

Bastian Reker
 Sebastian Westermann
 Peter Goerke-Mallet
 Christian Melchers

Protecting Aquifers from Rising Mine Waters: Managing Mine Water in the Durham Coalfield (UK) and a Comparison with Methods used in Lorraine (France)

When a coalfield finally ceases production there will no longer be any operational requirement to continue with the mine pumping and dewatering operations. Switching off the pumps generally results in an increase in mine-water levels. This process can take place very quickly or may even last several years or decades. Rising mine-water levels are an ongoing event in many places, not only in Germany but around the world, and the public is sometimes completely unaware that they are happening. In the former mining area of South Butterknowle in the Durham coalfield (United

Kingdom) an inaccurate assessment of the hydrogeological conditions resulted in mine water and groundwater being mixed together. This paper will seek to show how lessons can be drawn from the Durham experience and how the mine-water management procedures adopted during the post-mining phase in the East of Wear (UK) and Lorraine (France) mining areas can be adapted with a view to providing long-term protection for the aquifers in these regions.

Der Schutz von Grundwasserleitern beim Grubenwasseranstieg: Grubenwassermanagement im Durham-Revier (Großbritannien) und ein Vergleich mit dem Konzept in Lothringen (Frankreich)

Wird ein Steinkohlenrevier endgültig stillgelegt, entfällt auch die betriebliche Notwendigkeit, die Wasserhaltungsmaßnahmen weiterzuführen. Mit dem Abschalten der Pumpen kommt es dabei in der Regel auch zu einem Anstieg des Grubenwassers. Dieser Prozess kann sehr schnell vorstattengehen oder sich über mehrere Jahre bis hin zu Jahrzehnten erstrecken. Nicht nur in Deutschland, sondern weltweit liefen bereits vielfach Grubenwasseranstiege ab, z.T. ohne von der Öffentlichkeit wahrgenommen zu werden. In Großbritannien kam es im Abbaubereich South Butterknowle

des Durham Reviers infolge einer falschen Einschätzung der hydrogeologischen Verhältnisse zu einer Durchmischung von Gruben- und Grundwasser. Im Beitrag soll gezeigt werden, wie aus den dort gemachten Erfahrungen Lehren gezogen wurden und wie das Grubenwassermanagement in der Nachbergbauphase in den Revieren East of Wear (Großbritannien) sowie in Lothringen (Frankreich) angepasst und die dortigen Grundwasserleiter nachhaltig geschützt werden konnten.

1 Introduction

The permanent closure of the German coal industry at the end of 2018 created an increasing need to tackle the challenges of the post-mining era and to manage the related problems in a sustainable way. In this context it is expedient to look back at the experiences associated with the closure of other coalfields both in Germany and elsewhere. The Research Institute of Post-Mining, which is attached to the TH Georg Agricola University in Bochum/Germany, carries out systematic analyses of international experience in this area and assesses the options available for transferring this know-how to the Ruhr, Saar and Ibbenbüren coalfields. Much of this work has focused on the experiences

1 Einleitung

Mit dem endgültigen Ende des Steinkohlenbergbaus in Deutschland zum Ende des Jahres 2018 wächst die Notwendigkeit, die nachbergbaulichen Herausforderungen anzunehmen und nachhaltig zu gestalten. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, auch einen Blick auf die Erfahrungen zu werfen, die bereits mit den Stilllegungen zahlreicher Steinkohlenreviere im In- und Ausland gemacht wurden. Am Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA) in Bochum werden die internationalen Erfahrungen systematisch ausgewertet und die Möglichkeit der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die Reviere an Ruhr und Saar sowie in Ibbenbüren

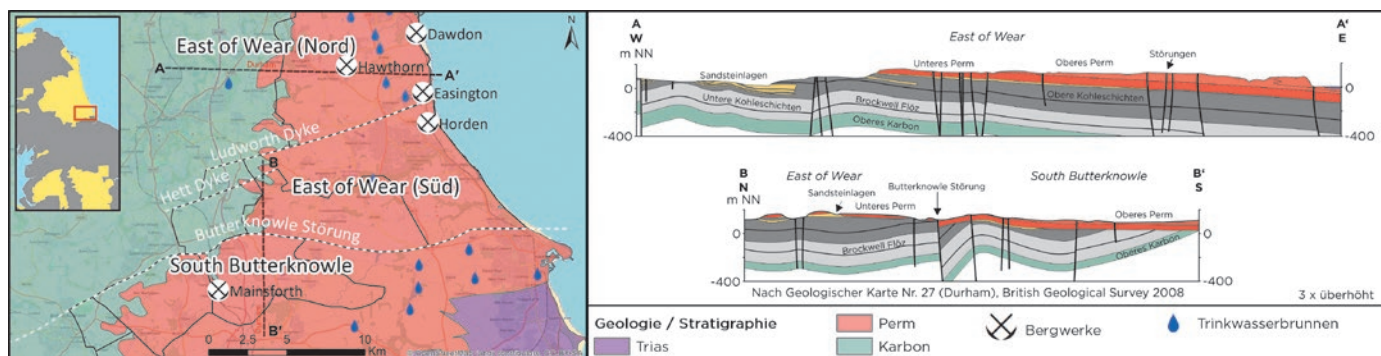


Fig. 1. Position and geology of the East of Wear and South Butterknowle working districts of the Durham coalfield (United Kingdom). Wells used for the supply of drinking water are shown as blue droplets. Geology colours as recommended by the International Stratigraphy Commission. Geological data provided by the British Geological Survey, mining areas according to (9). // Bild 1. Lage und Geologie der East of Wear- und South Butterknowle-Abbaugelände des Durham Reviers in Großbritannien. Brunnen für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind als blaue Tropfen dargestellt. Farben der Geologie nach Empfehlung der Internationalen Kommission der Stratigraphie. Geologie nach British Geological Survey, Abbaugelände nach (9).

of the United Kingdom, whose many individual coalfield areas have now all been closed. The organisational structure and development of mining operations in the United Kingdom, and in the Yorkshire coalfield in particular, have already featured in a number of reports (1, 2).

2 Durham coalfield/UK

The Durham mining area lies to the south of the Northumberland coalfield on the north-east coast of England. At the beginning of the 20th century Durham was producing nearly 42 Mt of coal (3) and was one of the country's most important coal mining regions. The coalfield was divided into several smaller working districts and the following paper will focus on the South Butterknowle and East of Wear areas, which lie adjacent to each other and are hydraulically segregated by the Butterknowle fault (Figure 1).

Permian limestone beds form the regional joint aquifer (Permian Magnesian Limestone), which is of huge water-resource significance for the North East of England (4). With an average total of about 36,000 m³ (equivalent to some 25 m³/min or 13 Mm³/a) of water being extracted each day by Northumbrian Water Ltd. this resource meets the water supply needs of approximately 150,000 people living in and around the Durham area (5). It is also an important source of water for local agricultural and industrial consumers (6). The lithology mainly comprises magnesium-rich limestones, dolomite, marl and interposed evaporite beds. The aquifer is underlain by Carboniferous deposits that have already been extensively mined. Coal extraction was continued below the North Sea following the eastwards dip of the strata (profile section A-A' in Figure 1). The last of the Durham mines were closed in the early 1990s. The cessation of much of the mine dewatering work has caused mine-water levels to rise over a wide area.

2.1 South Butterknowle mining district

The first case in the United Kingdom of aquifer contamination by rising mine water was documented in the southern part of the Durham coalfield south of the major Butterknowle fault (Figure 2) (7, 8, 9). In this area much of the Carboniferous lies discordantly below the limestone beds of the Magnesian Limestone aquifer (section B-B' in Figure 1), from which it is only hydraulically separated at local level by a layer of marl.

bewertet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den Erfahrungen, die in den letzten Jahrzehnten in Großbritannien mit seinen zahlreichen Revieren, die allesamt mittlerweile stillgelegt sind, gemacht wurden. Über die Organisationsstruktur und die Entwicklung des Bergbaus in Großbritannien und das Yorkshire Revier wurde bereits mehrfach berichtet (1, 2).

2 Durham-Revier/Großbritannien

Das Durham-Steinkohlenrevier liegt südlich des Reviers Northumberland an der Nordostküste Englands und war Anfang des 20. Jahrhunderts mit einer Gesamtförderung von knapp 42 Mio. t Kohle (3) eines der bedeutendsten Reviere Großbritanniens. Das Steinkohlenrevier teilt sich in mehrere kleinere Abbaugelände, von denen im Folgenden auf die Gebiete South Butterknowle und East of Wear eingegangen wird, die benachbart zueinander liegen und durch die Butterknowle-Störung hydraulisch voneinander abgegrenzt sind (Bild 1).

Kalksteine des Perm bilden den regionalen Kluftgrundwasserleiter (Permian Magnesian Limestone) mit hoher wasserwirtschaftlicher Bedeutung für den Nordosten Englands (4). Mit einer durchschnittlichen täglichen Gesamtentnahmemenge von ca. 36.000 m³ (entspricht ca. 25 m³/min bzw. 13 Mio. m³/a) durch die Northumbrian Water Ltd. sichert er den Wasserbedarf von rd. 150.000 Menschen rund um den Bereich Durham (5) und ist darüber hinaus auch für den landwirtschaftlichen und industriellen Bereich von Bedeutung (6). Lithologisch besteht er vor allem aus magnesiumreichen Kalksteinen, Dolomitstein, Mergeln und eingeschalteten Evaporitlagen. Er wird durch die Ablagerungen des Karbon unterlagert, in denen ein weiträumiger Abbau von Steinkohle stattgefunden hat. Dem Einfallen der Schichten nach Osten hin folgend (Profilschnitt A-A' in Bild 1) ist der Abbau bis unter die Nordsee vorangetrieben worden. Die letzten Zechen wurden im Durham-Revier zu Beginn der 1990er Jahre geschlossen. Mit dem damit verbundenen Ende vieler Wasserhaltungsmaßnahmen kam es seitdem zu einem großflächigen Anstieg des Grubenwassers.

2.1 South Butterknowle-Abbaugelände

Im südlichen Teil des Durham-Reviers, das südlich der großen Butterknowle-Störung liegt (Bild 2), kam es zur ersten in Großbritannien dokumentierten Verunreinigung eines Grundwasserleiters

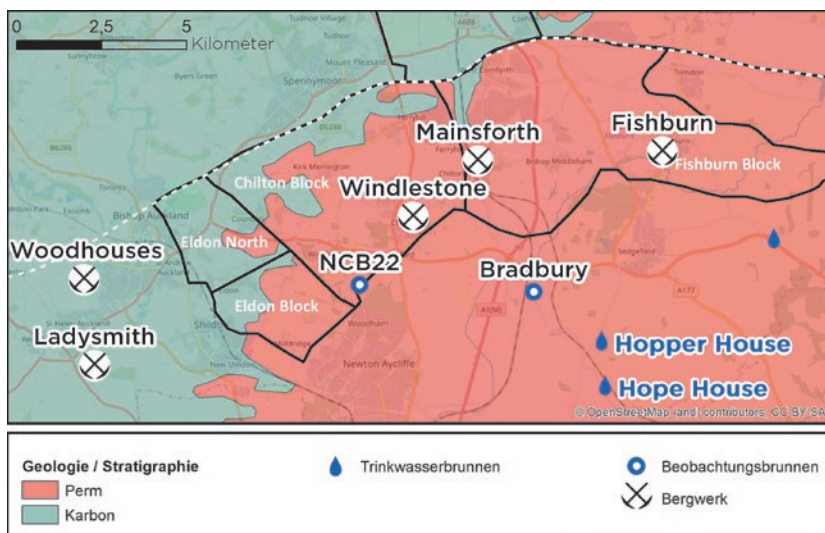


Fig. 2. South Butterknowle region of the Durham coalfield. The black lines indicate the limits of the different mining blocks (according to (9, 11)). The entire area was closed down, and subsequently flooded, during the 1970s. This flooding operation resulted in some local impairment of the overlying Magnesian Limestone aquifer, as verified at observation well NCB22 (7, 8, 9).
 Bild 2. South Butterknowle-Region des Durham-Reviere. Die schwarzen Umrandungen geben die Lage der verschiedenen Abbaublöcke wieder (nach (9, 11)). Das gesamte Gebiet wurde im Lauf der 1970er Jahre stillgelegt und geflutet. Infolge der Flutung kam es lokal zu Beeinträchtigungen des überlagernden Magnesian Limestone-Grundwasserleiters, nachweislich u. a. im Beobachtungsbrunnen NCB22 (7, 8, 9).

Even when flooding operations commenced in the early to mid 1970s there was an awareness of the problem that rising mine water could enter the aquifer and cause contamination. The general absence of a marl barrier meant that even when the mines were in operation large quantities of water flooded into the pits from the Magnesian Limestone – at Mainsforth this amounted to as much as 20,000 m³/d or 13.6 m³/min (10) – a situation that required an extremely efficient dewatering system. It was therefore clear that significant hydraulic pathways had to be present between the deposits and the overburden rock, these taking the form of joints and fissures. This situation was the result of mining-induced ground movements and the associated fracturing of the overlying rock (10).

The first phase of the flooding at Mainsforth mine (Figure 2) was carried out in a controlled manner. Rising mine-water levels were regulated by maintaining and deploying a system of pumps (red numbers in Figure 3). The hydrochemical parameters were monitored at the same time and compared with the set delivery rates. During this operation it became apparent that a steady delivery was more effective than an intermittent discharge, as otherwise there would be a marked decline in water quality (10). These findings indicated that a constant rate of flow should be used for the flooding operation.

Despite this, pumping was halted over the entire area in the mid 1970s, with the result that the mine water was able to rise unimpeded and eventually reached the groundwater aquifer. Crucial to this situation was the fact that the pressure head of the mine water had been wrongly assessed. The deepest workings in this area were in the Brockwell seam, which outcrops just a few kilometres to the west to a height of +125 m OD (above ordnance datum, equivalent to above sea level), where it is fed by precipitation. It therefore potentially has a much greater pressure head – on average about +110 m OD (8) – than the groundwater in the Magnesian Limestone, which in this area exhibits a height of around +90 m OD (7). This situation can also be derived from the mine-water levels of around +105 m OD at the Ladysmith und Woodhouses collieries, which also lie a few kilometres to the west of the area. In 1974 and 1975, driven by these pressure differences, there was an ingress of mine water from Mainsforth colliery into the overlying strata. Over the longer term the mine-water

durch aufsteigendes Grubenwasser (7, 8, 9). In diesem Bereich liegt das Karbon in großen Teilen diskordant unter den Kalksteinen des Magnesian Limestone-Grundwasserleiters (Schnitt B-B' in Bild 1), von dem es nur lokal durch eine Mergelschicht hydraulisch getrennt ist.

Schon zu Beginn der Flutungsphase Anfang bis Mitte der 1970er Jahre war man sich der Problematik bewusst, dass das aufsteigende Grubenwasser bis in den Grundwasserleiter gelangen und diesen verunreinigen könnte. Durch die zumeist fehlende Mergel-Barriere waren schon zu Betriebszeiten große Wassermengen aus dem Magnesian Limestone in die Zechen geflossen – Mainsforth bis ca. 20.000 m³/d bzw. 13,6 m³/Min (10) – wodurch eine leistungsfähige Wasserhaltung notwendig war. Damit wurde deutlich, dass bedeutende Wasserwegsamkeiten zwischen der Lagerstätte und dem Deckgebirge existieren mussten, die in Form von Klüften vorhanden waren. Diese Klüfte waren Folge von bergbauinduzierten Bodenbewegungen und der damit einhergehenden Zerrüttung des überlagernden Gebirges (10).

Die erste Phase der Flutung bei Mainsforth (Bild 2) wurde kontrolliert durchgeführt. Der Grubenwasseranstieg konnte durch das Vorhalten und den Einsatz von Pumpen gesteuert werden (rote Ziffern in Bild 3). Hierbei wurden die hydrochemischen Parameter überwacht und mit den eingestellten Förderleistungen abgeglichen. Dabei stellte sich heraus, dass eine gleichmäßige Förderleistung der Pumpen einem intermittierenden Pumpen vorzuziehen ist, da es sonst zu einem deutlichen Abfall der Wasserqualität kommt (10). Diese Ergebnisse legten also eine Flutung mit konstanter Förderleistung nahe.

Dennoch wurde in dem gesamten Gebiet die Pumpaktivität Mitte der 1970er Jahre eingestellt, wodurch das Grubenwasser ungehindert ansteigen und bis in den Grundwasserleiter gelangen konnte. Hierfür ausschlaggebend war der Umstand, dass die Druckhöhe des Grubenwassers falsch eingeschätzt wurde. Der tiefste Abbau in diesem Gebiet fand im Brockwell-Flöz statt, das nur wenige Kilometer westlich bei einer Höhe von +125 m OD (Ordnance Datum, entspricht in etwa NN) ausstreicht und dort durch Niederschläge gespeist wird. Damit hat es potentiell eine deutlich größere Druckhöhe – im Mittel ca. +110 m OD (8) – als das Grundwasser im Magnesian Limestone, der in dem Gebiet eine Höhe von ca. +90 m OD aufweist (7). Dieser Sachverhalt lässt sich

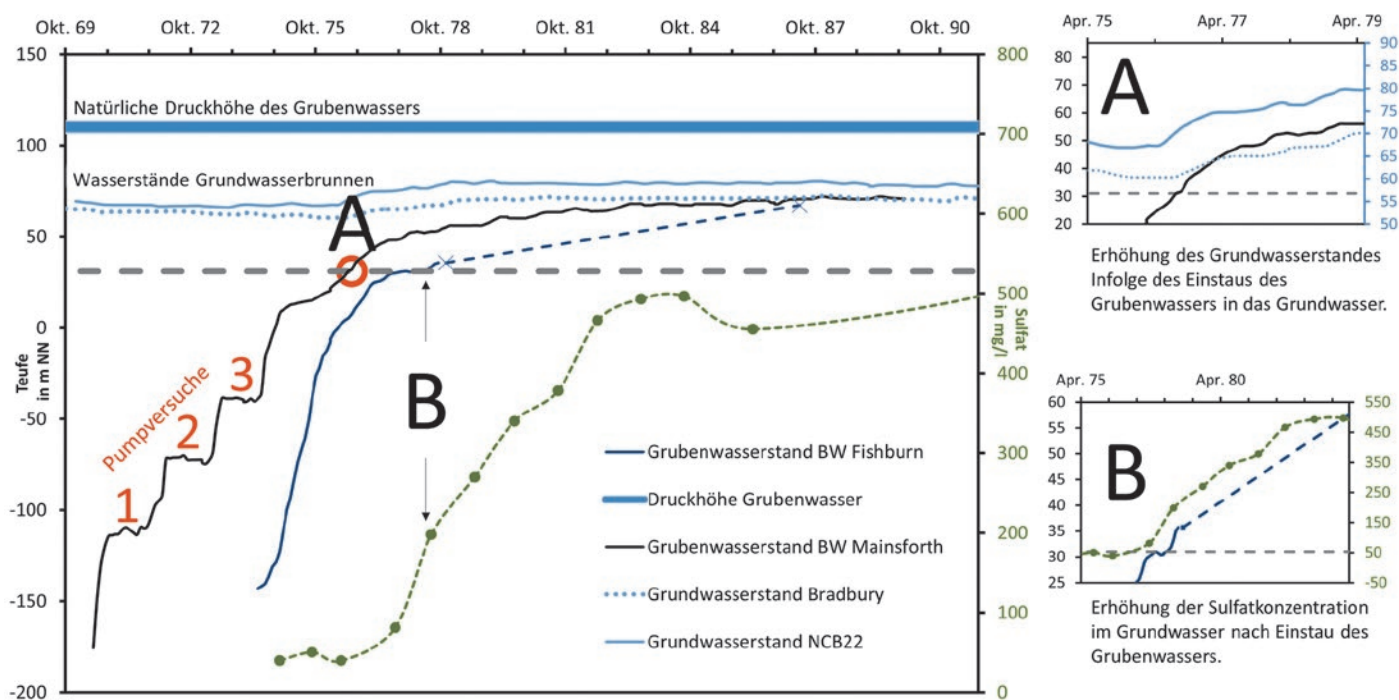


Fig. 3. Increases in mine-water levels at selected collieries and observation points in the Durham coalfield for areas lying south of the Butterknowle fault from 1969 to 1991. The rise in groundwater levels as a result of the increasing height of the mine water is highlighted at inset A. The contamination of the Magnesian Limestone aquifer from the summer of 1976 is reflected in the increases in sulphate concentration levels (green line, inset B). Colliery and borehole water data according to (9, 10, 11). For further explanation see text and Figure 4.

Bild 3. Grubenwasseranstiegsverläufe in ausgewählten Zechen und Beobachtungspunkten im Revier Durham für die Gebiete südlich der Butterknowle-Störung von 1969 bis 1991. Das Ansteigen der Grundwasserstände infolge des Grubenwasseranstiegs ist in Inlet A hervorgehoben. Die Kontamination des Magnesian Limestone Grundwasserleiters ab Sommer 1976 spiegelt sich in den steigenden Werten der Sulfatkonzentration wider (grüne Linie, Inlet B). Gruben- und Bohrlochwasserdaten nach (9, 10, 11). Weitere Erläuterungen siehe Text und Bild 4.

level at Mainsforth initially began to approach the groundwater levels at Bradbury (+72 m OD), a process that continued until the late 1980s, and would remain at this level until about 1993/1994. Over the following ten years there was another slight rise in water level to a point which was just below the groundwater table measured at NCB22 (approximately +80 m OD).

The contamination of the groundwater, which commenced as flooding operations got under way, can be identified from the measured sulphate concentrations at NCB22 (Figure 3). Windlestone colliery, which lies about 2.5 km south west of Mainsforth, had driven a roadway through the Brockwell seam into the overlying strata (Figure 2) and this created a direct hydraulic connection between the collieries and the aquifer (9). Once the mine water at Mainsforth reached the level of this connecting roadway in 1976 (red markings in Figure 3) the groundwater levels at Bradbury and at gauging station NCB22 began to rise by about 10 m. When the mine water at Fishburn colliery also reached the level of this roadway one year later the sulphate concentrations at the observation points at Bradbury and at NCB22 also began to rise fairly quickly, namely from an original level of 30 to 40 mg/l to 200 mg/l in 1978 and then to over 600 mg/l by the mid 1990s. There was no reported increase in iron concentration levels as the net acidic mine water was neutralised by the limestone in the aquifer and the iron was precipitated as a hydroxide deposit on the surface of the cracks and fissures (7).

The rise in groundwater level can be explained by the fact that as the mine water filled up the groundwater was less able to

außerdem auch an den Grubenwasserständen von rd. +105 m OD bei den Zechen Ladysmith und Woodhouses ablesen, die ebenfalls wenige Kilometer westlich dieses Gebiets liegen. Getrieben durch diese Druckdifferenzen kam es bereits im Lauf der Jahre 1974 und 1975 bei Mainsforth zu einem Einstau des Grubenwassers in das Deckgebirge. In der langfristigen Entwicklung näherte sich der Grubenwasserstand bei Mainsforth zunächst bis in die späten 1980er Jahre dem Grundwasserstand bei Bradbury (ca. +72 m OD) an und verharrte dort bis ungefähr 1993/1994. In den nächsten zehn Jahren kam es nochmals zu einem leichten sukzessiven Anstieg bis knapp unter den Grundwasserstand bei der Messstelle NCB22 (ca. +80 m OD).

Die beginnende Beeinträchtigung des Grundwassers lässt sich exemplarisch anhand der gemessenen Sulfatkonzentrationen bei NCB22 in Verbindung mit den Flutungsverläufen erkennen (Bild 3). In der Nähe von Mainsforth gab es bei der ca. 2,5 km südwestlich entfernten Zeche Windlestone (Bild 2) eine aufgefahrene Strecke über das Brockwell-Flöz bis in das Deckgebirge hinein, was zu einer direkten hydraulischen Verbindung zwischen den Bergwerken und dem Grundwasserleiter geführt hat (9). Nachdem das Grubenwasser bei Mainsforth die Teufenlage dieser Verbindungsstrecke um 1976 erreichte (rote Markierung in Bild 3), begannen die Grundwasserstände bei Bradbury und der Messstelle NCB22 um bis zu 10 m zu steigen. Nachdem ein Jahr später auch das Grubenwasser bei Fishburn die Teufe dieser Verbindungsstrecke erreichte, begannen die Sulfatkonzentrationen in den Beobachtungsstellen bei Bradbury und NCB22 schnell zu

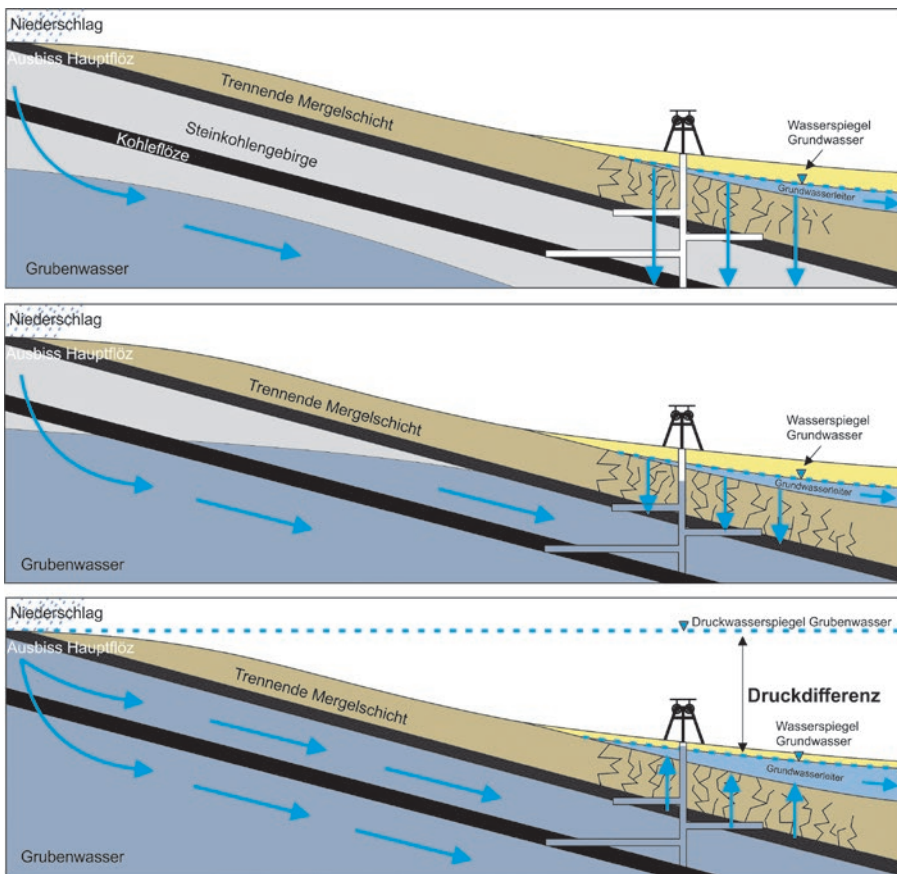


Fig. 4. One possible depiction of the phases in the mine flooding operation during which mine water can infiltrate the groundwater. Top: The groundwater flows into the underlying deposits (pressure-water level of the mine water \ll water level of the groundwater), there is a reduced flow of the groundwater into the deposits (middle, pressure-water level of the mine water $<$ water level of the groundwater), there is infiltration of the mine water into the groundwater and a resulting increase in the groundwater level (bottom, pressure-water level of the mine water \gg water level of the groundwater). Highly schematised and not to scale.

Bild 4. Ein mögliches Schema der Phasen einer Grubenflutung, bei der es zu einer Infiltration von Grubenwasser ins Grundwasser kommen kann. Oben: Abfluss des Grundwassers in die Lagerstätte (Druckwasserstand Grubenwasser \ll Wasserstand Grundwasser), verringerter Abfluss des Grundwassers in die Lagerstätte (Mitte, Druckwasserstand Grubenwasser $<$ Wasserstand Grundwasser), Infiltration des Grubenwassers in das Grundwasser und resultierende Erhöhung des Grundwasserstands (unten, Druckwasserstand Grubenwasser \gg Wasserstand Grundwasser). Stark schematisiert und nicht maßstabsgerecht.

flow down into it as the pressure gradient declined (Figure 3 and Figure 4 middle), and, conversely, when the pressure gradient was reversed it was fed by it (Figure 4 bottom (7, 8, 12)).

This observation therefore explains the rise in groundwater levels as the mine water floods into the overburden layers. However, it does not account for the fact that both sets of water actually became mixed together, causing an increase in the sulphate concentration level of the groundwater. For this to take place there has to be a potential difference that provides for a direction of flow from the deposits into the aquifer (Figure 4 bottom). The mine-water level therefore has to exhibit a greater hydraulic potential than the groundwater (7). As can be seen from Figure 3 this had not yet happened at the observation points at the time the sulphate concentration levels of the groundwater began to increase. As there was, nevertheless, some mixing of the two bodies of water it therefore has to be assumed that the groundwater level in some areas must have been below the pressure height of the rising mine water, whereby the mine water present in these locations had a potential that enabled it to mix with the groundwater.

In order to examine the evolving chemical parameters of the groundwater a number of models were constructed that took account of various factors such as the spatio-temporal development of the rising mine-water level, the filling of the overlying strata, the chemical composition of the mine water, potential differences in the pressure heights and the manner in which the two bodies of water became mixed (8). One of the findings from this study was that the mixing of the waters can take place not just at selected "hot spots", e.g. along boreholes, but rather that it is more likely to occur in areas where coal has been extracted

steigen, von ursprünglich 30 bis 40 mg/l auf 200 mg/l im Jahr 1978 und über 600 mg/l Mitte der 1990er Jahre. Erhöhte Eisenkonzentrationen wurden nicht nachgewiesen, da das netto-azidische Grubenwasser durch den Kalkstein im Grundwasserleiter neutralisiert und das Eisen als Hydroxidbelag auf den Kluftflächen ausfallen konnte (7).

Der Anstieg des Grundwassers lässt sich dadurch erklären, dass mit dem Einstau des Grubenwassers das Grundwasser mit abnehmenden Druckgradienten immer weniger ins selbige abfließen konnte (Bild 3 und Bild 4 Mitte) und bei Umkehrung des Druckgradienten im Gegenteil aus diesem gespeist wurde (Bild 4 unten (7, 8, 12)).

Diese Beobachtung erklärt also den Anstieg des Grundwasserstands bei einem Einstau des Grubenwassers in das Deckgebirge. Sie erklärt jedoch nicht den Umstand, dass es zu einer tatsächlichen Vermischung beider Wässer und damit zu einem Anstieg der Sulfatkonzentration im Grundwasser kommt. Hierzu muss es eine Potentialdifferenz geben, die eine Fließrichtung aus der Lagerstätte in den Grundwasserleiter (Bild 4 unten) vorgibt. Das Grubenwasserstands-niveau muss also ein höheres hydraulisches Potential aufweisen als das Grundwasser (7). Wie aus Bild 3 ersichtlich ist, war dies in den Beobachtungsmessstellen zum Zeitpunkt des Beginns der steigenden Sulfatkonzentration im Grundwasser noch nicht gegeben. Dass es trotzdem zu dieser Vermischung kam, muss folglich daran gelegen haben, dass der Grundwasserstand aus topographischen oder geogenen Gründen in Teilgebieten unter der Druckhöhe des ansteigenden Grubenwassers gelegen haben muss, wodurch das Grubenwasser an diesen Orten ein Potential hatte, das eine Vermischung mit dem Grundwasser ermöglichte.

right up close to the overlying rock, leading to diffuse transfers of mine water into the groundwater horizon (see above). The aim of the model investigations was to enable temporal and spatial prediction of the spread of the contaminants, as the eastern part of the area contained wells supplying drinking water and the groundwater flow was directed from west to east. Several wells that were used for the recovery of industrial water, and whose usage was not sulphate sensitive, had already been tainted by the sulphate. The first breach of the limit value of 250 mg/l sulphate for the drinking-water wells is likely to occur at the Hope House well in 2019 and then at the Hopper House well in 2024 (Figure 2 (8)).

2.2 East of Wear mining district

A comparable set of problems existed at the group of coal mines lying to the north east of Butterknowle fault. Horden, Easington and Dawdon collieries were situated along the North Sea coast and exhibited similar geological conditions, while Hawthorn mine was only a few kilometres away inland (Figure 1). Here too the Carboniferous beds were overlain with Permian layers some 140 to 180 m thick. From Figure 1 it can be seen that much of the East of Wear mining area is used by the Northumbrian Water company as a source of mains water supply. After dewatering operations ceased in the mid 1990s the water levels in the mines were monitored and on the basis of these observations predictions were drawn up as to when measures would have to be introduced to deal with the impact on the groundwater horizon and/or at the surface (5). For this reason, from about August 2004 steps were taken to keep the mine-water levels in the zone above Horden colliery several metres below the pressure-water level of the joint aquifer (0 to 20 m OD) (Figure 5) and, in addition, the mine water was purified in an active treatment plant. Here the delivery rate was varied between 35 and 150 l/s – equivalent to about 3,000 to 13,000 m³/d or 2.1 to 9 m³/min – in order to investigate the effect of the delivery flow on the water chemistry. It was found that a reduced delivery rate had a positive influence on the iron and chloride concentrations of the mine water (Table 1).

From these results it is clear that a high extraction rate promotes the influx of more highly mineralised subterranean waters and hence has a negative impact on the overall mineral content of the intake water and on the formation of a stable density layering.

By allowing the mine water to rise to just a few metres below the level of the groundwater aquifer it was possible to improve the quality of the water being pumped quite considerably. More-

delivery rate Förderleistung	50 l/s	125 l/s
iron concentration Eisenkonzentration	73.4 mg/l	108 mg/l
chloride concentration Chloridkonzentration	7.600 mg/l	40.000 mg/l

Table 1. Impact of delivery rate on the hydrochemistry at Horden colliery (data acc. to (9)). // Tabelle 1. Einfluss der Förderleistung auf die Hydrochemie im Bergwerk Horden (Daten nach (9)).

Für die weitere Entwicklung der chemischen Parameter des Grundwassers wurden Modelle entwickelt, die u. a. den zeitlich-räumlichen Verlauf des Grubenwasseranstiegs, den Einstau in das Deckgebirge, die chemische Beschaffenheit des Grubenwassers, Potentialunterschiede in den Druckhöhen und die Art der Durchmischung der Wässer berücksichtigten (8). Ein Ergebnis dieser Studie war, dass die Durchmischung der Wässer nicht nur punktförmig im Sinne von „Hot Spots“, z. B. entlang von Bohrungen, geschehen sein kann, sondern dass es vielmehr in den Bereichen, wo der Steinkohlenabbau bis nah unter das Deckgebirge getrieben wurde, zu diffusen Übertritten des Grubenwassers in den Grundwasserhorizont gekommen sein muss (s.o.). Ziel der Modellierungen war es, zeitliche und räumliche Prognosen über die Verbreitung der Schadstoffe aufzustellen, da im östlichen Teil des Gebiets Brunnen zur Trinkwassergewinnung liegen und die Grundwasserströmung von West nach Ost gerichtet ist. Mehrere Brunnen, die industriellen Zwecken zur Wassergewinnung dienen und deren Wassernutzung nicht sulfatsensitiv ist, wurden von der Sulfatfahne bereits erreicht. Erste Überschreitungen des Grenzwerts von 250 mg/l Sulfat für Trinkwasserbrunnen werden für das Jahr 2019 (Brunnen „Hope House“) und 2024 (Brunnen „Hopper House“) erwartet (Bild 2 (8)).

2.2 East of Wear-Abbauegebiet

Eine ähnliche Problematik stand auch in dem nordöstlich der Butterknowle-Störung gelegenen Zechenblock bevor. Die Zechen Horden, Easington und Dawdon lagen unter vergleichbaren geologischen Bedingungen direkt an der Küste, die Zeche Hawthorn nur wenige Kilometer in Richtung Landesinnere entfernt (Bild 1). Auch hier wird das Karbon von Schichten des Perm mit einer Mächtigkeit von 140 bis 180 m überlagert. Aus Bild 1 ist ersichtlich, dass in weiten Teilen des East of Wear-Gebiets Trinkwasser durch Northumbrian Water gefördert wird. Nach der Beendigung der Wasserhaltungen Mitte der 1990er Jahre wurde der Grubenwasserstand in diesen Zechen überwacht und auf Grundlage der Monitoringergebnisse eine Prognose erstellt, ab wann mit Auswirkungen auf den Grundwasserhorizont und/oder die Tagesoberfläche gerechnet werden musste (5). Aus diesem Grund wurde der Grubenwasserstand in dem Gebiet über Horden ab ca. August 2004 einige Meter unter dem Druckwasserstand des Kluftgrundwasserleiters (0 bis 20 m OD) gehalten (Bild 5) und das Grubenwasser mittels einer aktiven Aufbereitungsanlage gereinigt. Hierbei wurde die Förderleistung zwischen 35 und 150 l/s – entspricht ca. 3.000 bis 13.000 m³/d bzw. 2,1 bis 9 m³/min – variiert, um den Einfluss der Förderleistung auf den Wasserchemismus zu untersuchen. Dabei hat sich gezeigt, dass eine geringere Förderleistung einen positiven Einfluss auf die Eisen- und Chloridkonzentrationen des Grubenwassers hat (Tabelle 1).

Dies ist dadurch zu erklären, dass eine hohe Entnahmerate den Zufluss von höher mineralisierten Tiefenwässern begünstigt und somit die Gesamtmineralisation des gefördert Wassers sowie die Bildung einer stabilen Dichteschichtung negativ beeinflusst.

Durch den Anstieg des Grubenwassers bis wenige Meter unter den Wasserstand im Grundwasserleiter konnten sowohl die Qualität des abzupumpenden Wassers erheblich verbessert als auch die Pumpkosten minimiert und das Grundwasser ausreichend vor einer Vermischung mit Grubenwasser geschützt werden.

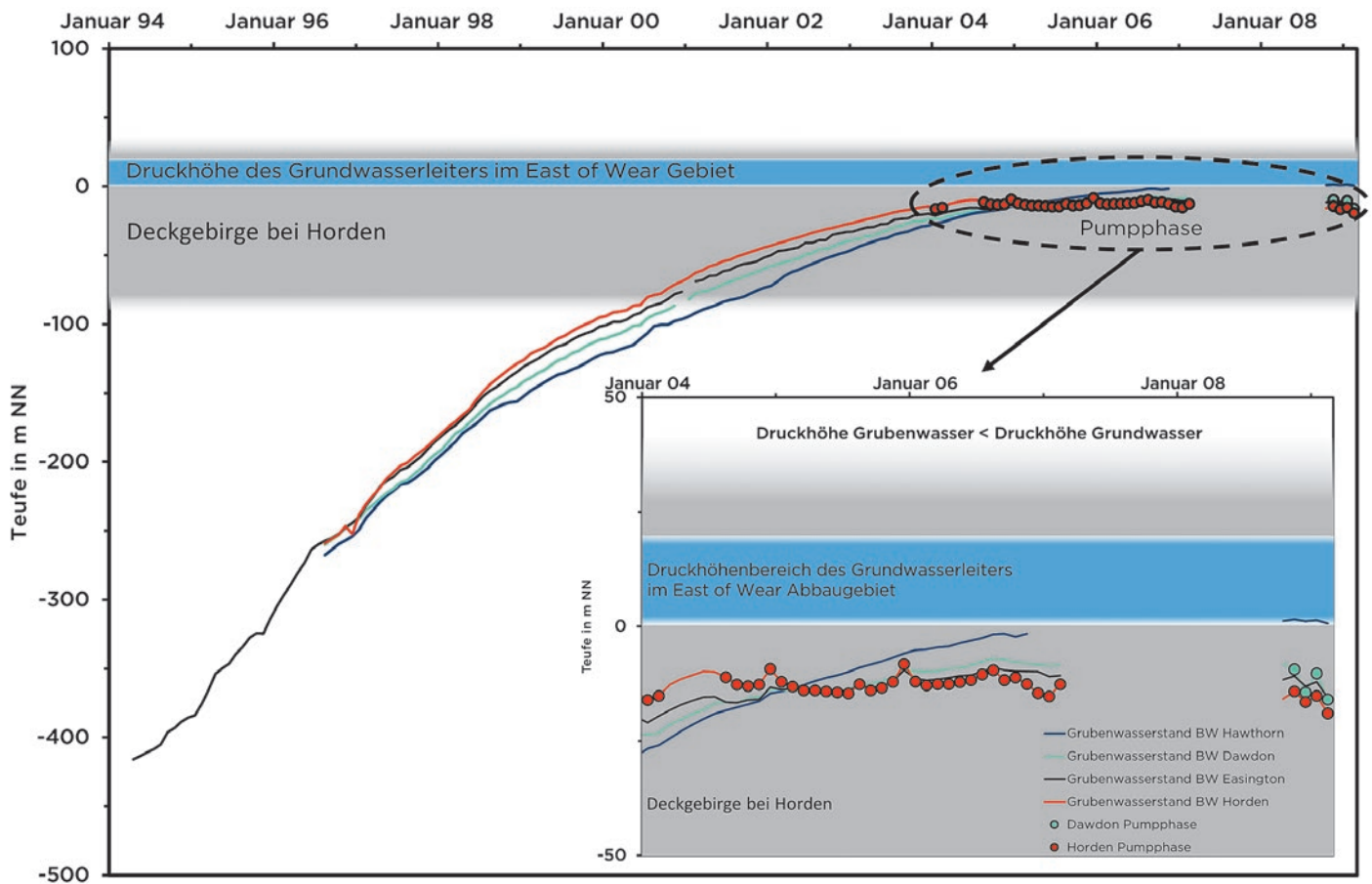


Fig. 5. Progressive rise in mine-water levels at Hawthorn, Dawdon, Easington and Horden collieries in the East of Wear mining area. Mine-water data according to (5, 13). The inset shows how pumping operations undertaken at Dawdon and Horden collieries ensured that the mine-water levels were kept just below the groundwater level in this area, thereby preventing any mixing.

Bild 5. Grubenwasseranstiegsverläufe der Zechen Hawthorn, Dawdon, Easington und Horden im East of Wear-Abbauggebiet. Daten der Grubenwasseranstiege nach (5, 13). Das Inlet zeigt, wie durch Pumpmaßnahmen auf den Bergwerken Dawdon und Horden die Grubenwasserstände knapp unterhalb des Grundwasserstands in diesem Gebiet gehalten werden, um eine Durchmischung zu verhindern.

over, pumping costs could be kept to a minimum and sufficient protection provided to prevent the groundwater mixing with the mine water.

In this context the chloride concentration of the mine water in particular is a crucial parameter as the chloride cannot be removed by passive water treatment methods and this rules out the use of plant-based water treatment installations. The area around Horden colliery was originally separated hydraulically from Easington and Dawdon collieries by Ludworth Dyke. The only hydraulic connection was via a mine roadway that according to the records should have been sealed off (5). As Figure 5 shows the measured increases in mine-water levels all exhibit a very similar and practically identical course. This would indicate that there is no stopping between the areas concerned but that in fact an open and hydraulically effective connection can be assumed between the two zones. It is uncertain as to how long this connection can maintain its hydraulic conductivity, as it could break down at any time (5). As the hydraulic pressure gradient in this area is directed from west to east both for the mine water and for the aquifer, in other words towards the coast where the collieries are situated, any hydraulic disruption of this connection would cause the treatment capacity available at Horden (approx. 150 l/s or 13,000 m³/d) to be sur-

In diesem Zusammenhang ist speziell die Chloridkonzentration des Grubenwassers ein wichtiger Parameter, da das Chlorid nicht über passive Wasseraufbereitungsanlagen entfernt werden kann und den Einsatz von Pflanzenkläranlagen verhindert. Ursprünglich war das Gebiet rund um das Bergwerk Horden durch den Ludworth Dyke hydraulisch von den Bergwerken Easington und Dawdon getrennt. Eine hydraulische Verbindung besteht nur durch eine aufgefahrene Strecke, die laut Aufzeichnungen abgedämmt sein sollte (5). Wie aus Bild 5 hervorgeht, zeigen die gemessenen Grubenwasseranstiegsverläufe allesamt einen sehr ähnlichen, nahezu identischen Verlauf. Dies deutet darauf hin, dass es keine Abdämmung zwischen den Gebieten gibt, sondern vielmehr von einer offenen, hydraulisch wirksamen Verbindungsstrecke ausgegangen werden kann. Unklar ist, wie lange diese Verbindung ihre hydraulische Leitfähigkeit beibehalten wird, da sie jederzeit verbrechen kann (5). Da das hydraulische Druckgefälle in diesem Gebiet sowohl für das Grubenwasser als auch für den Grundwasserleiter von West nach Ost, also in Richtung Küste mit den dortigen Bergwerken, gerichtet ist, würden bei einer hydraulischen Beeinträchtigung dieser Verbindung die Aufbereitungskapazitäten von Horden (ca. 150 l/s bzw. 13.000 m³/d) überschritten und es käme zu einer unkontrollierten Beeinträchtigung des Grundwassers. Um dies zu verhindern, wurde zeitnah auch auf

passed and the groundwater would as a result be uncontrollably compromised. In order to prevent such a situation arising an active treatment plant with an identical capacity was also soon installed at Dawdon mine. As the shaft at Dawdon is deeper than that at Horden it was assumed that the water quality would also be worse, e.g., with higher concentrations of chloride and iron. When the water treatment plant was completed at Dawdon towards the end of 2008 it became possible to cut the throughput of the Horden plant back to about 50 l/s. This reduction in pumping performance also resulted in the expected decline in chloride concentration levels, whereby the active plant was dismantled and by 2011 had been replaced by a passive treatment installation covering an area of some 1.7 ha, complete with ventilation system, settling tank and plant-based clarification unit. The treated water is discharged into the nearby North Sea, where even elevated chloride concentration levels have no real impact.

3 France

3.1 Lorraine coalfield

In the Lorraine coalfield on the French side, and at Warndt colliery which is part of the Saar coalfield on the German side, sandstone beds from the Lower Triassic form the regional joint aquifer and provide both industrial water and public mains drinking water. Although the underlying Carboniferous strata – the boundary clays – are classified as being impervious to water, they may be fractured by the mining operations widely practised in the region over the years and as a result will have lost their function as a barrier between the Carboniferous and the Triassic. Coal mining, particularly on the French side of the line, has destroyed the sealing function of the boundary clays in numerous areas (14). Since the year 2000 the drinking-water supply companies in Warndt have been extracting between 10 and 12.6 Mm³ of water a year from this locality (14).

The coal was mined at depths of between 150 m and 1,250 m below sea level, with the associated pumping and dewatering operations also having to extend down to the mining horizons. Fracturing and fissuring of the overlying strata also created large volumes of water that now flowed from the aquifer into the bedrock and the mine workings contained therein, resulting in large cones of depression in the aquifer (15).

The general set of problems associated with the rising mine water is very similar to the situation that has affected the Durham coalfield in the United Kingdom:

- an extensive area of underground coal workings;
- coal mined quite close to the overlying strata;
- shatter zones above the mine workings acting as water pathways between the deposits and the overburden;
- major groundwater horizons in the overlying strata;
- outflow of groundwater into the deposits; and
- threat posed to the aquifer by rising mine water.

During the operational phases of the collieries the water flowing into the deposits from the aquifer was quickly pumped away and hence only had a short dwell time in the deposits zone. It was not therefore enriched with dissolved, problematic substances (16)

Dawdon eine aktive Aufbereitungsanlage mit einer identischen Kapazität errichtet. Da der Schacht von Dawdon tiefer als der von Horden ist, wurde auch von einer schlechteren Wasserqualität mit höheren Konzentrationen u.a. an Chlorid und Eisen ausgegangen. Als die Aufbereitungsanlage in Dawdon Ende 2008 fertiggestellt war, konnte die auf Horden auf rd. 50 l/s heruntergefahren werden. Mit der Reduzierung der Pumpleistung trat auch der erwartete Rückgang der Chloridkonzentrationen ein, womit die aktive Anlage abgebaut und stattdessen bis 2011 ein passives Aufbereitungssystem von ca. 1,7 ha Größe samt Belüftungsanlage, Absetzbecken und Pflanzenkläranlage aufgebaut werden konnte. Das aufbereitete Wasser wird in die anliegende Nordsee geleitet, wo auch erhöhte Chloridkonzentrationen keine bedeutende Rolle mehr spielen.

3 Frankreich

3.1 Revier Lothringen

Im Revier Lothringen auf französischer Seite und im Warndt als Teil des Saar-Reviers auf deutscher Seite bilden die Sandsteine der unteren Trias den regionalen Kluftgrundwasserleiter, sowohl für die industrielle Nutzung als auch für die öffentliche Versorgung mit Trinkwasser. Obwohl die unterlagernden Schichten des Karbons – die Grenzletten – als wasserundurchlässig gelten, können sie durch den weiträumig umgegangenen Bergbau zerklüftet sein und so ihre Funktion als Barriere zwischen Karbon und Trias verlieren. Vor allem der Abbau, der von französischer Seite erfolgt ist, hat die abdichtende Funktion der Grenzletten in großen Teilen zerstört (14). Insgesamt lag die jährliche Wasserförderung der Trinkwasserversorgungsunternehmen im Warndt in den 2000er Jahren bei 10 bis 12,6 Mio. m³ (14).

Der Abbau der Steinkohle fand in Teufen von -150 m NHN bis -1250 m NHN statt, womit einhergehend die Wasserhaltung bis in die entsprechende Teufe reichen musste. Durch die Zerrüttung und Zerklüftung der Deckgebirgsschichten kam es hierbei außerdem zu großen Wassermengen, die nunmehr aus dem Grundwasserleiter in das Grundgebirge und die darin befindlichen Grubenbauten abfließen, resultierend in großen Absenkungstrichtern im Grundwasserleiter (15).

Die sich insgesamt ergebende Problematik im Hinblick auf das ansteigende Grubenwasser ist der des Durham-Reviers in Großbritannien sehr ähnlich:

- weiträumiger, untertägiger Abbau von Steinkohle,
- Abbau bis nah unter das Deckgebirge,
- Zerrüttungszonen über den Abbaubereichen als Wasserwegsamkeiten zwischen Lagerstätte und Deckgebirge,
- wichtige Grundwasserhorizonte im Deckgebirge,
- Abfluss des Grundwassers in die Lagerstätte und
- Gefährdung des Grundwasserleiters durch ansteigendes Grubenwasser.

Während der Betriebsphasen der Bergwerke wurde das aus dem Grundwasserleiter in die Lagerstätte fließende Wasser umgehend abgepumpt, wodurch diese Wässer nur eine kurze Verweilzeit in der Lagerstätte hatten. Dadurch waren sie nicht an gelösten, problematischen Inhaltsstoffen angereichert (16) und konnten für industrielle Zwecke verkauft und das überschüssige

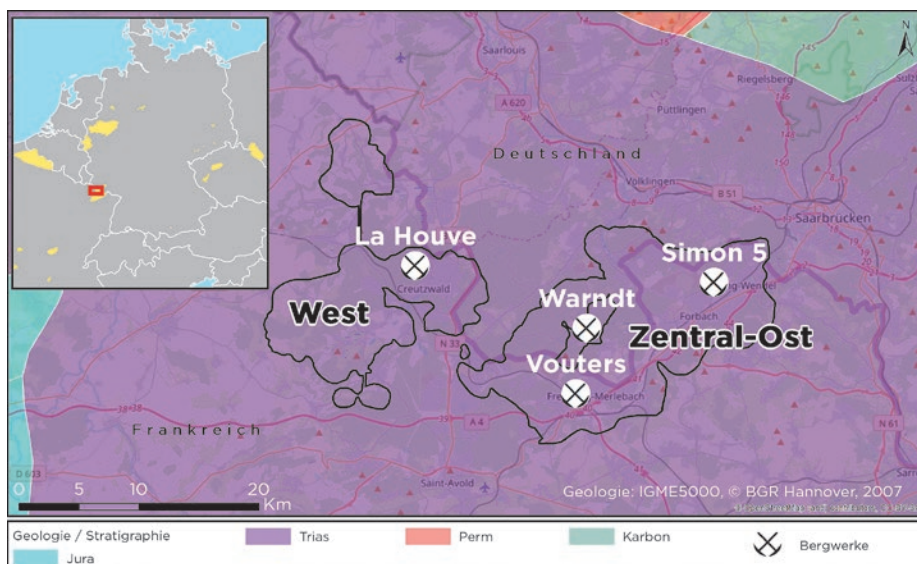


Fig. 6. Overview of the geology and mining districts of the west and central-east Lorraine coalfield, including Warndt colliery. The collieries mentioned in the text (La Houve, Vouters, Warndt and Simon 5) are marked for reference. Bild 6. Übersicht der Geologie sowie der Abbaufelder West und Zentral-Ost des Lothringer Reviers inklusive des Warndt. Die im Text behandelten Bergwerke (La Houve, Vouters, Warndt und Simon 5) sind hervorgehoben.

and could be sold for industrial use, while the surplus water could be safely discharged into the local environment (15). After the mine dewatering measures had ceased such an approach was no longer possible. The much higher dwell times that set in after mine pumping was discontinued led to a significant increase in the mineral content of the water. If this was allowed to rise in an uncontrolled way it could contaminate the aquifer or would have to be pumped out and treated before being discharged, e.g., into a body of receiving water. Another problem that had to be dealt with was that the former mine operators Charbonnages de France (CdF) had left all the mining equipment (machinery, electrical systems and hydraulic installations) in place below ground and this still contained various consumables that posed a risk to the environment (17).

In order to protect the groundwater and also the buildings located in the mining subsidence areas, these structures being situated in some cases below the natural groundwater level, measures were initially put in place to provide for continuous monitoring of the upsurge in mine water that had been taking place since the second half of 2006 (Vouters, Simon 5 and Warndt: June to August 2006; La Houve: December 2006). Figure 6 shows the position of these observation points and the way the coalfield is divided up into a western and a central-eastern area. Warndt colliery is hydraulically separated from the Saar mines further to the east by means of a high-pressure stopping constructed at about the 840 m level (18).

3.1.1 Rising mine-water levels at Vouters, Simon 5 and Warndt collieries

Mine dewatering operations were ceased at Vouters, Simon 5 and Warndt collieries between June and August 2006 (17, 19). The rise in the water level in all the mine shafts can be broken down into three phases (Figure 7). The first phase was characterised by very high initial rates of increase of as much as 50 m per month, this subsequently reducing fairly quickly over the first year to around 30 m a month. In July 2007 mine-water levels at Simon 5 became static and even declined slightly (the monthly rate of rise fell to somewhere between zero and a slightly negative figure), while at Vouters the rate of increase again reached values of around 42 m

Wasser konnte bedenkenlos der Umwelt zugeführt werden (15). Nach der Beendigung der Wasserhaltungen ist ein solches Vorgehen nicht mehr möglich. Die erheblich erhöhten Verweilzeiten nach Ende der Wasserhaltungsmaßnahmen bedingen eine deutlich erhöhte Mineralisation der Wässer. Bei einem unkontrollierten Anstieg dieser Wässer können diese den Grundwasserleiter verunreinigen oder müssen bei einem Abpumpen aufbereitet werden, bevor beispielsweise eine Einleitung in einen Vorfluter stattfinden kann. Eine weitere Problematik in diesem Gebiet besteht darin, dass seitens des ehemaligen Bergwerkbetreibers Charbonnages de France (CdF) sämtliche Einrichtungen (Maschinen, Elektrik, hydraulische Installationen) unter Tage verblieben sind und insbesondere die entsprechenden Betriebsstoffe ein Risiko darstellen (17).

Zum Schutz des Grundwassers und auch der Gebäude, die in den Bergsenkungsbereichen und dadurch teilweise unterhalb des natürlichen Grundwasserstands liegen, wurde der seit der zweiten Jahreshälfte 2006 (Vouters, Simon 5 und Warndt: Juni bis August 2006; La Houve: Dezember 2006) stattfindende Anstieg des Grubenwassers zunächst kontinuierlich überwacht. Die Lage dieser Beobachtungspunkte sowie die Einteilung des Reviers in ein westliches und ein zentral-östliches Gebiet sind aus Bild 6 ersichtlich. Das Bergwerk Warndt ist durch einen Hochdruckdamm in rd. 840 m Teufe von den östlich gelegenen saarländischen Bergwerken hydraulisch getrennt (18).

3.1.1 Grubenwasseranstiege bei Vouters, Simon 5 und Warndt

Die Einstellung der Wasserhaltungsmaßnahmen fand auf Vouters, Simon 5 und Warndt zwischen Juni und August 2006 statt (17, 19). Der Anstieg kann in allen Schächten in drei Phasen eingeteilt werden (Bild 7). Die erste Phase war von sehr hohen initialen Anstiegsgeschwindigkeiten von bis zu nahezu 50 m pro Monat geprägt, ging dann aber rasch auf Werte bis 30 m pro Monat im Verlauf des ersten Jahres zurück. Im Juli 2007 stagnierte dann der Grubenwasserstand auf Simon 5 und war sogar leicht rückläufig (monatliche Anstiegsgeschwindigkeiten gingen auf 0 m bis leicht negative Werte zurück), während die Anstiegsgeschwindigkeiten auf Vouters wieder Werte von 42 m pro Monat

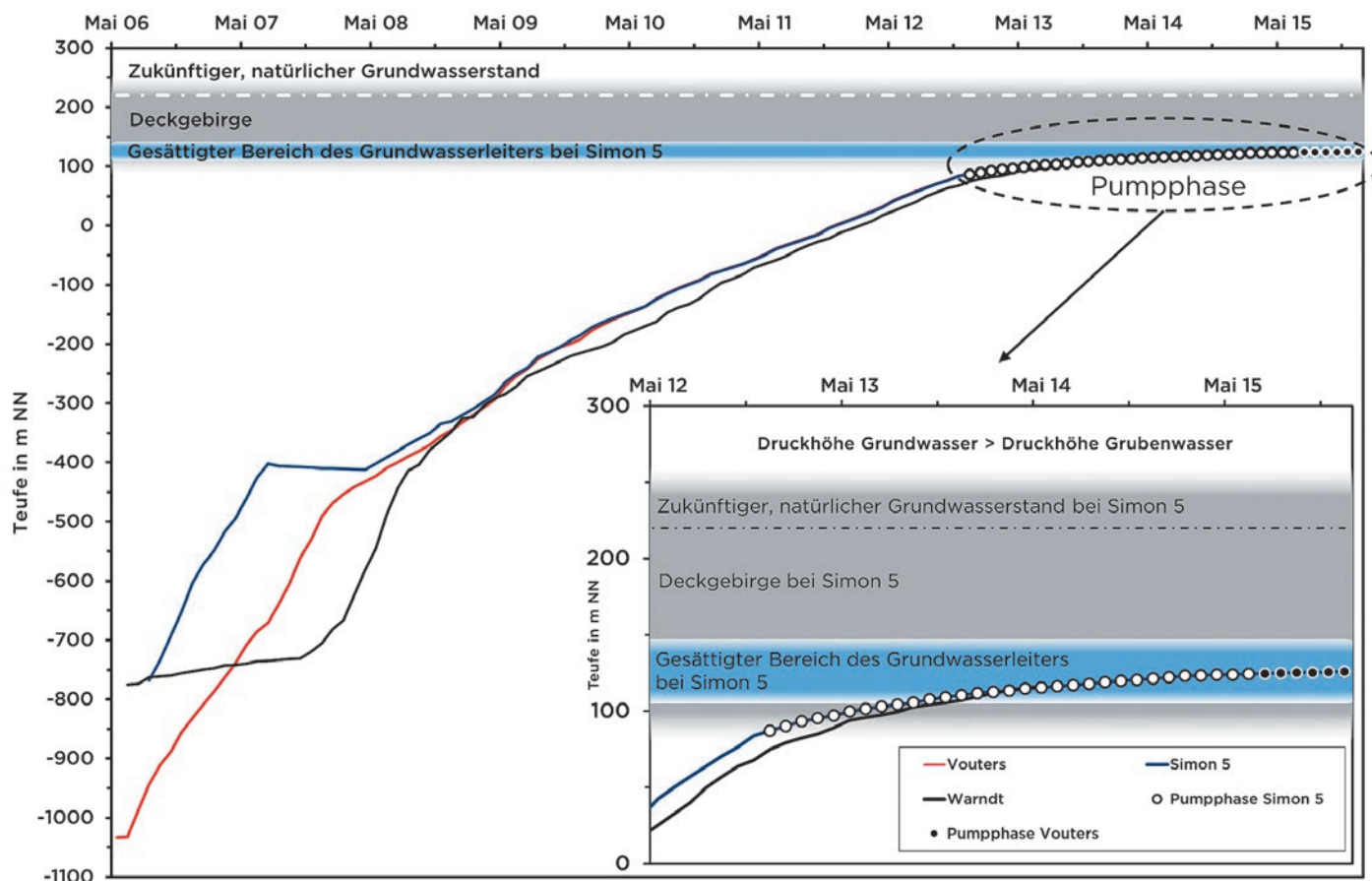


Fig. 7. Rising mine-water levels as measured at the Vouters and Simon 5 observation stations in Lorraine between 2006 and 2015 (data according to (20)) and at Warndt in Germany (data according to (19)). The Permian and Triassic overburden strata are highlighted in colour. The groundwater level in the aquifer at Simon 5 is represented by the blue area while the natural groundwater level is marked by the white broken line above. The inset shows how, during the pumping phase (shown by the line of dots), the pressure level of the mine water was kept just below the groundwater level in order to prevent any mixing of the two. // Bild 7. Grubenwasseranstiegsverläufe der Beobachtungsstationen Vouters und Simon 5 in Lothringen von 2006 bis 2015 (Daten nach (20)) sowie Warndt in Deutschland (Daten nach (19)). Das Deckgebirge des Perms und der Trias sind farblich hervorgehoben. Der Grundwasserstand im Grundwasserleiter bei Simon 5 ist als blauer Bereich abgesetzt, der natürliche Grundwasserstand als weiße gestrichelte Linie darüber. Das Inlet zeigt, wie während der Pumpphase (gepunkteter Bereich) die Druckhöhe des Grubenwassers knapp unterhalb des Grundwasserstands gehalten wurde, um eine Durchmischung zu verhindern.

a month. Presumably this could be attributed to the presence of a hydraulic connection between the three locations. The water flowed out from the Simon 5 area into the deeper lying and as yet unflooded workings of Vouters und Warndt collieries. The second phase of the mine-water upsurge commenced as the two water levels converged. The mine water at Simon 5 again began to rise, displaying values of around 10 m a month, while the rate of increase at Vouters and Warndt fell back to almost identical levels. The difference between the water levels reduced from the initial figure of up to 270 m in July (Simon 5: 402 m below sea level; Vouters: 670 m below sea level) to around 20 m in April 2008 (Simon 5: 413 m below sea level; Vouters: 433 m below sea level) and then continued to converge during the period 2008 to 2009 until by mid 2009 the groundwater levels at all three sites had assumed almost identical values. The rate of increase then generally varied at between 6 and 11 m a month until the Carboniferous bedrock had become fully saturated, the Permian and Triassic beds of the overlying strata subsequently being completely filled with water by the end of 2012. This marked the start of the third phase of the mine-water ascent, which was marked by the commencement of water pumping operations. These reduced the rate of rise to be-

erreichten. Vermutlich war dies auf eine hydraulische Verbindung zwischen den drei Standorten zurückzuführen. Das Wasser floss auf Simon 5 über in die tiefer gelegenen, noch nicht gefluteten Bereiche von Vouters und Warndt. Bei zunehmender Annäherung der Wasserstände untereinander begann die zweite Phase des Grubenwasseranstiegs. Das Grubenwasser auf Simon 5 begann wieder mit Werten im Bereich um 10 m pro Monat zu steigen und die Anstiegsgeschwindigkeiten auf Vouters und Warndt fielen auf nahezu identische Werte zurück. Der Unterschied bei den Wasserständen verringerte sich von ehemals bis zu 270 m im Juli 2007 (Simon 5: -402 m NN; Vouters: -670 m NN) auf rd. 20 m im April 2008 (Simon 5: -413 m NN; Vouters: -433 m NN) und glich sich im weiteren Verlauf von 2008 bis 2009 immer weiter an, bis sich die Grundwasserstände an allen drei Standorten Mitte 2009 auf nahezu identische Werte einstellten. Die Anstiegsgeschwindigkeiten bewegten sich nunmehr auf zumeist 6 bis 11 m pro Monat, bis das karbonische Grundgebirge vollständig geflutet war und es Ende des Jahres 2012 zu einem Einstau in die Schichten des Perms und der Trias des Deckgebirges kam. Ab hier begann die dritte Phase des Grubenwasseranstiegs, der davon geprägt war, dass mit Wasserhaltungsmaßnahmen begonnen und dadurch

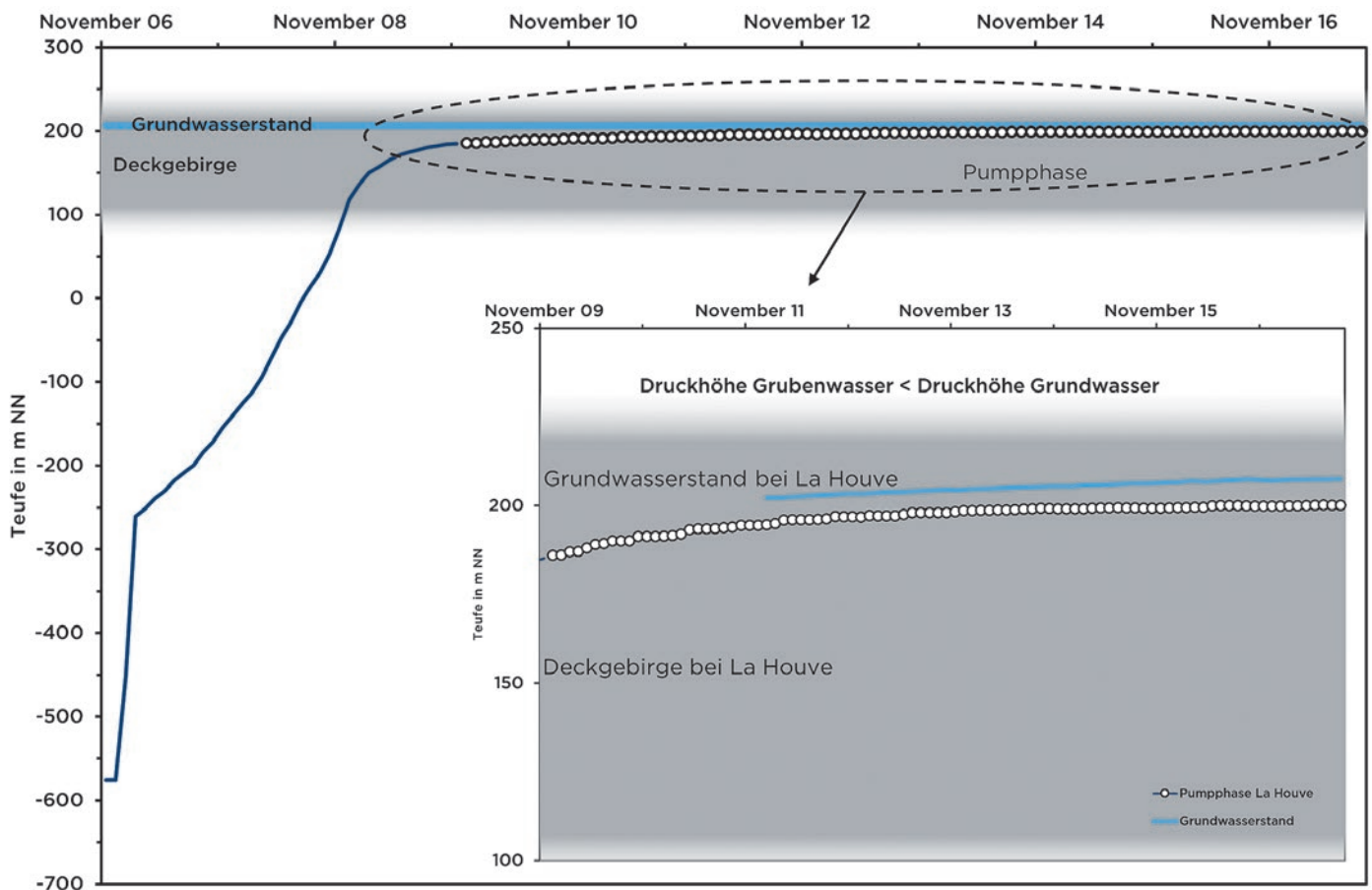


Fig. 8. Rising mine-water levels as measured at the La Houve observation station between 2006 and 2016 (data according to (17)) and at Warndt (data according to (19)). The overburden and current groundwater level are highlighted in colour. The broken line marks the future natural groundwater level. The inset shows in detail how during the pumping phase (represented by the dotted line) the pressure height of the mine water was maintained just below the groundwater level in order to prevent any infiltration of mine water into the aquifer. // Bild 8. Grubenwasseranstiegsverlauf der Beobachtungsstation La Houve in Lothringen von 2006 bis 2016 (Daten nach (17)) sowie im Warndt (Daten nach (19)). Das Deckgebirge sowie der derzeitige Grundwasserstand sind farblich hervorgehoben. Als gestrichelte Linie ist der zukünftige, natürliche Grundwasserstand hervorgehoben. Das Inlet zeigt im Detail, wie während der Pumpphase (gepunkteter Bereich) die Druckhöhe des Grubenwassers knapp unterhalb des Grundwasserstands gehalten wird, um eine Infiltration des Grubenwassers in den Grundwasserleiter zu verhindern.

tween 1 and 2 m a month, this subsequently falling even further to practically zero.

3.1.2 Rise in mine water at La Houve colliery

The dewatering measures at La Houve were terminated in December 2006. Here too the rise in water levels can be divided into three phases (Figure 8). The first phase lasted from December 2006 to February 2007 and was marked by exceptionally high rates of increase of as much as 191 m a month. During this period the water rose from about 580 m below sea level to 250 m below sea level. This could be explained by the fact that at these depths the volumetric ratio of the voids was very small in proportion to the reservoir volume (15). As the system entered its second phase the rate of increase dropped off to about 10 m a month. The majority of the coal workings were located at this depth and accordingly the largest floodable cavity volume was also to be found here. At the end of the second phase there was a renewed increase in the rate to between 20 and a maximum of 35 m a month. This was interpreted as the filling of the mining-induced shatter zone above the highest mining horizon. The overlying layers then began to fill with water soon after the local rise reached

die Anstiegsgeschwindigkeit auf Werte von zunächst 1 bis 2 m pro Monat verringert wurde und immer weiter gegen 0 strebte.

3.1.2 Grubenwasseranstieg bei La Houve

Die Wasserhaltungsmaßnahmen bei La Houve wurden im Dezember 2006 eingestellt. Auch hier kann der Anstieg in drei Phasen eingeteilt werden (Bild 8). Die erste Phase dauerte von Dezember 2006 bis Februar 2007 und war gekennzeichnet durch außerordentlich hohe Anstiegsgeschwindigkeiten von bis zu 191 m pro Monat. Innerhalb dieser Zeit stieg das Wasser von ca. -580 m NHN auf -250 m NHN an. Dies wurde so erklärt, dass in diesem Teufenbereich der Anteil der Hohlraumvolumina gemessen zum Reservoirvolumen sehr klein war (15). Mit dem Übergang zur zweiten Phase kam es zu einem Abfall der Anstiegsgeschwindigkeiten auf Werte von 10 m pro Monat. In diesem Teufenbereich fand der größte Abbau an Steinkohle statt, dementsprechend lagen hier auch die größten flutbaren Hohlraumvolumen. Zum Ende der zweiten Phase kam es zu einer erneuten Erhöhung der Anstiegsgeschwindigkeiten von 20 m bis maximal knapp 35 m pro Monat. Dies wird als Flutung der bergbaubedingten Zerrüttung des Gebirges über dem höchsten Abbauhorizont gedeutet. Kurz nach dem lokalen

its maximum of 35 m a month. The rate at which the water rose initially sank to below 10 m a month and then gradually declined to values of around 1 m a month. This can be attributed to two factors: firstly that the inflows continued to decrease in size as the pressure difference declined, and secondly that the aquifer was located in the Triassic sandstones of the overlying strata and in the groundwater-filled zone this did not exhibit a floodable void ratio per se. From November 2009 a resumption of pumping operations succeeded in bringing mine-water levels back down to a point where the rate of rise was dissipating.

3.2 Mine-water management

In order to protect the groundwater horizon La Houve, Vouters and Simon 5 collieries adopted a concept that was similar to that employed in the Durham coalfield, which has been described above. The dewatering measures were resumed at La Houve in November 2009, at Simon 5 in November 2013 and at Vouters in July 2015 and the groundwater was kept several metres below the groundwater pressure height (Figures 7, 8). Maintaining this potential difference, which was generally between 5 and 10 m, and creating a stable density layering effectively prevented any mixing of the two sets of water (15). The groundwater with the higher pressure level can then flow into the mine water, whereas the mine water with the lower pressure level cannot enter the groundwater. The fact that the pressure difference between the two bodies of water is relatively small means that only a small quantity of water can pass from the groundwater horizon into the mine water, as is the case in the Durham coalfield. As a result of this, the groundwater level also gradually rises along with the mine water. However, if the mine water is kept at a constant level then the level of the groundwater will be controlled at the same time and this will prevent any flooding of those areas affected by mining subsidence. Generally speaking, the depth to groundwater should be maintained at 3 m. Nevertheless, in the western part of the coalfield around La Houve colliery some small French towns did experience flooding into the cellars of the houses (21). Here it must also be borne in mind that this represents the natural state of the local wetlands as they were before the mining industry commenced its pumping operations. No uncontrolled gas emissions or damage to infrastructure or environment, including the groundwater, has been identified in the eastern part of the coalfield (22). Some ground uplift of 15 to 20 cm was recorded over a fairly wide area, though this tended to be uniform in nature and so had little or no impact on the local infrastructure.

3.3 Mine-water treatment

Even before mine pumping operations were resumed plans had to be put in place for the provision of mine-water treatment facilities. The empirical data acquired in Britain (23) were used to predict the likely iron and sulphate concentration levels. According to these figures the initial maximum iron concentration of the mine water is in direct correlation with the total sulphur concentration of the deposits and so can be assessed on this basis. After the maximum level has been reached the iron concentration levels slowly begin to fall again. The time required for the iron concentration to fall back to half its original level roughly corresponds to the total mine flooding period. The iron concentration level of

Anstiegsmaximum von 35 m pro Monat begann der Einstau in das Deckgebirge. Die Anstiegsgeschwindigkeiten fielen auf zunächst unter 10 m pro Monat, dann sukzessive auf Werte von rd. 1 m pro Monat ab. Dies ist dadurch zu erklären, dass zum einen die Zuflüsse durch die abnehmende Druckdifferenz immer weiter abnahmen. Zum anderen befand sich in den triassischen Sandsteinen des Deckgebirges der Grundwasserleiter, der im grundwassergefüllten Bereich per se keinen flutbaren Hohlraumanteil aufweist. Ab November 2009 wurde der Stand des Grubenwassers mittels erneuter Wasserhaltungsmaßnahmen wieder auf dem Level des ausklingenden Grubenwasseranstiegs kontrolliert.

3.2 Grubenwassermanagement

Sowohl bei La Houve als auch bei Vouters und Simon 5, wurde zum Schutz des Grundwasserhorizonts ein ähnliches Konzept wie das oben beschriebene im britischen Durham verfolgt. Die Wasserhaltungsmaßnahmen wurden bei La Houve im November 2009, bei Simon 5 im November 2013 und bei Vouters im Juli 2015 wieder aktiviert und der Grubenwasserstand einige Meter unterhalb der Druckhöhe des Grundwassers gehalten (Bilder 7, 8). Durch diese aufrecht erhaltene Potentialdifferenz, in der Regel zwischen 5 und 10 m, sowie die Ausbildung einer Dichteschichtung kann es zu keiner Durchmischung der beiden Wässer kommen (15). Das Grundwasser mit dem höheren Druckniveau kann hierbei ins Grubenwasser abfließen, aber das Grubenwasser mit geringerem Druckniveau nicht in das Grundwasser hinein. Dadurch, dass die Druckdifferenz zwischen beiden Wässern relativ klein ist, verringert sich auch die Menge an Wasser, die vom Grundwasserhorizont in das Grubenwasser abfließen kann, ähnlich wie im Durham Revier. Als Folge hiervon steigt mit dem Grubenwasser auch der Grundwasserstand sukzessive an. Wird das Grubenwasser hierbei jedoch auf einem konstanten Level gehalten, werden auch gleichzeitig der Grundwasserstand kontrolliert und Überschwemmungen in von Bergsenkungen betroffenen Gebieten verhindert. In der Regel soll ein Flurabstand von 3 m eingehalten werden. Im westlichen Abbaubezirk bei La Houve ist es dennoch in einigen Ortschaften in Frankreich zu Überschwemmungen und gefluteten Kellern gekommen (21). Hierbei muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass dies dem natürlichen Zustand des Sumpfgebiets entspricht, wie er vor den Wasserhaltungsmaßnahmen des Bergbaus vorlag. Im östlichen Revier sind keine unkontrollierten Gasaustritte sowie Schäden an Infrastruktur oder Umwelt einschließlich des Grundwassers bekannt (22). Es wurden großflächige Hebungsbeträge von 15 bis 20 cm registriert, die jedoch gleichmäßig und somit ohne Beeinträchtigungen der Infrastruktur abgelaufen sind.

3.3 Grubenwasseraufbereitung

Schon im Vorfeld der erneuten Wasserhaltungsmaßnahmen mussten Grubenwasseraufbereitungsanlagen geplant werden. Für die Prognose der zu erwartenden Eisen- und Sulfatkonzentrationen wurde auf Erfahrungswerte aus Großbritannien (23) zurückgegriffen. Hiernach steht die initiale, maximale Eisenkonzentration des Grubenwassers in enger Korrelation zur Gesamtschwefelkonzentration der Lagerstätte und kann dementsprechend daraus abgeschätzt werden. Nach diesem Maximum fallen die Eisenkonzentrationen langsam wieder ab. Die Zeit, bis die

the water, as observed long term, will in turn depend on sulphur levels in the coal and on the distance between the water pumping station and the area where the deposits outcrop at ground level. This is because the outcrop zones are significant sources of pyrite oxidation.

The first of three mine-water treatment plants (La Houve) was built on the basis of these assumptions. This installation has been designed as a passive treatment facility with an aeration cascade, a 1,800 m² settling tank and three adjoining plant-based clarification units with a total surface area of 3,400 m² (15). While the modelled concentration progression for iron was incorrect and the actual values showed a significant delay in the reduction of the iron concentration levels, nevertheless the system was able to demonstrate a high degree of operational reliability. The initial iron-concentration levels were in a similar order of magnitude to the modelled values, which meant that the purification performance of the plant was not exceeded. However, the delayed reduction in concentration levels has led to a significant increase in sludge residues in the settling tanks since the plant was commissioned and this ultimately resulted in higher expenditure on maintenance and hence in increased operating costs too. Nevertheless, in overall terms the plant always managed to filter out more than 94% of the dissolved iron, with a peak performance of as much as 99%, and was able to maintain the prescribed maximum iron concentration levels of 2 mg/l in the mine water being released into the environment. One possible reason for the discrepancy between the predicted and the actual values is that the pump output was not constant but in fact varied considerably. When the pump is operating at a high but steady rate of delivery there is indeed a marked downturn in the iron levels, whereas during those phases when there is a variable delivery rate the iron values have a wide spread and tend to increase (17).

Two further passive treatment plants were built in addition to the one at La Houve. These were the Simon facility, which was set up in November 2012 to treat mine water from the central and eastern part of the coalfield, and the Vouters plant, which has a maximum capacity of around 12,000 m³/d (approx. 8.3 m³/min) and was built in July 2015 in order to process mine water from the same area. Both facilities have a similar performance to the first plant at La Houve but have to deal with higher zinc and copper levels in the intake water (17).

4 Summary

The experience acquired in the UK and France shows that a sustainable mine-water management regime can be developed by having an understanding of the regional hydrogeological relationships and by applying fundamental hydraulic principles. The protection of the drinking water in both the Durham and Lorraine coalfields is now assured by maintaining a comparatively small potential difference of just a few metres between the groundwater and the mine water. In both locations the increase in mine-water levels has also resulted in a rise in the groundwater level and when the topographical conditions are right this can lead to areas of standing water and the creation of polder wetlands. An extensive monitoring programme and the provision of appropriate pumping systems are therefore required. After it has been raised to the surface the water can be treated using either an ac-

anfängliche Eisenkonzentration bis auf die Hälfte abgeklungen ist, ist grob mit der Gesamtflutungsdauer des Bergwerks gleichzusetzen. Die sich langfristig einstellende Eisenkonzentration des Wassers hängt wiederum von der Schwefelkonzentration der Kohle und von der Entfernung des Wasserhaltungsstandorts von der Ausstrichzone der Lagerstätte an der Tagesoberfläche ab. Dies hat den Grund, dass die Ausstrichzonen als wichtige Quellen für die Pyritoxidation gelten.

Auf Grundlage dieser Annahmen wurde die erste von drei Grubenwasseraufbereitungsanlagen, La Houve, gebaut. Diese Anlage ist als passives Aufbereitungssystem mit Belüftungskaskade, 1.800 m² großem Absetzbecken sowie drei angeschlossenen Pflanzenkläranlagen mit insgesamt 3.400 m² Fläche aufgebaut (15). Obwohl die modellierten Konzentrationsverläufe für Eisen falsch waren und die tatsächlichen Werte eine deutlich verzögerte Abnahme der Eisenkonzentration aufwiesen, konnte das System eine sehr gute Funktionstüchtigkeit unter Beweis stellen. Die initialen Eisenkonzentrationen waren in einer vergleichbaren Größenordnung wie die modellierten Werte, wodurch die Reinigungsleistung der Anlage nicht überschritten wurde. Durch die verzögerte Abnahme fielen jedoch seit Inbetriebnahme der Anlage deutlich erhöhte Schlammrückstände in den Becken an, was letztlich zu einem höheren Wartungsaufwand und damit auch zu höheren Betriebskosten geführt haben dürfte. Insgesamt schafft es die Anlage jedoch, stets mehr als 94% bis hin zu 99% des gelösten Eisens herauszufiltern und die vorgeschriebenen maximalen Eisenkonzentrationen von 2 mg/l für die Zuführung des Grubenwassers in die Umwelt einzuhalten. Ein diskutierter Grund für die Abweichung der prognostizierten von den tatsächlichen Werten ist, dass die Pumpleistung nicht konstant war, sondern sehr stark variierte. Bei erhöhter, aber gleichbleibender Pumpleistung ist tatsächlich ein deutlicher Rückgang der Eisenwerte festzustellen, während in Phasen mit variabler Pumpleistung auch die Eisenwerte stark streuen und tendenziell anwachsen (17).

Neben La Houve wurden noch zwei weitere passive Aufbereitungsanlagen gebaut. Im November 2012 die Anlage Simon, die das Grubenwasser des zentral-östlichen Teils des Gebiets aufbereitet sowie im Juli 2015 die Anlage Vouters, die ebenfalls der Aufbereitung der Grubenwässer aus diesem Gebiet dient und eine maximale Kapazität von rd. 12.000 m³/d (ca. 8,3 m³/min) hat. Beide Anlagen zeigen eine ähnlich gute Leistung wie die erste Anlage bei La Houve, weisen aber erhöhte Zink- und Kupferwerte im ausströmenden Wasser auf (17).

4 Zusammenfassung

Die Erfahrungen in Großbritannien und Frankreich zeigen, dass durch ein Verständnis der regionalen hydrogeologischen Zusammenhänge und die Berücksichtigung grundlegender hydraulischer Prinzipien ein nachhaltiges Grubenwassermanagement entwickelt werden kann. Ein Schutz des Trinkwassers wird sowohl in Durham als auch in Lothringen durch eine vergleichsweise geringe Potentialdifferenz von nur wenigen Metern zwischen Grund- und Grubenwasser gewährleistet. In beiden Revieren ist es infolge des Grubenwasseranstiegs auch zu einem Anstieg des Grundwasserstands gekommen, was bei entsprechender Topographie zu Vernässungen bis hin zu Poldern führen kann. Ein um-

tive or a passive process (or a combination of both), depending on its chemical composition and rate of production, and can then be discharged into the receiving waters provided it meets the given limit values.

fangreiches Monitoring sowie die Vorhaltung geeigneter Wasserhaltungsinstallationen sind daher notwendig. Das gehobene Wasser kann abhängig von Chemismus und Förderraten teils aktiv, teils passiv oder in Kombination beider Typen aufbereitet und bei Einhaltung geltender Grenzwerte in die Vorfluter geleitet werden.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Goerke-Mallet, P.; Reker, B.; Westermann, S.; Melchers, C. (2017): Nachbergbau in Großbritannien: das Steinkohlenrevier South Yorkshire. In: *Markscheidewesen* 124 (1), S. 13–21.
- (2) Reker, B.; Goerke-Mallet, P.; Westermann, S.; Melchers, C. (2018): Die britische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus dem Revier South Yorkshire und aktuelle Entwicklungen in Großbritannien. In: *Bergbau* 69 (6), S. 269–275.
- (3) Hill, A. (2012): Coal, a chronology for Great Britain; The Northern Mine Research Society, British Mining No. 94, 272 S., 69 Abb. ISBN 978 0 901450 68 5.
- (4) Younger, P. L. (1995): Hydrogeology. Chapter 11. In: Johnson, G. A. L.: *Robson's Geology of North East England*. (The Geology of North East England, Second Edition). – Transactions of the Natural History Society of Northumbria, Vol. 56, (5); S. 353–359.
- (5) Watson, I. (2011): Managing rising mine water to prevent aquifer pollution. Präsentation im Rahmen der Konferenz "Contaminated Ground, Contaminated Groundwater?" des UK Groundwater Forum am 24.05.2011 in London.
- (6) Bearcock, J.; Smedley, P. L. (2009): Baseline Groundwater Chemistry: the Magnesian Limestone of County Durham and North Yorkshire. British Geological Survey Open Report OR/09/030.
- (7) Younger, P. L.; Adams, R. (1999): Predicting Mine Water Rebound. Environment Agency, R&D Technical Report, W179.
- (8) Neymeyer, A.; Williams, R. T.; Younger, P. L. (2007): Migration of polluted mine water in a public supply aquifer. In: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 40, S. 75–84.
- (9) 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. Final report. Luxembourg, Luxembourg: Off. For Official Publ. of the European Communities (EUR Research Fund for Coal and Steel series, 23456).
- (10) Cairney, T.; Frost, R. C. (1975): A case study of mine water quality deterioration, Mainsorth colliery, County Durham. In: *Journal of Hydrology*, 25, S. 275–293.
- (11) Kortas, L.; Younger, P. L. (2007): Using the GRAM Model to Reconstruct the Important Factors in Historic Groundwater Rebound in Part of the Durham Coalfield, UK. In: *Mine Water and the Environment* 26 (2), S. 60–69.
- (12) Younger, P. L. (1993): Possible environmental impact of the closure of two collieries in County Durham. In: *Jl. Inst. Water and Environmental Management*, 7 (5), S. 521–531.
- (13) Whitworth, K. R. (2002): The monitoring and modelling of mine water recovery in UK coalfields. In: Younger, P. L. & Robins, N. S. (2002): *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*. Geological Society, London, Special Publications, 198, S. 61–73.
- (14) Wagner, J. (2010): Zukunft Warndt Wasser – Handlungsstudie zu den Chancen nach dem Anstieg des Grundwassers im Warndt. Unveröffentlichte Studie der Fa. Grundwasser- und Geo-Forschung Neunkirchen.
- (15) Koeberlé, N.; Levicki, R.; Kaiser, J.; Heitz, S. (2013): Treating mine waters in the Lorraine coal field – feedback from the La Houve treatment plant. In: Tibbett, M.; Fourie, A. B. & Digby, C. (eds): *Proceedings of the Eighth International Conference on Mine Closure*, 18.–20. September 2013, Cornwall, United Kingdom. Australian Centre for Geomechanics, S. 171–182, 2013.
- (16) Blachere, A.; Lefort, D. (2003): Etude prévisionnelle de la qualité des eaux après remplissage des mines des secteurs Est, Ouest et Centre. Bureau d'études Cesame.
- (17) Corbel, S.; Kaiser, J.; Vicentin, S. (2017): Coal mine flooding in the Lorraine-Saar basin: experience from the French mines. In: Wolkersdorfer, C.; Sartz, L.; Sillanpää, M.; Häkkinen, A. (eds): *IMWA 2017 – Mine Water & Circular Economy*. Lappeenranta, Finland 2017, S. 161–166.
- (18) RAG (2015): Grubenwasser in der Diskussion. Broschüre der RAG Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter: www.bergbau-unser-erbe.de/fileadmin/user_upload/Grubenwasser_in_der_Diskussion.pdf (Stand: 31.01.2019).
- (19) Schäfer, A. (2016): Das Grubenwasser im saarländischen Steinkohlerevier nach dem Ende der Gewinnung. In: *Bergbau* 67 (4), S. 172–176.
- (20) Cosquer, R. (2016): *Compte-rendu d'activités DPSM – Année 2015/Lorraine*. Rapport final, BRGM/RP-65651-FR.
- (21) Ernst, N.; Maillason, H. (2018): In Lothringen sind die Gruben längst geflutet. Onlineartikel der Saarbrücker Zeitung vom 31. Juli 2018. Online verfügbar unter: www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/blickzumnachbarn/frankreich/in-lothringen-sind-die-gruben-laengst-geflutet_aid-24159007 (Stand 31.01.2019).
- (22) Schleuning, J. (2018): Welche Auswirkungen die aktuelle Grubenflutung im Saarland hat. Onlineartikel der Saarbrücker Zeitung vom 28. Januar 2019. Online verfügbar unter: www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/saarland/welche-auswirkungen-die-aktuelle-grubenflutung-im-warndt-hat_aid-35960693 (Stand: 31.01.2019).
- (23) Younger, P. L. (2000): Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. In: *Journal of Contaminant Hydrology*, 44(1), S. 47–69.

Authors / Autoren

Dr. rer. nat. Bastian Reker, Sebastian Westermann M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet, Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers, Forschungszentrum Nachbergbau, Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum