quality for that particular site. The design verification also confirms that the assumptions made at the modelling stage, e.g. material behaviour, impact of boreholes, etc., are actually real-

vergenzmessungen, Bohrlochinspektion, Permeabilitätsmessungen, Spannungsmessungen) sowie eine aktuelle geologische Aufnahme durchgeführt. Zusätzlich werden relevante Altbohrungen im Bereich der SB erfasst und vorlaufend qualitätsgerecht verfüllt. Aus den geotechnischen Messungen erfolgt dann eine Auslegungsrechnung, bei der auf Grundlage der jeweiligen hydraulischen Anforderungen die Bauwerksgeometrie (Sollquerschnitt für den Streckennachschnitt und notwendige hydraulische Länge) abgeleitet wird (9). In einem weiteren Schritt wird ein Bautechnischer Nachweis erstellt. In diesem wird gezeigt, dass die Anforderungen des hydraulischen Widerstands aus der Modellierung auf Grundlage der bergsmechanischen Randbedingungen am jeweiligen Standort erreicht werden können. Dabei liegt der Zielparame- ter für den hydraulischen Widerstand in der Regel um eine Größenordnung über der Mindestanforderung, um eine qualitätsgerechte und bestmögliche Abdichtung in diesem Bereich sicher erreichen zu können. Zusätzlich belegt der Bautechnische Nachweis, dass die in den Modellierungen getroffenen Annahmen, z.B. Materialverhalten, Einfluss von Bohrungen, tatsächlich eingehalten werden können. Der Bautechnische Nachweis liefert die Grundlage zur Erstellung eines standortspezifischen Qualitäts-sicherungs-(QS) und Dokumentationsplans. Auf Basis des QS- und Dokumentationsplans wird ein Bauablaufplan erstellt, in dem die durchzuführenden Arbeiten aufgelistet werden. Auf Basis dieser technischen Planungen werden die berg- und atomrechtlichen Antragsunterlagen den zuständigen Behörden übermittelt.

Nach Vorlage der behördlichen Genehmigung kann mit dem Bau der SB begonnen werden. Dazu wird zunächst der Standort inklusive des Nachschnitts vorbereitet und es erfolgt eine technische Abnahme und geologische Aufnahme des Standorts. Erfüllt die Abnahme die standortspezifischen Anforderungen, können die Arbeiten fortgeführt werden, ansonsten sind zusätzliche Arbeiten nötig und der Standort wird anschließend erneut geprüft.



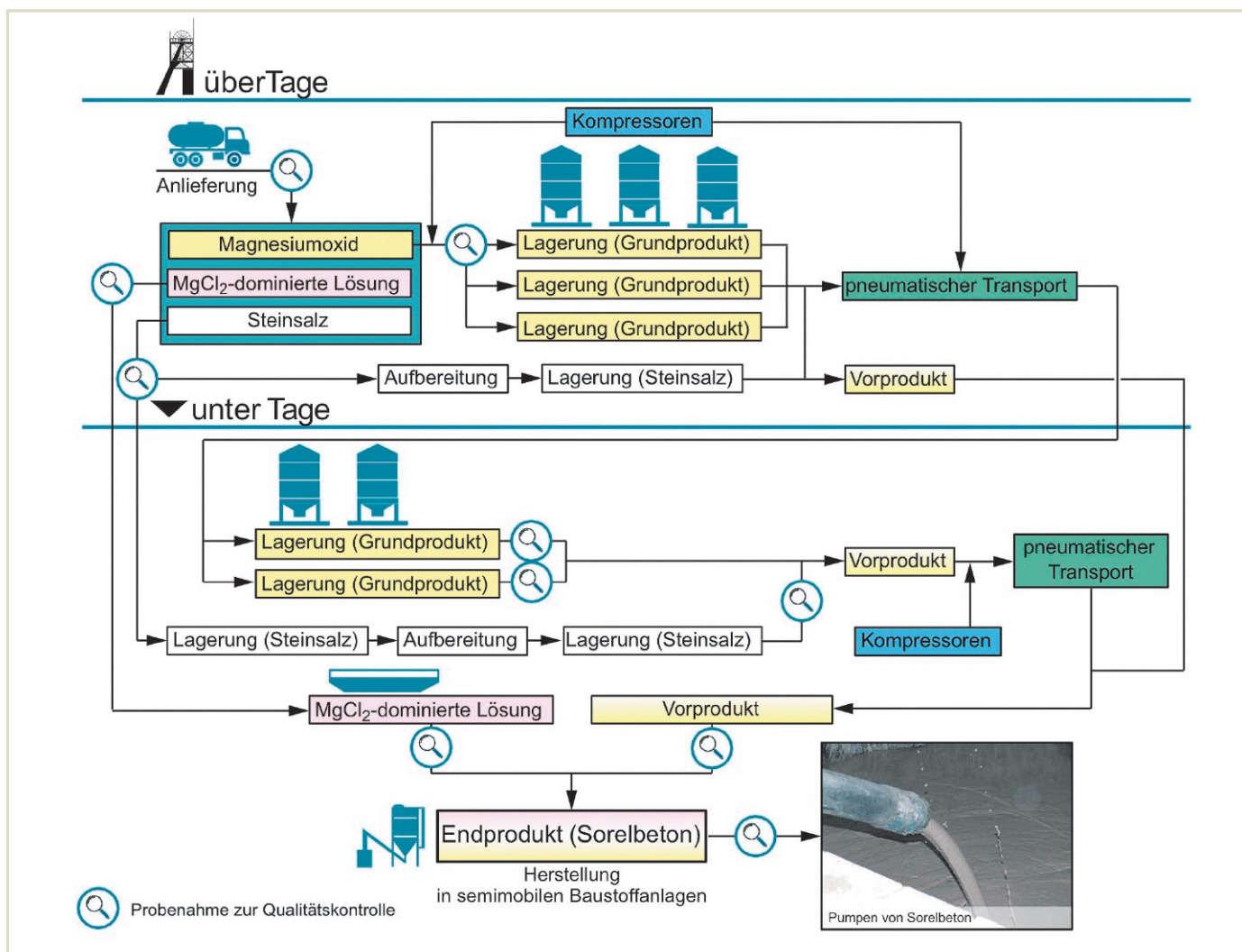


Fig. 6. Production set-up and material logistics scheme for the preparation of Sorel concrete.  
Bild 6. Produktion und Materiallogistik zur Herstellung von Sorelbeton. Source/Quelle: BGE

ised. The design verification provides the basis for drawing up a site-specific quality assurance (QA) and documentation plan. The QA and documentation plan is used for preparing a work schedule that lists all the different tasks that have to be completed. The application documents required under mining and nuclear legislation are then submitted to the relevant authorities on the basis of these technical plans.

Once approval has been obtained from the authorities the barrier construction work can commence. The barrier zone and the new profile cut are then prepared and a technical inspection is carried out in conjunction with a geological survey of the area. If the inspection meets the site-specific conditions the project can move to the next stage, otherwise additional work will have to be undertaken and the site will have to be checked over again.

The performance of the flow barrier is then confirmed in a final design verification based on the results of the QA audit, the building supervision process and, where applicable, additional geotechnical measurements. In order to determine the relevant parameters for the project specially adapted building materials tests were developed on the basis of existing standards. Various procedures were introduced in order to ensure that the building materials met the required quality standards. These included

Die Funktionalität der SB wird auf Basis der Ergebnisse der QS-Prüfungen, der Bauüberwachung und bei Bedarf ergänzender geotechnischer Messungen in einem finalen bautechnischen Nachweis belegt. Auf Grundlage bestehender Normen wurden hierfür speziell angepasste Baustoffprüfungen zur Bestimmung relevanter Parameter entwickelt. Zur Sicherstellung der Baustoffqualität erfolgen Eingangskontrollen der Baustoffkomponenten, Rezepturprüfungen, Überwachung der Suspensionsparameter (Temperatur, Luftporengehalt, Fließmaß, Suspensionsdichte) und Untersuchungen an Rückstellproben (Permeabilität, Ersatzkompaktionsmodul, einaxiale Druckfestigkeit) (6).

## 6 Logistik und Qualitätskontrolle

Aus den Erfahrungen mit der Erstellung der Pilotbauwerke wurden ein entsprechender Maschinenpark und eine routinierte Logistik geplant und installiert (Bild 6). Die notwendigen Komponenten zur Herstellung werden teils angeliefert (MgO, MgCl<sub>2</sub>-dominierte Lösung, Steinsalz), teils können Komponenten aus dem eigenen Betrieb (Eigensalz aus Streckenauffahrungen, gefasste MgCl<sub>2</sub>-dominierte Lösung) verwendet werden. Der Maschinenpark erlaubt die Herstellung der Trockenmischung (Vorprodukt aus Steinsalz und MgO) in stationären Baustoffanlagen (BA) sowohl über Tage

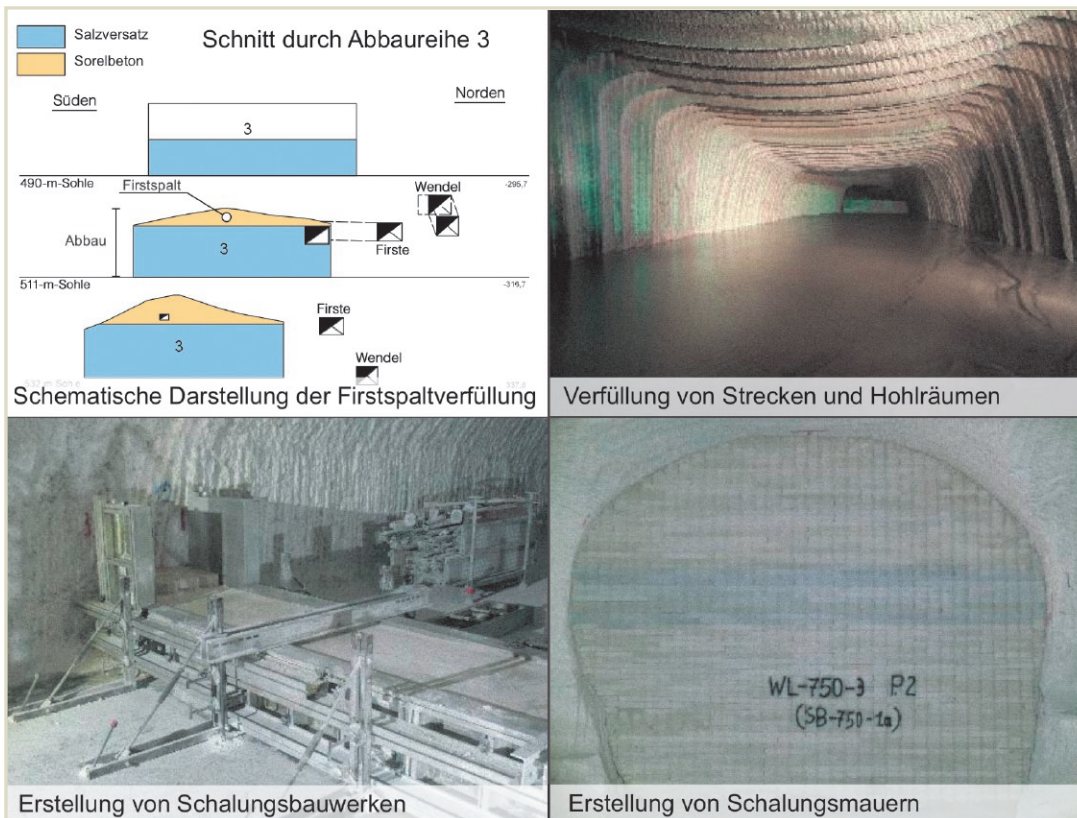


Fig. 7. Sorel concrete being applied as a cavity stabilisation medium at Schachtanlage Asse II.  
 Bild 7. Verwendung von Sorelbeton für Stabilisierungsmaßnahmen im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II.  
 Source/Quelle: BGE

incoming inspections of the material constituents, formulation checks, monitoring of the suspension parameters (temperature, air void content, slump and suspension density) and analysis of retention samples (permeability, equivalent compaction modulus, uniaxial compressive strength) (6).

## 6 Logistics and quality control

The experience acquired from the pilot barrier projects was used to plan and install the operating plant and equipment and a proven logistics system (Figure 6). Some of the constituent building materials had to be brought in (MgO, MgCl<sub>2</sub>-predominant solution, rock salt) while some elements could be sourced at the mine (salt from roadway drivages, MgCl<sub>2</sub> solution prepared on site). The assembled operating plant was designed for the production of a dry mix (feedstock based of rock salt and MgO) in stationary material delivery systems that were set up both above ground and on the 700 m level. The Sorel concrete suspension is then mixed in semi-mobile supply units installed close to the target zone before being pumped into the placement point at a rate of 10 to 20 m<sup>3</sup>/h. An extensive monitoring programme has been established in order to check the quality of the individual components and final products. The mineralogical, chemical and physical properties of the constituents are analysed at various points in order to ensure that the barrier filling process meets all the specified requirements.

## 7 Using Sorel concrete for stabilisation measures

As well as being used for constructing barrier seals Sorel concrete is also employed at the Schachtanlage Asse II for filling residual cavities and for creating the supporting structures needed for stabilising the mine's existing load-bearing systems (Figure 7).

als auch auf der 700 m-Sohle. Die Anmischung der Sorelbeton-suspension erfolgt dann in semimobilen BA im Nahbereich des zu verfüllenden Bereichs. Von diesen BA wird die Sorelbetonsuspension mit 10 bis 20 m<sup>3</sup>/h in die Bauwerke gepumpt. Zur Qualitätskontrolle der verwendeten Komponenten und den Produkten ist ein umfangreiches Überwachungsprogramm eingerichtet. An mehreren Punkten erfolgt eine mineralogische, chemische und physikalische Charakterisierung der Komponenten, sodass im Anschluss eine qualitätsgerechte Verfüllung der Bauwerke garantiert werden kann.

## 7 Verwendung von Sorelbeton für Stabilisierungsmaßnahmen

Neben der Verwendung des Sorelbetons für den Bau von Abdichtbauwerken wird der Baustoff für Resthohlraumverfüllungen von noch offenen Hohlräumen und die Erstellung von Stützbauwerken zur Stabilisierung des Tragsystems im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II verwendet (Bild 7).

Der mit Abstand größte Teil der während der Gewinnungszeit aufgefahrenen Abbaue befindet sich an der sogenannten Südflanke des Grubengebäudes. Dieses Baufeld ist aufgrund seiner Lage und Größe von größter Bedeutung für das gebirgsmechanische Verhalten des gesamten Grubengebäudes. Die lange offene Standzeit der Abbaue und die unterdimensionierten Tragelemente führten zu fortschreitenden Schädigungsprozessen und damit zu einer Vielzahl von Schwebenbrüchen, Rissbildungen in den Pfeilern sowie Schädigungen der umgebenden Gebirgsbereiche, insbesondere in der Anbaubank zum lösungsführenden Deckgebirge. Um der verformungsbedingt zunehmenden hydrogeologischen Gefährdung entgegenzuwirken, werden seit Mitte der 1990er Jahre die Abbaue zur Stabilisierung verfüllt. Dies erfolgte

The majority of the chambers excavated during the mine's active production period are located in the southern flank of the mine workings. Because of its position and size this particular area has a major influence on the geomechanical behaviour of the mine as a whole. The undersized design of the supporting elements, combined with the many years during which the workings were left open, have resulted in progressive degradation and caused a large number of roof fractures, fissuration of the pillars and damage to the surrounding strata zones, particularly in the measures attached to the solution-bearing overburden. In order to counteract the increasing hydrogeological risk presented by ongoing deformation an operation was launched in the mid-1990s to stabilise the workings by backfilling. This was initially based on pneumatic stowing, with the material being blown directly into the open chambers. At the end of 2009 it was decided that the residual cavities could also be filled with Sorel concrete as part of an operation aimed at taking precautionary measures to reduce the likelihood of solution ingress and hence avoid the consequences of inflows on a beyond-design level. The roof crevices (residual cavities) that had developed in the extraction chambers due to the settlement of the salt backfill, along with selected roadways and other cavity spaces, were therefore filled with Sorel concrete in order to keep deformation-prone cavity development to an absolute minimum and stabilise the mine support system. By June 2019 a total of some 244,000 m<sup>3</sup> of Sorel concrete had been pumped into the mine for the filling of roof crevices and residual cavities, thereby backfilling almost 70% of the former extraction chambers and a large part of the now disused roadway cavities. Measurement-based monitoring now shows that the Sorel concrete filling operation and the associated reduction in the number of convergence-prone cavities have proved effective in reducing the deformation rate.

Sorel concrete, which can be used to create formwork or as a basis for mould castings and interlocking pavers, was also employed as part of the general operation to renovate those sections of roadway exhibiting serious geomechanical damage. The aim here has been to provide some localised stabilisation in the damaged areas (which included the repair of a spiral transport roadway) and in this way to keep the mine infrastructure open and accessible.

## 8 Technical progress to date

To meet the particular conditions prevailing at Schachtanlage Asse II Sorel concrete type A1 and various other product formulations were developed and tested on an industrial scale for the filling and sealing operations required as part of the emergency planning preparations. Residual-cavity filling operations have now been under way at the mine since 2005 using equipment that has been specifically adapted for Sorel concrete. The quality of the barrier seals and the success of the stabilisation work in heavily damaged areas have demonstrated the effectiveness of Sorel concrete and confirmed that this material is generally suitable for further backfilling operations of this kind. A total of 32 flow barriers have now been constructed since 2006 and 16 of these have already undergone final functional verification. This verification process serves to confirm that flow barriers of



this kind are capable of achieving the required hydraulic resistance.

By July 2019 some 368,500 m<sup>3</sup> of cavity space had been filled with Sorel concrete. This included about 16,100 m<sup>3</sup> of material for the building of core barriers, 36,000 m<sup>3</sup> for abutments and some 60,300 m<sup>3</sup> for support packs.

However, the on-site conditions – which can be less than favourable in some areas – have already posed a number of technical challenges and these will continue to require customised and site-specific solutions as the project moves forward. In the course of the coming years an additional 270,000 m<sup>3</sup> or so of Sorel concrete is likely to be deployed at the Schachanlage Asse II workings as part of a programme of emergency and preventive measures and for the ongoing stabilisation of the mine support system. This is considered essential in order to maintain the highest possible safety levels, in view of forthcoming operations to retrieve the radioactive waste, and to counteract the degradation processes that are continuing below ground.

#### References / Quellenverzeichnis

- (1) Kamlot, P. et. al.: Geomechanical assessment of the Asse II operation phase until radioactive waste retrieval using large 3D-models. Mechanical Behavior of Salt VII – Roberts, Mellegard & Hansen (eds.). Taylor & Francis Group, London, 2015.
- (2) Teichmann, L., Heydorn, M., Köhler, J.: Einsatz von Sorelbeton für Verschlussbauwerke und Stabilisierungsmaßnahmen in der Schachanlage Asse II. 3. Internationales Freiburger Fachkolloquium – Versatz und Baustoffe im Bergbau 05.–06.10.2017. TU-Freiberg, Freiberg.
- (3) Wasserdichte Verdämmung im Steinsalzgebirge. Glückauf 38 (1902) Heft 14, S. 307–309.
- (4) Heydorn, M. et. al.: Schachanlage Asse II Anwendungsversuch Pilotströmungsbarriere PSB A1. Bergbau 4/2016.
- (5) Institut für Gebirgsmechanik: Ergebnisse der geotechnischen Messungen am Standort der PSB A1 nach Bau der Strömungsbarriere. Leipzig 30.04.2008.
- (6) Meyer, T. et. al.: Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagungsband der Fachtagung Messen in der Geotechnik 2008, Braunschweig.
- (7) Institut für Gebirgsmechanik: Ergebnisse der Erkundungen am Standort BW-K2C-750-1. Leipzig, Februar 2007.
- (8) ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH: Untersuchungsprogramm Blindschacht 4, 800 m-Sohle bis 850 m-Sohle. Erfurt, 15.05.2009.
- (9) Weise, D. et al.: Geotechnische Standorterkundungen und gebirgsmechanischer Funktionsnachweis für Strömungsbarrieren im Bergwerk Asse im Rahmen der Schließungsmaßnahmen. 36. Geomechanik-Kolloquium. Leipzig, November 2007.

#### Authors / Autoren

Dipl.-Ing. Jens Köhler, Dipl.-Ing. Lutz Teichmann,  
Dipl.-Ing. Matthias Heydorn, Dipl.-Geow. Dr. Paul Eric Wolff,  
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH,  
Schachanlage Asse II, Remlingen

zunächst mit Blasversatz, der in die Abbaue eingebracht wurde. Zusätzlich wird seit Ende 2009 im Rahmen der Umsetzung der Vorsorgemaßnahmen zur Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenzen eines auslegungsüberschreitenden AÜL die Verfüllung von Resthohlräumen mit Sorelbeton betrieben. Somit wurden die durch Eigensetzung des Salzversatzes in den Abbauen entstandenen Firstspalte (Resthohlräume) sowie ausgewählte Strecken und Hohlräume mit Sorelbeton verfüllt, um den verformungsaktiven Hohlraum weitestgehend zu minimieren und das Tragsystem zu stabilisieren. Insgesamt wurden bis Juni 2019 ca. 244.000 m<sup>3</sup> Sorelbeton für die Firstspalt- und Resthohlraumverfüllung in das Grubengebäude eingebracht und somit fast 70% der ehemaligen Abbaue nachverfüllt und ein Großteil der ehemaligen Hohlräume in Strecken verfüllt. Die messtechnische Überwachung des Grubengebäudes zeigt, dass mit den durchgeführten Sorelbetonverfüllungen und der damit verbundenen Reduzierung der konvergenzaktiven Hohlräume eine degressive Entwicklung der Verformungsraten erreicht werden konnte.

Weiterhin kommen im Rahmen der Sanierung von gebirgsmechanisch stark geschädigten Streckenabschnitten Schalungswände aus Sorelbeton, als Formguss und als Rasengittersteine zum Einsatz. Diese haben die Aufgabe, die geschädigten Bereiche, z. B. Wendelstrecke, lokal zu stabilisieren und somit die weitere infrastrukturelle Nutzung zu ermöglichen.

#### 8 Status der technischen Umsetzung

Aufgrund der speziellen Standortbedingungen in der Schachanlage Asse II wurden für die im Rahmen der Notfallvorsorge umzusetzenden Verfüll- und Abdichtmaßnahmen der Sorelbeton A1 sowie eine Reihe von Rezepturvarianten entwickelt und großmaßstäblich erprobt. Seit 2005 werden Resthohlraumverfüllungen mit einem eigens für Sorelbetonverfüllungen angepassten Maschinenpark durchgeführt. Mit der qualitätsgerechten Erstellung von Abdichtbauwerken und der erfolgreichen Stabilisierung von stark geschädigten Bereichen des Grubengebäudes kann heute konstatiert werden, dass der Sorelbeton erfolgreich eingesetzt wurde und generell für die noch anstehenden Verfüllmaßnahmen geeignet ist. Seit 2006 wurden bereits 32 Strömungsbarrieren betoniert und für 16 SB liegen die finalen Funktionsnachweise bereits vor. Die finalen Funktionsnachweise zeigen, dass für alle SB ein ausreichender hydraulischer Widerstand erreicht werden konnte.

Insgesamt wurde mit Stand Juli 2019 ein Hohlraumvolumen von ca. 368.500 m<sup>3</sup> mit Sorelbeton verfüllt. Davon wurden ca. 16.100 m<sup>3</sup> für die Erstellung von Kernbarrieren, ca. 36.000 m<sup>3</sup> für Widerlager und ca. 60.300 m<sup>3</sup> als stützender Versatz eingebracht.

Aufgrund der teils ungünstigen Standortverhältnisse kommt es dennoch bei der Umsetzung zum Teil zu technischen Herausforderungen, für die entsprechend angepasste und situationsbezogene Lösungen gefunden wurden und auch in Zukunft gefunden werden müssen. In das Grubengebäude der Schachanlage Asse II müssen im Rahmen der Notfall- und Vorsorgemaßnahmen sowie zur weiteren Stabilisierung des Tragsystems in den laufenden Jahren noch weitere ca. 270.000 m<sup>3</sup> Sorelbeton eingebracht werden. Nur so kann im Hinblick auf eine anstehende Rückholung der radioaktiven Abfälle und aufgrund der weiter fortschreitenden Schädigungsprozesse ein möglichst hohes Sicherheitsniveau erreicht werden.