

Applications of Geophysical Measuring Methods for the Exploration and Securing of Old Mine Workings Near the Surface Using the Example of the Former Lignite Mine Robertshall

During the expansion of the Ehestorfer Heuweg road in the village of Ehestorf, district of Rosengarten/Germany, a daybreak occurred on 11th September 2019, which had a diameter of approximately 0.5 m and a depth of approximately 5 m. Research in the archives of the State Office for Mining, Energy and Geology (LBEG) in Clausthal-Zellerfeld revealed that the probable cause of the collapse can be traced back to the former Robertshall lignite mine, which mined lignite underground here and was in operation until 1922. The collapse suggested that the sand backfill introduced into the roadways crossing under the road during the closure of the mine was not sufficiently stable or that the backfilled roadway area was too narrow. The location of the drifts was basically known and the results of the work in 2019/2020 had confirmed the extensive reliability of the mine plan. However, as the work progressed, there were major deviations in the drifts from the positions recorded in the mine plan. In addition, cavities were found in areas that, according to the mine plan, should not show any drifts.

If mine plans are missing or incomplete, the risk to protected assets at the surface due to mining damage can often only be reliably assessed by means of indirect methods such as geophy-

sics in reasonable combination with drilling. Within the scope of this work the extend of room-and-pillar caving at the Robertshall deep lignite mine was determined by geophysical methods. Subsequent backfilling and securing of the old mine workings are the goals of this exploration.

The simultaneous application of several methods on the selected test profile is not only intended to increase the reliability of the results, but also to gain experience as to which methods are best suited for routine detection under the given geological and mining conditions. The geophysical measurements are supplemented by an evaluation of historical data.

The results of geophysics have led to the prompt and reliable discovery of many drifts that were not included in the mine plan. Compared to the conventional approach of exploration by drilling, the application of seismic measurements saves time and costs. The securing measures could be carried out by the responsible parties and the desired securing success has been achieved so that no further movements of the ground surface are to be expected.

Introduction

According to its mine plans, the mine workings of the former lignite mine Robertshall are located 13 and 17 m below the street Ehestorfer Heuweg and adjacent properties. The areas in the immediate vicinity of the objects requiring securing (road and residential buildings) are now to be explored and secured. Previous work has shown that the exploration of the mine plan has sufficient local accuracy to determine the location of the drifts on site. Furthermore, it is known that sand with isolated layers of brown coal is located above the drifts.

The northern part of the mine workings is located on the territory of the city of Hamburg. The southern part is located on the territory of the State of Lower Saxony. The exploration and securing of the mine workings in the Hamburg area was carried out between September 2019 and February 2020. Subsequently, the process of securing of the Lower Saxony part of the mine below the Ehestorfer Heuweg and nearby residential properties was started in March 2020 and was completed in early 2023.

During the work it became apparent that numerous parts of the mine are not shown on the official mine plan. The mine plan

Einleitung

Das Grubengebäude des ehemaligen Braunkohlentagebaus Robertshall liegt laut Risswerk 13 und 17 m unter der Straße Ehestorfer Heuweg und angrenzenden Grundstücken. Die Flächen in unmittelbarer Nähe der zu sichernden Objekte (Straße und Wohngebäude) sollen erkundet und gesichert werden. Die bisherigen Arbeiten haben gezeigt, dass das Risswerk eine ausreichende örtliche Genauigkeit aufweist, um die Lage der untertägigen Strukturen zu bestimmen. Weiterhin ist bekannt, dass sich über den verbliebenen Strukturen Sand mit vereinzelt Braunkohlenschichten befindet.

Der nördliche Teil des Grubengebäudes befindet sich auf dem Gebiet der Stadt Hamburg. Der südliche Teil befindet sich auf dem Gebiet des Landes Niedersachsen. Die Erkundung und Sicherung des Grubengebäudes im Hamburger Raum wurde zwischen September 2019 und Februar 2020 durchgeführt. Anschließend wurde im März 2020 mit der Sicherung des niedersächsischen Teils des Grubengebäudes unterhalb des Ehestorfer Heuwegs und der angrenzenden Wohnbebauung begonnen und die Arbeiten wurden Anfang 2023 abgeschlossen.

Einsatzmöglichkeiten geophysikalischer Messmethoden zur Erkundung und Sicherung von Hinterlassenschaften aus oberflächennahem Altbergbau am Beispiel des ehemaligen Braunkohlenbergwerks Robertshall

Beim Ausbau der Straße Ehestorfer Heuweg in der Ortschaft Ehestorf/Kreis Rosengarten kam es am 11. September 2019 zu einem Tagesbruch, der bei ca. 0,5 m Durchmesser eine Tiefe von etwa 5 m aufwies. Die Recherche im Archiv des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Clausthal-Zellerfeld ergab, dass die wahrscheinliche Ursache des Tagesbruchs auf das ehemalige Braunkohlenbergwerk Robertshall zurückzuführen ist, welches hier Braunkohle im Untertagebetrieb abgebaut hat und bis 1922 betrieben wurde. Der Tagesbruch legte die Vermutung nahe, dass der seinerzeit bei der Betriebsstilllegung in den die Straße unterquerenden Strecken eingebrachte Sandversatz nicht ausreichend lagestabil oder der versetzte Streckenbereich zu knapp bemessen war. Die Lage der Strecken war dem Grunde nach bekannt und die Ergebnisse der Arbeiten 2019/2020 hatten die weitgehende Zuverlässigkeit des bergmännischen Risswerks bestätigt. Mit zunehmendem Voranschreiten der Arbeiten traten jedoch größere Abweichungen der Strecken von den im Risswerk verzeichneten Positionen auf. Zusätzlich wurden Verbruchzonen in Bereichen erbohrt, die laut Risswerk keine Strecken aufweisen sollten.

Bei fehlenden oder unvollständigen Risswerken kann die Gefährdung von Schutzgütern an der Tagesoberfläche durch Bergschäden

oft nur mit indirekten Methoden wie der Geophysik in sinnvoller Kombination mit Bohrungen zuverlässig abgeschätzt werden. Im Rahmen der Masterarbeit der Autorin wurde das Ausmaß des Bergwerks Robertshall mit geophysikalischen Methoden ermittelt. Die anschließende Verfüllung und Sicherung des alten Grubengebäudes ist das Ziel der Erkundung.

Durch die Anwendung mehrerer geophysikalischer Methoden auf einem Testprofil soll nicht nur die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht, sondern es sollen auch Erfahrungen gesammelt werden, welche Methoden unter den gegebenen geologischen und bergbaulichen Bedingungen am besten für die Erkundung geeignet sind. Die geophysikalischen Messungen werden durch eine Auswertung historischer Daten ergänzt.

Die Ergebnisse der Geophysik haben zur schnellen und zuverlässigen Erkundung zahlreicher, im Risswerk nicht verzeichneter Abbaustrecken geführt. Im Vergleich zur konventionellen Erkundung durch Bohrungen spart der Einsatz von seismischen Messungen Zeit und Kosten. Die Sicherungsmaßnahmen konnten durchgeführt werden, und der gewünschte Sicherungserfolg ist eingetreten, sodass keine weiteren Bewegungen der Erdoberfläche zu erwarten sind.

is of great value in evaluating whether the old mine workings pose hazards to the use of the surface. In order to ensure the success of safety measures, the underground is therefore being investigated using geotechnical- and geophysical methods.

Robertshall

The mining of lignite in the region of central Germany increased in the 18th century. As a result of the growing demand for energy and the already exhausted deposits close to the surface, deep mining was applied. The excavation chambers were supported with timber, excavated to the planned size and then collapsed. Only about 50 % of the coal seam could be extracted by this method. In most cases, the mining areas were located under agricultural land and the placement of backfill was therefore not considered necessary. Furthermore, due to the small overburden layer and insufficient technology, the backfill material could not be placed compacted enough to avoid effects on the surface. (1, 2, 3)

At the beginning of the 20th century a lignite deposit was discovered in the Hausbruch district of Hamburg. The deposit

Bei den Arbeiten stellte sich heraus, dass viele Bereiche des Bergwerks nicht im Risswerk dargestellt sind. Das Risswerk ist von hohem Stellenwert, wenn es darum geht, zu beurteilen, ob die untertägigen Strukturen eine Gefahr für die Nutzung der Oberfläche darstellen. Um den Erfolg von Sicherheitsmaßnahmen zu gewährleisten, wird der Untergrund daher mit geotechnischen und geophysikalischen Methoden untersucht.

Robertshall

Im 18. Jahrhundert nahm der Abbau von Braunkohle im mitteldeutschen Raum zu. Aufgrund des wachsenden Energiebedarfs und der bereits erschöpften oberflächennahen Lagerstätten wurde in vielen Gebieten Tiefbau betrieben. Die Strecken wurden mit Holz ausgebaut, um die Kohle hereinbrechend zu gewinnen. Mit dieser Methode konnten nur etwa 50 % des Kohleflözes abgebaut werden. In den meisten Fällen befanden sich die Abbaugelände unter landwirtschaftlichen Flächen, sodass eine Verfüllung nicht für notwendig erachtet wurde. Außerdem konnte das Versatzmaterial aufgrund der geringen Deckgebirgsschicht und der unzureichen-

consisted of a lignite-sand mixture with a lignite content of about 55%. The owner of the property owned the mining rights granted by the Celle Mining Office, which she sold to the Dortmund-based company Gebrüder Stern KG in 1918/1919 (4). After the First World War an increased demand for energy sources arose and made the mining of the rather uneconomic deposit profitable (5). At the end of 1919 the Robertshall union was formed. This union concluded a supply contract with Vereinigte Gummiwarenfabrik Harburg-Wien – later Phoenix. After the erection of a winding tower operations began on 10th March 1920. Lignite was used as an energy source for the process heat required for vulcanization in the production of rubberware. It also served as a raw material for soot, which is the primary aggregate used in tire production (6).

The mining of the approximately 8.5 m thick seam was carried out on two levels at depths of 13 and 17 m, respectively, using the room and pillar caving method. After the individual drifts had been excavated the wooden support beams were removed. During excavation and after closure, the drifts were backfilled with hand backfill in the area of the road. This backfilling method results in only a 40 to 50 % fill ratio (7). Due to the sandy subsoil, this led to extensive collapse of the mining areas and therefore mining damage visible at the surface.

With the improvement of the situation of the raw materials market and the resulting reduction of the price of coal the mine closed at the end of 1922. By then, it is documented that approximately 80,400 t of lignite sand had been mined. (8)

In the further course of the work, the 13 m and 17 m level will be referred to. This term refers to the mine record and not to the actual depth. The depth varies, of course, depending on the location.

Mining damage

The measures of backfilling of the cavities are carried out exclusively below the roads and properties due to economic reasons and time constraints. The total area of the mine, and thus the area affected by possible mining damage on the surface, extends to approximately 25 ha. In the northern areas of the former mine, there are numerous localized sink holes on the surface. This suggests that the underlying surface layer has mostly collapsed and the mine has thus been backfilled. Consequently, there are no significant alterations to the subsurface and associated hazards expected in these areas. Furthermore, this area is used exclusively for forestry. An examination of the entire area is thus not economical, since the expenditure of time cannot justify the marginal increase in safety.

Due to the incomplete mine plans, only known and found cavities can be secured. This eliminates the aspect of securing the entire mine workings, as required by the preservation.

Geophysics

The detection of cavities in the subsurface is a task frequently approached to geophysics. A fundamental problem of cavity detection with geophysics is a physical issue. In all methods where the measured quantities are derived from a potential, it is essential that a cavity must not lie too deep in relation to its diameter. (8)

The aim of the first investigations is to find a suitable, cost-efficient and effective geophysical method to locate potential areas

den Technik nicht ausreichend verdichtet werden, um Auswirkungen auf die Oberfläche zu vermeiden. (1, 2, 3)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde im Hamburger Stadtteil Hausbruch eine Braunkohlenlagerstätte entdeckt. Die Lagerstätte bestand aus einem Braunkohle-Sand-Gemisch mit einem Braunkohlenanteil von etwa 55%. Die Eigentümerin des Grundstücks besaß die vom Bergamt Celle erteilten Abbaurechte, die sie 1918/1919 an die Dortmunder Firma Gebrüder Stern KG verkaufte (4). Nach dem Ersten Weltkrieg entstand ein erhöhter Bedarf an Energieträgern und machte den Abbau der eher unwirtschaftlichen Lagerstätte rentabel (5). Ende 1919 wurde die Gewerkschaft Robertshall gegründet. Diese schloss einen Liefervertrag mit der Vereinigten Gummiwarenfabrik Harburg-Wien – später Phoenix – ab. Nach der Errichtung eines Förderturms wurde der Betrieb am 10. März 1920 aufgenommen. Die Braunkohle wurde als Energieträger für die zur Vulkanisation benötigte Prozesswärme bei der Herstellung von Gummiwaren eingesetzt. Außerdem diente sie als Rohstoff für den Ruß, der bei der Reifenherstellung als Hauptbestandteil verwendet wird (6).

Der Abbau des ca. 8,5 m mächtigen Flözes erfolgte auf zwei Sohlen in 13 bzw. 17 m Teufe im Room and Pillar-Verfahren. Nach dem Auffahren der einzelnen Stollen wurden die hölzernen Stützbalken entfernt. Während des Aushubs und nach der Schließung wurden die Schächte im Bereich der Straße mit Handschüttung verfüllt. Diese Art der Verfüllung erreicht lediglich einen Füllungsgrad von 40 bis 50 % (7). Dies führte aufgrund des sandigen Untergrunds zu großflächigen Einbrüchen der Abbaubereiche und damit zu an der Oberfläche sichtbaren Bergschäden.

Mit der Verbesserung der Situation auf dem Rohstoffmarkt und der damit verbundenen Senkung des Kohlepreises wurde die Grube Ende 1922 geschlossen. Bis dahin wurden nachweislich ca. 80.400 t Braunkohlensand abgebaut. (4)

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird von der 13 m- und 17 m-Sohle gesprochen. Dieser Begriff bezieht sich auf die Angaben im Risswerk und nicht auf die tatsächliche Tiefe. Die Tiefe variiert natürlich je nach Lage.

Bergbauschäden

Die Maßnahmen zur Verfüllung der Hohlräume werden aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen ausschließlich unterhalb der Straßen und Grundstücke durchgeführt. Die Gesamtausdehnung des Bergwerks und damit die Fläche, die von möglichen Bergschäden an der Oberfläche betroffen ist, beträgt ca. 25 ha. In den nördlichen Bereichen des ehemaligen Bergwerks finden sich an der Oberfläche zahlreiche Pingen. Dies lässt darauf schließen, dass die darunter liegende Deckschicht größtenteils verbrochen ist und mögliche Hohlräume somit verfüllt sind. Folglich sind in diesen Bereichen keine signifikanten Veränderungen des Untergrunds und damit verbundene Gefahren zu erwarten. Außerdem wird dieses Gebiet ausschließlich forstwirtschaftlich genutzt. Eine Untersuchung des gesamten Gebiets ist daher nicht wirtschaftlich, da der Zeitaufwand den marginalen Sicherheitsgewinn nicht rechtfertigt.

Aufgrund des unvollständigen Risswerks können nur bekannte und gefundene Hohlräume gesichert werden. Damit entfällt der Aspekt der Sicherung des gesamten Grubengebäudes, die für eine dauerhafte Wiederherstellung gefordert wird.

of cavities in the area of the mine and the reduce the number of drillings. In order to verify the accuracy of the geophysical measurements, test profiles were constructed along drifts that had already been confirmed by drilling (Figure 1). This also serves to validate the measurement methods and provides information on how future measurement data can be interpreted.

The selection of measurement methods is based on the cost per meter, the time required and their depth range. The selected methods are geoelectrics, georadar and seismic.

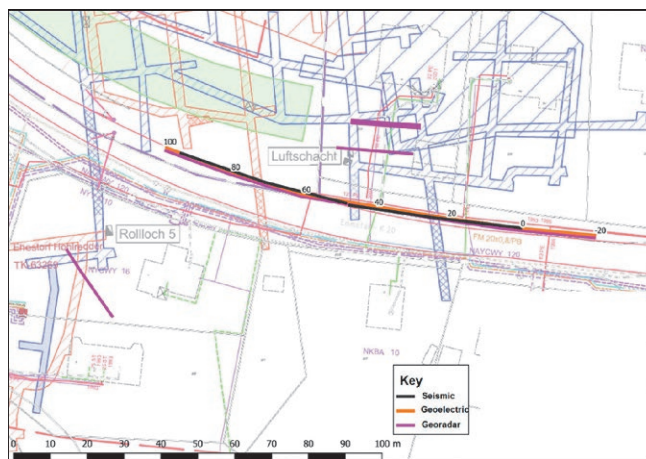


Fig. 1. Location of the test profiles along the Emmetal road (left), display of the landstreamer (right).
Bild 1. Lage der Testprofile entlang der Straße Emmetal (links), Auslage des Landstreamers (rechts).
Photos/Fotos: Weinbach

Results of seismic measurement campaigns

Both, geoelectrics and georadar measurements could not verify any of the drifts crossing the test profiles. The seismic measurements were evaluated by refraction tomography on the one hand and qualitatively analysed for characteristic wavefield distortions on the other hand. The refraction tomography provides a depth distribution of P-wave velocities below the profile. A zone of low velocities was localized overlying one of the previously known drifts. Lowered velocities indicate a loosened zone.

Seismic was selected as a suitable method for subsurface exploration and measurements were carried out in a total of five campaigns between March and June 2021. Measurements were performed using the same equipment previously installed for the test profiles. The measurements were made using either the landstreamer or the geophones were embedded in the ground along the profiles (Figures 2, 3). The seismic energy was generated with a hand hammer. Measurements were taken with a maximum of 48 active channels. Profiles that were longer were measured in sections.

In order to verify the suspicion points found, a direct exploration method must be used that can drill below the anomalies. Therefore, drillings are carried out to confirm the suspicion points. However, a borehole represents only linear information about a spatial phenomenon. To obtain an understanding of the cavities

Geophysik

Das Auffinden von Hohlräumen im Untergrund ist eine Aufgabe, die häufig an die Geophysik herangetragen wird. Ein grundlegendes Problem der Hohlraumdetektion in der Geophysik ist ein physikalisches Problem. Bei allen Methoden, bei denen die Messgrößen aus einem Potential abgeleitet werden, ist es wichtig, dass ein Hohlraum im Verhältnis zu seinem Durchmesser nicht zu tief liegt. (8)

Ziel der ersten Untersuchungen ist es, eine geeignete, kosteneffiziente und effektive geophysikalische Methode zu finden, um potentielle Hohlräume im Bereich des Bergwerks zu lokalisieren und die Anzahl der Bohrungen zu reduzieren. Um die Genauigkeit der geophysikalischen Messungen zu überprüfen, wurden Testprofile entlang der bereits durch Bohrungen bestätigten Stollen angelegt (Bild 1). Dies dient auch der Validierung der Messmethoden und gibt Aufschluss darüber, wie zukünftige Messdaten interpretiert werden können.

Die Auswahl der Messmethoden basiert auf den Kosten pro Meter, dem Zeitaufwand und dem Tiefenbereich. Die ausgewählten Methoden sind Geoelektrik, Georadar und Seismik.

Ergebnisse der seismischen Messkampagnen

Sowohl die Geoelektrik- als auch die Georadmessungen konnten keine der kreuzenden Strecken unterhalb der Testprofile nachweisen. Die seismischen Messungen wurden zum einen mittels Refraktionstomographie ausgewertet und zum anderen qualitativ auf charakteristische Wellenfeldverzerrungen analysiert. Die Refraktionstomographie liefert eine Tiefenverteilung der P-Wellen-Geschwindigkeiten unterhalb des Profils. Es wurde eine Zone mit niedrigen Geschwindigkeiten lokalisiert, die über einem der zuvor bekannten Stollen liegt. Niedrigere Geschwindigkeiten deuten auf eine aufgelockerte Zone hin.

Die Seismik wurde als geeignete Methode für die Erkundung des Untergrunds ausgewählt und die Messungen wurden in insgesamt fünf Kampagnen zwischen März und Juni 2021 durchgeführt. Die Messungen wurden mit denselben Geräten durchgeführt, die zuvor für die Testprofile installiert worden waren. Die Messungen erfolgten entweder mit dem



Fig. 2. Use of the measuring devices (left) and plug-in geophones (right).
Bild 2. Einsatz der Messgeräte (links) und Steckgeophone (rechts). Photos/Fotos: Weinbach



Fig. 3. Landstreamer on sealed surface (left), geophone (right).
 Bild 3. Landstreamer auf versiegelter Oberfläche (links), Geophon (rechts).
 Photos/Fotos: Weinbach

of the subsurface, it is necessary to assign a volume to the linear data. After a loss of circulation is detected and the borehole is encased with PVC-casing, material is placed in the cavity. Contrary to the mud loss, the quantity provides conclusions about the size of the cavity.

It is apparent that there is a relation between the strength of the anomaly and the amount of backfill. Weak anomalies were either not confirmed during drilling, or only small amounts of the construction material were placed.

During the backfilling process, mobilization of the subsoil cannot be excluded. Therefore, material can reach other nearby areas and already fill the cavity. The water content of the suspension is approximately 80 % and can flush out parts of the sandy subsoil. Backfilling takes place without additional pressure, so the risk of mobilization is low, but not completely excluded.

Results

During the geophysical measurements in the scope of this thesis, a total of 5,000 m seismic profiles were measured. In the process, 43 suspicion points were interpreted and 36 were confirmed by means of drillings. It should be mentioned that at the time of writing the thesis a number of profiles have not been verified by drilling.

In total, a cavity was detected by mud loss in 36 of a total of 43 suspicion points, giving a hit rate of 83,72 %. Of the 36 verified suspicion points, 23 were classified as strong anomalies and 13 as weak anomalies. All unverified suspicion points were anomalies of class 2 or lower.

The results of the seismic measurements carried out are shown in figure 4, which shows that most of the anomalies lie along the theoretical axis of the mine plan. The intensity of the anomalies was categorized during the evaluation. The anomaly is assigned to a class from 1 to 3, where 1 (red) represents a strong anomaly, 2 (orange) a weak anomaly and 3 (blue) an area or unknown shape.

The cavities that were exclusively located by drilling technology followed the mining pattern of the existing mine plans. Thereby it suggests that the anomalies found follow a similar pattern. As a result, it leads to the assumption that the use of seismic has been effective.

Landstreamer oder mit Geophonen, die entlang der Profile in den Boden gesteckt wurden (Bilder 2, 3). Die seismische Energie wurde mit einem Handhammer erzeugt. Die Messungen wurden mit maximal 48 aktiven Kanälen durchgeführt. Längere Profile wurden in Abschnitten gemessen.

Um die gefundenen Verdachtspunkte zu verifizieren, muss eine direkte Explorationsmethode angewandt werden, um den Untergrund unterhalb der Anomalien zu untersuchen. Daher werden Spülbohrungen durchgeführt, um die Verdachtspunkte zu bestätigen. Ein Bohrloch stellt jedoch nur eine lineare Information über ein räumliches Phänomen dar. Um ein Verständnis für die Hohlräume des Untergrunds zu erhalten, ist es notwendig, den linearen Daten ein Volumen zuzuordnen. Nachdem ein Spülungsverlust festgestellt und das Bohrloch mit einem PVC-Rohr ausgebaut wurde, wird Material

in den Hohlraum eingebracht. Im Gegensatz zum Spülungsverlust lässt die Menge Rückschlüsse auf die Größe des Hohlraumes zu.

Es zeigt sich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Stärke der Anomalie und der Menge der Verfüllung gibt. Schwache Anomalien wurden entweder bei der Bohrung nicht nachgewiesen, oder es wurden nur geringe Mengen des Baustoffs eingebracht.

Bei der Verfüllung kann eine Mobilisierung des Untergrunds nicht ausgeschlossen werden. Daher kann Material in andere nahe gelegene Bereiche gelangen und den Hohlraum bereits verfüllen. Der Wassergehalt der Suspension beträgt ca. 80 % und kann Teile des sandigen Untergrunds ausspülen. Die Verfüllung erfolgt ohne zusätzlichen Druck, sodass die Gefahr einer Mobilisierung zwar gering ist, aber nicht völlig ausgeschlossen werden kann.

Ergebnisse

Bei den geophysikalischen Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden in einer Länge von insgesamt 5.000 m seismische Profile gemessen. Dabei wurden 43 Verdachtspunkte interpretiert und 36 durch Bohrungen bestätigt. Zu erwähnen ist, dass zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit eine Reihe von Profilen noch nicht durch Bohrungen verifiziert wurden.

Insgesamt wurde in 36 von 43 Verdachtspunkten ein Hohlraum durch Spülungsverluste festgestellt, was einer Trefferquote von 83,72 % entspricht. Von den 36 verifizierten Verdachtspunkten wurden 23 als starke Anomalien und 13 als schwache Anomalien eingestuft. Alle nicht verifizierten Verdachtspunkte waren Anomalien der Klasse 2 oder niedriger.

Die Ergebnisse der durchgeführten seismischen Messungen sind in Bild 4 dargestellt, aus dem hervorgeht, dass die meisten Anomalien entlang der theoretischen Achse der vorhandenen Stollen liegen. Bei der Auswertung wurde die Intensität der Anomalien kategorisiert. Die Anomalie wird einer Klasse von 1 bis 3 zugeordnet, wobei 1 (rot) eine starke Anomalie, 2 (orange) eine schwache Anomalie und 3 (blau) eine Fläche oder unbekannte Form darstellt.

Die Hohlräume, die ausschließlich mit Hilfe der Bohrtechnik lokalisiert wurden, folgten dem Abbaumuster des bestehenden Risswerks. Daraus lässt sich schließen, dass die gefundenen Anomalien einem ähnlichen Muster folgen. Dies führt zu der Annahme, dass der Einsatz der Seismik zielführend war.

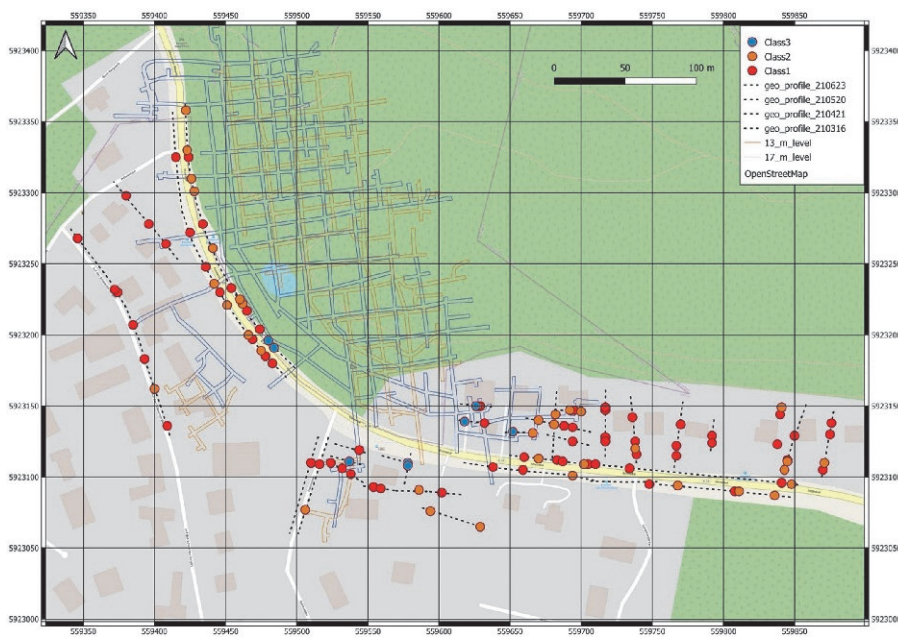


Fig. 4. Results of the seismic measurements.

Bild 4. Ergebnisse der durchgeführten seismischen Messungen. Source/Quelle: Weinbach

Nevertheless, it should be noted that the evaluation is qualitative and subjective. Therefore, it is possible that the marked anomalies have other causes and no evidence of cavities or drifts is found here. It is not possible to determine the depth position of the anomaly. The uncertainty of the positioning is about ± 2 m.

Discussion

In order to be able to answer the central question of the thesis, whether geophysics is a successful exploration method for old mining projects, the findings and problems are discussed in the following.

The data base on already performed investigations on this application example of geophysics is very limited. The selection of geophysical methods was based on a few application cases from the past as well as on advice from other companies. The insufficient data basis is mainly favoured by the fact that the implementation of similar projects is carried out by companies and there is no research topic involved.

A theoretical preselection limits the methods to seismic, geoelectric and georadar. The deciding factor for the selection of these methods was the subsurface condition, which was very homogeneous due to the overlying sand layer. In addition, the formations searched for were located at depths of 13 and 17 m, respectively, which in turn directly ruled out some methods because their range would be too small. The cost of the measurements also factored into the pre-selection process.

Nevertheless, it should be mentioned that the evaluation of the seismic measurements is subjective and thus never free from errors. Furthermore, the evaluation only shows the position of the anomaly, but not the associated depth. However, for the objective of the securing, it is not necessary to image the subsurface in detail, but only to reliably detect zones of loosening. Therefore, seismic was selected as the geophysical method.

Furthermore, the economic efficiency of the method has to be considered. In this case the data basis is deficient. Prior to the

Es ist jedoch zu beachten, dass die Bewertung qualitativ und subjektiv ist. Daher ist es möglich, dass die markierten Anomalien andere Ursachen haben und dass hier keine Anzeichen für Hohlräume oder Stollen zu finden sind. Es ist nicht möglich, die Tiefenlage der Anomalie zu bestimmen. Die Unsicherheit der Positionierung beträgt etwa ± 2 m.

Diskussion

Um die zentrale Frage der Arbeit, ob die Geophysik eine erfolgreiche Erkundungsmethode für Altbergbauprojekte ist, beantworten zu können, werden im Folgenden die Erkenntnisse und Probleme diskutiert.

Die Datenbasis über bereits durchgeführte Untersuchungen zu diesem Anwendungsbeispiel der Geophysik ist sehr begrenzt. Die Auswahl der geophysikalischen Methoden basierte auf wenigen Anwendungsfällen aus der Vergangenheit sowie auf Hinweisen von anderen Unternehmen. Die unzureichende Datenbasis wird vor allem dadurch begünstigt,

dass die Durchführung ähnlicher Projekte von Unternehmen durchgeführt wird und kein Forschungsthema vorliegt.

Eine theoretische Vorauswahl beschränkt die Methoden auf Seismik, Geoelektrik und Georadar. Ausschlaggebend für die Auswahl dieser Methoden war die Untergrundbeschaffenheit, die aufgrund der darüber liegenden Sandschicht sehr homogen war. Außerdem befanden sich die gesuchten Formationen in 13 bzw. 17 m Tiefe, was wiederum einige Methoden direkt ausschloss, da ihre Reichweite zu gering wäre. Auch die Kosten für die Messungen spielten bei der Vorauswahl eine Rolle.

Dennoch ist zu erwähnen, dass die Auswertung der seismischen Messungen subjektiv und damit nie fehlerfrei ist. Außerdem zeigt die Auswertung nur die Position der Anomalie, nicht aber die zugehörige Tiefe. Für die Zielsetzung der Sicherung ist es jedoch nicht notwendig, den Untergrund detailliert abzubilden, sondern lediglich Auflockerungszonen zuverlässig zu erkennen. Daher wurde die Seismik als geophysikalische Methode gewählt.

Außerdem muss die Wirtschaftlichkeit der Methode berücksichtigt werden. In diesem Fall ist die Datengrundlage mangelhaft. Bereits vor der Durchführung der Sicherungsmaßnahmen konnte davon ausgegangen werden, dass die Grubenbaue über die dokumentierten Stollen hinausreichen. Auch muss bei Sicherungsmaßnahmen immer der Zeitbedarf berücksichtigt werden. Die Seismik ist keine besonders zeitintensive Methode und liefert schnelle Ergebnisse. Dies ist besonders für kurzfristige Planungen wichtig. In einigen Fällen wurden bei den Bohrungen keine Hohlräume angetroffen, und es musste kurzfristig umdisponiert werden. Durch die schnelle Verfügbarkeit und unkomplizierte Durchführung konnte das Projekt ohne größere Verzögerungen, die erhebliche Mehrkosten verursachen können, umgesetzt werden.

Da das Untersuchungsgebiet ein Wohngebiet umfasst, variieren die Oberflächeneigenschaften. Im Gegensatz zur Geoelektrik können seismische Messungen sowohl auf versiegelten Flächen als auch auf weichen Böden ohne Komplikationen durchgeführt

implementation of the securing measures an assumption could already be made that the mine workings extended beyond the documented drifts. Also, the time required must always be taken into account for securing measures. Seismics is not a particularly time-consuming method and provides fast results. This is particularly important for short-term planning. In some cases, no cavities were encountered during drilling and rescheduling was necessary at short notice. Due to the fast availability and uncomplicated execution the project could be implemented without major delays, which can cause considerable additional costs.

Since the study area includes a residential area the surface characteristics vary. Contrary to geoelectrics, seismic measurements can be carried out on sealed surfaces as well as on soft grounds without any complications. Over the course of the work it became apparent that this saved time and therefore reduced expenses.

Seismic surveys were conducted in five measurement campaigns over the period from March to June 2021. A total of 110 suspicion points were found. These were transferred to plans and used for drilling scheduling. During drilling, as many suspicion points as possible were to be checked with one borehole due to time and cost constraints. At the same time, this made the evaluation more complicated, which will be discussed later.

A flush drilling method was used and the corresponding mud loss was documented. It amounts to between 0 and 100% during drilling and provides information about the areas in which a potential cavity is located. During the work, a total of 235 exploratory boreholes were drilled based on the geophysics measurement results. An average mud loss of 89.64% occurred in 66.38% of the boreholes. The average volume of backfill material amounts to 3,101.73 l per borehole.

The evaluation of the data showed a clear correlation between mud loss and the subsequent backfill volume. This method is not sufficient to show the actual size of the void, since no total amount of loss is documented. Since the amount of mud loss was 100% in most cases, no correlation between the size and the backfill volume could be demonstrated. However, the mud loss gives information about the depth and location of the cavity and provides first indications about its size. In addition, there are some indications that the drilling activity mobilizes the sandy subsoil and slightly increase the size of the voids.

After drilling each borehole is secured and a water-cement mixture is injected through a PVC pipe. The backfill volumes were documented and evaluated to map the dimensions of the cavities. A disadvantage of this approach is that in retrospect it cannot be clearly assigned which backfill quantity belongs to which suspicion point. Although the evaluation shows the volumes per borehole, it does not show the quantities per suspect point. This is due to the fact that often several boreholes were drilled in the area of a cluster of suspect points. However, the backfill quantities show a clear correlation to anomaly strength. Small amounts of backfill material were often placed at suspicion points with low anomaly strength. Boreholes planned with previous seismic measurements encounter a cavity 83.72% of the time. This proves that seismic is a target-oriented measurement method to detect underground cavities.

Within the scope of this work, a map was produced with the help of the software QGIS showing all detected anomalies of the measurements (Figure 4). While this served as a planning tool, it also

werden. Im Lauf der Arbeiten stellte sich heraus, dass dies Zeit und damit Kosten spart.

Die seismischen Untersuchungen wurden in fünf Messkampagnen im Zeitraum von März bis Juni 2021 durchgeführt. Es wurden insgesamt 110 Verdachtspunkte gefunden. Diese wurden in Pläne übertragen und für die Bohrplanung verwendet. Bei den Bohrungen sollten aus Zeit- und Kostengründen möglichst viele Verdachtspunkte mit einer Bohrung überprüft werden. Gleichzeitig wurde dadurch die Auswertung komplizierter, worauf später noch eingegangen wird.

Es wurde ein Spülbohrverfahren angewandt und der entsprechende Spülungsverlust dokumentiert. Er beträgt beim Bohren zwischen 0 und 100% und gibt Aufschluss darüber, in welchen Bereichen sich ein potentieller Hohlraum befindet. Im Rahmen der Arbeiten wurden auf der Grundlage der geophysikalischen Messergebnisse insgesamt 235 Erkundungsbohrungen abgeteuft. In 66,38% der Bohrungen trat ein durchschnittlicher Spülungsverlust von 89,64% auf. Das durchschnittliche Volumen des Verfüllmaterials beträgt 3.101,73 l pro Bohrloch.

Die Auswertung der Daten zeigte einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Spülungsverlust und dem nachfolgenden Verfüllvolumen. Diese Methode reicht nicht aus, um die tatsächliche Größe des Hohlraums aufzuzeigen, da keine Gesamtmenge des Verlusts dokumentiert wird. Da der Spülungsverlust in den meisten Fällen 100% betrug, konnte keine Korrelation zwischen der Größe und dem Verfüllvolumen nachgewiesen werden. Der Spülungsverlust gibt jedoch Aufschluss über die Tiefe und Lage des Hohlraums und liefert erste Hinweise auf dessen Größe. Darüber hinaus gibt es einige Hinweise darauf, dass die Bohrtätigkeit den sandigen Untergrund mobilisiert und die Größe der Hohlräume leicht erhöht.

Nach dem Bohren wurde jedes Bohrloch gesichert und ein Wasser-Zement-Gemisch durch ein PVC-Rohr injiziert. Die Verfüllmengen wurden dokumentiert und ausgewertet, um die Dimensionen der Hohlräume abzubilden. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass im Nachhinein nicht eindeutig zugeordnet werden kann, welche Verfüllmenge zu welchem Verdachtspunkt gehört. Die Auswertung stellt zwar die Volumina pro Bohrloch dar, jedoch nicht die Mengen pro Verdachtspunkt. Dies liegt daran, dass im Bereich einer Verdachtspunktgruppe oft mehrere Bohrungen niedergebracht wurden. Die Verfüllmengen zeigen jedoch eine deutliche Korrelation zur Anomaliestärke. An Verdachtspunkten mit geringer Anomaliestärke wurden oft geringe Mengen an Versatzmaterial eingebracht. Bohrungen, die mit früheren seismischen Messungen geplant wurden, stoßen in 83,72% der Fälle auf einen Hohlraum. Dies beweist, dass die Seismik ein zielgerichtetes Messverfahren ist, um unterirdische Hohlräume zu erkennen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit Hilfe der Software QGIS eine Karte erstellt, die alle entdeckten Anomalien der Messungen zeigt (Bild 4). Diese diente zum einen als Planungshilfe, zum anderen konnte eine Korrelation zwischen der detektierten Anomaliendichte und der Größe des gefundenen Hohlraums nachgewiesen werden. Auffällig war die Dichte der Verdachtspunkte in den erweiterten Bereichen der bereits dokumentierten Stollen. Die Messungen wiesen häufig auf Verbindungsstollen zwischen Strukturen hin. Diese beiden Typen, Stollenerweiterungen und Stollenverbindungen, wurden in fast allen Fällen durch Bohrungen nachgewiesen.

Die Schwierigkeit bei der Auswertung der Daten liegt in der konkreten Zuordnung eines gefundenen Hohlraums zu einem Verdachts-

provided evidence of a correlation between the detected anomaly density and the size of the cavity found. The density of suspicion points in the extended areas of the already documented drifts was noticeable. The measurements frequently indicated connecting drifts between structures. These two types, drift extensions and drift connections, have been detected by drilling in almost all cases.

The difficulty in evaluating the data is the specific allocation of a found cavity to a suspicion point. Whereas the geophysical survey collects data extensively, the boreholes only collect data on a point-by-point basis. This creates a lot of room for interpretation of the results. During the evaluation a cavity was assigned to a suspicion point if the borehole running below registered a mud loss. It is possible to use the mud loss data, because during the work a correlation between this and the backfill quantity has been proven. This correlation indicated that backfill material can be inserted into boreholes with mud loss. The mud loss data is the only information that provides accurate data on the depth of the supposed cavity. This allowed the backfill quantity to be additionally assigned to one of the two excavation levels.

In addition, the overall goal of properly securing the subsurface should not be ignored. The backfilling work is based solely on the plans based on the seismic measurements. After securing a total of 92 control boreholes were drilled, taking into account the necessary setting time and after completion of the drilling and backfilling work. This allowed to verify the reliability of the safety measures. In 27.17% of the control boreholes an inadequately secured zone was encountered. In the remaining cases (72.82%), the previously placed and cured backfill material was encountered. It can therefore be assumed that the desired securing success has been achieved and that no further movements of the ground surface are to be expected.

Während die geophysikalische Untersuchung flächendeckend Daten sammelt, werden die Bohrungen nur punktuell erfasst. Dadurch entsteht ein großer Spielraum für die Interpretation der Ergebnisse. Bei der Auswertung wurde ein Hohlraum einem Verdachtspunkt zugeordnet, wenn das darunter liegende Bohrloch einen Spülungsverlust registrierte. Es ist möglich, die Daten zum Spülungsverlust zu verwenden, da bei den Arbeiten eine Korrelation zwischen diesem und der Verfüllmenge nachgewiesen wurde. Diese Korrelation deutet darauf hin, dass Versatzmaterial in Bohrlöcher mit Spülungsverlusten eingebracht werden kann. Die Daten über den Spülungsverlust sind die einzigen Informationen, die genaue Angaben über die Tiefe des angenommenen Hohlraums liefern. Damit konnte die Verfüllmenge zusätzlich einer der beiden Aushubebenen zugeordnet werden.

Darüber hinaus darf das Gesamtziel der ordnungsgemäßen Sicherung des Untergrunds nicht außer Acht gelassen werden. Die Verfüllarbeiten richten sich ausschließlich nach den Plänen, die auf den seismischen Messungen basieren. Nach der Sicherung wurden unter Berücksichtigung der notwendigen Abbindezeit und nach Abschluss der Bohr- und Verfüllarbeiten insgesamt 92 Kontrollbohrungen niedergebracht. Damit konnte die Zuverlässigkeit der Sicherungsmaßnahmen überprüft werden. Bei 27,17% der Kontrollbohrungen wurde eine unzureichend gesicherte Zone angetroffen. In den übrigen Fällen (72,82%) wurde das zuvor eingebrachte und ausgehärtete Verfüllmaterial angetroffen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der gewünschte Sicherungserfolg erreicht wurde und keine weiteren Oberflächensenkungen zu erwarten sind.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Ott, M. (1976): Gefährdung der Tagesoberfläche durch Tagesbrüche in Braunkohlentiefbaubereichen des Bezirkes Halle. Diplomarbeit Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- (2) Hustrulid, W. A. (1982): Underground mining methods handbook. United States.
- (3) Stefanko, R. (1983): Coal mining technology: theory and practice. United States.
- (4) Bergamt Hannover (1919): Acta betreffend Braunkohlebergwerk Robertshall – Betrieb.
- (5) Meyer-Abich, K. M. (1982): Energy Issues and Policies in the Federal Republic of Germany. Insitute Market and Plan, Department of Ecomonics, University of Frankfurt, Frankfurt/M.
- (6) Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv (HWWA) (Hrsg.) (1949): Situation der westdeutschen Gummi-Industrie. In: Wirtschaftsdienst Vol. 29, Ausgabe 2, S. 48 – 50.
- (7) Fritzsche, C. H. (1962): Lehrbuch der Bergbaukunde. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- (8) Pilecki, Z. (2003): Die Anwendung geophysikalischer Methoden bei der Lösung von Altbergbau-Problemen. 3. Altbergbau-Kolloquium, Freiberg.

Author / Autor

Hannah Weinbach M.Sc., SST Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner
Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen