Henning Jasnowski-Peters
Christian Melchers

Mine Water Rebound in the Former Hard Coal Mining Area of the Ruhr District – Hydrogeochemical Monitoring for a Sustainable, Ecological and Economical Feasible Post-Mining Approach

Mine water rebound including mine water management and water treatment are key perpetual tasks for the operating mine company RAG Aktiengesellschaft, Essen/Germany, and associated foundation RAG-Stiftung, Essen/Germany, since hard coal mining in the Ruhr District ceased at the end of 2018. The scientific support of the mine water rebound process includes a robust risk management and associated hydrogeochemical monitoring to verify containment and conformance of mine water during the entire rebound process. Hydrogeochemical monitoring of mine waters becomes increasingly important in the view of a limited access to the mine workings. The aim is to design a monitoring guideline which is fit for purpose, i.e. sustainable, ecological and economically feasible, and supports the optimization of the rebound process, i.e. identifying a mine water level, which is self-regulating. Here, the authors report on a hydrogeochemical data repository on mine water and formation waters of the overburden. The goal is to identify natural tracers which qualify as toolset to prevent and mitigate loss of containment, i.e. detect infiltrating mine water into surrounding aquifers. Extensive studies during the last 60 years have investigated the hydrochemistry of mine waters in the Ruhr District. However, a tracer concept for Upper Carboniferous hosted mine water and the understanding of the entire hydrogeological system in the Ruhr area remains largely a gap of knowledge. The integration of bromide vs. chloride concentration, molar Na/Cl ratios and water isotopes, δ^2H and $\delta^{18}O$, was able to distinguish saline Upper Carboniferous mine waters from the regional saline Cenomanian-Turonian (CT) aquifer and determine the origin of salinity. Further, bromide to chloride ratios was evaluated to trace formation water of the Emscher Formation, which resembles mine waters in terms of elevated sulfate and iron concentrations. Hence, first assessment of trace elements within mine and formation waters resulted in candidates for mine water characterization and identifying its solute candidates with formation waters during rebound.

Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlenrevier des Ruhrgebiets – hydrogeochemisches Monitoring für einen nachhaltigen, öko- und ökonomisch realisierbaren Nachbergbau-Ansatz

Der Grubenwasseranstieg, sein Management und die Wasseraufbereitung sind wichtige Ewigkeitsaufgaben der RAG Aktiengesellschaft, Essen, und ihrer assoziierten RAG-Stiftung, Essen, seitdem der Ruhrkohlenbergbau Ende 2018 zu Ende ging. Die wissenschaftliche Begleitung des Grubenwasseranstiegs baut auf einem soliden Risikomanagementkonzept auf. Das damit assoziierte hydrogeochemische Monitoring basiert auf der Einhaltung der Speicherintegrität sowie auf der langfristigen Prognosegenauigkeit von Grubenwasser während des gesamten Anstiegsverlaufs. Einem hydrogeochemischen Monitoring kommt bei einem nur limitierten Zugang in den Untergrund eine immer größere Bedeutung für diese beiden Prinzipien zu. Das Ziel dieses Vorhabens ist, ein Monitoringkonzept zu entwickeln, das zweckdienlich ist, d.h. nachhaltig, ökologisch und ökonomisch durchführbar, und die Optimierung des Grubenwasseranstiegs unterstützt, indem es einen Grubenwasserstand ermittelt, der selbstregulierend (nachhaltig) ist. In diesem Ansatz berichten die Autoren über eine hydrogeochemische Datenbank, die aus Grubenwasseranalysen und Analysen der Formationswässer im Deckgebirge besteht. Ziel dieser Datenbank ist es, natürliche Tracer zu finden, die sich eignen, um die Speicherintegrität von Grubenwasser zu überprüfen, d.h. infiltrierendes Grubenwasser in benachbarte Aquifere und Formation detektiert. Groß angelegte Studien haben in den letzten 60 Jahren die Hydrochemie der Grubenwässer im Ruhrrevier analysiert. Allerdings fehlt dieser Betrachtungsweise ein Tracer-Konzept der oberkarbonischen Grubenwässer sowie das allgemeine hydrologische Systemverständnis des Untersuchungsraums. Die Integration von Bromid vs. Chlorid-Konzentrationen, molaren Natrium/Chlorid-Verhältnissen sowie Wasserisotopen, d.h. δ^2H und $\delta^{18}O$, ermöglichte es, die Grubenwässer aus dem Oberkarbon nachweislich von dem Cenomanium-Turonium (CT) Salinar zu unterscheiden und die Herkunft der Salinität beider Wasserkörper zu identifizieren. Weiterhin ermöglichte der Bromid vs. Chlorid-Konzentrationsansatz, die intrinsischen Wässer der Emscher-Formation, die Grubenwässern aufgrund höherer Sulfat- und Eisengehalte ähneln, zu typisieren. Zusammenfassend resultiert aus dieser Forschung ein erster Ansatz, intrinsische Spezies für die Grubenwässer zu finden und ihre potentielle Mischung mit den Formationswässern während des Anstiegs zu detektieren.

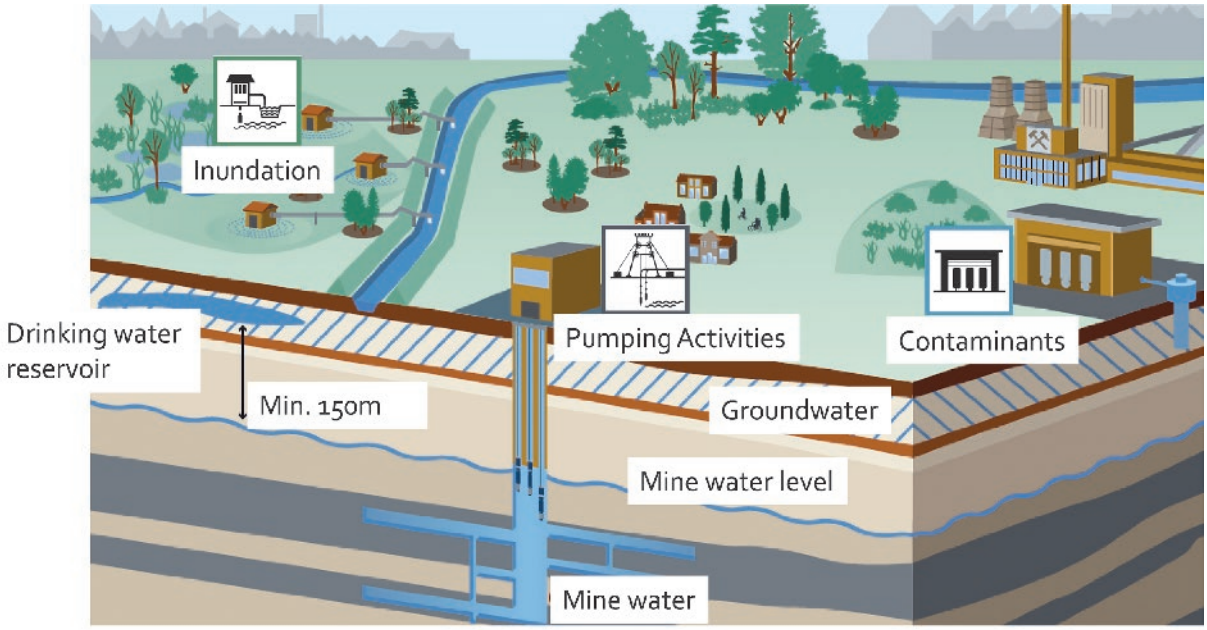

Fig. 1. Perpetual tasks and major prerequisites of mine water rebound (after RAG 2018).
Bild 1. Ewigkeitsaufgaben und Grundvoraussetzungen für den Grubenwasseranstieg (nach RAG 2018). Source/Quelle: FZN

Introduction

Mine water rebound in the former Upper Carboniferous hard coal mining region of the Ruhr Valley is a long-term billion Euro project operated by the former coal mining company RAG Aktiengesellschaft, Essen/Germany. Financing of so-called perpetual tasks to account for mine water management purposes, i.e. mainly pumping costs, polder measures and water treatment/remediation purposes, is secured by funds of the foundation RAG Stiftung, Essen/Germany (Figure 1).

German industrial hard coal mining districts comprise the Saar and Ruhr Districts including the geologically isolated Ibbenbüren colliery. The research presented here focuses on the Ruhr District which is the most extensively exploited mining area situated in urban areas with approximately five million inhabitants which are impacted by mining and the rebound process. The approximately 150-year history of industrial hard coal mining in North-Rhine Westphalia ceased at the end of 2018 due to the end of coal subsidies. Previously, the coal mining at the Saar region ended in 2012 due to unforseen induced seismicity events. Therefore, German hard coal mining is officially on transition to the post mining stage since 2019 (1). Phasing out coal until 2038 the latest is part of a long-term strategy to fight global climate change and hence, research associated with the long-term projects of mine water rebound in German hard coal mining areas can act as a role model for such necessary task in the coming years. Guidelines obtained from the associated research can be transferred to rebound processes on various mine sites elsewhere in the future. Leveraging experiences from European mine water management and rebound processes at different stages in Poland, the United Kingdom (UK), France and Spain including its mine water inventory (2) has been taken into account in order to apply the lessons learned to the German hard coal mining districts (3). One major aspect for the rebound strategy of RAG is that the mine water rebound is operated in

Einführung

Der Grubenwasseranstieg im oberkarbonischen ehemaligen Bergbaugebiet des Ruhrreviers ist ein Multi-Milliarden Euro-Großprojekt, das von der RAG Aktiengesellschaft, Essen, geleitet wird. Die Finanzierung dieser sogenannten Ewigkeitsaufgaben im Rahmen des Grubenwassermanagements, d.h. größtenteils Pumpkosten, Poldermaßnahmen und Wasseraufbereitung/-sanierung wird durch die RAG-Stiftung, Essen, und Ihr Vermögen sichergestellt (Bild 1).

Deutsche Steinkohlenreviere umfassen die Bergbauregionen an der Saar und des Ruhrgebiets sowie die isolierte geologische Struktur des Bergwerks Ibbenbüren. Die Forschung hier bezieht sich größtenteils auf die Vorgänge im Ruhrgebiet, das den bergbaulich am stärksten ausgeschöpften und geprägten Raum inmitten von Stadtgebieten und einer Einwohnerzahl von 5 Mio. Menschen darstellt. Der ungefähr 150 Jahre industriell betriebene Steinkohlenbergbau an der Ruhr endete mit der Beendigung der Subventionen Ende 2018. Vorher wurde die Bergbauregion an der Saar durch seismische Ereignisse während des Abbaus im Jahr 2012 beendet. Daher befindet sich seit 2019 der deutsche Steinkohlenbergbau offiziell in seiner Nachbergbauphase (1). Die Abkehr von der Kohle spätestens bis 2038 ist Teil einer langjährigen Strategie, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Die Forschung, die mit der wissenschaftlichen Begleitung der langzeitlichen Grubenwasseranstiege in den deutschen Steinkohlenrevieren assoziiert ist, kann als Vorzeigemodell in diesem notwendigen Rahmen des Klimawandels für andere Regionen und Arten des Bergbaus in der Welt gelten. Sich die Erfahrung aus den Grubenwassermanagement- und Anstiegsszenarien in unterschiedlichen Phasen in Polen, dem Vereinigten Königreich, Frankreich und Spanien zunutze zu machen (2), wurde hier integriert, um die erlernten Eigenheiten auf den deutschen Steinkohlenbergbau zu übertragen (3). Ein wichtiger Punkt ist hier, dass die Strategie für den Grubenwasseranstieg der RAG einen strikt

a controlled manner compared to former rather uncontrolled natural mine water rise in the UK or France.

Mine water quality

Gombert et al. (2) summarizes average, minimum and maximum concentrations of aqueous species for European hard coal regions and identified sulfate and iron as key contaminants besides minor impact by As, Cr and Zn. Chloride (Cl) has only been reported with high concentrations in mine waters of Germany, Poland and the UK. However, metal mobilization in non-flooded, unsaturated zones need to be taken into account for accurate forecasting of future mine water discharges. Such initial outflow of mine water after initially infiltrating the unsaturated zone including uptake of soluble species has been termed "first flush" effect (4). The effect is proposed to decay exponentially after the initial breakthrough during mine discharge. Hence, continuous monitoring of mine water hydrochemistry, before, during and after the rebound process and in combination with a baseline concept are essential in order to verify such effects and forecast their imprint on the overall mine discharge rate and quality in dependency of a defined mine water level (5). Especially, the imprint of in-situ sulfide oxidation including a more accurate in-situ sampling of mine waters in underground shafts in dependency of a defined mine water level are key aspects to optimize the forecast of hydrochemistry of mine waters during rebound. Mine waters associated with hard coal mining generally are rich in sulfate and iron species as products from sulfide oxidation processes, called acid rock drainage (6). Often deeply seated mine waters exhibit high electrical conductivity (EC) exceeding 100 mS/cm or are even saline brines, rich in chloride, due to prolonged water-rock interaction with its host rock or dissolution of adjacent evaporites.

Numerous studies including the recent reviews on European hard coal mine waters by Gomberti et al. (2) and a more global perspective of mine waters by Wolkersdorfer und Mugova (7) reviewed the influence of mine water management and discharges to ground and surface waters. Depending on the extent of sulfide oxidation and buffering capacity by mainly dissolved bicarbonate in mine waters, Wolkersdorfer and Mugova (7) reported discrete pH values from mine workings ranging from pH 3.0 to pH 7.5 with respect to hard coal and lignite mining examples. Gomberti et al. (2) reported on pH values from 6.0 and higher with an average on pH 6.5 based on approximately 2,500 samples from European hard coal mine discharges. pH values are important in terms of transition metal mobilization potential. A potential contamination risk exists at acidic pH levels <5.6, because toxic transition metals, i.e. Pb, Zn, Al and Cd, cations increase in solubility. Such parameters mentioned above were identified to be the main characteristics of hard coal associated mine waters.

The proposed mine water concept of RAG in the Ruhr District area foresees a controlled, stepwise rise of current mine water levels to an initial set depth of 600 m below sea level (mbsl) (8). The reason is to keep mine water provinces still hydraulically disconnected from each other and to obey the major prerequisite to protect drinking water reserves, i.e. Upper Cretaceous Haltern Formation sandstones, and economic usage of deeper aquifers.

kontrollierten Anstieg vorsieht im Vergleich zu damaligen, unkontrollierten Anstiegen als europäische Beispiele aus dem Vereinigten Königreich oder Frankreich.

Grubenwasserbeschaffenheit

Gombert et al. (2) haben die gemittelten Minima und Maxima an Konzentration von gelösten Inhaltstoffen im Grubenwasser aus den europäischen Steinkohlenrevieren zusammengefasst und Sulfat und Eisen als Hauptbestandteile sowie Arsen, Chrom und Zink als wichtige Nebenbestandteile identifiziert. Chloride (Cl) wurden nur in hohen Konzentrationen in Grubenwässern aus Deutschland, Polen und dem Vereinigten Königreich gefunden. Allerdings muss die Lösungsfracht an Metallen aus der bislang noch nicht infiltrierten, unsaturierten Zone oberhalb des Grubenwasserstands ebenfalls für eine exakte Vorhersage für zukünftige Einleitungen von Grubenwasser herangezogen werden. Die ersten Einleitungen von Grubenwasser in die Vorflut innerhalb des Grubenwasseranstiegs nach dieser ersten Flutung der unsaturierten Zone wird in Fachkreisen „First Flush"-Event genannt (4). Dieser Effekt verhält sich in den kommenden Jahren nach einem Kurvenverlauf eines exponentiellen Verfalls nach dem ersten Auslauf in die Vorflut. Um diese Effekte beweisen und nachvollziehen zu können, sind ein kontinuierliches Monitoring vor, während und nach dem Anstiegsverlauf sowie ein dazugehöriges Baseline-Konzept unerlässlich, um den Einfluss der Hydrochemie auf die Flussrate und die Qualität des Grubenwassers beim ersten Einleiten der Wässer und darüber hinaus in Relation zu einem definierten Grubenwasseranstiegsniveau zu prognostizieren (5). Insbesondere der Einfluss der Sulfidoxidation und die bessere In-situ-Beprobung von Grubenwässern in untertägigen Schächten und durch Lotungs-/Entgasungsleitungen sind wichtige Aspekte, um die Hydrochemie der Grubenwässer besser vorhersagen zu können. Grubenwässer aus dem Steinkohlenbergbau sind generell reich an Sulfat und Eisen aus der Sulfidoxidation (6). Oft besitzen diese Grubenwässer auch eine hohe Leitfähigkeit von über 100 mS/cm oder sind sogar hochsalinare Lösungen reich an Chloriden aufgrund langer Wasser/Gesteins-Wechselwirkungen mit dem Umgebungsgestein oder angrenzender Evaporitsequenzen.

Viele Studien inklusive der von Gombert et al. (2) auf europäische Steinkohlenreviere sowie eine globale Sichtweise unterschiedlicher Grubenwässer von Wolkersdorfer und Mugova (7) haben den Einfluss der Grubenwässer und deren Management auf Oberflächenwässer und Vorfluter zusammengefasst. In Abhängigkeit des Ausmaßes der Sulfidoxidation und der Pufferkapazität von gelöstem Hydrogenkarbonat im Grubenwasser haben Wolkersdorfer und Mugova (7) über diskrete pH-Werte aus Grubenbauen in Kohleabbauen berichtet, die in einem Bereich von pH = 3,0 bis pH = 7,5 lagen. Gombert et al. (2) berichteten von einer Grundgesamtheit von 2.500 Wasseranalysen aus Einleitungen innerhalb europäischer Steinkohlenreviere, die höher als pH = 6,0 mit einem Mittelwert von pH = 6,5 lagen. PH-Werte sind wichtig im Zusammenhang mit dem Potential der Mobilisierung von Übergangsmetallen. Eine potentielle Gefahr der Kontamination mit toxischen Übergangsmetallen besteht dabei bei sauren pH-Werten < 5,6, weil die Löslichkeit der Kationen dieser Übergangsmetalle (z. B. Pb, Zn, Al und Cd) steigt. Die Parameter, die in diesem Kapitel genannt wurden, stellen die Hauptcharakteristika von Grubenwässern dar.

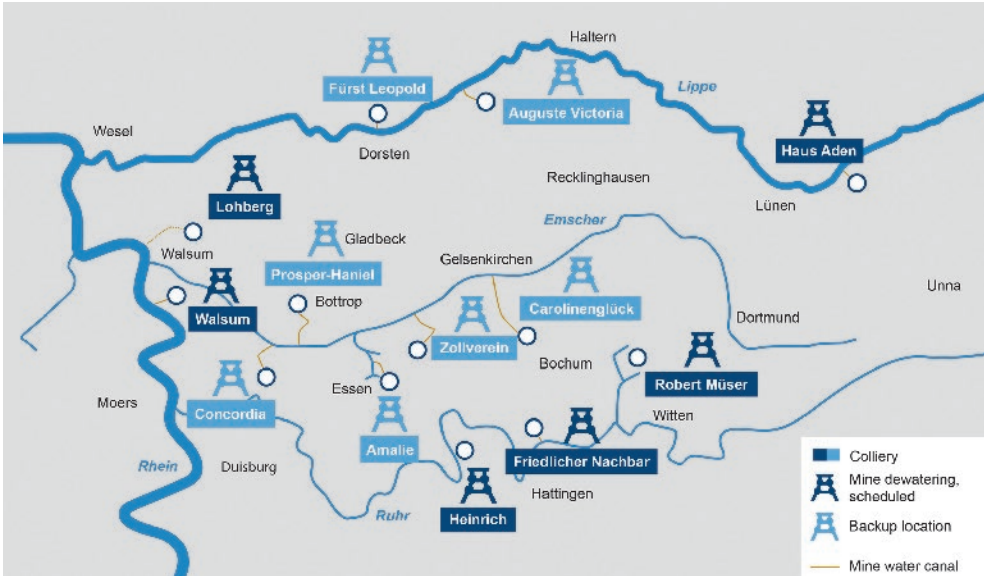

Fig. 2. Overview of current and future mine dewatering stations in the mining area of the Ruhr District (after RAG 2019). // Bild 2. Überblick auf die jetzigen und zukünftigen Wasserhaltungsstandorte im Ruhrrevier (nach RAG 2019). Source/Quelle: FZN

The thirteen mine dewatering stations currently installed will be transformed to six main operating dewatering stations including backup stations, which will discharge approximately 70 Mm^3/a of mine water into the receiving water courses of Ruhr, Lippe and Rhine each year, keeping the river Emscher free of mine water drainage in the future (Figure 2). Therefore, the future dewatering of the former central mining area makes use of higher dilution of the drainage by the river Rhine compared to more local receiving water courses of Ruhr, Lippe and Emscher.

Mine water levels

The mine water rebound is currently set to a final 150 m vertical distance from the potentiometric surface of the mine water towards any drinking reservoir in the region. However, a sustainable, economic and ecological feasible mine water rebound level has not been determined accurately. This task is part of the ongoing research activities and aims of the Forum Bergbau und Wasser (FBW), a foundation consisting of experts in hydrogeology. The foundation assists the mine water rebound process in all former hard coal mining areas of the RAG since 2017. The research presented here has been conducted as part of an internal research project of the FBW.

The current situation of mine water levels in the former Ruhr District mining concession area, which is approximately 4,400 km^2 large, is very heterogeneous as mentioned previously. Eastern mine water provinces of collieries Königsborn and Westfalen, which are geologically and hydraulically isolated by large sealing faults and not part of the central water provinces, exhibit mine water levels close to the ground surface with hydraulic potentials already equilibrated. Instead, central or northern mine water provinces of the most recently closed collieries exhibit current mine water levels situated as deep as 1,000 mbsl (Figure 3). Depending on permits for the water provinces, such mine water levels are maintained by pumping of large submersible motor pumps located at the dewatering stations. At currently three col-

Das vorgeschlagene Grubenwasserkonzept der RAG im Ruhrrevier sieht einen stufenweisen Anstieg der jetzigen Grubenwasserstände in den einzelnen Provinzen auf ein Niveau von −600 m NHN vor (8). Das Ziel ist es, in dieser Teufe verbundene Grubenwasserprovinzen immer noch hydraulisch isoliert zu belassen und das Hauptaugenmerk auf den Schutz der Trinkwasserreservoire, die sich größtenteils in den oberkretazischen Halterner Sanden befinden, sowie bewirtschaftete tiefere Aquifere zu legen.

Dabei werden die momentan 13 vorhandenen Wasserhaltungsstandorte sukzessive auf sechs Hauptwasserthaltungsstandorte und mehrere vorgehaltene Standorte umgebaut. Diese werden ca. 70 $Mio.m^3/a$ Grubenwasser in die Vorfluter Rhein, Lippe und Ruhr leiten, wobei zukünftig die Emscher frei von Einleitungen bleiben wird (Bild 2). Damit bezweckt man eine höhere Verdünnungsrate der zentralen Grubenwässer durch die enorme Wasserfracht des Rheins im Vergleich zu den Flüssen Ruhr, Lippe und Emscher.

Grubenwasserstände

Das Grubenwasseranstiegsniveau bezüglich dessen Grubenwasserspiegel, die potentiometrische Oberfläche, ist derzeit auf einen endgültigen vertikalen Abstand zu den Trinkwasserreservoiren von 150 m gesetzt. Allerdings wurde final ein wirklich nach nachhaltigen, ökologischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten optimiertes Grubenwasseranstiegsniveau bislang nicht im Detail festgelegt. Diese Aufgabe ist Teil der Ziele des Forums Bergbau und Wasser (FBW), eine Stiftung, die sich aus Experten in der Hydrogeologie zusammensetzt. Diese Stiftung begleitet die Grubenwasseranstiege in den deutschen Steinkohlenrevieren seit 2017. Die Forschung, die hier präsentiert wird, wurde innerhalb dieses Zeitraums im FBW betrieben.

Die jetzige Situation der Grubenwasserstände im ehemaligen Abbaugebiet innerhalb des Ruhrreviers, das ca. 4.400 km^2 umfasst, ist als sehr heterogen zu bezeichnen. Östliche Wasserprovinzen der ehemaligen Bergwerke Königsborn und Westfalen, die geologisch und hydraulisch von großen Störungssystemen isoliert und nicht Teil der zentralen Wasserhaltung sind, besitzen mittlerweile Grubenwasserstände in Oberflächennähe mit größtenteils equilibrierten Wasserständen in der Umgebung. Im Gegensatz dazu besitzen Bergwerke aus den zentralen oder nördlichen Wasserprovinzen der zuletzt geschlossenen Bergwerke im Ruhrgebiet Grubenwasserstände im Niveau um −1.000 m NHN (Bild 3). In Abhängigkeit von rechtlichen Gegebenheiten werden diese Grubenwasserstände mit großen Tauchmotorpumpen an den Wasserhaltungsstandorten gehalten. An momentan drei Wasserhaltungsstandorten im Ruhrrevier, dem Wasserhaltungsstandort an der Ruhr Heinrich, dem Bergwerk Auguste Victoria (geschlossen

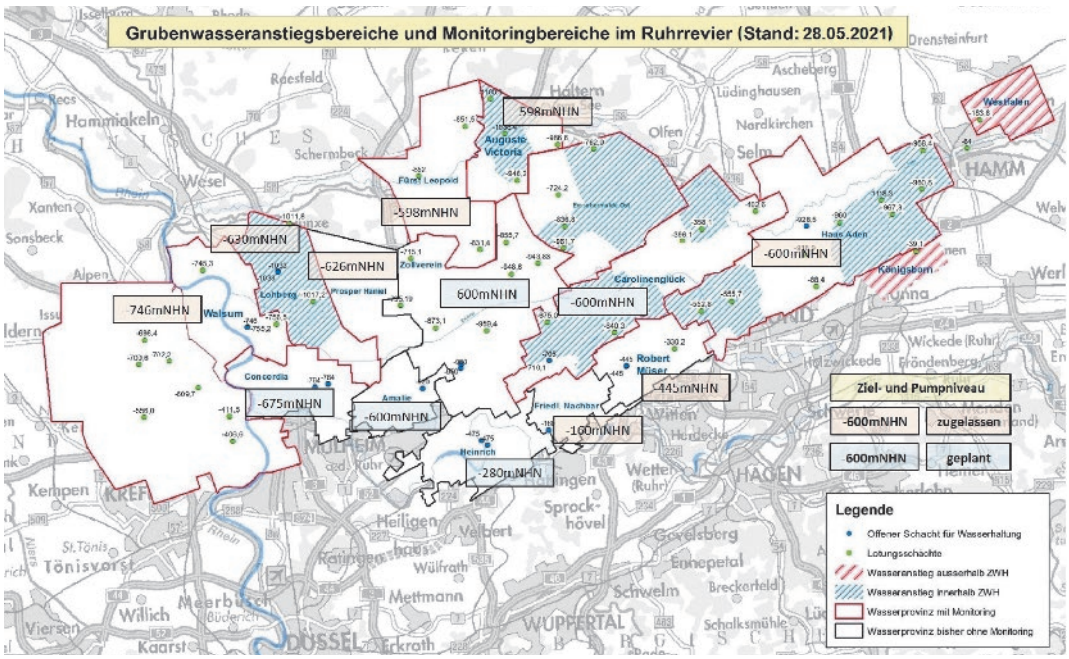

Fig. 3. Overview of current mine water levels within the former hard coal mining area of the Ruhr District. Water provinces marked with red stripes are not part of the major rebound. // Bild 3. Überblick über rezente Grubenwasserspiegel im ehemaligen Steinkohlenrevier an der Ruhr. Wasserprovinzen, die mit roten Streifen markiert sind, sind nicht Teil der zentralen Wasserhaltung. Source/Quelle: FZN

lieries in the Ruhr District, i.e. Heinrich as dewatering station at the river Ruhr, Auguste Victoria (closure end of 2015) and Prosper Haniel (closure end of 2018), multi-sensor mine water probes designed by the Research Center of Post Mining (FZN) of the TH Georg Agricola University (THGA), Bochum/Germany, have been installed. Such monitoring stations are part of discrete monitoring to receive hydraulic heads, hydrochemical data (pH, EC, ORP) as well as dissolved mine gas data from deeper levels during the rebound process (9, 10).

Risk management

In order to manage risk of contamination to the hydrosphere and accurately forecast mine water rebound water levels, conformance and containment of mine water needs to be frequently monitored during the active mine water rebound phase. In 2019 legal authorities including the Mining Authority and the Department of Mining and Energy of the District Council of Arnsberg in North-Rhine Westphalia have initiated an integrative monitoring concept including three major topics, which are identified to be relevant during mine water rebound: 1. water, 2. mine degassing and 3. ground movement (inundation/upheaval). Induced seismicity during mine water rebound as a potential consequence is included in the issues of the integrative monitoring concept and currently researched on by the EU funded project FloodRisk. The research presented here is focusing on hydrodynamics and hydrogeochemistry being complementary to the "water" topic of the integrated monitoring initiative.

As part of the activities within the foundation FBW, a risk based framework for measurement, monitoring and verification (MMV) for an effective mine water monitoring plan with emphasis on hydrogeochemistry of mine water has been set up (11). The bow-tie method has been selected by the FBW as method to

Ende 2015) und dem Bergwerk Prosper-Haniel (geschlossen Ende 2018), sind Multi-Sensor-Grubenwassersonden, konstruiert durch das Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, installiert worden. Diese Grubenwassersonden sind Teil des diskreten Monitoring-Konzepts, um das hydraulische Potential, hydrochemische Daten (pH, EC, ORP) sowie gelöste Gase von tieferen Solen während des Grubenwasseranstiegs zu erfassen (9, 10).

Risikomanagement

Um das Risiko einer Kontamination für die Hydrosphäre zu minimieren und den Grubenwasseranstiegsverlauf verlässlich vorhersagen zu können, sind „conformance" und „containment" als oberste Ziele des Risikomanagements während der aktiven Anstiegsphase stets zu kontrollieren. Im Jahr 2019 haben die Bergbehörde und die Abteilung Bergbau und Energie der Bezirksregierung in Arnsberg, Nordrhein-Westfalen, ein integrales Monitoringkonzept entwickelt, das sich in drei Hauptbereiche gliedert: 1. Wasser, 2. Ausgasung von Grubengas und 3. Bodenbewegungen (Vernässung/Bodenhebung). Induzierte Erderschütterungen als mögliche Konsequenz der Grubenwasseranstiegsphase sind als Aspekt des integrativen Monitoringkonzepts ebenfalls aufgenommen worden und werden zur Zeit im EU-Projekt „FloodRisk" untersucht. Die wissenschaftliche Arbeit hier ist Bestandteil der Hydrodynamik und der Hydrogeochemie als Ergänzung zum Ressort „Wasser" der integralen Monitoring-Initiative.

Als Teil der Forschungsaktivitäten innerhalb der Stiftung FBW wurde ein risikobasiertes Modell für das sogenannte Measurement, Monitoring and Verification (MMV) eines aktiven Grubenwasser-Monitoring-Plans mit dem Schwerpunkt der Hydrogeochemie des Grubenwassers aufgesetzt (11). Die Bow-Tie-Methode wurde vom FBW als Methode zur Identifikation der Monitoring-Aspekte

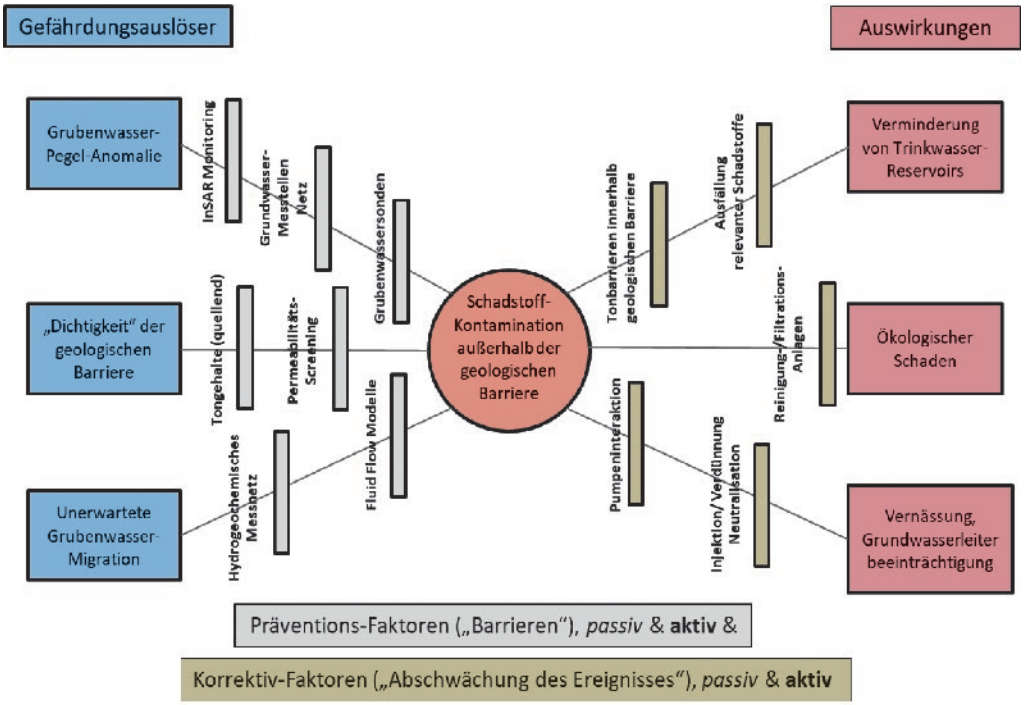

Fig. 4. Bow tie visual representation of monitoring tasks and safeguards (after (11)).
Bild 4. Bow-Tie visuelle Darstellung der Monitoring-Aspekte und Safeguards (nach (11)). Source/Quelle: FZN

identify monitoring tasks (Figure 4). It relates back to the work of Reason (12) on human error investigation and marks a visual representation by highlighting the "unwanted event". It has been used in the past to enhance process safety of long-term projects. The method builds a solid foundation on risk management by identifying and listing safeguards, which act in terms of prevention or mitigation of consequences of a so-called top event. The more safeguards for specific threats are applicable, the better the MMV can act in case of an unwanted accident. In total five elements are described in the bow-tie scheme with the top event as central topic of the tie, threats and consequences together with the associated safeguards on each side of it. In relation to mine water rebound processes, Heitfeld et al. (13) have used such an approach in the past together with the local authorities in the Netherlands to manage risks related to upheaval threats during rebound in the Limburg mining area. So far, a risk management analysis is an iterative process and needs to be adjusted each time, an "event" occurred. The tracer tool set act as preventive safeguard in a sense that it reveals incremental changes in the hydrochemistry of the sampled water, which gives an alert/alarm when the baseline threshold value is exceeded. It can also act as corrective safeguard in its role as "geochemical eye" to reduce the impact of a top event, if the spatial sample density is appropriate.

This paper describes the hydrogechemical monitoring as one important pillar of an integrated MMV plan. The scientific approach consists of quality-controlled literature data combined with a continuous record of own hydrogeochemical data acquisition since 2016 and comprises more than 750 individual data points. Sources of literature data presented here are from Wedewardt (14), Michel et al. (15) and Puchelt (16). A more focused and detailed origin and tracking of the various water bodies within the entire mine workings and the overburden is necessary due

benutzt (Bild 4). Diese Methode ist auf die Arbeit von Reason (12) zurückzuführen, der sich mit menschlichen Fehlern beschäftigte und ein „nicht gewolltes Event" so visuell herausarbeiten konnte. Es wurde in der Vergangenheit dazu benutzt, um Produktionssicherheitsprozesse zu optimieren. Die Methode baut auf einem Risikomangement auf, in dem sogenannte Safeguards identifiziert und aufgeführt werden. Diese greifen im Fall von Prävention oder Abschwächung von Konsequenzen, die sich aus dem sogenannten Top Event ergeben. Je mehr Safeguards gefunden und angewendet werden, desto effektiver kann das MMV-Verfahren bei einem ungewollten Event eingesetzt werden. Im ganzen sind fünf Elemente im Bow-Tie Schema aufgeführt. Dabei bildet das Top Event den Knoten der Fliege (Bow-Tie), die Gefahren und Konsequenzen bilden die zwei Seiten der Fliege. In Bezug auf Grubenwasseranstiegsprozesse haben Heitfeld et al. (13) diese Art gemeinsam mit den niederländischen Behörden benutzt, um Risiken im Zusammenhang mit Bodenhebungen während des Anstiegs im Limburger Revier zu bewältigen. Der Risikomanagementprozess ist soweit als ein iterativer Prozess zu verstehen, der permanent erneuert und angepasst werden muss, sobald ein Top Event eingetreten ist. Das Natürliche-Tracer-Tool agiert hierbei als Präventivmaßnahme, weil es kleinste Veränderungen in der Hydrochemie der beprobten Wässer aufdeckt, die als Alarm angezeigt werden, sobald der sogenannte Baseline-Wert überschritten wurde. Es kann auch als korrigierende Maßnahme eingesetzt werden in seiner Rolle als „geochemisches Auge", um die Auswirkungen eines Top Events zu verringern, falls die räumliche Beprobungsdichte angemessen ist.

Dieser Artikel beschreibt das hydrogeochemische Monitoring als einen wichtigen Pfeiler eines integrierten MMV-Plans. Der wissenschaftliche Ansatz besteht dabei aus einer Kombination von Literaturdaten mit Qualitätskontrolle kombiniert mit einem kontinuierlichen Datensatz von eigenen hydrogeochemischen Analysen seit

to the limited underground access. Former shafts were plugged and sealed off as part of the regulations in the operational plan for mine closure. Mine water rebound hydraulics are closely monitored and past rebound paths as well as recent forecasts are closely linked with the MMV. During mine water rebound entering the overburden host rock, interaction with regional aquifers and formation waters of overlying Upper Cretaceous sediments should be kept minor. Mine waters can be masked or mixed during rebound. The worst assumptions would be to encounter false positive "alarms" during monitoring from waters, which closely resemble mine waters but are true formation waters with comparable dissolved constituents.

General mine water hydrochemistry

Upper Carboniferous hosted mine waters of the former Ruhr mining district, hence groundwater, which came into contact with underground mine workings, are characterized by high salinity and high levels of sulfate and iron species resulting from (di)sulfide oxidation processes within the mine. One of the major tasks in characterizing deep, saline fluid inventories is to identify the origin of salinity. Brine-type, Na-Cl dominated basinal waters can have different origins (17). Two major processes leading to brines are

(a) evaporative pathways of formerly trapped or infiltrated seawater; and
(b) subsurface dissolution of salt minerals, preferentially halite.

Initial seawater composition, i.e. sensu strictu connate waters, can be subsequently modified after entrapment by diagenesis, water-rock interaction, microbial interactions and mixing with groundwater in the subsurface. The approach reports on first data in order to distinguish fluids affected by such interactions. In terms of higher chlorine contents, Zechstein based brines and mixing of Upper Cretaceous brine-type waters infiltrating Upper Carboniferous hosted mine waters in the past need to be identified and tracked. The Upper Cretaceous Emscher formation forms a major hydraulic barrier in the region. The formation hosts organic-rich marly claystones rich in sulfates and iron minerals originated from sulfide oxidation processes similar to the ones associated with the coal measures. The tracer toolset aims to still link clearly elevated concentrations of dissolved sulfate and iron to either mine water or distinguish a mixing of formation water of Emscher Fm. with mine water. We report on a first example in distinguishing the regional saline groundwater aquifer of Upper Cretaceous Cenomanian to Turonian age superimposed on the hard coal-bearing Upper Carboniferous host rocks from the mine waters using bromide to chloride ratios, molar ratios of sodium versus chloride and water isotopes, i.e. δ^2H and $\delta^{18}O$.

Regional geology of the Ruhr District

The former coalfield of the Ruhr Valley is situated in folded and weakly metamorphosed Paleozoic basement rock of Upper Carboniferous age referred to as the Rhenish Massif (18). Upper Carboniferous siliciclastics intercalated with coal measures (Namurian to Westphalian A-C) forms the host rock of the former mining area. The folded Upper Carboniferous strata is gently dipping towards the North. It is unconformably overlain by Mesozoic

2016 und enthält mehr als 750 Datenpunkte. Quellen der Literaturdaten, die hier präsentiert werden, setzen sich aus den Publikationen von Wedewardt (14), Michel et al. (15) und Puchelt (16) zusammen. Eine detailgetreue Sicht auf die Herkunft und die Verfolgung der unterschiedlichen Wasserkörper innerhalb der Grubenbaue und des Deckgebirges ist aufgrund des stark eingeschränkten Zugangs zur Tiefe notwendig. Frühere Schächte wurden verfüllt und plombiert als Teil der gesetzlichen Bestimmungen des jeweiligen Abschlussbetriebsplans. Grubenwasserströme werden eng beprobt und frühere Anstiegsverläufe wie auch deren Prognose sind eng mit dem MMV-Plan verknüpft. Während der Grubenwasseranstieg das Deckgebirge erreicht, wird versucht, die Interaktion mit den regionalen Aquiferen und Formationswässern der überlagernden Oberkreide-Sedimente zu minimieren. Grubenwässer können während des Anstiegs maskiert oder vermischt werden. Die schlechtesten Annahmen wären sogenannte falsch positive Alarme während des Monitorings von Wässern, die dem Grubenwasser zwar ähneln, aber reine Formationswässer mit vergleichbaren Inhaltsstoffen sind.

Allgemeine Grubenwasserchemie

Oberkarbonische Grubenwässer des früheren Ruhrreviers, also Grundwässer, die in Kontakt mit den untertägigen Grubenbauen gekommen sind, werden charakterisiert durch hohe Salinitäten sowie hohen Konzentrationen an Sulfat und Eisen-Spezies, die aus der Sulfidoxidation innerhalb der Gruben resultieren. Ein wichtiges Anliegen bei der Untersuchung von tiefen, salinaren Fluidkörpern ist es, die Herkunft der Salinität herauszufinden. Solen, das sind natriumchloridreiche, basale Wässer, können unterschiedlicher Herkunft sein (17). Zwei Hauptprozesse, die zu Solen führen, sind

(a) Evaporation von eingeschlossenem oder infiltrierendem Meerwasser und
(b) Auflösung von Salzmineralen im Untergrund, in erster Linie Halit (NaCl).

Die anfängliche Meerwasserzusammensetzung, im engeren Sinn konnates Wasser, kann nach dem Einschluss durch Diagenese, Wasser/Gesteins-Wechselwirkungen, mikrobielle Interaktionen und durch Mischungen mit anderen Grundwässern nachträglich verändert werden. Dieser Ansatz berichtet von ersten Daten, um Fluide, die durch diese Prozesse verändert wurden, zu unterscheiden. In Bezug auf die höheren Chlorid-Werte im Grubenwasser, müssen zechsteinbasierte Solen und Mischungen von oberkretazischen Solen, die bereits oberkarbonische Grubenwässer infiltriert haben, identifiziert und weiter verfolgt werden. Die Emscher-Formation ist ein Hauptaquitard in der Region. Diese Formation besteht aus organisch reichen, mergeligen Tonsteinen, die reich an Sulfaten und Eisenmineralen sind, die ebenfalls aus der Sulfidoxidation stammen – ähnlich wie der Prozess in den Kohleflözen. Das Tracer-Toolset hat die Zielsetzung, erhöhte Konzentrationen von gelöstem Sulfat und Eisen entweder eindeutig dem Grubenwasser oder der Mischung von Formationswässern aus der Emscher-Formation mit Grubenwässern zuzuordnen. Wir berichten von einem ersten Beispiel, den regionalen, salinaren Grundwasserleiter aus dem Cenomanium-Turonium (CT), der sich oberhalb der oberkarbonischen Grubenwässer befindet, von diesen mittels Bromid zu Chlorid-Verhältnis, molarem Natrium zu Chlorid-Verhältnis und „Wasserisotopen", das sind δ^2H und $\delta^{18}O$, zu unterscheiden.

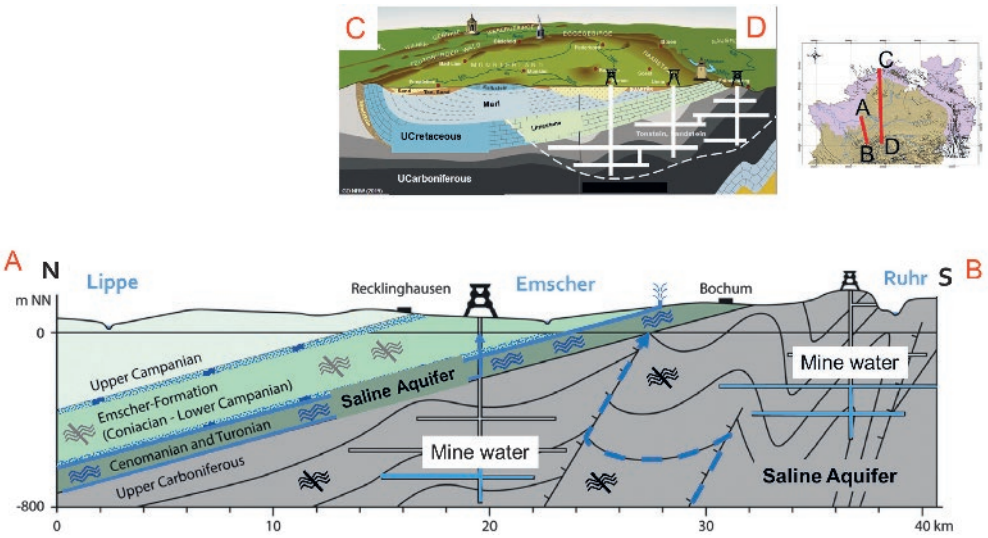

Fig. 5. Schematic cross section of the strata of the mining area including former mine workings in Upper Carboniferous coal bearing strata and unconformably overlain Upper Cretaceous overburden consisting of carbonates and marls (modified after (20)).
Bild 5. Schematischer Profilschnitt der geologischen Schichten innerhalb des Bergbaugebiets, die sich aus den oberkarbonischen kohleführenden Schichten mit dem ehemaligen Grubengebäude und darüber liegenden oberkreidezeitlichen Mergeln und Karbonaten zusammensetzen (verändert nach (20)). Source/Quelle: FZN

sediments of the Muensterland Basin, which are dominated by Upper Cretaceous marls and carbonates (19) (Figure 5).

These two geological provinces contain both Na-Cl type basinal groundwaters with electrical conductivities up to 200.000 µS/cm. In the Muensterland Basin, the brine infiltrates Cenomanian-Turonian (CT) strata and builds a regional aquifer extending from the northern edge of the basin, towards the southern border to the Paleozoic basement known as the Haarstrang ridge (21). Numerous spas and former saltworks are located in the region and making use of this saline aquifer since mediaeval times. Up to 1,500 m thick, marly sediments of the Emscher Formation, Middle Coniacian to Upper Santonian, were deposited on top of the CT carbonate sequence. The Emscher Formation consists of homogeneous grey to dark grey coloured sediments of finely laminated to thick layered and in parts organic rich (Type II) marls. Hydrogeo-

Regionale Geologie des Ruhrgebiets

Das ehemalige Kohleabbaugebiet an der Ruhr befindet sich im schwach metamorphen, gefalteten paläozoischen Grundgebirge oberkarbonischen Alters, das auch als Rheinisches Massiv bezeichnet wird (18). Oberkarbonische Siliziklastika mit Einschaltungen von Kohleflözen (Namur bis Westphal A-C) bilden das Umgebungsgestein des ehemaligen Bergbaugebiets. Das gefaltete Oberkarbon fällt schwach nach Norden ein. Es ist diskordant überdeckt von mesozoischen Sedimenten des Münsterländer Beckens, die größtenteils aus oberkretazischen Mergeln und Karbonaten bestehen (19) (Bild 5).

Beide geologischen Provinzen beinhalten natriumchloridhalitige basale Grundwässer mit elektrischen Leitfähigkeiten bis zu 200.000 µS/cm. Im Münsterland infiltrirt die Sole Schichten des Cenomaniums und Turoniums und bildet einen regionalen Aquifer, der sich von der nördlichen Grenze des Beckens bis hin zur südlichen Grenze zum paläozoischen Grundgebirge, auch bekannt als Haarstrang, erstreckt (21). Zahlreiche balneologische Betriebe/Bäder und ehemalige Salinen befinden sich in dieser Region und nutzen diese Sole seit dem Mittelalter. Bis zu 1.500 m mächtige mergelige Schichten der Emscher-Formation, Mittleres Coniacium bis Mittleres Santonium, wurden oberhalb der CT-Karbonatsequenz abgelagert. Die Emscher-Formation besteht aus homogenen, grauen bis hin zu dunkelgrauen, feingeschichteten bis dünnbankigen und in Teilen organischreichen (Typ II) Mergeln. Hydrogeologisch ist die Emscher-Formation ein Aquitard, aber die obersten Bereiche der Formation beinhalten einen lokal im Ruhrgebiet auftretenden Kluftgrundwasserleiter. Eingeschlossen von Aquitarden ist der CT-Aquifer gespannt. Evaporitablagerungen im Gebiet werden repräsentiert durch permische (Zechstein) und triassische (Oberer Buntsandstein, Röt Fm.) Salinare. Sie wurden am nördlichen Rand des Münsterländer Beckens sowie auch am westlichen Rand bis hinunter an den Niederrhein abgelagert (Bild 6).

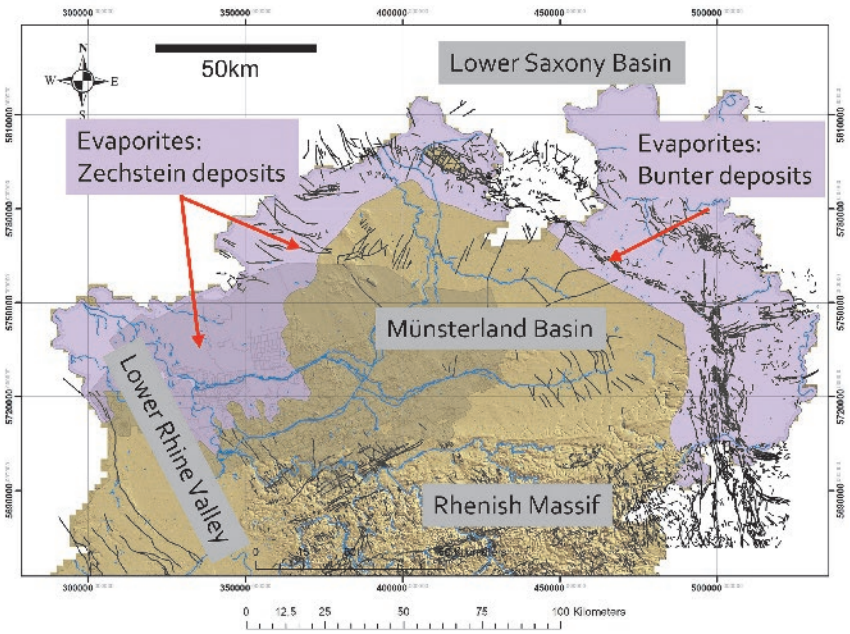

Fig. 6. Saline deposits as part of the overburden in the vicinity of the Ruhr District mining area (former area of concessions as shaded). // Bild 6. Salinare Ablagerungen als Teile des Deckgebirges in der Umgebung des Bergbaus im Ruhrgebiet (frühere Konzessionsgebiete sind schattiert dargestellt). Source/Quelle: FZN

logically, the Emscher Formation is a thick aquitard whereas its uppermost part includes a local fractured aquifer in the Ruhr District. Enclosed by aquitards, the CT aquifer is confined. Evaporite deposits in the area are represented by Permian (Zechstein) and Triassic (Upper Bunter, Roet Fm.) salt sequences. They were deposited on the northern rim of the Muensterland Basin and along the western margin down to the Lower Rhine region (Figure 6).

The Upper Santonian Haltern Formation (Haltern Sands) including the Recklinghausen Formation overlying the Emscher Formation represents an important drinking water reservoir for the region. It is anticipated that during the main rebound phase mine water will infiltrate the overburden and potentially mix with CT saline aquifer, and subsequently, will rise within the pore network and fault pathways of the Emscher Formation. As prerequisite, Haltern Formation strata as drinking water reservoir must be kept free from mine waters.

Mine water hydrochemistry study

In total over 750 separate data points have been collected comprising own hydrogeochemical analysis during the period of 2017 to 2021 and literature data. Upper Carboniferous hosted mine waters, CT aquifer samples and Coniacian-Santonian Emscher Formation waters have been focused on in the hydrochemical data assessment (22). Data points cover the entire mining area of the Ruhr district and extends to the Muensterland basin where spas have been sampled (Figure 7). Hydrogeochemical analyses of major cations and anions incl. trace elements were conducted by certified lab analysis according to DIN ISO 11885 and DIN 10304-1 protocols. Oxygen and hydrogen stable isotope measurements were analysed by an optical CRDS analyser, Picarro 2130i, with standard deviations of 0,06 ‰ for 18O and 0.48 ‰ for δ^2H.

Mine waters at the points of discharge are characterized by iron hydroxides and oxyhydroxides precipitates as shown at the discharge from the mine dewatering station Carolinenglück or in the case of the discharge at the mine dewatering station of Robert Müser have been treated with peroxides to form natural elemental sulphur giving the water a milky appearance (Figure 8).

Stable water isotopes, i.e. δ^2H and δ^{18}O, distinguish CT saline aquifer waters from Upper Caroniferous mine waters (Figure 9). The trend shown here for the CT aquifer reveals former meteoric water percolating through the overburden rocks as the origin of water for such aquifer. Instead, Upper Carboniferous mine waters follow that trend partially. Samples from deeper intervals in the mine workings exhibit a trend towards more positive δ^{18}O values being the consequence of intense water-rock interaction with the host rock.

Origin of salinity has been deduced from plotting molar concentrations of sodium and chloride species (Figure 10). A trend of the ratio of both species reveals a slope of 0.86 as trend of evaporating seawater versus a slope of 1 for halite dissolution in case of the Upper Creteacous CT samples.

Die Obersantonische Haltern-Formation, inklusive der Recklinghäuser Sandmergel überlagern die Emscher-Formation und sind ein bedeutender Trinkwasserspeicher der Region. Es ist prognostiziert, dass während der Hauptgrubenwasseranstiegsphase Grubenwässer das Deckgebirge infiltrieren werden und sich mit dem CT-Salinar mischen und danach weiter im Porennetzwerk entlang von Störungsbahnen der Emscher-Formation aufsteigen werden. Als Grundvoraussetzung während dieses Prozesses muss sichergestellt sein, dass die Haltern-Formation als Trinkwasserspeicher frei von Grubenwasser bleibt.

Grubenwasser-Hydrochemie-Studie

In Gänze wurden 750 separate Datenpunkte aus hydrogeochemischen Analysen in der Periode 2017 bis 2021 sowie aus Literaturdaten zusammengetragen. Oberkarbonische Grubenwässer, CT-Aquiferproben sowie Coniacium-Santonium Emscher-Formationswässer wurden bei dieser Bewertung voneinander unterschieden (22). Datenpunkte decken das gesamte Ruhrgebiet ab und erweitern sich bis ins Münsterländer Becken, indem die Wässer aus den balneologischen Anlagen analysiert wurden (Bild 7). Hydrogeochemische Analysen der Hauptkationen und -anionen inklusive der Spurenelemente wurden von einem zertifiziertem Labor nach DIN ISO 11885- und DIN 10304-1-Protokollen analysiert. Stabile Isotope des Sauerstoffs und Wasserstoffs wurden mittels eines optischen CRDS-Analysators 2130i der Fa. Picarro analysiert. Standardabweichungen betrugen 0,06 ‰ für δ^{18}O and 0,48 ‰ für δ^2H.

Grubenwässer an ihren Einleitstellen sind meist charakterisiert durch die Ablagerungen von Eisenoxiden- und Eisenoxyhydroxiden, wie hier am Beispiel der Einleitstelle des Wasserhal-

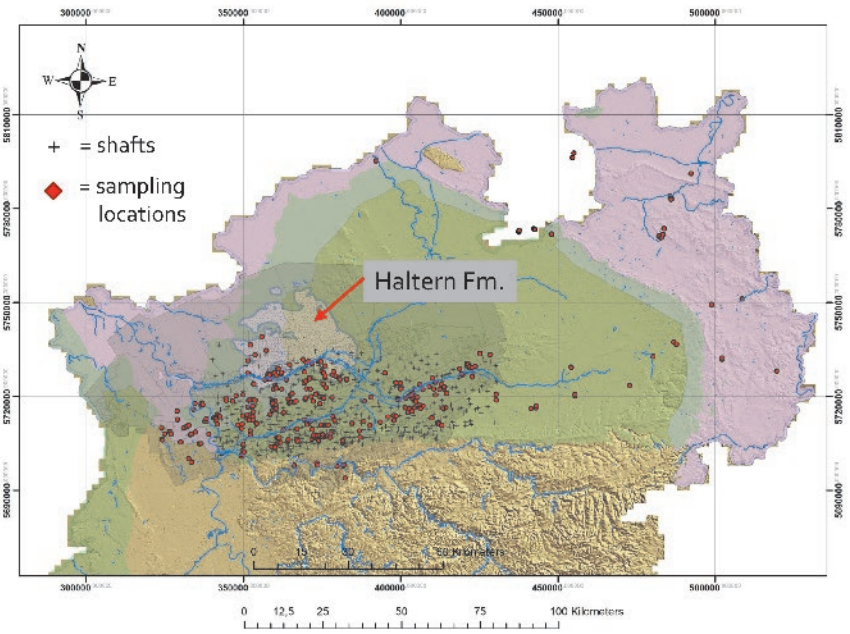

Fig. 7. Data points (red dots) showing a good coverage of the former mining area marked by shafts (crosshairs) and concessions (shaded area). Haltern sands are marked by sand texture belongs to former concession area. // Bild 7. Datenpunkte (rote Punkte) zeigen eine gute Abdeckung des ehemaligen Bergbaugebiets, das durch die Schächte (Kreuze) und Konzessionen (schattierter Bereich) repräsentiert ist. Die Halterner Sande (Sandtextur) sind Teil der ehemaligen Konzessionsgebiete. Source/Quelle: FZN

Fig. 8. Mine water drainage of mine dewatering station Carolinenglück into the receiving water course Emscher (left) and mine water discharge from mine dewatering station Robert Müser into local ponds called "Harpener Teiche" (right). // Bild 8. Grubenwassereinleitung an der Wasserhaltung Carolinenglück in die Vorflut der Emscher (links) und Grubenwassereinleitung der Wasserhaltung Robert Müser in die lokalen Seen, bekannt als „Harpener Teiche" (rechts). Source/Quelle: FZN

Finally, bromide to chloride concentrations are plotted in a log-log plot in order to test its ability to act as natural tracer for mine waters. In figure 11 mine waters can be characterized by chloride to bromide ratios of 1,450 < x < 450. This intermediate range of ratios is flanked by lower values represented by formation waters of Emscher Fm. and higher values by the CT brines of the regional aquifer.

First data assessment reveals the usefulness of detailed screening of hydrochemistry. Trace elements like bromide have been identified to contribute significantly to a robust monitoring plan and risk management purposes. When integrated with more natural hydrochemical tracers, the mine water tracking can potentially be more precise giving more insights on representative hydrochemistry for water provinces in the Ruhr District. Hence, it allows identifying mixing with adjacent water provinces to enhance mine water management. In the future, the aim is to enlarge the hydrochemical analyses and to identify more tracers suitable for risk management evaluation.

tungsstandorts Carolinenglück dargestellt, oder wurden im Fall der Einleitstelle der Wasserhaltung Robert Müser mit Peroxiden behandelt, die natürlichen, elementaren Schwefel bilden und somit das Wasser milchig einfärben (Bild 8).

Stabile Wasserisotope, δ^2H und $\delta^{18}O$, unterscheiden den CT salinaren Aquifer von den oberkarbonischen Grubenwässern (Bild 9). Der gezeigte Trend der CT-Wässer deckt auf, dass es sich hierbei um meteorische Wässer handelt, die durch das Deckgebirge perkolierten. Im Gegensatz dazu folgen die oberkarbonischen Grubenwässer diesem Trend nur teilweise. Proben aus tieferen Bergwerkssolen zeigen einen Trend hin zu deutlich erhöhten $\delta^{18}O$-Werten, die eine Konsequenz einer intensiven Wasser-Gesteins-Wechselwirkung sind.

Die Herkunft der Salinität wurde abgeleitet, indem die molaren Konzentrationen von Natriumkationen und Chloridanionen dargestellt wurden (Bild 10). Der Trend des molaren Verhältnisses beider Spezies (Na vs. Cl) zeigt für Meerwasserevaporation ein Verhältnis von 0,86, während das molare Verhältnis für die Auflösung von Halit im Falle der CT-Wässer Eins ergibt.

Als letzter Graph wurde Bromid gegen Chlorid-Konzentrationen als Log-Log-Graph aufgetragen, um zu testen, ob dieses Verhältnis sich als natürlicher Tracer eignen würde. In Bild 11 sind Grubenwässer durch Chlorid vs. Bromid-Verhältnisse von 1.450 < x < 450 charakterisiert. Diese mittleren Werte werden flankiert hin zu niedrigeren Werten repräsentiert durch Formationswässer der Emscher-Formation und hin zu höheren Werten durch die CT-Wässer des regionalen Aquifers.

Eine erste Datenüberprüfung hat die Nützlichkeit eines detaillierten Screenings der Hydrochemie gezeigt. Spurenelemente wie Bromid leisten signifikant einen Beitrag zu einem robusten Monitoring-Plan und Risikomanagement. Wenn diese Daten

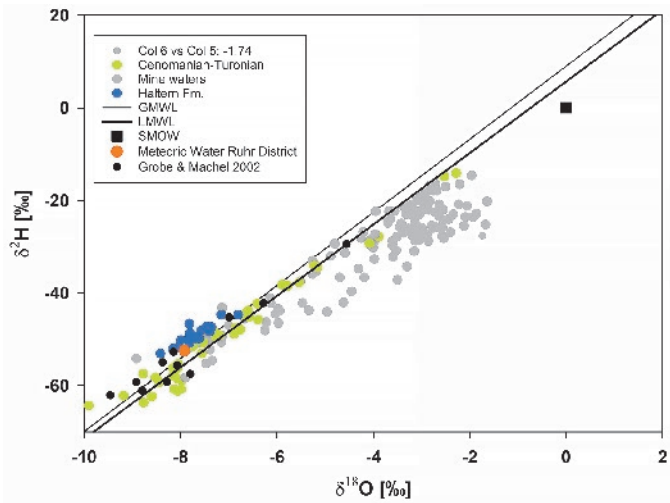

Fig. 9. Stable water isotopes plot of analysed water samples.
Bild 9. Stabile Wasserisotopen-Graph der analysierten Proben.
Source/Quelle: FZN

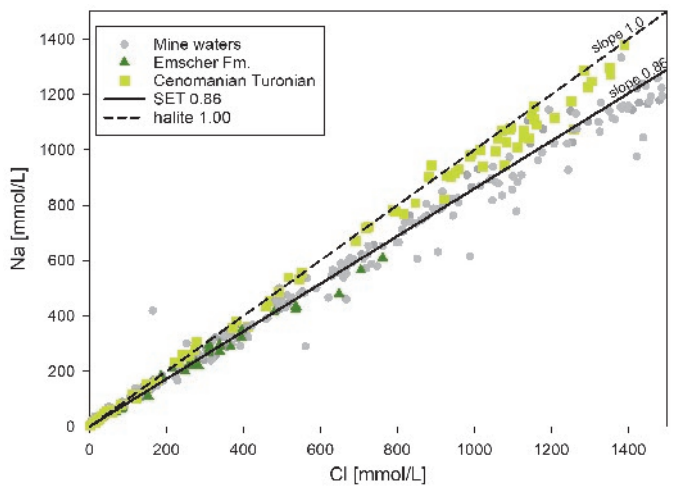

Fig. 10. Plot of molar concentrations (mmol/l) of sodium (Na^+) and chloride (Cl^-). // Bild 10. Graph der molaren Konzentrationen in (mmol/l) von Natrium (Na^+) und Chlorid (Cl^-). Source/Quelle: FZN

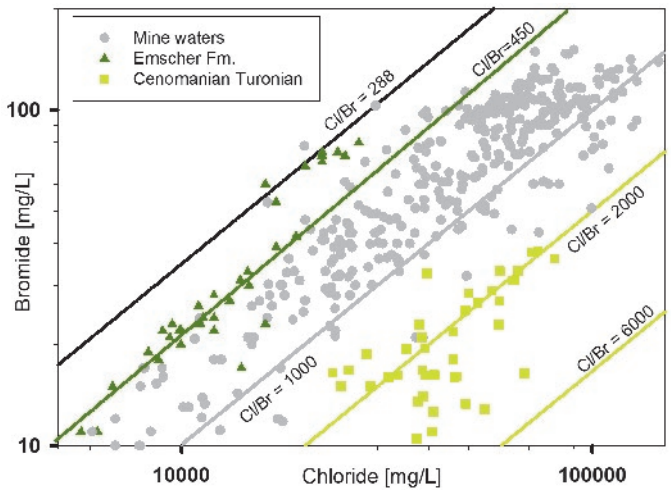

Fig. 11. Log-log plot of bromide to chloride concentration ratios of analysed water samples. // Bild 11. Log-Log-Graph der Bromid vs. Chlorid-Konzentrationen der analysierten Wasserproben. Source/Quelle: FZN

mit weiteren natürlichen hydrochemischen Tracern verschnitten werden, können sie tiefere Einsichten in die repräsentative Hydrochemie einzelner Wasserprovinzen im Ruhrgebiet geben und somit auch Mischungen mit Anrainer-Wasserprovinzen ermöglichen, um das Grubenwassermanagement zu optimieren. In Zukunft ist das Ziel, die hydrochemischen Analysen auszuweiten und mehr Tracer zu identifizieren, die sich als nützlich für das Risikomanagement erweisen.

References / Quellenverzeichnis

(1) Melchers, C.; Goerke-Mallet, P.; Kleineberg, K. (2016): Elemente und Aspekte des Nachbergbaus. In: Mining Report Glückauf 152 (2016), Heft 3, S. 215–223.
(2) Gombert, P.; Sracek, O.; Koukouzas, N.; Gzyl, G.; Valladares, S. T.; Frączek, R. (2019): An Overview of Priority Pollutants in Selected Coal Mine Discharges in Europe. In: Mine Water Environ 38 (1), pp 16–23. DOI: 10.1007/s10230-018-0547-8.
(3) Melchers, C.; Westermann, S.; Reker, B. (2020): Evaluation of mine water rebound processes in the German Coalfields of Ruhr, Saar, Ibbenbüren, and the adjacent European countries. Bochum: Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum (Berichte zum Nachbergbau, 1).
(4) Younger, P. L. (1997): The longevity of mine water pollution: a basis for decision-making. In: Science of The Total Environment 194–195, pp 457–466. DOI: 10.1016/S0048-9697(96)05383-1.
(5) Pastor, J.; Klinger, C.; Talbot, C.; Whitworth, K.; Suso Llamas, J. M. (2008): Optimisation of mine water discharge by monitoring and modelling of geochemical processes and development of measures to protect aquifers and active mining areas from mine water contamination. Edt. by European Commission – Research Fund for Coal and Steel. Luxembourg.
(6) Nordstrom, D. K.; Blowes, D. W.; Ptacek, C. J. (2015): Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. In: Applied Geochemistry 57, pp 3–16. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.02.008.
(7) Wolkersdorfer, C.; Mugova, E. (2022): Effects of Mining on Surface Water. In: Encyclopedia of Inland Waters: Elsevier, pp 170–188.
(8) Balzer, I.; Roth, M. (2019): Grubenwasserhaltung im Ruhrgebiet – Chancen für die Zukunft. In: Mining Report Glückauf 155 (2019), Heft 3, S. 254–261.
(9) Drobniewski, M.; Witthaus, H. (2017): Mine water monitoring. In: C. Wolkersdorfer, L. Sartz, M. Sillanpää and A. Häkkinen (Ed.): Mine Water and Circular Economy. IMWA 2017. Lappeenranta, Finland, pp 88–93.
(10) Witthaus, H.; Melchers, C. (2019): Mine water monitoring in abandoned mines at RAG Aktiengesellschaft. In: E. Khayrulina, C. Wolkersdorfer, S. Polyakova and A. Bogush (Ed.): Mine Water – Technological and Ecological Challenges. IMWA 2019. Perm, Russia, pp 59–67.
(11) Kessler, T.; Mugova, E.; Jasnowski-Peters, H.; Rinder, T.; Stemke, M.; Wolkersdorfer, C. (2020): Grundwasser in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren – ein wissenschaftlicher Blickwinkel auf Grubenflutungen. In: Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 25 (4), S. 259–272. DOI: 10.1007/s00767-020-00460-0.
(12) Reason, J. (2000): Human error: models and management. In: BMJ (Clinical research ed.) 320 (7237), pp 768–770. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768.
(13) Heitfeld, M.; Denys, F.; Schouwstra, M.; Klünker, J.; Rosner, P.; Spaans, J. (2017): Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande: Bestandsaufnahme und Prognosen. In: Jörg Benndorf (Hg.): 18. Geokinematischer Tag des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie am 10. und 12. Mai 2017 in Freiberg. 18. Geokinematischer Tag. Freiberg. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH.
(14) Wedewardt, M. (1995): Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier. Bochum: DMT (DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 39).
(15) Michel, G.; Rabitz, A.; Werner, H. (1974): Betrachtungen über die Tiefenwässer im Ruhrgebiet. In: Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, 20 (1974), S. 215–236.
(16) Puchelt, H. (1964): Zur Geochemie des Grubenwassers im Ruhrgebiet. In: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 116, S. 167–203.
(17) Hanor, J. S. (1994): Origin of saline fluids in sedimentary basins. In: Geological Society, London, Special Publications 78 (1), pp 151–174. DOI: 10.1144/GSL.SP.1994.078.01.13.
(18) Kukuk, P. (1938): Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes. Textband. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
(19) Hiss, M.; Mutterlose, J. (2010): Field trip E6: Cretaceous geosites of the eastern Ruhr Area and the southern Münsterland. In: sdgg 66, pp 168–183. DOI: 10.1127/sdgg/66/2010/168.
(20) Hahne, K.; Schmidt, R. (1982): Die Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes. Einführung in d. Steinkohlengebirge u. seine Montangeologie. Von Carl Hahne u. Rolf Schmidt. Mit einem Beitrag über das Deckgebirge von Wolfgang Müller. Essen: Verlag Glückauf.
(21) Struckmeier, W. (1990): Wasserhaushalt und hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens. Düsseldorf: Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (Wasser und Abfall, 45).
(22) Jasnowski-Peters, H.; Melchers, C. (2021): Natural Tracers for Mine Water Fingerprinting – A First Step to a Hydrogeochemical Monitoring Plan for Risk Assessment during Mine Water Rebound in the Ruhr District Area, Germany. In: P. Stanley, C. Wolkersdorfer and K. Wolkersdorfer (Ed.): Mine Water Management for Future Generations. IMWA 2021. Cardiff, Wales, United Kingdom, pp 212–217.

Authors / Autoren

Dipl.-Geol. Henning Jasnowski-Peters, Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers, Research Center of Post-Mining (FZN), TH Georg Agricola University (THGA), Bochum/Germany