

Mine Water Monitoring in Closed Mines at RAG Aktiengesellschaft

The shutdown of hard coal production in 2018 implicates a challenge in deriving of physical and chemical parameters of mine water in situ. Finishing underground activities is going along with a limitation of alternative application of monitoring methods. This report is focussing on measures to derive sufficient information about water rebound in former mines. Exemplarily results of an un-

derground monitoring system, which was developed in cooperation between TH Georg Agricola University (THGA) in Bochum/Germany and RAG Aktiengesellschaft, Essen/Germany, are presented. The system includes four probes at the former Auguste Victoria mine, which had been developed for a long-term observation of a mine water rebound process over two or three decades.

Grubenwassermonitoring in geschlossenen Bergwerken der RAG Aktiengesellschaft

Die Einstellung der Steinkohlenproduktion im Jahr 2018 ist mit der Herausforderung verbunden, physikalische and chemische Parameter des Grubenwassers in situ weiterhin zu erfassen. Das Beenden der Untertagebetriebe führte zu Einschränkungen der Alternativen bei den Monitoringmethoden. Dieser Bericht fokussiert sich auf Maßnahmen, die zur Absicherung ausreichender Informationen zum Grubenwasseranstieg in ehemaligen Bergwerken entwickelt wurden. Es werden beispielhafte Ergebnisse

dargestellt, die durch ein Grubenwassermonitoring unter Tage erzielt wurden, welches in einem Kooperationsprojekt mit der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA) in Bochum und der RAG Aktiengesellschaft, Essen, entwickelt wurde. Das System besteht aus vier Sonden auf dem ehemaligen Bergwerk Auguste Victoria in einem Pilotprojekt für eine Langzeitüberwachung des Grubenwasseranstiegs für den Zeitraum von zwei oder drei Jahrzehnten.

Introduction

German hard coal mining was shut down in 2018. The former coal production company RAG Aktiengesellschaft, Essen/Germany, is responsible for future consequences of the mining activities. Mine water management is a long-term task to fulfill beside regulation of damages caused by subsidence and management of groundwater. The regional concept of RAG includes a controlled rebound of mine water level, a reduction of pumping stations and installation of well pumps in shafts instead of underground pumps. The mine water will be controlled permanently on a level below the ground water reservoir, which is used for drinking water abstraction. Individual concepts had been developed also for other former mining districts in the Saar area and in Ibbenbüren.

After closing of a mine normally the only way to get information about the mine water level and parameters of the water is restricted to measures from the surface. In cooperation with the TH Georg Agricola University (THGA), Bochum/Germany, an additional monitoring system was developed by RAG. Some information about the project is given in the following chapter.

Einführung

Die Steinkohlenförderung in Deutschland wurde im Jahr 2018 eingestellt. Die RAG Aktiengesellschaft, Essen, ist als früherer Steinkohlenproduzent verantwortlich für zukünftige Konsequenzen der Bergbaubetriebe. Grubenwassermanagement ist dabei ebenso eine Ewigkeitsaufgabe wie die Schadensregulierung durch Bodenbewegungen und das Grundwassermanagement. Das regionale Konzept der RAG sieht einen kontrollierten Grubenwasseranstieg, die Reduzierung der Pumpstandorte und die Errichtung von Brunnenbetrieben anstelle untertägiger Wasserhaltungen vor. Dabei wird das Grubenwasserniveau kontrolliert unterhalb der Grundwasserhorizonte gehalten, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden. Individuelle Konzepte wurden ebenso für die ehemaligen Bergbauregionen Saarland und Ibbenbüren entwickelt.

Nach Schließung eines Bergwerks ist es normalerweise nur noch durch Messungen von über Tage aus möglich, Informationen über das Grubenwasserniveau und Parameter des Grubenwassers zu erhalten. In Kooperation mit der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, wurde durch die RAG ein ergänzendes Monitoringsystem entwickelt. Einige Informa-

A first initial trial of the monitoring system was installed at the former mine Auguste Victoria in 2017. The focus of this article is to give an overview to more than 2,000 days of experience with the system.

Research project

The RAG research project in cooperation with THGA started in 2015. Within the frame of the project four work packages had been defined, including the planning and conception of the system, the test and installation of components, the installation and initial operation of an underground test system, as well as the start of regular monitoring and subsequent analysis and improvement.

The project ended in December 2017. The first underground trial system was installed at Auguste Vitoria mine at 9th April 2017.

The system allows to gather additional information from abandoned mine districts. The system includes probes with different sensors, electrical supply and data transfer units and the cable connection to the control room above ground. The complete system is intrinsically safe and approved by the mining authority in Germany. The following parameters are observed:

- pressure;
- temperature;
- electrical conductivity;
- direction of velocity; and
- flow rate.

Figure 1 shows the modified multi parameter probe manufactured by Sea & Sun company in Trappenkamp/Germany. The cable conduction is at the upper end of the hanging probe. In comparison to the original version the probe is dismantled by a protection cave. Under the main unit the sensors for pressure, temperature, electrical conductivity, and flow measurement are located. An additional mechanical switch is connected to the probe by a wire which indicates present water below the probe at the roadway floor area.

Parameters of the lower levels are very important to proof the functioning of the planned water flow, therefore the probes are installed within the main water gateways. In minimum the measurement system should deliver data about rebound between level – 1,110 m NHN and – 600 m NHN. This process is prognosed with a duration of approximately 15 years.

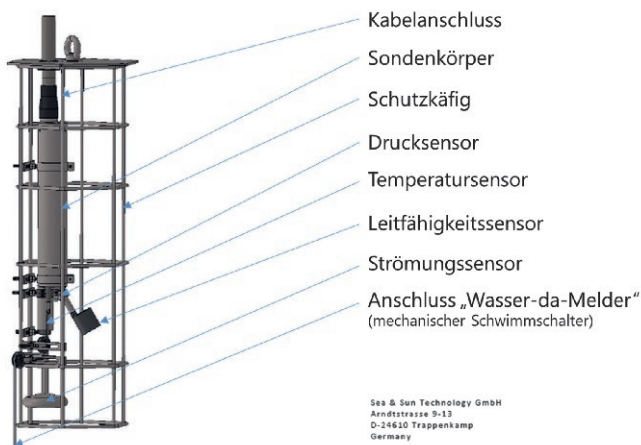


Fig. 1. RAG Ex-Schutz probe.

Bild 1. RAG Ex-Schutz-Sonde. Source/Quelle: RAG

tionen zu diesem Projekt werden im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst.

Ein erster Piloteinsatz des Monitoringsystems wurde auf dem ehemaligen Bergwerk Auguste Victoria im Jahr 2017 installiert. Der Schwerpunkt des Artikels liegt darin, einen Überblick über die Erfahrungen mit dem System aus einer Betriebsdauer von mehr als 2.000 Tagen zu geben.

Forschungsprojekt

Das RAG-Forschungsprojekt in Kooperation mit der THGA begann im Jahr 2015. Im Rahmen des Projekts wurden vier Arbeitspakete definiert, welche die Planung und Konzeption des Systems, die Testphase und die Installation von Systemkomponenten, einen Piloteinsatz des Untertagesystems sowie den Beginn des Regelbetriebs und die Analyse und Verbesserung beinhaltet haben.

Das Projekt endete im Dezember 2017. Das erste untertägige Pilotsystem wurde auf dem ehemaligen Bergwerk Auguste Victoria am 9. April 2017 in Betrieb genommen.

Das System erlaubt die Sammlung ergänzender Daten aus dem Bereich ehemaliger Bergbaubetriebe. Es beinhaltet sowohl Sonden mit verschiedenen Sensoren als auch die elektrische Versorgung, den Datentransfer und die Kabelverbindung zur Kontrollstation über Tage. Das Gesamtsystem ist eigensicher ausgelegt und zugelassen durch die deutsche Bergaufsichtsbehörde. Folgende Parameter werden erfasst:

- Druck,
- Temperatur,
- elektrische Leitfähigkeit der Umgebung,
- Strömungsrichtung und
- Strömungsgeschwindigkeit.

Bild 1 stellt die von der Firma Sea & Sun Technology in Trappenkamp entwickelte RAG Ex-Schutz-Sonde dar. Diese ist die Modifikation einer Tiefseesonde. Der Kabelstecker befindet sich am oberen Ende der hängenden Sonde. Im Vergleich zur Original-Tiefseesonde wurde ein Schutzkäfig um den Sondenkörper konstruiert. Unter dem Sondenkörper sind die Sensoren für Druck, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Strömungsmessung angeordnet. Ein zusätzlicher mechanischer Schwimmschalter ist unterhalb der Sonde angebracht und zeigt Wasser auf der Sohle unterhalb des Sondenkörpers an.

Die Messdaten von der unteren Sohle sind von großer Bedeutung, um den planmäßigen Wasserfluss zu bestätigen, daher sind die Sonden auch in den Hauptwasserwegen angeordnet. Als Minimalziel sollen die Sonden Daten des Grubenwasseranstiegs zwischen dem Niveau – 1.110 m NHN und – 600 m NHN liefern. Dieser Prozess wird gemäß Prognose über einen Zeitraum von ca. 15 Jahren andauern.

Grundlagendaten zur Interpretation der Sondendaten sind:

- chemische und physikalische Parameter der Grubenwasseranalysen,
- Zuflussmenge des Grubenwassers im ehemaligen Bergwerk,
- geometrische Daten der Bergwerksinfrastruktur und
- Prognose des Grubenwasseranstiegsprozesses und der Grubenwassereigenschaften.

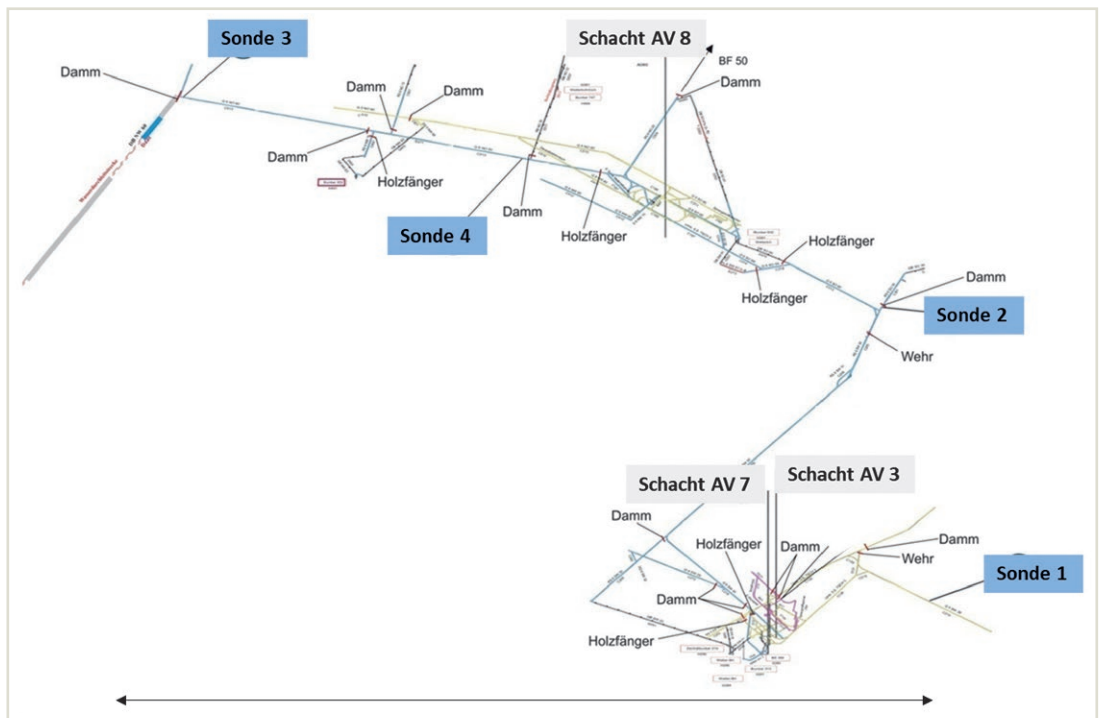


Fig. 2. Underground roadway system of Auguste Victoria mine (2017) in perspective view.
Bild 2. Grubengebäude des Bergwerks Auguste Victoria (2017) in perspektivischer Darstellung.
Source/Quelle: RAG

Fundamental data for the interpretation of probe parameter are:

- chemical and physical parameter of mine water analysis;
- amount of mine water inflow to the mine;
- geometrical data of mine infrastructure; and
- prediction of mine water rebound process and mine water quality parameter.

More than 13 million data per year are collected by the system. Some 100 thousand data of geometry and prediction, which are extracted from specific data systems at RAG, are also part of the interpretation.

In total four probes had been installed in the underground roadway system of the Auguste Victoria mine. Three of them are located in the 6th level of the mine in a depth of approximately –1,110 m NHN. One (probe 1) had been installed at the 5th level in a depth of approximately –990 m NHN (Figure 2).

Each probe has a direct cable connection to the surface. All cables are installed in shaft no 3 and connected to the data collection unit at the surface. Probe no 3 is connected to surface via a cable of approximately 12,000 m length.

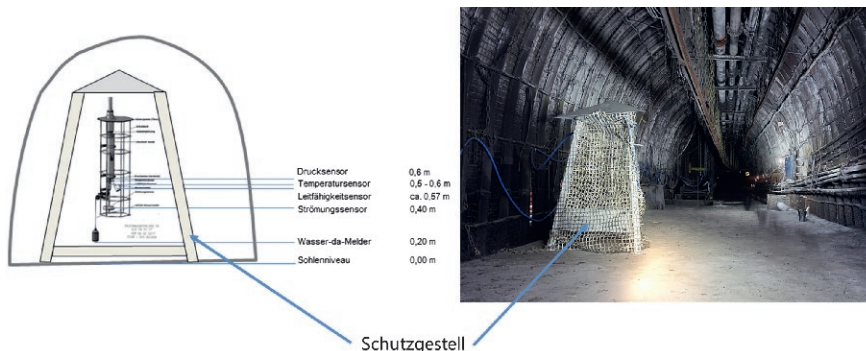


Fig. 3. Framework installation on the roadway floor.
Bild 3. Installation mit auf der Sohle aufgestelltem Schutzgestell. Source/Quelle: RAG

Mehr als 13 Mio. Daten werden durch das Messsystem je Jahr gesammelt. Zusätzlich werden einige Hunderttausend Informationen zu Geometrie und Prognose in die Interpretation einbezogen, die aus einem RAG-eigenen Datenbanksystem geliefert werden.

Insgesamt vier Sonden wurden im untertägigen Streckensystem des ehemaligen Bergwerks Auguste Victoria installiert. Drei Sonden befinden sich auf der 6. Sohle im Niveau von ungefähr –1.110 m NHN. Eine Sonde (Sonde1) wurde auf der 5. Sohle in einem Niveau von –990 m NHN eingebaut (Bild 2).

Jede Sonde ist über eine direkte Kabelverbindung nach über Tage angeschlossen. Alle Kabel sind über den Schacht 3 mit der Datenerfassungseinheit über Tage verbunden. Sonde 3 ist über ein Kabel von ca. 12.000 m Länge angeschlossen.

Jede Sonde ist in einem Schutzgestell aufgehängt, welches auf der Streckensohle steht (Bild 3). Die Kabelverbindung verläuft unter dem Dach des Schutzgestells, um die Verbindung gegen Stein-schlag im Fall eines Versagens des Streckenausbaus zu schützen. Die schwere Konstruktion besitzt einen niedrigen Schwerpunkt und verhindert das Kippen des Gestells auch im Fall massiver Sohlenhebung. Die besondere Kabelkonstruktion verfügt über ein Stahlflecht und einen Feuchtigkeitsschutz. Das Kabel selbst würde auch bei einer freihängenden Länge von 2.400 m nicht durch die entstehenden Zugkräfte zerstört. Von Bedeutung ist auch die spezielle Konstruktion der Kabelverbindungen. Diese ist für einen Wasserdruck von 100 bar ausgelegt, was einer Wassersäule über dem System von 1.000 m entspricht.

Der Drucksensor erfasst den Druck der Umgebung in dbar und ist ein Indikator für die Höhe des Wasserspiegels über der Sonde (Bild 4). Der Wasseranstieg im Bergwerk erreichte das Niveau –1.100 m im September des Jahres 2019. Es wurde erwartet, dass alle Sonden in diesem Niveau

Each probe is hanging in a framework which is standing on the floor of a roadway (Figure 3). The cable connection below the roof of the framework is protected against roof fall in case of damage at the roadway support. The heavy construction and a low centroid of the framework prevents the construction from tilting over, even in case of massive floor heaving. The cable construction protects the inner wires against damage and humidity by steel reinforcement and damp course. The cable itself could resist a free length of vertical installation of approximately 2,400 m without failing by tensile stress. Important also is a special construction of the cable plug system. It resists a pressure of approximately 100 bar, which is equivalent to a water level of 1,000 m above the system.

The pressure sensor reports the compressive stress in dbar and is an indicator for the water level above the probe (Figure 4). The flooding water within the mine reached the level of -1,100 m in September 2019. It was expected that all probes in this level should indicate the same level of pressure after flooding. We did measure a lower level at probe no 2 for a duration of several months. In August 2020 all probes at the 6th level achieved a harmonized development. In 2021 the increasing rate stopped for approximately two months and afterwards the pressure did rise again. The probe on the 5th floor indicates increasing pressure in 2022.

Using the measured pressure data of each probe the level of mine water can be estimated (Figure 5). For the calculation of the level the geometry of installation above the roadway floor, the vertical position of the floor and the density of the water are taken into consideration.

The floor level is known by mine survey results and the geometry of the probe position is documented within the installation process. For estimating the density of the mine water the value of electrical conductivity can be taken into account, because both parameters show a significant correlation to each other.

Gemessener Druck an Sonde in dbar

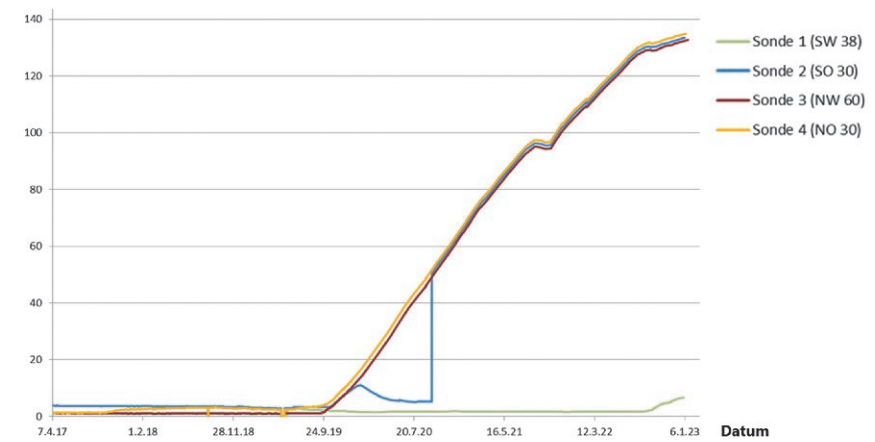


Fig. 4. Results of pressure measurement between 04/2017 and 12/2022. Bild 4. Ergebnisse der Druckmessung im Zeitraum 04/2017 bis 12/2022. Source/Quelle: RAG

der 6. Sohle das gleiche Druckniveau nach der Überstauung anzeigen würden. Es wurde an Sonde Nr. 2 über einen Zeitraum von mehreren Monaten jedoch ein geringerer Druck gemessen. Im August des Jahres 2020 erreichten im Anschluss alle Sonden auf der 6. Sohle eine harmonisierte Entwicklung. Im Jahr 2021 verringerte sich die Anstiegsgeschwindigkeit über einen Zeitraum von circa zwei Monaten deutlich und stieg in der nachfolgenden Zeit wieder einheitlich weiter an. Die Sonde auf der 5. Sohle zeigt seit 2022 einen Druckanstieg an.

Aus dem gemessenen Druck an jeder Sonde kann das Grubenwasserniveau ermittelt werden (Bild 5). Für die Berechnung des Grubenwasserspiegels werden die Geometrie des Sondeneinbaus über der Streckensohle, die vertikale Position der Sohle und die Dichte des Grubenwassers einbezogen.

Die Lage der Sohle ist aus den markscheiderischen Dokumentationen des Bergwerks bekannt, und die Geometrie der Sonde wurde bei Einbau dokumentiert. Zur Abschätzung der Dichte des Grubenwassers wird der Wert der gemessenen Leitfähigkeit einbezogen, weil Dichte und elektrische Leitfähigkeit eine signifikante Korrelation zeigen.

Natürlich besteht eine Vielzahl an Argumenten aus hydrologischer Sicht und praktischer Erfahrung, die eine Verallgemeinerung dieses

Zusammenhangs widerlegen können. Aber verschiedene Ergebnisse aus Analysen aus Untersuchungen im ehemaligen Bergwerk belegen eine Dichte des Grubenwassers zwischen 1,05 und 1,2 kg/dm³, wodurch ohne die Berücksichtigung der Grubenwasserdichte (reines Wasser mit der Dichte 1,0 g/cm³) ein Fehler zwischen 5 und 20% in Kauf genommen würde. Der Nachteil dieser Abschätzung ist, dass die gemessene elektrische Leitfähigkeit am Standort der Sonde und damit im unteren Bereich der Flutung gemessen wird. Wird ein hoher Bereich oberhalb der Sonde überstaut, so nimmt die Aussagefähigkeit dieser Abschätzung ab. Schachtmessungen mit Sal-Temp-Sonden weisen häufig nach, dass keine konstante elektrische Leitfähigkeit in der Wassersäule gegeben ist. Diese Nachteile der Abschätzung werden in Kauf genommen, da die Genauigkeit durch ergänzende Messungen von der Tagesoberfläche gesteigert werden können.

Berechnete Höhe des Grubenwasserstands in m NHN

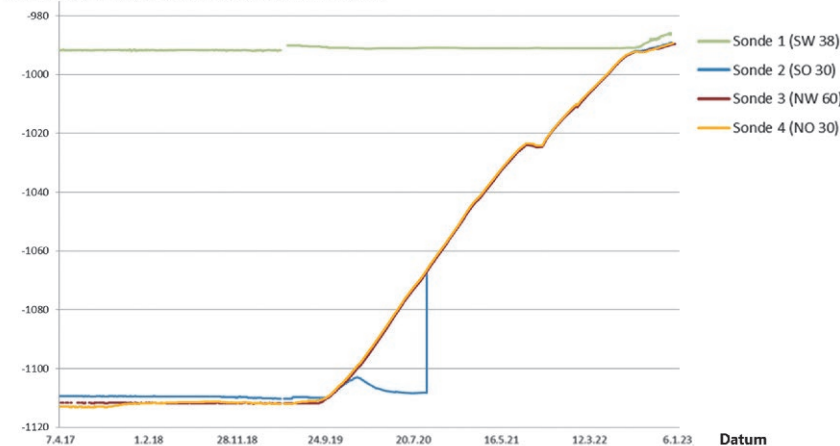


Fig. 5. Results of calculated mine water level between 04/2017 and 12/2022. Bild 5. Berechnete Höhe des Grubenwasserspiegels im Zeitraum 04/2017 bis 12/2022. Source/Quelle: RAG

Of course, there are several arguments of hydrological science and practical experience which can be used for explaining that this is not universally valid. But several results of analysis derived from the former mine observation did proof a density between 1,05 to 1,2 kg/dm³ and with this characterization an error of 5 to 20% could occur, if a density of pure water (1,0 g/cm³) would be taken into account. The leak of this estimation is, that we take the measurement of the electrical conductivity value at the bottom of the flooded area. By reaching a high level of mine water above the probe, the accuracy of this estimation will decrease. Shaft observations of former mines applying Sal-Temp-probes do proof, that there is no constant value of electrical conductivity in the water column. This leak of accuracy must be taken into account for the interpretation of the results but can be minimized by additional measurements from the surface.

Measurement of the temperature is figured in the diagram of figure 6. Before the mine water level reached the depth of the 6th floor in September 2019 the probes which are located in the level (probes no 2, 3 and 4) had a different temperature between 32 and 42 °C. In the following months the probes indicated a mixing process and a common level of 38 °C was documented. The measured temperature at the probe on 5th floor was not influenced by mine water up to summer 2019. Afterwards the building of a wall within the roadway introduced a contact of the sensor to the inflow of water in this roadway. The inflow of the southern area of the former mine had a higher level of temperature with 44 °C.

At the end of 2022 the mine water level did reach the depth of the 5th floor and the probes at 6th floor were significantly influenced by a mixing process again. The level of temperature amounted 41 °C and parallel to the rising temperature at the 6th floor the temperature at probe no 1 was decreasing to 43 °C.

The results of electrical conductivity do proof a good correlation to the results of temperature measurement (Figure 7). The probes at the 6th floor indicate a mixing process since 2019.

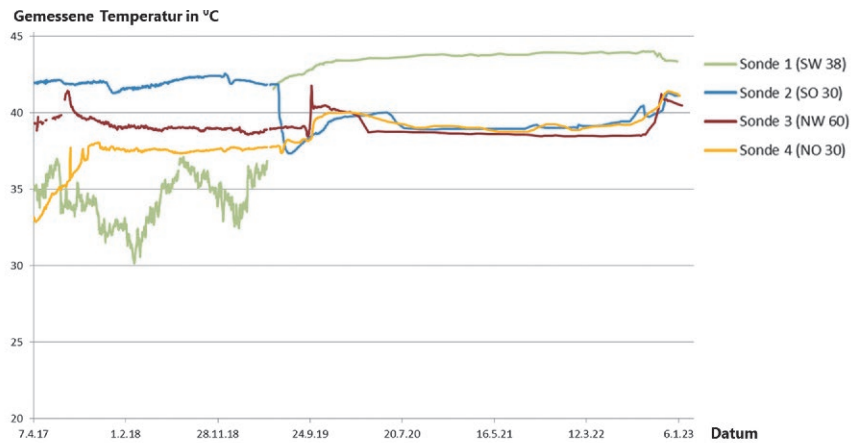


Fig. 6. Results of temperature measurement between 04/2017 and 12/2022. Bild 6. Temperaturmessung aus dem Zeitraum 04/2017 bis 12/2022. Source/Quelle: RAG

Die Ergebnisse der Temperaturmessung sind in Bild 6 dargestellt. Bevor der Grubenwasserspiegel im September 2019 das Niveau der 6. Sohle erreichte, zeigten die Sonden dort (Sonden 2, 3 und 4) eine Temperatur zwischen 32 und 42 °C an. In den darauf folgenden Monaten zeigten die Sonden einen Durchmischungsprozess an und die Temperatur vergleichmäßigte sich auf einem Niveau um 38 °C. Die gemessene Temperatur an der Sonde auf der 5. Sohle war bis zum Sommer 2019 nicht durch Grubenwasser beeinflusst. Im Anschluss wurde beim Rückzug eine Mauer in der Strecke errichtet und Sonde 1 bekam Kontakt zum Grubenwasserzufluss von Süden auf der 5. Sohle. Dieser Zufluss hatte mit 44 °C eine höhere Temperatur.

Zum Ende des Jahres 2022 erreichte der Grubenwasserspiegel die 5. Sohle und die Sonden auf der 6. Sohle zeigten wiederum eine Durchmischung an. Das Temperaturniveau stieg dort auf 41 °C an und die Temperatur an der Sonde auf der 5. Sohle sank auf 43 °C ab.

Die Ergebnisse der Messungen zur elektrischen Leitfähigkeit zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Interpretationen aus der Temperaturmessung (Bild 7). Seit dem Jahr 2019 deuten die Sonden auf der 6. Sohle einen Durchmischungsprozess an. Die Sonde 1 auf der 5. Sohle zeigt das höchste Niveau (170 mS/cm) und damit das hohe Niveau der Mineralisierung des Zuflusses aus den südlichen Bereichen – was auch zuvor durch Analysen aus Untertageproben bekannt war.

Seit dem Jahr 2022 zeigt das Signal an Sonde 1 eine große Bandbreite zwischen dem vorherigen Niveau von 170 mS/cm und einem Minimalwert von ca. 60 mS/cm. Diese starken Schwankungen könnten durch Inkrustationen des Sensors hervorgerufen sein und können nicht durch derart starke Änderung der Wasserqualität des Zuflusses erklärt werden. Die Fortsetzung der Messungen wird zeigen, ob der Sensor in den nächsten Jahren zuverlässige Ergebnisse liefert.

Zusammenfassung

Über einen Zeitraum von mehr als 2.000 Tagen liefern die Sonden wertvolle Daten aus dem ehemaligen Bergwerk Auguste Victoria. Die Er-

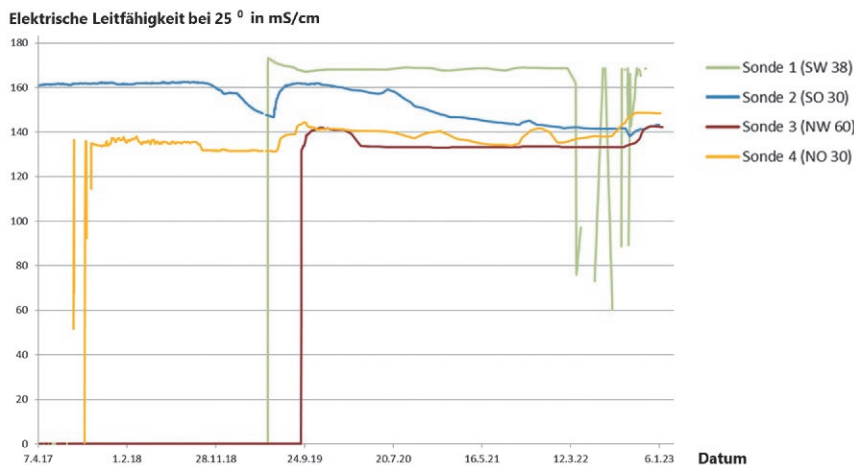


Fig. 7. Results of electrical conductivity measurement between 04/2017 and 12/2022 (1). Bild 7. Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit im Zeitraum 04/2017 bis 12/2022 (1).

The probe no 1 shows the highest level (170 mS/cm) and by this the high level of mineralization of inflow from the southern areas – which was known from analysis results at the mine over decades – is proofed.

Since 2022 the signal of probe no 1 shows a high bandwidth between the former level of 170 mS/cm and lower data with a minimum of approximately 60 mS/cm. This high variation might be the result of incrustation of the sensor and cannot be explained by sudden changing of the water quality of the inflow. Further measurements will show if this sensor can achieve sufficient information for the next years.

Conclusion

For a duration of more than 2,000 days the underground mine water probes deliver worthful data. The results allow the comparison and correlation to measurements and results of analysis derived from alternative investigations at the surface. Even short time processes of changing can be interpreted exactly. The mixing processes of different inflow to the mine are indicated by the monitoring probes in the underground and can be interpreted with the background of former data from analysis and mine layout.

The experience from the pilot project at the former Auguste Victoria mine is basic for six further underground projects in the Ruhr area, former Ibbenbüren coal mine and the Saar area, which had been started yet.

RAG thanks THGA for the initiative idea and cooperation and all partners of the project for their excellent cooperation:

- Sea & Sun Technology GmbH (probe technology);
- DMT GmbH (consulting and technical assistance);
- Becker & Hüser GmbH & Co. KG (confection, installation and logistics);
- Delta Elektro- und Industrietechnik GmbH (installation and electrical supply); and
- Prysmian Kabel und Systeme GmbH (cable design and manufacturing).

References / Quellenverzeichnis

- (1) RAG (2017): Abschlussbericht Projekt „Grubenwassermonitoring“, unveröffentlicht.
- (2) Jahresberichte zum Abschlussbetriebsplan für das Bergwerk Auguste Victoria 2018–2021, unveröffentlicht.

Author / Autor

Dr.-Ing. Holger Witthaus, Servicebereich Technik- und Logistikdienste, RAG Aktiengesellschaft, Essen

gebnisse erlauben einen Abgleich und die Korrelation mit Daten, die aus alternativen Untersuchungen und Messungen über Tage gewonnen werden. Auch kurzzeitige Vorgänge können anhand der Daten genau beschrieben werden. Die Durchmischung unterschiedlicher Zuflüsse werden durch die Sonden unter Tage erfasst und können vor dem Hintergrund früherer Analysen und mark-scheiderischer Aufnahmen interpretiert werden.

Die Erfahrungen aus dem Pilotprojekt auf dem ehemaligen Bergwerk Auguste Victoria sind Grundlage für sechs weitere bereits begonnene Untertageprojekte im Ruhrgebiet, im ehemaligen Steinkohlenbergwerk Ibbenbüren und im Saarrevier.

Die RAG bedankt sich bei den Initiatoren der THGA und allen Partnern des Projekts für die hervorragende Zusammenarbeit. Hervorzuheben sind:

- Sea & Sun Technology GmbH (Sondentechnik und Entwicklung),
- DMT GmbH (Beratung und technische Unterstützung),
- Becker & Hüser GmbH & Co. KG (Konfektion, Installation und Logistik),
- Delta Elektro- und Industrietechnik GmbH (Installation und Elektrische Versorgung),
- Prysmian Kabel und Systeme GmbH (Design und Herstellung des Kabels).