

Meeting Technical, Ecological, and Social Challenges in the Decommissioning of Potash Mines in Eastern Germany

With annual production of almost 3.5 mt of K_2O , former East Germany (GDR) was the third-largest producer of potassium, ranking behind only the Soviet Union and Canada. More than 80 % of production was intended for export, to obtain urgently required hard currency. For this reason, beginning in the 1970s, East Germany also began mining of otherwise unprofitable hard-salt deposits and geomechanically problematic carnallite fields. In the course of increasing concentration of available mining resources on maximizing production, moreover, the backfilling of mined-out cavities, necessary over the long run, was increasingly neglected. An additional development was the increasingly smaller dimensioning of the pillars used for supports in the mined fields, as well as increasingly long spans between supports in the mined-out cavities. The purpose here was to further reduce the specific expense of mining. All these developments led to a critical increase in geomechanical risks in the underground workings.

In the course of restructuring from a centrally planned to a market economy, only two of the total of nine potash mines were classified after German reunification as economically viable and were privatized. All six potash mines in the South Harz Mining Region were closed between 1991 and 1993.

A geomechanical assessment of the potash mines in the South Harz Region, conducted as early as 1992, came to the result that a number of mining-field sections in mines at Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt, and Bischofferode required securing measures in the form of backfilling of mining cavities. The purpose of these measures was to prevent danger to public objects on the ground such as communities, roads and streets, railway lines, and rivers. The current and predicted settlement at the surfaces above the mines reached a rate of up to 250 mm/a, and the increasingly strong and more frequent seismic events with Richter magnitudes up to three necessitated immediate action.

Elaboration in the present study covers the locally specific necessity, as well as the type and extent of back-filling and securing measures. As a result of the immediately and intensively conducted remedial measures taken, it was possible to prevent rock bursts and damage to public surface facilities. This documentation describes the safeguarding successes achieved to date, with appreciable reduction and stabilization of surface settlement and with reduction in the intensity of mining-induced seismic events.

Also presented are concepts updated to the state of the engineering art for securing a large number of potash mining shafts for long-term effectiveness in separation of the workings from the watercourse levels in the cap rock.

In the course of 100 years of potash mining in the South Harz Region, six mining dumps were operated, with a total volume of approximately 200 m³. They consisted of up to 95 % of water-soluble salts. Every year, precipitation dissolved up to 750,000 t of these salts, which enter as highly concentrated solution into watercourses and ground water. Explanation follows of measures implemented for minimization of this environmental pollution by covering dumps and by controlled drainage of salt solutions from the dumps, also designated as dump leach. To the extent possible, the controlled leach solutions are used in production of self-binding backfill, hydraulic stowing, as well as flooding of potash mines.

Finally, presentation is made of the results of the successful work until now by Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben (GVV), Sondershausen/Germany, for new use of decommissioned mining sites by settlement of new businesses and industries for creation of additional jobs and for revitalization of the previously monostructured South Harz Potash Mining Region.

Introduction

Closure of mining operations, especially underground mines, is normally a long-term, forward-planning and execution process. This was not the case, however, after reunification of Germany, where between 1990 and 1994, a state-controlled economy was transformed with a speed previously unknown in world history, into a free-market economy. The mining industry was also subjected to this transformation process (1).

In review of the initial situation in 1990 (Fig. 1), we shall initially treat the lignite industry, which covered 70 % of the primary-energy requirements of former East Germany. This extensive lignite mining occupied an area of approximately 140,000 ha. Market-demand

Einleitung

Die Stilllegung eines Bergbaubetriebs, besonders eines untertägigen, wird in der Regel längerfristig geplant und vorausschauend vollzogen. Nicht jedoch so nach dem politischen Umbruch im Osten Deutschlands, wo in den Jahren 1990 bis 1994 mit einem in der Weltgeschichte einmaligen Tempo die staatliche Planwirtschaft in die Marktwirtschaft überführt wurde. Diesem Umstrukturierungsprozess musste sich auch die Bergbauindustrie unterwerfen (1).

Im Rückblick auf die Ausgangssituation im Jahr 1990 (Bild 1) ist zunächst die Braunkohlenindustrie zu erwähnen. Sie deckte 70 % des Primärenergiebedarfs der ehemaligen DDR. Durch die extensive Braunkohlengewinnung waren rd. 140.000 ha Flächen bergbau-

Bewältigung von technischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen bei der Stilllegung von Kalibergwerken in Ostdeutschland

Mit einer jährlichen Produktion von fast 3,5 Mio. t K_2O war die ehemalige Deutsche Demokratische Republik (DDR) nach der Sowjetunion und Kanada der drittgrößte Kaliproduzent der Welt. Über 80% der Produktion war zur Beschaffung dringend benötigter Devisen für den Export bestimmt. Aus diesem Grund wurden ab den 1970er Jahren zunehmend auch unwirtschaftliche Hartsalzvorkommen sowie gebirgsmechanisch problematische Carnallitfelder abgebaut. Im Zuge der immer stärkeren Konzentration der verfügbaren Ressourcen auf eine Produktionsmaximierung wurde zudem der langfristig notwendige Versatz von Abbauhohlräumen zunehmend vernachlässigt. Hinzu kam, dass die Pfeiler als Tragelemente in den Abbaufeldern zunehmend schwächer dimensioniert und die Spannweite der Abbaufelder vergrößert wurden, um den spezifischen Aufwand bei der Gewinnung noch weiter abzusenken. All dies führte zu einem kritischen Anstieg von gebirgsmechanischen Risiken in den Grubengebäuden.

Im Zuge der Umstrukturierung der Volkswirtschaft von der staatlichen Planwirtschaft zur Marktwirtschaft konnten nach der Wiedervereinigung Deutschlands nur zwei der insgesamt neun Kalibergwerke als betriebswirtschaftlich überlebensfähig eingestuft und privatisiert werden. Alle sechs Kalibergwerke des Südharz-Reviere mussten ihre Produktion noch in den Jahren 1991 bis 1993 einstellen.

Eine bereits im Jahr 1992 eingeleitete gebirgsmechanische Bewertung der Kaligruben des Südharz-Reviere kam zu dem Ergebnis, dass in den Bergwerken Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt und Bischofferode mehrere Grubenfeldesteile mit Verwahrmaßnahmen in Form von Hohlräumversatz zu sichern sind, um gemeinschädliche Gefahren für die Schutzgüter über Tage wie Ortschaften, Verkehrsstraßen, Eisenbahnlinien, Flüsse etc. abzuwehren. Die aktuellen und prognostizierten Absenkungen an der Tagesoberfläche erreichten bis zu 250 mm/a. Darüber hinaus machten die zunehmend stärker und häufiger auftretenden seismischen Ereignisse mit Magnituden bis zu drei teilweise ein unverzügliches Handeln notwendig.

Erläutert werden die standortspezifische Notwendigkeit sowie Art und Umfang der gewählten Versatz- und Sicherungsmaßnahmen. Dank der unmittelbar eingeleiteten und mit hoher Intensität durchgeführten Maßnahmen konnte das Auftreten von Gebirgsschlägen mit gemeinschädlichen Auswirkungen auf Übertage abgewendet werden. Dokumentiert wird der bisherige Verwahrerfolg mit deutlicher Reduzierung der Absenkungen an der Tagesoberfläche sowie mit dem Rückgang der Intensität der bergbauinduzierten seismischen Ereignisse.

Vorgestellt werden auch die entsprechend dem Stand der Technik fortgeschriebenen Konzepte zur Verwahrung der zahlreichen Kalischächte für eine langfristig wirksame Trennung der Grubengebäude von den wasserführenden Schichten im Deckgebirge.

Im Zuge der rund 100jährigen Kaliproduktion im Südharz-Revier sind sechs Rückstandshalden mit einem Gesamtvolumen von rd. 200 Mio. m^3 entstanden. Sie bestehen zu 95 % aus wasserlöslichen Salzen. Durch Niederschläge lösten sich jährlich bis zu 0,75 Mio. t Salz, die in Form von hochkonzentrierter Lösung diffus in die Vorfluter und in das Grundwasser gelangten. Erläutert werden die Maßnahmen zur Minimierung dieser Umweltbelastungen durch die Abdeckung von Halden und durch kontrollierte Fassung dieser auch als Haldenlaugen bezeichneten Salzlösungen. Die gefassten Laugen werden soweit wie möglich bei der Herstellung des selbstbindenden Spülversatzes sowie bei der nassen Verwahrung der Kaligruben durch Flutung eingesetzt. Schließlich werden die Ergebnisse der bisherigen erfolgreichen Arbeit der Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben (GVV), Sondershausen, zur Schaffung neuer Arbeitsplätze in dem zuvor monostrukturierten Kali-Südharz-Revier durch die Neuerschließung und die Neubesiedlung von Kali-Altstandorten mit Gewerbe und Industrie vorgestellt.

and operational cost-efficiency investigations after German reunification led to the findings that only eight of a total of 40 large open-cast lignite mines could profitably continue operations. These eight mines were privatized. The remaining mines, over an area of 100,000 ha, were shut down – in some cases from one day to the next – and efforts to secure and rehabilitate this area followed. The pattern was similar in the potash and salt mines. Only two potash mines and one salt mine were allowed to continue production and were privatized. The remaining six potash mines were closed. It was also necessary to close all twelve operational metal- and spar-ore mines, most of which had been unprofitable for decades. These included mines for tin, copper shales, fluorspar, barytes, and pyrites.

lich beansprucht. Betriebswirtschaftliche Untersuchungen und die Marktnachfrage führten zu dem Ergebnis, dass nur acht der insgesamt 40 Großtagebaue ihre Produktion fortsetzen können. Diese wurden privatisiert. Die restlichen Betriebe mit 100.000 ha Flächen mussten, teilweise von heute auf morgen, stillgelegt werden und waren in der Folge zu sichern und zu rekultivieren. Ähnlich war es im Kali- und Salzbergbau. Nur zwei Kali- und ein Steinsalzbergwerk konnten ihren Betrieb fortsetzen und wurden privatisiert. Die restlichen sechs Kalibergwerke mussten stillgelegt werden. Der Erz- und Spatbergbau war bereits seit Jahrzehnten stark defizitär, so dass alle zwölf Bergwerke ihre Produktion einstellen mussten. Darunter waren Bergwerke für Zinnerz, Kupferschiefer, Fluss- und

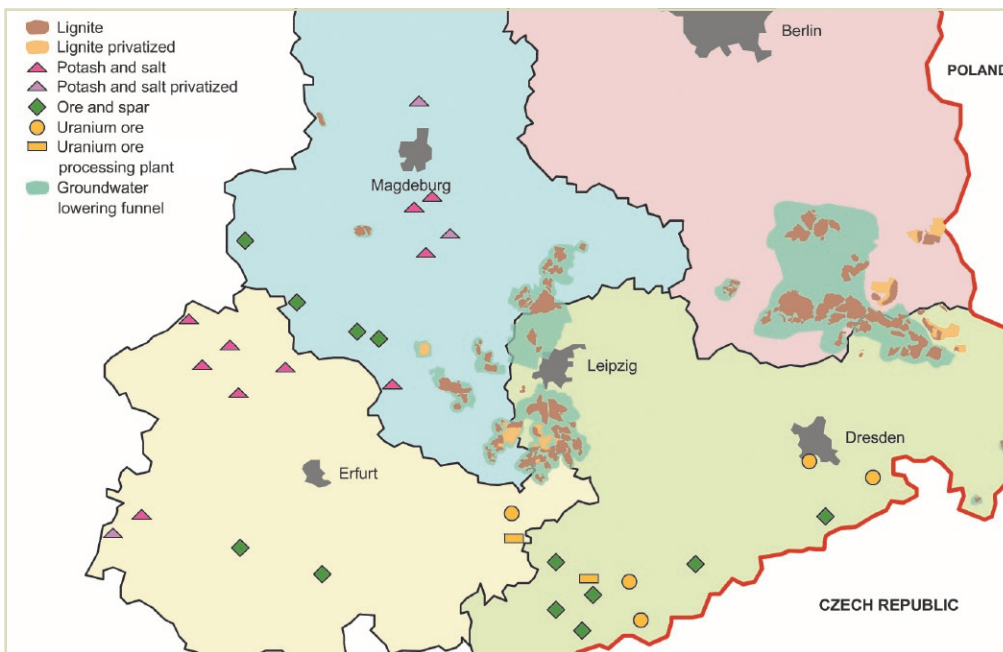


Fig. 1. Mining regions in the German accession states in 1990.
Bild 1. Bergbaustandorte neue Bundesländer um 1990.

Likewise, all operations producing uranium ore – all of which was required to be exported to the Soviet Union until 1990 – were also closed.

As a result, three tasks became necessary: swift but orderly mine closure, assurance of public safety on mining sites and their rehabilitation, and the use of restored sites for economic revitalization of previously monostructured mining regions. These tasks were assigned to three government-owned companies especially formed for this purpose:

- Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) in Senftenberg/Germany, for rehabilitation of lignite regions;
- Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben (GVV) in Sondershausen/Germany, for rehabilitation of potash, metal-ore, and spar-ore mining facilities (with merger since September of 2014 with LMBV); and
- Wismut GmbH in Chemnitz/Germany, for uranium-mining rehabilitation.

Schwerspat sowie Schwefelkies. Auch die Betriebe des Uranerzbergbaus, die ihre Produkte bis zum Jahr 1990 vollständig an die Sowjetunion zu liefern hatten, wurden komplett eingestellt.

Folglich standen drei Aufgaben an, nämlich die rasche, aber geordnete Stilllegung der Betriebe, die Herstellung der öffentlichen Sicherheit auf bergbaulichen Flächen sowie deren Wiedernutzbarmachung und drittens die Verwertung sanierter Flächen zur wirtschaftlichen Revitalisierung der monostrukturierten Bergbaureviere. Diese Aufgaben wurden auf drei eigens hierfür gegründete, bundeseigene Gesellschaften übertragen:

- die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) in Senftenberg für die Braunkohlesanierung,
- die Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben (GVV) mit Sitz in Sondershausen für die Kali-, Erz- und Spatbergbaubetriebe (seit September 2014 auf die LMBV verschmolzen) und
- die Wismut GmbH in Chemnitz für die Uranbergbausanierung.



Fig. 2. Closed mines of the South Harz Potash Mining Region, with salt facies.
Bild 2. Stillgelegte Bergwerke des Kali-Südharz-Reviere mit Salzfazies.

The sheer number of mining operations destined for closure, most of which would have otherwise continued production for decades to come – as well as the great range of the engineering and ecological challenges to be mastered in the closure, securing, and rehabilitation of the mines and of the areas occupied by mining operations – represented an historically unique and extraordinarily demanding technical and ecological mission. In the course of meeting these challenges, the companies involved conducted application-oriented research projects to fill gaps in knowledge and insights, with the resulting gain in a great number and diversity of findings.

The point of departure in the South Harz Potash Mining Region

Figure 2 shows the South Harz Potash Mining Region, whose six potash mines in Rossleben, Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt, Bischofferode, and Volkenroda were closed. During a period of about 100 years of potash mining there, approximately 559 mt of crude salt had been extracted. The mines occupied a total underground area of 15,600 ha. After strata convergence and backfilling, the volume of mining excavations remaining open amounted to around 130 m³. The potash seams, extending to a depth of 400 to 1,000 m, were as a rule worked using room-and-pillar techniques. The rooms were mined 10 m wide and 6 m high. To ensure structural stability of the workings, pillars 10 to 20 m wide between the rooms were left unmined. The excavated yield lost by allowing these pillars to remain therefore depended on the dimensions of the pillars.

From the onset, potassium export was a significant source of foreign exchange for former East Germany. This importance resulted in continuous expansion of underground potassium mining. Production of fertilizer was 1.2 mt of K₂O in 1950, which had doubled by 1970 and tripled by 1985. Over the same period, the export share rose from 60 to 83 %.

In the course of increasing concentration of available East German resources on production, beginning in the 1970s, the backfill of geomechanically critical mined-out cavities by hy-

Die große Anzahl der stillzulegenden Betriebe, von denen die meisten noch über Jahrzehnte hätten produzieren sollen, sowie die große Bandbreite der zu bewältigenden technischen und ökologischen Herausforderungen bei der Stilllegung, Verwahrung und Sanierung der Bergwerke sowie der bergbaulichen Flächen bedeutete eine historisch einmalige und technisch-ökologisch anspruchsvolle Aufgabe. Im Zuge der Umsetzung dieser Aufgaben wurden auch anwendungsorientierte Forschungsvorhaben zur Schließung von Wissens- und Kenntnislücken durchgeführt und vielfältige Erfahrungen sowie neue Erkenntnisse gewonnen.

Ausgangssituation im Kali-Südharz-Revier

Das Kali-Südharz-Revier, dessen sechs Kalibergwerke Roßleben, Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt, Bischofferode und Volkenroda stillgelegt wurden, ist in Bild 2 dargestellt. Im Zuge der rd. 100jährigen Kaliproduktion waren hier 559 Mio. t Rohsalz gefördert worden. Die Gruben hatten eine Gesamtausdehnung unter Tage von 15.600 ha. Der nach Konvergenz und Versatz offen gebliebene Grubenhohlraum belief sich auf 130 Mio. m³. Das in einer Teufe von 400 bis 1.000 m anstehende Kaliflöz wurde in der Regel im Room and Pillar-Abbau gewonnen. Die Kammern hatten eine Breite von ca. 10 m und eine Höhe von rd. 6 m. Zur Gewährleistung der Standsicherheit im Grubengebäude wurden zwischen den Abbaukammern Pfeiler in einer Breite von 10 bis 20 m stehen gelassen. Der Abbauverlust wurde damit maßgeblich durch die Pfeilerdimensionierung bestimmt.

Der Kaliexport war von Anfang an eine bedeutende Devisenquelle für die DDR. Daher musste die Untertageförderung ständig erhöht werden. So wurde die Düngemittelproduktion von 1,2 Mio. t K₂O im Jahr 1950 bis zum Jahr 1970 verdoppelt und bis 1985 verdreifacht. Gleichzeitig wurde der Exportanteil von 60 auf 83 % erhöht.

Im Zuge der immer stärkeren Konzentration der verfügbaren Ressourcen auf die Produktion wurde ab den 1970er Jahren der Versatz bergsmechanisch kritischer Abbauhohlräume mittels Spülversatz zunehmend vernachlässigt, ja sogar bis auf ein Bergwerk eingestellt (2). Gleichzeitig mussten auch weniger hoffige

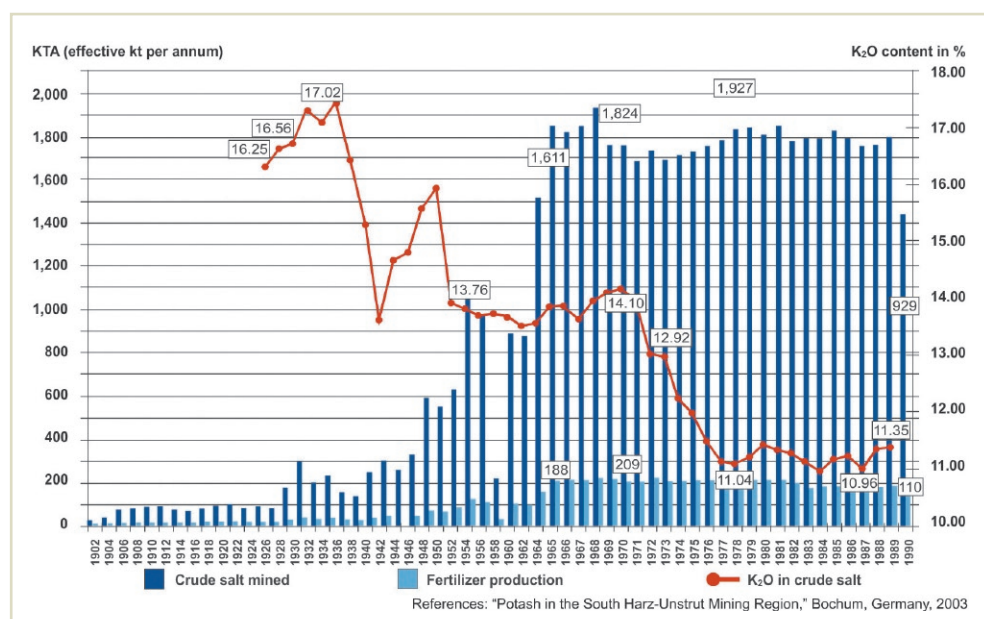


Fig. 3. Crude salt mined at Bleicherode, with K₂O content.
Bild 3. Rohsalzförderung und K₂O-Gehalt, Bergwerk Bleicherode.

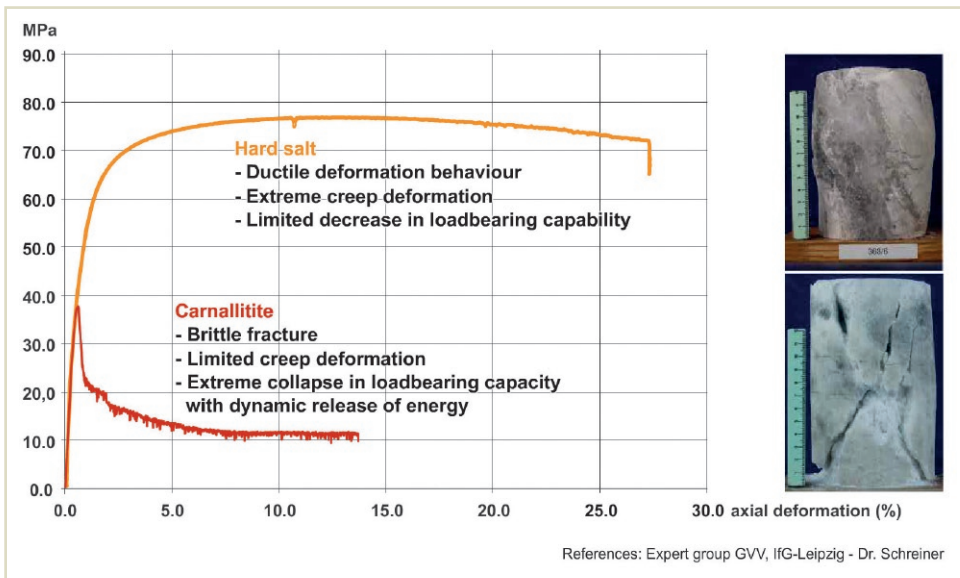


Fig. 4. Stress-strain diagram for hard salt and carnallite.
Bild 4. Spannungs-Verformungsdiagramm Hartsalz und Carnallitit.

draulic stowing was increasingly neglected – and was eventually discontinued in all mines except one (2). At the same time, it became necessary to extract lower-grade sections of potash seams to achieve output objectives. The selective extraction of pure hard salt (Figure 2) from adequately thick deposits was no longer sufficient. Beginning in the early 1970s, consequently, it became necessary in former East Germany to mine so-called mixed salt, i.e., a mixture of hard salt from thin seams, and of geomechanically critical carnallite (Figure 2) – and beginning in the 1980s, even the mining of pure carnallite fields was resorted to. The extraction of mixed salt and carnallite led to significant economic disadvantages owing to the resulting reduction of K_2O content – already low enough in international comparison – in the crude salt extracted from approximately 17 to 11%, as shown in Figure 3 for mining at Bleicherode (3).

The mining of carnallite over such an extensive area resulted in predictable geomechanical problems. As shown in Figure 4, hard salt in a tri-axial compression test exhibits ductile, i.e., plastic, deformation and gradually fails due to creep, with a moderate drop in loadbearing capability. Carnallite, on the other hand, tends to sudden brittle fracture, without creep-induced deformation, and with sudden reduction in loadbearing capability (4). This sudden collapse of the rock structure results in a dynamic release of energy. Finally of mention, beginning in the 1980s, it became necessary to modify the dimensions of the pillars and the widths of the extraction rooms to the very limits of feasibility, to further reduce extraction losses.

Geomechanical assessment of the potash mines in South Harz, and development of the concept for safeguarding measures

Enormous surface subsidence and severe seismic events induced by mining, particularly in the urban area of Sondershausen, motivated GVV in 1992 to quickly establish an interdisciplinary team of experts from the fields of geotechnics, geophysics, and hydrology. Together with experts from GVV, this team was assigned to subject the potash mines in South Harz to a comprehensive geotechnical assessment, and to prepare the securing measures

Lagerstättenteile abgebaut werden. Der selektive Abbau von reinem Hartsalz (Bild 2) in ausreichend mächtigen Ausbreitungen reichte nicht mehr aus, sodass ab den 1970er Jahren auch das sogenannte Mischsalz, d.h. geringmächtige Hartsalzpartien zusammen mit gebirgsmechanisch kritischem Carnallitit abgebaut wurden und ab den 1980er Jahren sogar auch reine Carnallititfelder. Der Abbau von Mischsalz und Carnallitit bedeutete zudem erhebliche wirtschaftliche Nachteile, weil damit ein starker Rückgang des nach internationalem Vergleich ohnehin niedrigen K_2O -Gehalts in der Rohsalzförderung von ca. 17% auf 11% verbunden war, wie aus Bild 3 für das Bergwerk Bleicherode hervorgeht (3).

Ein flächenhafter Carnallititabbau musste zwangsläufig zu gebirgsmechanischen Problemen führen. Denn während sich das Hartsalz, wie in Bild 4 dargestellt, im triaxialen Druckversuch duktil, das heißt plastisch verformt, allmählich kriechend nachgibt und seine Tragfähigkeit moderat abfällt, neigt Carnallitit zum plötzlichen Sprödbbruch, ohne Kriechverformung, mit einem raschen Traglastabfall (4). Dieser plötzliche Kollaps des Materialkörpers führt zu einer dynamischen Energiefreisetzung. Zu erwähnen ist schließlich, dass ab den 1980er Jahren zur weiteren Reduzierung der Gewinnungsverluste die Pfeiler und die Spannweiten der Baufelder grenzwertig dimensioniert wurden.

Gebirgsmechanische Bewertung der Kaligruben im Südharz, Entwicklung der Verwahrkonzeptionen

Enorme Oberflächenabsenkungen und starke bergbauinduzierte seismische Ereignisse, vor allem im Stadtgebiet Sondershausen, waren Veranlassung für die GVV, noch im Jahr 1992 ein interdisziplinär aus Geotechnikern, Geophysikern und Hydrologen zusammengesetztes Gutachterteam zusammen mit den Experten des Unternehmens damit zu beauftragen, die Kalibergwerke im Südharz geotechnisch einer umfassenden Bewertung zu unterziehen sowie die kurz- und mittelfristig erforderlichen Verwahrmaßnahmen zusammenzustellen. Auf der Grundlage der ersten Ergebnisse der Untersuchungen der Gutachter wurde resümiert (4):

- Die Bergwerke Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt und Bischofferode sind mit umfangreichen Maßnahmen durch den Versatz der gebirgsmechanisch kritischen Baufelder zu

required over the short to medium term. On the basis of initial assessment results of the experts, the measures summarized in the following were decided (4):

- It was necessary to secure the mines at Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt, and Bischofferode with extensive backfill of the mining cavities associated with critical geomechanical danger. For a number of these workings, recommendation was made for immediate initiation of backfill measures, or intensification of such efforts that had already begun.
- For the mines at Rossleben and Volkenroda, the investigations disclosed no safety risks with special need for security measures. It was accordingly possible to limit the securing of these mines to assurance of compliance with the regular catalogue of measures for orderly decommissioning of such workings, to include long-term securing of the shafts in accordance with the current status of scientific and technical knowledge.

The development of concepts for securing potash mines, and generally for salt mines, involves the following two focal points:

- Securing mine workings: It is an essential and basic requirement – both during the operational phase and, most especially, during the post-operational phase – to prevent any and all entry of water or aqueous solutions into the workings. In cases in which it is possible, and after assurance of geotechnical safety on a long-term basis, the workings can also be left unfilled, i.e., they can be secured without further filling on a so-called dry basis. In cases in which this is not possible – e.g., in the presence of lower inflow (fossil water from the underlying wall, from the time during which the deposits were created) that cannot be sealed off – the workings must be flooded with a suitable flooding medium.
- Securing of the surface shafts: Principally, the surface shafts must, by permanent means, be sealed watertight from the workings and the groundwater horizons.

For the individual workings, the following securing concepts were developed on the basis of the above-stated investigations:

- Sondershausen, Bleicherode, and Sollstedt: Securing on a dry basis, with backfill of extensive geomechanically critical cavities.
- Bischofferode: Flooding of the mine with suitable medium owing to continuous ingress from lower inflow, but only after securing the workings by backfilling the geomechanically critical cavities. Owing to the circumstances dictated by the presence of various salt facies in the individual extraction rooms, flooding of these workings takes place with leach solutions, some containing $MgCl_2$ and some containing NaCl. Owing to the relatively steep and consistent slope of the workings toward the south, it is furthermore possible to flood the mine only partially, up to a certain level.
- Rossleben: Dry securing of closed mines on a dry basis. Studies determined that the mine was not suitable for creation of a waste disposal facility. Within the context of the residual deposits of potash still remaining in the mine, and the possibility of their possible future extraction, the decision was reached not to put the leach solution, containing NaCl – which in any case was small in amount – resulting from the mining waste into the mine.

sichern. Dabei wurde für einige Baufelder der unverzügliche Beginn bzw. die Intensivierung bereits eingeleiteter Versatzmaßnahmen empfohlen.

- Für die Bergwerke Roßleben und Volkenroda wurden keine Sicherheitsdefizite mit besonderem Handlungsbedarf festgestellt. Die Verwahrung der Gruben dieser Bergwerke konnte sich auf die Erfüllung des regulären Maßnahmenkatalogs für ein ordnungsgemäßes Verlassen des Grubengebäudes, u.a. auf eine langzeitsichere Verwahrung der Schächte nach dem Stand der Technik beschränken.

Bei der Gestaltung der Verwahrkonzeption von Kali- bzw. generell von Salzbergwerken stehen zwei Schwerpunkte im Focus:

- Verwahrung des Grubengebäudes: Grundsätzlich gilt es, sowohl in der Betriebs- als auch und ganz besonders in der Nachbetriebsphase, jeglichen Zutritt von Wasser bzw. wässrigen Lösungen in das Grubengebäude auszuschließen. Dort, wo dies möglich ist, kann die Grube – nach Herstellung der geotechnischen Langzeitstandsicherheit – „luffterfüllt“, d.h. „trocken“ verwahrt werden. Dort, wo dies nicht möglich ist, wie z.B. beim Vorliegen von nicht abdichtbaren Liegendzuflüssen, ist die Grube mit einem geeigneten Flutungsmedium zu fluten. In diesem Falle wird von „Nassverwahrung“ gesprochen.
- Verwahrung der Tagesschächte: Generell sind die Tagesschächte gegenüber dem Grubengebäude sowie den Grundwasserhorizonten langzeitsicher wasserdicht zu isolieren.

Für die einzelnen Grubengebäude wurden auf der Grundlage vorgenannter Untersuchungen folgende Verwahrkonzeptionen ausgearbeitet:

- Sondershausen, Bleicherode und Sollstedt: Luffterfüllte Verwahrung mit Versatz umfangreicher, geomechanisch kritischer Hohlräume.
- Bischofferode: Nassverwahrung wegen des anhaltenden Zutritts von Liegendzuflüssen (fossile Wässer aus der Entstehungszeit der Lagerstätte), jedoch erst nach der Sicherung des Grubengebäudes durch Versatz der geomechanisch kritischen Hohlräume. Vor dem Hintergrund des Vorliegens unterschiedlicher Salzfacies in den einzelnen Baufeldern erfolgt die Flutung des Grubengebäudes teils mit $MgCl_2$ - und teils mit NaCl-haltiger Lauge. Aufgrund der relativ steilen und gleichmäßigen Neigung des Grubengebäudes nach Süden ist es ferner möglich, die Grube nur teilweise, bis zu einem bestimmten Niveau zu fluten.
- Roßleben: Luffterfüllte Trockenverwahrung. Untersuchungen zur Eignung der Grube zur Errichtung einer Abfalldeponie waren negativ. Vor dem Hintergrund der hier verbliebenen Restvorräte an Kali und deren eventueller Gewinnung in der Zukunft wurde von der Entsorgung der – ohnehin geringen Menge – der NaCl-haltigen Haldenlauge in die Grube Abstand genommen.
- Volkenroda – Pöthen: Nassverwahrung durch Flutung mit Haldenlauge. Grundsätzlich eignete sich die Grube für eine luffterfüllte Trockenverwahrung. Vor dem Hintergrund des Anfalls großer Mengen NaCl-haltiger Lauge von der Halde Menteroda bot es sich wirtschaftlich und ökologisch an, den Grubenhohlraum für die Entsorgung der sonst in die Oberflächengewässer

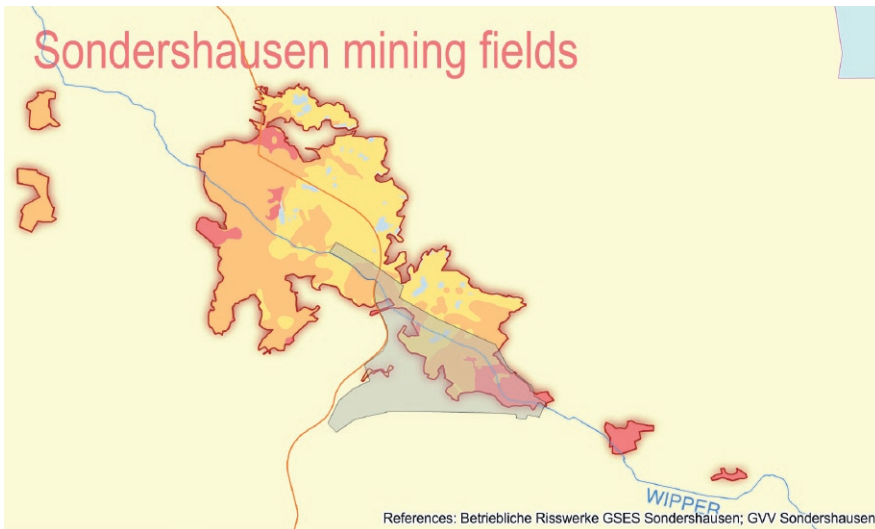


Fig. 5. Sondershausen East Field I mining area, with overlying town area of Sondershausen shown in grey. Bild 5. Das Bergwerksfeld Sondershausen, im Ostfeld I mit überlagerndem Stadtgebiet Sondershausen (grau).

- Volkenroda – Pöthen: Hydraulic securing by flooding with leach solution from the Volkenroda mining waste dump. This mine was basically suited for dry securing. Owing to the occurrence of large quantities of NaCl leach from the Menteroda mining dump, economic and ecologic considerations prompted the use of mining cavities for disposal of dump leach, which would otherwise be routed for disposal into surface water. Since carnallitite facies had been hardly cut into in the Volkenroda mine, no geochemical or safety factors spoke against disposal of the dump leach there.

einzuleitenden Haldenlaugen heranzuziehen. Da in der Grube Volkenroda Carnallititfazien kaum angeschnitten wurden, war die Verbringung der Haldenlauge hier geochemisch und sicherheitstechnisch unbedenklich.

The following descriptions present selected examples from the many securing measures used to assure long-term structural stability of the exhausted underground mining cavities, for protection of communities, infrastructure, and facilities at the surface above.

Nachfolgend werden ausgewählte Beispiele der zahlreichen Verwehrmaßnahmen zur Herstellung der langfristigen Standsicherheit der Grubenhohlräume zum Schutz der Schutzgüter über Tage vorgestellt.

Sondershausen East Field I mining area

Figure 5 shows the town area of Sondershausen (in grey), the River Wipper, National Highways 4 and 249, as well as the carnallitite mining areas (in red), directly under built-up areas, including residential dwellings. In 1990 surface subsidence of 240 mm/y was registered, with forecast for a total subsidence of up to 3 m in the already damaged town area, as well as for inclination of building structures of up to 7 mm/m. Especially critical were frequent

Bergwerk Sondershausen, Ostfeld I

In Bild 5 sind das Stadtgebiet, der Fluss Wipper und die Bundesstraßen 4 und 249 sowie rot dargestellte Carnallititbaufelder unmittelbar unter Wohnbebauung zu sehen. Im Jahr 1990 war eine Oberflächenabsenkung von 240 mm/a zu verzeichnen. Die im Stadtgebiet prognostizierte Gesamtabenkung von bis zu 3 m hätte für die ohnehin bereits betroffenen baulichen Anlagen zu Schiefelagen von bis zu 7 mm/m geführt. Besonders kritisch war das häufigere Auftreten seismischer Ereignisse mit Magnituden von bis zu 2,5 auf der Richterskala.

Im Bergwerk unter Tage verstärkten sich aufgrund der Standzeit der Abbaue von bis zu acht Jahren die massiven Sohlenhebungen von Monat zu Monat (Bild 6). Das mit hydraulischem Frac-Verfahren ermittelte Lastaufnahmevermögen der Carnalli-



Fig. 6. Massive floor strata uplift (4). Bild 6. Massive Sohlenhebungen (4).

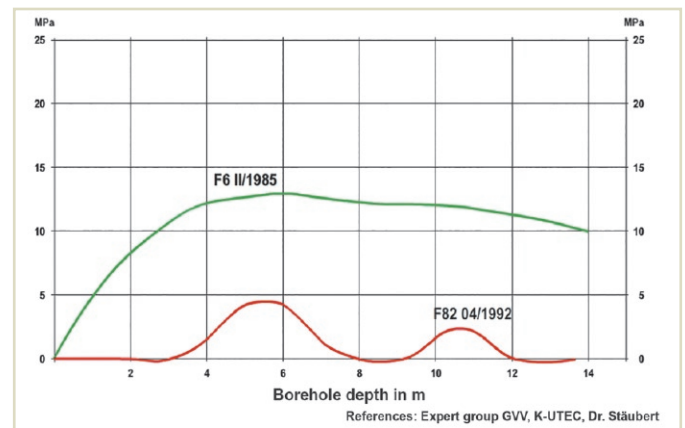


Fig. 7. Plot of static fracking pressure (4). Bild 7. Entwicklung der Frac-Ruhedrucke (4).

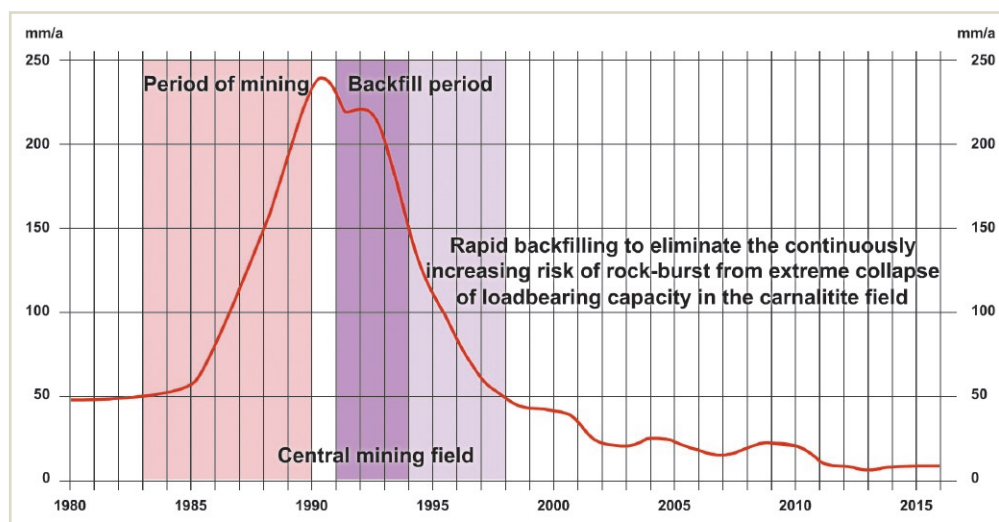


Fig. 8. Subsidence rate at the ground surface over the Sondershausen East Field I mining area.

Bild 8. Absenkung Tagesoberfläche Bergwerk Sondershausen-Ostfeld I.

occurrences of seismic events, with magnitudes up to 2.5 on the Richter scale.

As a result of the long periods since cessation of mining – up to eight years – massive floor strata uplift movements in the mine underground increased from month to month (Figure 6). Hydraulic fracking disclosed that certain individual pillars had completely lost their loadbearing capacity (Figure 7). Collapse of the pillars, and of even whole mined areas, were altogether possible – resulting in mining-induced seismic events with magnitudes ≥ 3 and with serious surface damage affecting the community above.

It was therefore decided to immediately and completely backfill the entire underground mined area. For the fill material in the critical mining cavities in the East Field, it was decided to use rock salt, a non-critical material from the rock-mechanics standpoint. It was possible there to extract the backfill from rock salt seams in the mining envelope by conventional drill and shoot methods, with loading and transport by LHD vehicles, sometimes combined with conveyor belts. After crushing to size and dampening, it was transported to the old exhausted mine workings and tipped in layers. In the South Harz Mining Region, backfill material prepared in this way is called “backfill-mine rock salt”. A packing rammer was used on the uppermost backfill layer to achieve maximum degree of backfill, i. e., to ensure that the critical mined-out cavities were completely backfilled. This method ensured a high degree of traction grip between the backfill and the surrounding ground. This technique is also called in short on-site backfill, to differentiate it from material taken from outside the site (imported backfill). Backfilling was conducted with great urgency. Within five years, a total of 2.2 mt of backfill was placed. The effectiveness of the backfill process was monitored by a complex geotechnical measurement system. Findings obtained from these measurements revealed that the actual results exceeded the expert-opinion specifications for backfilling of the exhausted mining cavities. Degree of backfilling was 95% (stipulated: 85%) and the compressive strength of the backfill was 100 MN/m² (stipulated: 40 MN/m²).

After only six years, the surface subsidence diminished rapidly from originally 240 mm/a to less than 50 mm/a (Figure 8).

The decline in severe seismic events was especially important. The initially very steep plot of the cumulative stress-release

titpfeiler ergab, dass die Pfeiler ihre Tragfähigkeit teilweise vollständig verloren hatten (Bild 7). Ein Zusammenbruch von Pfeilern, ja sogar von ganzen Baufeldern war demnach nicht mehr auszuschließen. Die mit solchen Gebirgsschlägen induzierten seismischen Ereignisse mit Magnituden von ≥ 3 hätten erhebliche gemeinschädliche Wirkungen über Tage gehabt.

Daher wurde hier der unverzügliche Versatz des gesamten Baufelds festgelegt. Für den Versatz kritischer Hohlräume im Ostfeld wurden Gewinnungsfelder im gebirgsmechanisch unkritischen Steinsalzflöz ausgewiesen. Dort wurde das Salz konventionell durch Bohren und Sprengen gewonnen, mit gleislosen Geräten und/oder mit Bandanlagen gefördert und nach Zerkleinerung und Befeuchtung scheibenweise in die Hohlräume verkippt. Das so hergestellte Versatzmaterial wird im Südharz-Revier „Bergemühlen-Steinsalz“ genannt. Die höchstmögliche Verfüllung, d. h. der Vollversatz des kritischen Abbauhohlraums, wurde durch den Einsatz eines Stopfkopfs in der obersten Kippscheibe erreicht. Auf diese Weise wurde ein hoher Kraftschluss zwischen dem Versatz und dem Gebirge hergestellt. Das Verfahren wird auch Eigenversatz genannt, um es von der Hohlraumverfüllung mit Drittmaterial – Fremdversatz – zu unterscheiden. Die Versatzarbeiten wurden mit großer Intensität durchgeführt. Innerhalb von fünf Jahren wurden insgesamt 2,2 Mio. t Versatzmaterial eingebracht. Der Versatzerfolg wurde mit einem komplexen geotechnischen Messprogramm überwacht. Im Ergebnis wurde nachgewiesen, dass die gutachterlichen Vorgaben zur Hohlraumverfüllung von 85% und zur Druckfestigkeit des Versatzes von 40 MN/m² durch die operative Verwahrung der Hohlräume mit 95% und 100 MN/m² übertroffen wurden. Die Oberflächenabsenkung ging in der Folge von ursprünglich 240 mm/a bereits nach sechs Jahren auf unter 50 mm/a zurück und ist inzwischen abgeklungen (Bild 8).

Besonders wichtig war der Rückgang von starken seismischen Ereignissen. Der zunächst sehr steile Verlauf der kumulativen Spannungsfreisetzungskurve im Beiniöff-Diagramm (Bild 9) verflacht mit der Zeit deutlich erkennbar, weil im Ergebnis der tragenden Stützwirkung des eingebrachten Versatzes in den kritischen Hohlräumen sowohl die Anzahl als auch die Stärke der registrierten seismischen Ereignisse zurückgeht. Durch Rückrechnung aus solchen geotechnischen Messwerten konnte nachge-

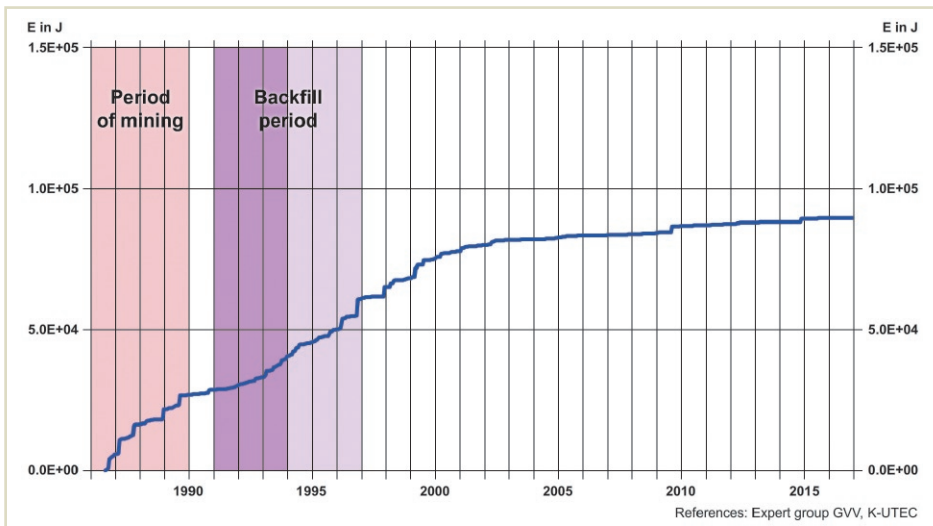


Fig. 9. Cumulative energy release in the Sondershausen East Field I mining area, from 1986 to May, 2012.
Bild 9. Kumulative Spannungsfreisetzung Bergwerk Sondershausen-Ostfeld I von 1986 bis Mai 2012.

curve in the Beinihoff diagram (Figure 9) flattens out appreciably over time. This is because the loadbearing support provided by the backfill placed into the critical mine cavities caused a reduction in not only the number but also in the severity of the registered seismic events. Retroactive calculation performed on such geotechnical measured values enabled confirmation that the promptly executed backfilling successfully eliminated the danger of rock-burst with a magnitude of greater than 4, as well as any resulting, appreciable damage to the urban area of Sondershausen. The Director of the expert group GVV (4) expressed his relief about the narrowly averted damage by making the statement, "We cheated the devil just by the skin of our teeth."

Sollstedt mining area, Southeast Field

Although the mining of hard salt in the Southeast Field of the Sollstedt mining area did not create a critical geomechanical situation, the seams had been worked in several layers. Consequently, seams were able to be worked in two and even three stage levels (Figure 10). In the course of years, the horizontal layers separating the vertical working levels had fractured (Figure 11).

The surface of the ground above the mine here had already begun to subside, and prediction was for an additional approxi-

wiesen werden, dass mit den zügig umgesetzten Versatzarbeiten die Gefahr eines Gebirgsschlags mit einer Magnitude > 4 und daraus resultierende erhebliche Schäden für das Stadtgebiet von Sondershausen erfolgreich abgewendet wurden. Der Leiter der Gutachter-Arbeitsgemeinschaft brachte diesen Sachverhalt damals mit dem Ausspruch „Wir sind dem Teufel noch rechtzeitig von der Schippe gesprungen...“ zum Ausdruck.

Bergwerk Sollstedt, Südostfeld

Im Südostfeld des Bergwerks Sollstedt war zwar gebirgsmechanisch unkritisches Hartsalz abgebaut worden, dieses stand jedoch in mehreren Lagen an. Das Flöz konnte demzufolge im Zwei- und teilweise auch im Dreietagenabbau gewonnen werden (Bild 10). Im Lauf der Jahre waren an vielen Stellen die Schweben zwischen den Etagen bereits zu Bruch gegangen (Bild 11).

Die Prognose für die bereits begonnene Absenkung der Tagesoberfläche lag bei bis zu 4 m. Betroffene Schutzgüter waren Teile der Stadt Sollstedt, öffentliche Straßen, die Eisenbahnlinie und der Fluss Wipper. Zudem lag die Trasse der damals in Planung befindlichen Autobahn A 38 darüber. Im Ergebnis war es notwendig, durch Versatz relevanter Hohlräume die prognostizierten Auswirkungen abzuwehren. Zur Anwendung kam auch hier der

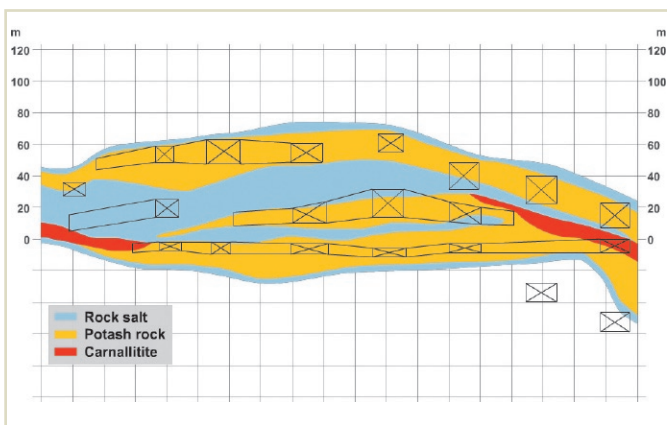


Fig. 10. Schematic section through the Southeast Field of the Sollstedt mine.
Bild 10. Schematischer Schnitt durch das Südostfeld des Bergwerks Sollstedt.



Fig. 11. Horizontal layer of the hard-salt multi-level workings in the Southeast Mining Field at Sollstedt/Germany, 1994.
Bild 11. Schweben des Hartsalz-Mehretagenabbaus im Bergwerk Sollstedt Südostfeld im Jahr 1994.

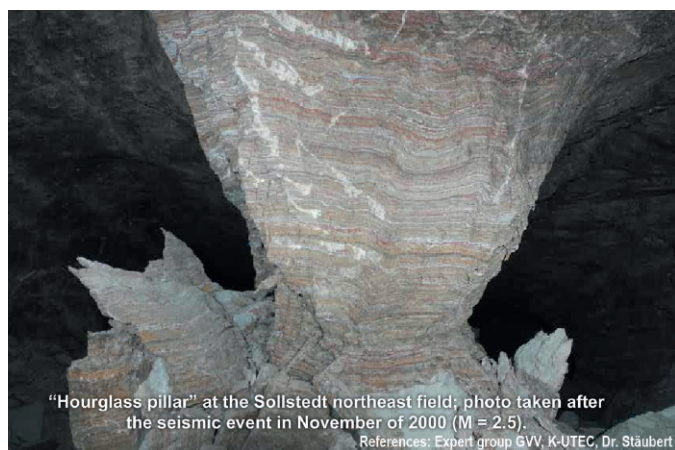


Fig. 12. Hourglass pillar, Sollstedt mine, Northeast Field.
Bild 12. Sanduhrpfeiler, BW-Sollstedt, Nordostfeld.

mately 4 m. Endangered objects, resources, built-up areas, and infrastructure included parts of the city of Sollstedt, public roads and streets, a railway line, and the River Wipper. Moreover, planning was to construct Motorway A 38 above the mining area. It was accordingly necessary to employ backfilling for the relevant exhausted mining cavities to prevent the predicted consequences. Onsite backfill was also employed here. Prompt execution of the necessary measures arrested subsidence of the ground above the mines at a low level, and maintained it to an acceptable degree.

In the course of extensively employed geotechnical monitoring for the closed potash mines in the South Harz Mining Region, and with practically oriented scientific procedures, it proved additionally successful to determine rock-mechanical parameters such as elasticity, creep, consolidation and deconsolidation, as well as dynamics of fracture. These efforts also resulted in appreciable enhancement of the integration of these parameters into engineering models for simulation of dynamic fracture processes and rock bursts. This achieved progress consequently enabled defensible decisions reached on the content and extent of the measures required to secure the closed mines. Concurrently, a complex geotechnical monitoring system was installed to detect changing conditions in the mine workings and in the surrounding strata, to assess the effectiveness of the executed restoration works, and for forecasts of their future development.

In 2000 a seismic event with a magnitude of 2.5 took place in the Northeast Field of the Sollstedt mining complex. This event required a closer examination of this old mining field, which had no longer been accessible in 2000 and which required new mining drives for the required measures. This investigation revealed a considerable number of so-called hourglass pillars (Figure 12). After complex geomechanical assessment, a calculation model of the Northeast Field was prepared, which revealed (Figure 13) that rock burst could not be ruled out in the workings. After several decades had passed following closure of this mine, a roof collapse in the hard salt had spread to the overlying carnallite. If a brittle fracture had taken place in the carnallite, this would have triggered a chain reaction with collapse of the workings and with immediate subsidence of up to several decimetres of the land surface over the mine. Backfilling of the critical mined cavities prevented these dangerous occurrences.

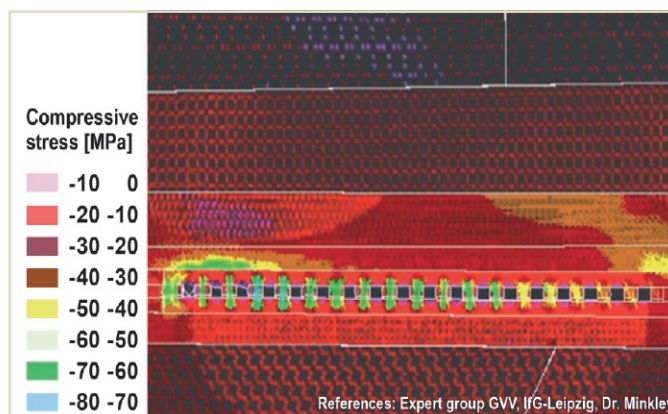


Fig. 13. Plot from the calculation model for the Sollstedt mine, Northeast Field.

Bild 13. Berechnungsmodell BW-Sollstedt, Nordostfeld.

Eigenversatz. Dank der zügigen Umsetzung der Maßnahmen konnte die Absenkung der Tagesoberfläche noch auf einem niedrigen Niveau aufgefangen und auf ein vertretbares Maß reduziert werden.

Im Zuge des breit angelegten geotechnischen Monitorings für die stillgelegten Kalibergwerke Südharz sowie mit praxisorientiertem wissenschaftlichem Vorgehen gelang es zudem, die Ermittlung der gesteinsmechanischen Parameter wie Elastizität, Kriechen, Verfestigung, Entfestigung, Bruchdynamik etc. sowie deren modelltechnische Zusammenführung zur Simulation von dynamischen Bruchvorgängen und Gebirgsschlägen erheblich zu verbessern und damit Inhalt und Umfang der erforderlichen Sicherungsmaßnahmen belastbar zu bestimmen. Gleichzeitig wurde ein komplexes geotechnisches Monitoringsystem aufgebaut, mit dessen Hilfe die Zustandsveränderungen im Grubengebäude und im Gebirge sowie die Wirkungen der durchgeführten Sicherungsmaßnahmen erfasst und Vorhersagen zu deren Entwicklung gemacht wurden.

Nach einem seismischen Ereignis mit der Magnitude 2,5 im Nordostfeld des Bergwerks Sollstedt im Jahr 2000 musste dieses, damals nicht mehr zugängliche, alte Abbaufeld durch Neuauffahrungen näher unter die Lupe genommen werden. Dabei wurden dort vielfach sogenannte Sanduhrpfeiler vorgefunden (Bild 12). Nach einer komplexen geomechanischen Bewertung wurde ein Berechnungsmodell des Nordostfelds erstellt (Bild 13), demzufolge in dem Baufeld ein Gebirgsschlag nicht auszuschließen ist. Nach einer Standzeit von mehreren Jahrzehnten hat sich der Firstbruch im Hartsalz im überlagernden Carnallit ausgebreitet. Ein darin auftretender Spröbruch hätte eine Kettenreaktion mit Baufeldkollaps und einer schlagartigen Absenkung der Tagesoberfläche bis zu mehreren Dezimetern ausgelöst. Durch Versatz der kritischen Hohlräume konnte die Gefahr abgewendet werden.

Bergwerk Bischofferode, Verwahrung der Grube durch Eigenversatz und Flutung

Aufgrund der zusitzenden Salzlösungen aus dem Liegenden konnte die Grube Bischofferode nicht „lutterfüllt trocken“ verwahrt werden und war – mindestens teilweise – zu fluten. Gleichzeitig war zu beachten, dass die am gemeinsamen Markscheidensicherheitspfeiler angrenzende Grube Bleicherode „trocken“ zu verwahren ist.

The Bischofferode mine: securing the workings with onsite backfill and flooding

The standing salt solutions arising from the underlying strata meant that the Bischofferode mine could not be dry-secured, a situation that required at least partial flooding. It was concurrently necessary to assure that the neighbouring Bleicherode mine – which bordered on the shared mine boundary safety pillar – remained dry. This was required for two reasons. First, the Bleicherode mine featured large-area carnallite exposure. It would have been possible to flood this mine with high-concentration $MgCl_2$ leach solution, but this solution would not have been unproblematic from aspects involving the kinematics of the solutions and rock mechanics. Second, the Bleicherode and Sollstedt workings were interconnected, with the consequence that flooding of Sollstedt would also have been necessary. To assure long-term securing at the workings at the Bleicherode and Sollstedt mines, it was necessary to guarantee that the hydraulic barrier effect of the mine boundary safety pillar between these two mines functioned flawlessly at all times (Figure 14). At the end of the 1970s and during the early 1980s, however, this barrier – which had been originally sufficiently dimensioned at a width of 50 m – had diminished to half of this width owing to its high K_2O content (Figure 15). To restore the necessary hydraulic barrier effect, backfilling took place to the maximum possible degree, directly at the boundary safety pillar, of those mined-out cavities that had been identified by the team of experts (Figure 15, purple zone). For this purpose, approximately 0.8 mt of rock salt were used as onsite backfill, analogous to the cases mentioned above. As final step, in addition, the backfill sector situated in front of the safety pillar was sealed off to prevent the entry of leach solution from the workings of the remaining area of the mines (Figure 14).

One further focal-point measure is also noteworthy for the work conducted before flooding to stabilize the Bischofferode mining area. In the north and northeast fields of this area, one difficulty was that the workings had been conducted extremely close to the main anhydrite seam, which had restricted water flow and from which slightly mineralized water had penetrated the seam (Figure 16). Due to prompt backfill of the sufficiently dimensioned infill fields, it was possible to prevent spreading of the

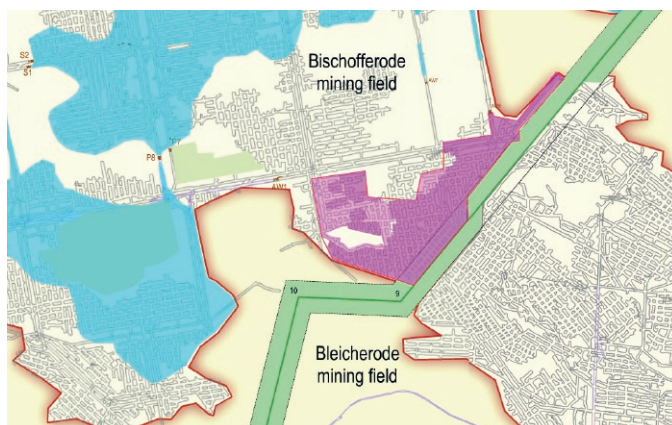


Fig. 15. Backfill at the boundary safety pillar between the Bischofferode and Bleicherode mines.

Bild 15. Versatz am Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Bergwerken Bischofferode und Bleicherode.

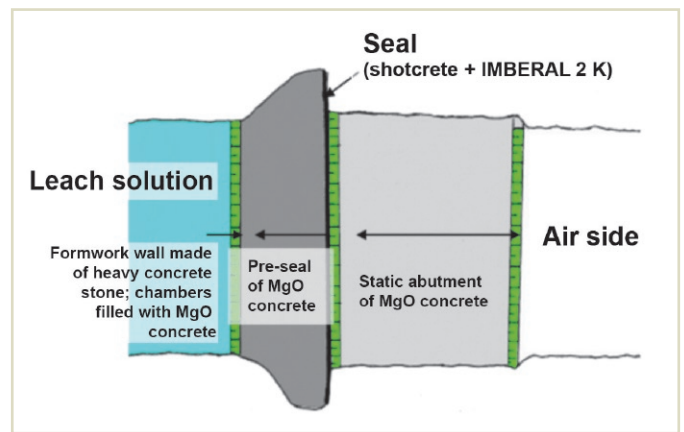


Fig. 14. Sealing of the backfill sector from entry of leach solution.
Bild 14. Abschluss des Versatzfelds gegen Laugenzutritt.

Dies war zum einen bedingt dadurch, dass die Grube Bleicherode von großflächigen Carnallitauflüssen geprägt war, sodass ihre Flutung zwar mit hochkonzentrierter $MgCl_2$ -Lauge möglich, aber lösungskinematisch und gebirgsmechanisch dennoch nicht ohne Probleme gewesen wäre. Zum zweiten waren die Grubengebäude Bleicherode und Sollstedt durchschlägig, sodass in der Folge auch Sollstedt hätte geflutet werden müssen. Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit der Gruben Bleicherode und Sollstedt musste daher sichergestellt werden, dass die hydraulische Barrierewirkung des Markscheidesicherheitspfeilers zwischen den Bergwerken Bischofferode und Bleicherode stets gegeben ist (Bild 14). Der mit 50 m Breite ursprünglich hinreichend stark dimensionierte Markscheidesicherheitspfeiler war jedoch Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre wegen seines hohen K_2O -Gehalts bis zur Hälfte dieser Breite abgebaut worden (Bild 15). Zur Wiederherstellung der hydraulischen Barrierewirkung wurden die gutachterlich ausgewiesenen Hohlräume (Bild 15, Bereich in lila) unmittelbar am Sicherheitspfeiler maximal möglich verfüllt. Zu diesem Zweck wurden rund 0.8 Mio. t Steinsalz analog wie in den oben genannten Fällen als Eigenversatz eingebaut. Zum Abschluss wurde zudem das dem Sicherheitspfeiler vorgelagerte Versatzfeld durch Abdämmung der Streckenverbindungen zum sonstigen Grubengebäude gegen Eintritt von Laugen abgeschirmt (Bild 14).

Zu erwähnen ist auch ein weiterer Schwerpunkt der Sicherungsarbeiten im Bergwerk Bischofferode vor der Flutung. Im Nord- und Nordostfeld der Grube war der Abbau zu nahe an den Wasser stauenden Hauptanhydrit herangeführt worden, aus dem schwach mineralisierte Wässer eindringen (Bild 16). Mit zügigem Versatz der hinreichend groß bemessenen Versatzfelder wurde dafür gesorgt, dass die Schwächezonen sich nicht verbreiten und damit ein nicht kontrollierbares Ersaufen der Grube abgewendet wird.

Für die Nassverwahrung der Grube Bischofferode war zu berücksichtigen, dass Feldesteile mit Carnallitauflüssen mit $MgCl_2$ -Laugen und die sonstigen – i. d. R. Hartsalz-Feldesteile mit $NaCl$ -Laugen zu fluten sind. Zudem war die Generalneigung der Kalilagerstätte und damit auch des Grubengebäudes von etwa 4° nach Süden für die zeitliche Reihenfolge der Flutung einzelner Feldesteile bestimmend. Basierend hierauf sowie auf einer Reihe grubenspezifischer Rahmenbedingungen wurde eine sogenannte gelenkte Flutung Bischofferode konzipiert. Der technisch und lösungskinematisch höchst anspruchsvolle Flutungsprozess Bi-

weak zones and thereby to avoid potential uncontrollable flooding of the mine.

For flooding the Bischofferode mine, it was important to consider that it was necessary for those parts of a mining field with exposed carnallite to be flooded with $MgCl_2$ leach solutions and the other sections of the field – as a rule, hard salt sections – flooded with $NaCl$ solutions. Moreover, the general slope to the south of approximately 4° of the potash deposits and, consequently, of the workings, was essential to determine the chronological sequence of the flooding of individual sections of the field. On this basis, and on the basis of a series of mine-specific general conditions, design was developed of a program known as “Guided Flooding for Bischofferode”. The flooding process for Bischofferode – with its highly sophisticated and demanding technical aspects, particularly involving the kinematics of the solutions – can roughly be classified in three phases and spatial areas (Figure 17):

- flooding of the west and southwest fields by underlying inflow containing $NaCl$ and by flooding with the leach solution obtained from the Bischofferode potash waste dump, also containing $NaCl$;
- flooding with highly concentrated $MgCl_2$ leach of the main basin in the southeast field, which borders the backfill field of the mine boundary safety pillar; and
- flooding of the remaining areas in the east field with enriched $MgCl_2$ leach solution.

The flooding process is being supported and controlled by an extensive monitoring network.

Privatization of backfill mines

As part of rapidly and simultaneously securing several mining sections by backfilling, and at the same time exploiting the possibility of using officially approved industrial waste as backfill, GVV privatized some of its mines. With transfer of the Mining Operational Planning Procedure, legally binding under German mining law, and in close coordination with the German Federal State of Thuringia and its State Mining Office, the Sondershausen mine was sold to GSES in 1995; the Bleicherode mine, to NDH-E in 1996; and the Sollstedt mine, also to NDH-E, in 2008. These two compa-

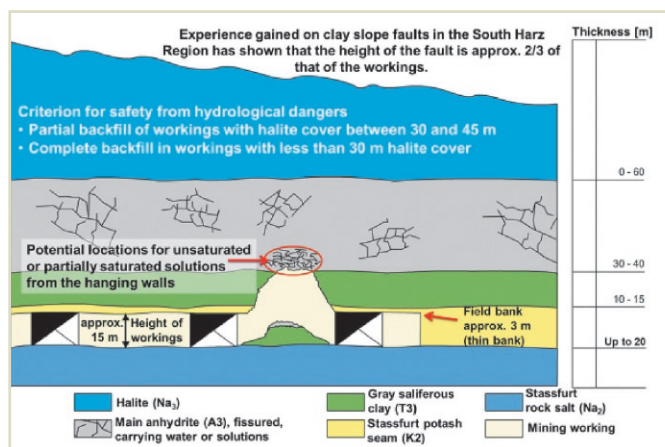


Fig. 16. Hydrological danger due to solution streaming to the hanging wall.
Bild 16. Hydrologische Gefährdung durch Lösungszustrom zum Hangenden.

schofferode ließ sich grob in drei Phasen und räumliche Bereiche unterteilen (Bild 17):

- die Flutung des West- und Südwestfelds durch $NaCl$ -haltige Liegendzuflüsse sowie durch die ebenso $NaCl$ -haltige gefasste Lauge der Kalihalde Bischofferode,
- die Flutung der an das Versatzfeld des Markscheidesicherheitspfeilers angrenzenden Hauptmulde im Südostfeld mit hochkonzentrierter $MgCl_2$ -Lauge und
- die Flutung der übrigen Bereiche im Ostfeld mit angereicherter $MgCl_2$ -Lauge.

Der Flutungsprozeß wurde durch ein umfangreiches Monitoring begleitet und gesteuert.

Privatisierung von Versatzbergwerken

Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit des gleichzeitigen und zügigen Versatzes mehrerer Feldesteile sowie der Möglichkeit zur Verbringung von behördlich zugelassenen industriellen Abfällen als Versatzbaustoff hat die GVV einige ihrer Bergwerke privatisiert. Mit Übertragung der bergrechtlichen Betriebsplanpflicht und in enger Abstimmung mit dem Freistaat und dem Landesbergamt Thüringen wurden das Bergwerk Sondershausen (1995)

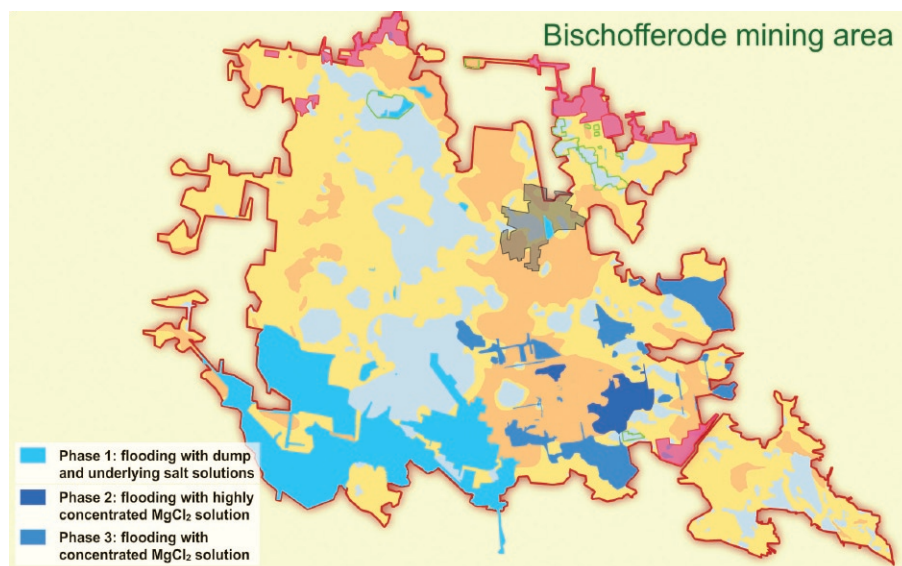


Fig. 17. Focal points of measures to secure mines at Bischofferode.
Bild 17. Schwerpunktmaßnahmen Verwahrung Bischofferode.

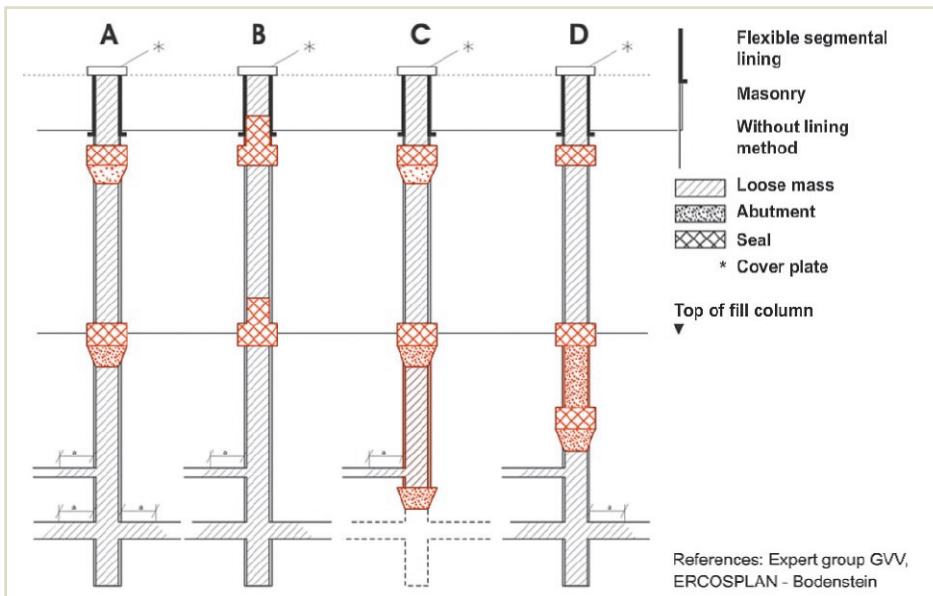


Fig. 18. Concepts for shaft stabilization in potash mines.
 Bild 18. Konzepte der Schachtverwahrung im Kalibergbau.

nies have invested several hundred million euros to execute the underground backfill project, rapidly and according to high technical standards. Also worthy of mention is a special development in the process of hydraulic stowing, whereby officially permitted industrial waste, in accordance with safety law, is prepared and converted into backfill material by means of a patented technique. Within several days after installation, this backfill hardens in the mining cavities (5). The complete backfilling of the mined cavities thereby results in rapid and strong bonding between the fill material and the surrounding strata. So-called big-bag stowing has also been applied. Suitable fill material is prepared in surface treatment plants and placed into strong plastic bags of up to 1.2 m³ capacity that are stacked in the underground cavities.

In these four potash mines (Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt and Bischoferode), a total of 8.5 mt of rock salt and more than 8 mt of nonmined imported materials have been backfilled to stabilize the South Harz potash mines. In addition, the Bischoferode and Volkenroda mines have been flooded with a total of 6 m³ of NaCl and 2 m³ of MgCl₂ leach solutions.

Long-term stabilization of surface shafts

In the course of around 100 years of potash mining in the South Harz Potash Region, over 40 large surface shafts were sunk, 30 of which were connected to the six closed potash mines, and 19 of which have by now been secured by GVV. In collaboration with its engineering experts, GVV has continued development of its security concept for surface shafts in salt and potash mines (6), and has consequently raised its concept to a new level of sophistication (Figure 18). This concept basically provides total backfilling of the shaft column, in the form of a layered fill column. From hydrological aspects, the fill column contains in every case a sealing element to separate the groundwater storey from the lower capping strata, as well as an additional seal in the top section of the salt-bearing strata horizon as protection of this horizon. Finally, an optional third sealing element is installed between the worked-out mine cavities and the filling column to account for rising leach water or effluent potentially containing pollutants from former mine workings. Such shaft securing is a technically

an die GSES sowie die Bergwerke Bleicherode (1996) und Sollstedt (2008) an die NDH-E verkauft. Beide Gesellschaften haben mehrere hundert Millionen Euro Investitionen getätigt, um den untertägigen Versatz zügig und auf einem hohen technischen Niveau erfolgreich umzusetzen.

Zu erwähnen ist zum einen der Spülversatz. Hierfür wurde ein geschütztes Verfahren entwickelt, mit dem behördlich zugelassene Stoffe konditioniert und zu einem Versatzbaustoff aufbereitet werden, der einige Tage nach der Einspülung in den Abbauhohlräumen aushärtet (5). Durch die vollständige Verfüllung des Versatzhohlraums kommt es zu einem raschen und hohen Kraftschluss zwischen Gebirge und Versatz. Angewendet wird auch der sogenannte Bigbag-Versatz. Dabei wird das Versatzgut in übertägigen Konditionierungsanlagen in reißfeste Kunststoffsäcke mit bis zu 1,2 m³ Inhalt abgefüllt und in die Abbauhohlräume eingestapelt.

In den vier vorgenannten Kalibergwerken (Sondershausen, Bleicherode, Sollstedt und Bischoferode) wurden bisher insgesamt 8,5 Mio. t Steinsalz sowie weitere über 8 Mio. t bergbaufremde Baustoffe als Versatz eingebracht, um die Südharz-Kaligruben zu sichern. Darüber hinaus wurden zur Flutung der Bergwerke Bischofferode und Volkenroda insgesamt 6 Mio. m³ NaCl- und 2 Mio. m³ MgCl₂-Lauge eingeleitet.

Langzeitsichere Verwahrung von Tagesschächten

Im Zuge des rd. 100jährigen Kalibergbaus im Südharz waren über 40 große Tagesschächte abgeteuft worden, von denen 30 im Zusammenhang mit den jetzt stillgelegten sechs Kalibergwerken stehen und 19 davon inzwischen durch die GVV verwahrt wurden. Die GVV hat hierzu zusammen mit ihren Gutachtern die Verwahrkonzeption von Tagesschächten für den Kali- und Salzbergbau fortgeschrieben (6) und auf ein hohes Niveau gehoben (Bild 18). Grundsätzlich wird dabei eine Totalverfüllung der Schachtsäule in Form einer geschichteten Verfüllsäule vorgesehen. Aus hydrologischen Gesichtspunkten erhält die Verfüllsäule in jedem Fall zunächst ein Dichtungselement zur Trennung des Grundwasserstockwerks vom unteren Deckgebirge sowie eine weitere Dichtung im Topbereich des Salinars zum Schutz des Salinars. Schließlich wird optional ein drittes Dichtelement zwischen dem Grubengebäude und der Ver-



Potash mining waste in Bleicherode in 1995 (west view)

Fig. 19. The Bleicherode potash dump in 1995.
Bild 19. Kalihalde Bleicherode im Jahr 1995.



Potash mining waste in Bleicherode in 2007 (west view)

Fig. 20. The Bleicherode potash dump in 2007.
Bild 20. Kalihalde Bleicherode im Jahr 2007.

demanding operation – especially the emplacement of the seal elements, with the layering of sealing materials and their compaction requiring continuous quality control.

More than 85% of the crude salt extracted from this mining region was not economically exploitable and was therefore stockpiled as industrial waste in dumps on the surface – insofar as it was not used for hydraulic stowing in underground workings. These dumps consisted of 95% soluble salts and covered an area of 350 ha, with a volume of 170 m³, in six potash dumps in the South Harz Mining Region. As a result of the action of precipitation over the years, some 500,000 t of salt have entered the groundwater and watercourses. Effective measures were necessary to counter the resulting negative effects on the environment.

The photographs in Figs. 20 and 21 depict the distinct transformation at the Bleicherode potash dump from 1995 to 2007. By today, more than 40% of the surface of the South Harz dumps – except for the Bischofferode dump – have been covered and vegetated with a total of 27 mt of material. As Fig. 21 makes clear, this development has until now reduced the salt burden in the River Wipper by half – a notable success for scientific and operational measures taken to reduce environmental damage.

The initial remedial task was to construct leach water catchment channels to minimize entry of leach run-off into the ground

füllsäule eingebaut, wenn ein Aufsteigen von Laugen oder schadstoffhaltigen Medien aus dem Grubengebäude zu besorgen ist. Die Schachtverwahrung ist auch in der technischen Durchführung eine hoch anspruchsvolle Arbeit. Insbesondere der Einbau der Dichtungselemente mit lagenweise einzubauenden und zu verdichten Materialien erfordert eine ständige Qualitätskontrolle.

Mehr als 85% des gefördert Rohsalzes war nicht verwertbar. Dieser sogenannte Fabrikrückstand wurde, sofern er nicht als Spülversatz unter Tage eingesetzt wurde, über Tage aufgehaldet. Diese Rückstände bestehen zu 95% aus löslichen Salzen. Im Südharzrevier entstanden sechs Kalihalde mit einer Fläche von 350 ha und einem Volumen von 170 Mio. m³. Durch die niederschlagsbedingten Lösungsprozesse gelangten Jahr für Jahr rd. 750.000 t Salz in das Grundwasser und in die Vorfluter. Die daraus resultierenden negativen Auswirkungen auf die Umwelt waren durch angemessene Maßnahmen nachhaltig zu reduzieren.

Die Bilder 19 und 20 veranschaulichen den deutlichen Wandel auf der Halde Bleicherode zwischen den Jahren 1995 und 2007. Inzwischen wurden mehr als 40% der Haldenoberfläche der Südharzhalden, ausgenommen die Halde Bischofferode, mit insgesamt 27 Mio. t Material abgedeckt und begrünt. Wie in Bild 21 erkennbar konnte damit die Salzfracht in der Wipper bisher um die Hälfte reduziert werden. Dies ist ein durchaus beachtlicher Beitrag der Wissenschaft und der Betriebspraxis zur Entlastung der Umwelt.

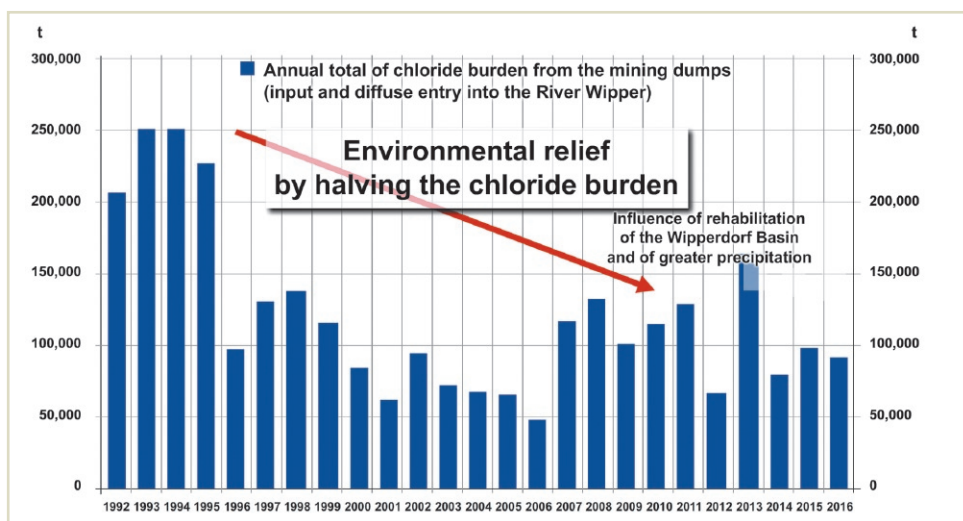


Fig. 21. Reduction of chloride burden at Hachelbich.

Bild 21. Reduzierung der Chloridfracht am Pegel Hachelbich.



Fig. 22. Construction of catchment channels for dump leach water.
Bild 22. Anlegen von Haldenlaugenfassungsräben.

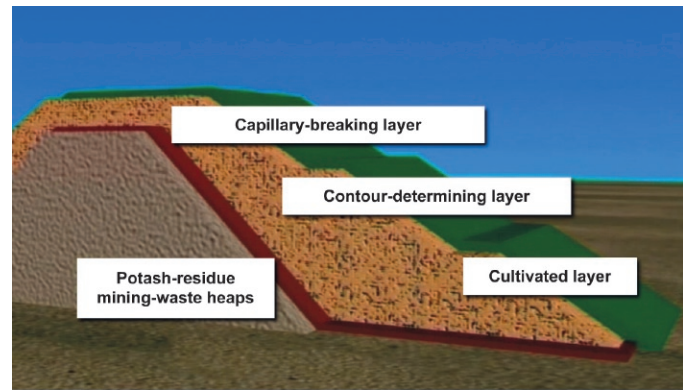


Fig. 23. Principle of cover configuration for potash dumps.
Bild 23. Regelaufbau Haldenabdeckung.

water (Figure 22). At the same time, it was necessary to cover and vegetate the dumps, to reduce – to as great a degree as possible – dissolution of the salt from precipitation (Figure 23). Immediately after German reunification, various research projects to investigate the most suitable variety of grasses and plants commenced at German universities in Clausthal-Zellerfeld, Freiberg, Göttingen, and Kassel, as well as at the German Environmental Foundation, K-UTEC, and GVV. These studies examined the basic conditions involved in the planting of various grasses and other plants. Project development involving the basic principles of soil and recultivation measures in the context of extremely aggressive, salty soil conditions was likewise initiated. After official approvals, the measures developed were implemented.

New infrastructure in decommissioned mining areas

The total closure of potash mines in the South Harz meant loss of employment for around 12,000 miners – a dramatic development for this mono-structured mining region. GVV therefore established a goal of rehabilitation as quickly as possible of the surface areas of the mines to provide areas for new development and job creation (7). The demolition and removal of redundant plant facilities was rapidly executed and, in collaboration with the local communities, plans for new infrastructure were developed and implemented. As a result, GVV has succeeded in settling around 200 new companies on the former locations of potash mines. Businesses that have invested until now 225 m € and created employment for over 3,600 men and women.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Kuyumcu, M.: Herausforderungen und der erreichte Stand bei der Stilllegung von Kalibergwerken in Ostdeutschland. Vortrag anlässlich der Veranstaltung „60 Jahre Kaliprojektierung aus Erfurt und 20 Jahre ERCOSPLAN“, Erfurt, 9. November 2012.
- (2) Hartwig, H.-J.; Kuyumcu, M.: Aufgaben der GVV und ihre Erfahrungen bei der Verwahrung von Erz- und Spatgruben. Glückauf (133) Heft 5/1997, S. 226–232.
- (3) Bergbau Museum Bochum (Herausgeber): Kali im Südharz-Unterrevier, 2003.
- (4) Gutachter-Arge GVV, bestehend aus Prof. Natau, IfG Leipzig, ERCOSPLAN, K-UTEC, unveröffentlichte Berichte.
- (5) Kirchner, W.; Leuschner, J.; Seifert, M.: Gefahrenabwehr im Südharz-Kali-Revier unter Nutzung von Abfällen zur Verwertung unter Tage. Internationaler Umweltsanierungskongress der LMBV, 2005.

Zunächst galt es, mit dem Bau von Fassungsräben den Eintritt der Laugen in das Grundwasser zu minimieren (Bild 22). Gleichzeitig war es notwendig, die niederschlagsbedingte Auflösung von Salz durch Abdeckung und Begrünung der Halden weitestgehend zu reduzieren (Bild 23). Zu diesem Zweck wurden gleich nach der Wiedervereinigung diverse Forschungsarbeiten der Universitäten Clausthal, Freiberg, Göttingen und Kassel sowie der Bundesumweltstiftung, K-UTEC und GVV eingeleitet und die Rahmenbedingungen zur Anpflanzung diverser Pflanzen und Gräser untersucht. Ebenso wurden die bodenkundlichen und rekultivierungstechnischen Grundlagen zur Begrünung dieser sehr rekultivierungsfeindlichen Salzböden entwickelt und nach behördlichen Genehmigungen umgesetzt.

Neuerschließung stillgelegter Altstandorte

Die komplette Einstellung des Kalibergbaus im Südharz bedeutete auch den Arbeitsplatzverlust für rd. 12.000 Bergleute. Dies war in diesem ohnehin monostrukturierten Bergbaurevier eine tiefe Zäsur. Deshalb setzte sich die GVV das Ziel, die übertägigen Bergbauflächen so rasch wie möglich zu sanieren und einer Nachnutzung mit neuen Arbeitsplätzen zuzuführen (7). Der Abbruch und die Demontage nicht nachnutzbarer Anlagen wurden zügig vorangetrieben und gleichzeitig in enger Zusammenarbeit mit den Kommunen eine Neuerschließung der Altstandorte geplant und umgesetzt. So ist es der GVV gelungen, auf den Altstandorten des Kalibergbaus rd. 200 neue Firmen anzusiedeln, die bisher 225 Mio. € investiert und über 3.600 neue Arbeitsplätze geschaffen haben.

- (6) Bodenstern, J.; Leuschner, J.; Seifert, M.: 10 Jahre Schachtverwahrung im Südharz-Kali-Revier – Erfahrungen aus Sicht von Planung und Ausführung, 2001.
- (7) Kuyumcu, M.; Naumann, D.; Lange, K.: Sanierung und Verwertung der Betriebsgelände der stillgelegten Bergwerke der GVV. Glückauf Verlag, Sonderdruck BrachflächenRecycling 2/1998, S 36–41.

Authors / Autoren

Dipl.-Ing. Klaus Zschiedrich, CEO, and Dipl.-Ing. Thorsten Pietsch, LMBV mbH, Senftenberg/Germany, Prof. Dr.-Ing. Mahmut Kuyumcu, TU Bergakademie Freiberg/Germany, former CEO of LMBV mbH and GVV