

Density Stratification in Mine Water Bodies as a Contribution to Better Long-Term Water Management

In flooded shafts of the Ruhr-area distinct boundaries between differently mineralised water bodies have been observed at diverse locations. The influx of higher mineralised water from the rock mass and from the mine workings on the one hand and the penetrating less mineralised surface water on the other hand causes significant density differences in the water column. The formation of a stable stratification can be proven by measurements of temperature and conductivity. These measurements confirm that columns of water in flooded shafts display stratification with distinct boundaries between individual, homogeneous layers. The stable conditions are driven by convection currents

which generate from the influx of higher tempered and mineralised mine water. Therefore, the observed density stratification can be considered as the result of a complex flow pattern which is governed by the mineralisation and temperature of the water in the shaft. The phenomenon of density stratification is an important criterion in the flooding of existing mine facilities after mine closure and requires further research. The formation conditions of natural density stratification are based on thermodynamic processes. The paper is based on a presentation made at the International Mining Symposium WISSYM 2015 on 2nd September 2015 in Bad Schlema, Germany.

Dichteschichtungen in Flutungswasserkörpern als Beitrag zur Optimierung der langzeitigen Wasserhaltung

In den gefluteten Schächten des Ruhrbergbaus wurden scharfe Grenzen zwischen unterschiedlich mineralisierten Wässern an diversen Lokalitäten beobachtet. Durch den Zustrom von hoch mineralisiertem Wasser aus dem Gebirge sowie dem Grubengebäude und dem eindringenden gering mineralisierten Oberflächenwasser bestehen in den Schächten signifikante Dichteunterschiede. Diese Ausbildung von stabilen Schichtungen lässt sich in den Schächten mittels Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen nachweisen. Diese stabilen Verhältnisse entstehen durch Konvektionsströmungen, die sich durch den Zustrom höher temperierter und mineralisierter Grubenwässer entwickeln. Die beobachteten Dichteschichtungen sind somit als das Resultat eines komplexen Strömungsbildes zu sehen, welches durch die Mineralisation und Temperatur des Wassers in den Schächten bestimmt

wird. Dichteschichtungen in Flutungswasserkörpern lassen sich auch in anderen Bergbauregionen beobachten. Es gibt aber auch Hinweise auf fehlende Konvektionszellen. Die Dichteschichtung ist ein wichtiges Kriterium bei der Flutung vorhandener Grubenräume nach der Stilllegung. In Anbetracht der Bedeutung dieses Phänomens für die Flutung unterschiedlicher Bergwerke bedarf es weitergehender Standortuntersuchungen. Die Bildungsbedingungen der natürlichen Dichteschichtung werden physikalisch, chemisch, hydraulisch und kinematisch erläutert. Ferner werden anhand verschiedener Standorte ausgewählte Beispiele vorgestellt. Der Beitrag stützt sich auf einen im Rahmen des Internationalen Bergbau-Symposiums WISSYM 2015 am 2. September 2015 in Bad Schlema gehaltenen Vortrag.

1 Introduction

Mine dewatering has altered the original, hydrogeological conditions. Countless shafts and boreholes have created connections between the land surface and zones deep below ground. According to their position these shafts are filled with water to varying degrees. Depending on the geology and tectonic of the surrounding rock and the shaft lining they create pathways for heat and material flows between the ground-water reservoir, other geological strata and the atmosphere.

After the cessation of mining activities in the Ruhr coalfield,

1 Einleitung

Die bergbauliche Wasserhaltung hat die ursprünglichen hydrogeologischen Verhältnisse verändert. Zahlreiche Schächte und Bohrungen schaffen Verbindungen von der Oberfläche bis in den tiefen Untergrund. In Abhängigkeit von ihrer Lage sind diese Schächte im unterschiedlichen Maß mit Wasser gefüllt und schaffen je nach Geologie und Tektonik des anstehenden Gesteins sowie des Schachtausbaus Wegsamkeiten für Wärme- und Stoffströme zwischen dem Grundwasserreservoir, anderen geologischen Schichten und der Atmosphäre.

and the partial or complete abandonment of dewatering measures, there will be a renewed rise in mine-water levels within the rock. The highly concentrated saline water, which has previously been artificially suppressed, will rise in level again and the hydrogeological system will in many respects revert to the way it was before mining began.

Understanding the development of the chemical composition and possible density layering of rising mine water in disused collieries plays a key role in any environmental impact assessment process.

2 The theory of density stratification

The formation of density layers in the water column is based on an extremely complex interaction of thermodynamic parameters that mutually influence each other. Here we need to characterise the following fluid properties:

- dynamic viscosity,
- thermal conductivity,
- specific heat capacity,
- density.

These properties determine the behaviour of the convection currents and are themselves dependent on pressure, temperature and salinity. The fluid properties are governed by the following sensitive dependencies:

- The dynamic viscosity is dependent on salinity and temperature.
- The thermal conductivity is dependent on salinity, temperature and pressure.
- The specific heat capacity is dependent on salinity.
- The density is dependent on salinity and temperature.

The law of mass conservation and the free-convection equations are used as a basis for calculating density-dependent flow and material flow.

Free convection, i.e. density-driven flow, can be calculated using the Navier-Stokes equation (equation 1), which describes the state of flow at a certain point in the fluid (1):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{f}' - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v} + \frac{\eta + \eta'}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) \quad \text{equation 1}$$

where: \vec{v} = velocity vector (m/s),
 t = time (s),
 \vec{f}' = force vector, as applied to the unit mass (N/kg),
 ρ = mass density (kg/m³),
 p = pressure (Pa),
 η = dynamic viscosity (kg/m·s),
 η' = temperature-dependent coefficient of friction (2nd Lamé viscosity constant) (kg/m·s),
 ∇ = Nabla operator.

The temporal ($\partial \vec{v} / \partial t$) and spatial ($(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$) change in velocity are shown on the left side of the Navier-Stokes equation. The forces that are based on the unit mass, and which are the cause of the changes in velocity, are given on the right side.

The equation describes the generally specified external force \vec{f}' (1st term), along with the internal compressive force p

Nach Beendigung der Bergbauaktivitäten im Ruhrrevier und der partiellen oder vollständigen Einstellung der Wasserhaltungen kommt es zum Wiederanstieg der Grubenwässer im Gebirge. Die bisher künstlich kurz gehaltenen, meist hochkonzentrierten Salzwässer werden wieder aufsteigen und das hydrogeologische System wird sich dem Stand vor Beginn des Bergbaus annähern.

Die Kenntnis der Entwicklung der chemischen Zusammensetzung und eventueller Dichteschichtungen ansteigender Grubenwässer in stillgelegten Bergwerken spielt eine entscheidende Rolle für die Einschätzung möglicher Auswirkungen auf die Umwelt.

2 Theorie der Dichteschichtung

Die Ausbildung von Dichteschichtungen in der Wassersäule beruht auf einem sehr komplexen Zusammenwirken thermodynamischer Parameter, welche sich gegenseitig beeinflussen. So ist es notwendig, folgende Fluideigenschaften zu beschreiben:

- dynamische Viskosität,
- Wärmeleitfähigkeit,
- spezifische Wärmekapazität,
- Dichte.

Diese Eigenschaften bestimmen das Verhalten der Konvektionsströmung und hängen selber von Druck, Temperatur und Salinität ab. Für die Fluideigenschaften bestehen folgende sensitive Abhängigkeiten:

- Die dynamische Viskosität ist von der Salinität und der Temperatur abhängig.
- Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Salinität, der Temperatur und dem Druck abhängig.
- Die spezifische Wärmekapazität ist von der Salinität abhängig.
- Die Dichte ist von der Salinität und der Temperatur abhängig.

Grundlage zur Berechnung der dichteabhängigen Strömung und des Stofftransports sind Massenerhaltungsgesetz und Gleichungen der freien Konvektion.

Die freie Konvektion, d.h. die dichtegetriebene Strömung, lässt sich mittels der Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 1) bestimmen, welche den Zustand der Strömung an einem bestimmten Ort des Fluids beschreibt (1):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{f}' - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v} + \frac{\eta + \eta'}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) \quad \text{Gleichung 1}$$

Mit: \vec{v} = Geschwindigkeitsvektor (m/s),
 t = Zeit (s),
 \vec{f}' = Kraftvektor, bezogen auf die Einheitsmasse (N/kg),
 ρ = Massendichte (kg/m³),
 p = Druck (Pa),
 η = dynamische Viskosität (kg/m·s),
 η' = temperaturabhängiger Reibungskoeffizient (2. Lamé-Viskositätskonstante) (kg/m·s),
 ∇ = Nabla-Operator.

Auf der linken Seite der Navier-Stokes-Gleichung stehen die zeitliche ($\partial \vec{v} / \partial t$) und räumliche ($(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$) Änderung der Geschwindigkeit. Auf der rechten Seite der Gleichung stehen die auf die

(2nd term), as based on the unit mass, the viscous internal friction force η and the temperature-dependent coefficient of friction η' (resistance to a change in shape or volume, 3rd and 4th terms).

The temporal change in density in a volume element, i.e. the inflow and outflow in all three spatial directions, is determined by means of the continuity equation (equation 2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad \text{equation 2}$$

where: ρ = mass density (kg/m³),
 t = time (s),
 ∇ = Nabla operator,
 \vec{v} = velocity (m/s).

The temperature gradient causes a flow of heat in a body, as described in the heat transfer equation according to Fourier's Law (equation 3). As the heat in this case flows in the direction of the temperature gradient, this indicates a negative correlation.

$$\vec{J}_t = -\lambda \nabla T \quad \text{equation 3}$$

where: \vec{J}_t = heat flux density (W/m²),
 λ = thermal conductivity (W/(K·m)),
 ∇ = Nabla operator,
 T = temperature (K).

The diffusion equation according to Fick's Law (equation 4) is equivalent to the thermal conductivity equation in describing the molecular diffusion of particles as the result of a concentration gradient.

$$\vec{J}_c = -D \nabla C \quad \text{equation 4}$$

where: \vec{J}_c = particle flow density (mol/(m²·s)),
 D = diffusion coefficient (m²/s),
 ∇ = Nabla operator,
 C = concentration (mol/m³).

The diffusivity of temperature is about $1.2 \cdot 10^{-9}$ m²/s, while that of salt is around $1.43 \cdot 10^{-7}$ m²/s. This means that temperature can be equalised about 100 times faster than salinity. It is therefore possible that under certain conditions a body of water will be heavier than its environment and will sink, as is the case when a zone of warm, saline water lies above another zone that is cold and only slightly saline. Thermal conduction therefore represents a more efficient transfer process in liquids than does molecular material diffusion.

3 Measurement method

The water columns in the shafts were investigated using a multi-parameter measurement probe with a diameter of up to 2 inches and a system of measurement cables up to 1,000 m in length. The multi-parameter probe recorded not only temperature and conductivity but also parameters such as pH value, redox potential and hydrostatic pressure. The probe's specifications are presented in Table 1 (2).

Einheitsmasse bezogenen Kräfte, welche die Geschwindigkeitsänderungen hervorrufen.

Neben der im Allgemeinen bekannten äußeren Kraft \vec{f} (1. Term), wird darin die auf die Einheitsmasse bezogene innere Druckkraft p (2. Term), die viskose innere Reibungskraft η und der temperaturabhängige Reibungskoeffizient η' (Widerstand gegenüber einer Form- bzw. Volumenänderung, 3. und 4. Term) beschrieben.

Die zeitliche Änderung der Dichte in einem Volumenelement, d.h. der Zu- und Abstrom in alle drei Raumrichtungen wird mittels der Kontinuitätsgleichung bestimmt (Gleichung 2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad \text{Gleichung 2}$$

Mit: ρ = Massendichte (kg/m³),
 t = Zeit (s),
 ∇ = Nabla-Operator,
 \vec{v} = Geschwindigkeit (m/s).

Durch das Temperaturgefälle entsteht ein Wärmestrom in einem Körper, welcher durch die Wärmeleitungsgleichung nach dem Fourier-Gesetz beschrieben wird (Gleichung 3). Da hierbei die Wärme in Richtung des Temperaturgefälles fließt, besitzt diese ein negatives Vorzeichen.

$$\vec{J}_t = -\lambda \nabla T \quad \text{Gleichung 3}$$

Mit: \vec{J}_t = Wärmestromdichte (W/m²),
 λ = Wärmeleitfähigkeit (W/(K·m)),
 ∇ = Nabla-Operator,
 T = Temperatur (K).

Die Diffusionsgleichung nach dem Fick'schen Gesetz (Gleichung 4) beschreibt äquivalent zur Wärmeleitungsgleichung die molekulare Diffusion von Teilchen aufgrund eines Konzentrationsgradienten.

$$\vec{J}_c = -D \nabla C \quad \text{Gleichung 4}$$

Mit: \vec{J}_c = Teilchenstromdichte (mol/(m²·s)),
 D = Diffusionskoeffizient (m²/s),
 ∇ = Nabla-Operator,
 C = Konzentration (mol/m³).

Die Diffusivität von Temperatur beträgt etwa $1,2 \cdot 10^{-9}$ m²/s, die von Salz etwa $1,43 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Temperatur kann demnach etwa 100-mal schneller ausgeglichen werden als Salinität. Daher ist es möglich, dass unter bestimmten Umständen ein Wasserpaket schwerer wird als seine Umgebung und absinkt, z.B. wenn warmes, salinates Wasser über kaltem, gering salinarem liegt. Wärmeleitung stellt also einen leistungsfähigeren Transportprozess in Flüssigkeiten dar, als die molekulare Stoffdiffusion.

3 Messmethode

Die Wassersäulen in den Schächten wurden mittels einer Multi-parameter-Messsonde mit einem Durchmesser von bis zu 2 Zoll und einer Auslegung der Messkabel von bis zu 1.000 m unter-

Parameter	Measurement range	Accuracy
temperature	0 °C to 50 °C	± 0.15 %
electrical conductivity	0 µS/cm to 200 µS/cm	± 0.5 %
	0.2 mS/cm to 2.0 mS/cm	± 0.5 %
	2.0 mS/cm to 20 mS/cm	± 0.5 %
	20 mS/cm to 200 mS/cm	± 0.5 %
pH value // pH-Wert	0 to 14	± 0.1 %
redox potential	-2,000 mV to +2,000 mV	± 2 mV
hydrostatic pressure	0 m to 600 m	± 0.3 %

Table 1. Specifications for the multi-parameter probe
Tabelle 1. Spezifikation der Multiparameter-Messsonde

The probe had a measuring range of 0 to 50 °C with an accuracy of about 0.1 %. The measuring range of the conductivity probe is dependent on the chosen resolution and is in the region of 0.5 %. Because of the slow speed of the rope winch it is only possible to take measurements of the salt concentration and temperature at intervals of just a few centimetres.

4 Geological-hydrogeological background

The entire rock mass that extends from the roof of the folded, seam-bearing Upper Carboniferous to the ground surface is collectively known as the overburden. In the southern part of the Ruhr coalfield, where the seam-bearing Upper Carboniferous outcrops directly to the surface, there is no overburden cover. The formerly marine depositional environment became landside at the end of the Westphalian D Stage when the Hercynian orogenesis reached its high-point in the Asturic Phase. With the beginning of the Cenomanian transgression at the start of the Upper Cretaceous there occurred a far-reaching incursion of the sea into the Rhenish-Westphalian carboniferous strata from a northerly direction. During the period from the Cenomanian to the Campanian Stages thick limestone beds were deposited from this shallow sea with its oversaturation of calcium carbonate. As a result, the bedrock layers of coal, zechstein and Bunter sandstone, which dipped to the north at a gradient of some 2° to 3°, were discordantly overlaid with the Upper Cretaceous overburden that today constitutes the surface rock of the region (Figure 1).

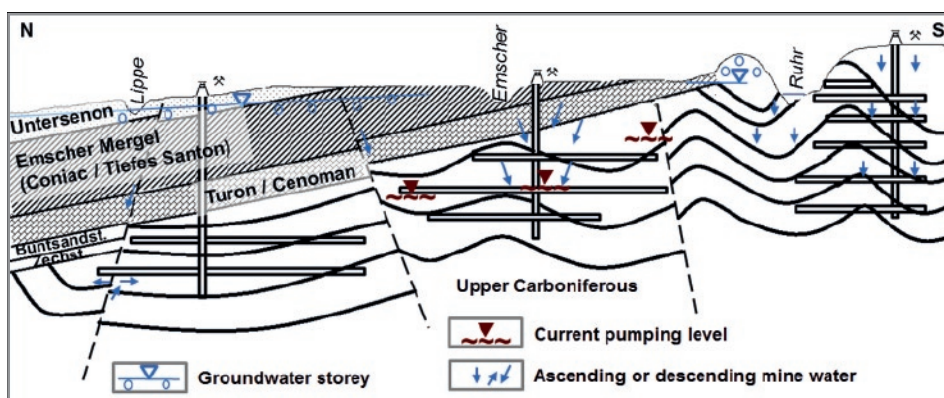


Fig. 1. Schematic section through the Ruhr coalfield (greatly exaggerated).
Bild 1. Schematischer Schnitt durch das Steinkohlenrevier an der Ruhr (stark überhöht).
Source/Quelle: nach Hahne & Schmidt, 1982

sucht. Die Multiparameter-Messsonde erfasst neben der Temperatur und Leitfähigkeit weitere Parameter wie den pH-Wert, das Redoxpotential und den hydrostatischen Druck. Die Sonden-Spezifikationen sind in der Tabelle 1 aufgeführt (2).

Der Messbereich der Temperatursonde liegt im Bereich von 0 °C bis 50 °C bei einer Genauigkeit von ca. 0,1 %. Der Messbereich der Leitfähigkeitssonde ist abhängig von der gewählten Auflösung und liegt bei ca. 0,5 %. Aufgrund einer geringen Geschwindigkeit der Seilwinde sind Messungen der Salzkonzentration und der Temperatur in Abständen von nur wenigen Zentimetern möglich.

4 Geologisch-Hydrogeologischer Überblick

Das gesamte Gebirge im Hangenden des gefalteten flözföhrnden Oberkarbon bis zur Tagesoberfläche wird zusammenfassend als Deckgebirge bezeichnet. Im südlichen Ruhrrevier, wo das flözföhrnde Oberkarbon direkt an der Tagesoberfläche austreicht, ist eine Überdeckung durch das Deckgebirge nicht vorhanden. Der vormals tief- bis flachmarine Ablagerungsraum wurde am Ende des Westfal D, als die Variszische Orogenese in der sogenannten Asturischen Phase ihren Höhepunkt erreichte, landfest. Mit Beginn der Cenoman-Transgression zu Beginn der Oberkreide kam es aus nördlicher Richtung zu einem raumgreifenden Meeresvorstoß auf das rheinisch-westfälische Steinkohlengebirge. Aus diesem an Calciumcarbonat übersättigten Flachmeer wurden im Zeitraum von Cenoman bis zum Campan mächtige Kalksteinpakete abgelagert. Das mit ca. 2° bis 3° nach Norden einfallende Grundgebirge aus Schichten des Karbon, Zechstein und Buntsandstein wurde hierbei diskordant von dem Oberkreide-Deckgebirge überlagert, das heute das Deckgebirge darstellt (Bild 1).

Schichten der Unterkreide, des Jura und der Trias fehlen im Münsterländer Becken auf Grund der transgressiven Überlagerung durch die Oberkreide (3). Die Grenze der Kreide verläuft im südlichen Ruhrrevier entlang der Linie Duisburg – Essen – Bochum – Dortmund (Bild 1). Südlich dieser Linie streicht das flözföhrnde Oberkarbon direkt an der Tagesoberfläche aus. Die Mächtigkeit der Kreide-Sedimente nimmt auf ca. 900 m im Norden des Ruhrreviers zu (4).

Die Cenoman-Konglomerate bilden im Südwesten des Ruhrreviers die Basis des Deckgebirges. Zum Hangenden folgt der glaukonitreiche, mergelige Essener Grünsand, der im zentralen Ruhrrevier einen Wasserstauer darstellt. Er ist allerdings nur dort

In the Münsterland basin the transgressive superposition of the Upper Cretaceous has resulted in the disappearance of Lower Cretaceous, Jurassic and Triassic strata (3). In the southern part of the Ruhr coalfield the Cretaceous boundary runs along the line Duisburg – Essen – Bochum – Dortmund (Figure 1). South of this line the seam-bearing Upper Carboniferous outcrops directly to the surface. The thickness of the Cretaceous sediments increases to around 900 m in the northern part of the Ruhr region (4).

The overburden rock in the south-west of the Ruhr coalfield is composed of Cenomanian conglomerate. The roof beds are followed by the glauconite-rich, marlaceous Essen Greensand that forms an impermeable layer in the central part of the Ruhr area. However, this Greensand is only impermeable where it is thick enough to develop clayish properties. The argillaceous component gives the rock its impermeable qualities along with a degree of plasticity.

The Essen Greensand displays these advantageous features in the area around Essen, Gelsenkirchen and Recklinghausen, while further to the east the Cenomanian Greensand has more often developed in a chalky way and tends to be less plastic, with the result that mining activities cause it to break like sandstone (5). The Essen Greensand is followed by jointed limestone and calcareous marlstone from the Cenomanian Stage, which can be water-bearing. The following Pläner limestone of the Turonian Stage mainly consists of calcareous marlstone and argillaceous limestone. This strata sequence includes two locally intercalated glauconitic greensand horizons – the blue-green Bochum greensand and the higher, mostly green Soest greensand. The Bochum greensand is generally lighter than the Essen variety and takes the form of glauconite-rich, marly fine sandstone or calcareous sandstone, or appears as sandy marlstone (5). Towards the east the Bochum greensand migrates into the Soest greensand. These greensand horizons vary substantially in thickness and do not endure over a wide area. The solid marlstones and limestones of the Turonian are fractured and water-bearing.

Special importance must be attached to the fairly consistently argillaceous marlstone beds of the Coniacian (about 89 million years ago) to Lower Middle Santonian (about 85 million years ago) Stages, which can be as much as 800 m thick. Schlüter (6) was the first to designate these stratigraphically as Emscherian marl and separated them from the Senonian as an independent stage. Within the Ruhr coalfield itself the Emscherian marl is generally never more than about 400 m in thickness, with an average of 250 to 350 m in this area (5). The topmost 1 to 2 m of Emscherian marl have been weathered to a clayed silt, or silty clay, thereby creating an aquiclude. Beneath this the clay marlstone can be jointed and water-bearing to a depth of some 30 to 50 m. Because of this jointing the Emscherian marl in these horizons can also be used as a source of drinking water supply. The joints and fissures become less common towards the bottom of the zone and finally close up completely. This creates an aquiclude. The Emscherian marl therefore seals the deeper groundwater storey of the Cenomanian and Turonian from the upper groundwater storey of the Quaternary and the jointing zone of the Emscherian marl. At the southern edge of the coalfield, beneath the shallow strata of the Quaternary, the Emscherian marl outcrops to the surface in a depression that is 15 m wide at some points (Figure 1).

wasserstauend, wo er bei größerer Mächtigkeit tonig entwickelt ist. Der tonige Anteil verleiht dem Gestein seine wasserstauende Wirkung und eine gewisse Plastizität.

Diese günstigen Eigenschaften weist der Essener Grünsand im Gebiet von Essen, Gelsenkirchen und Recklinghausen auf, wohingegen weiter östlich der Grünsand des Cenoman vielfach kalkig und wenig plastisch entwickelt ist, so dass dieser durch Abbauwirkungen nach Art des Sandsteins hereinbricht (5). Auf dem Essener Grünsand folgen klüftige Kalksteine und Kalkmergelsteine des Cenoman, die wasserführend sein können. Die folgenden Plänerkalksteine des Turon bestehen überwiegend aus kalkigen Mergelsteinen und tonigen Kalksteinen. In diese Abfolge sind örtlich zwei glaukonitische Grünsandhorizonte – der blaugrüne Bochumer und der höhere, zumeist grüne Soester Grünsand – eingelagert. Der Bochumer Grünsand ist zumeist heller als der Essener Grünsand und ist als glaukonitreicher, mergeliger Feinsandstein bzw. Kalksandstein oder sandiger Mergelstein ausgebildet (5). In Richtung Osten geht der Bochumer Grünsand in den Soester Grünsand über. Die genannten Grünsandsteinhorizonte schwanken in ihrer Mächtigkeit stark und halten räumlich nicht aus. Die festen Mergel- und Kalksteine des Turon sind geklüftet und wasserführend.

Eine besondere Bedeutung kommt den bis zu 800 m mächtigen, größtenteils einheitlichen tonigen Mergelsteinen des Coniac (ca. 89 Mio. Jahre) bis unteren Mittelsanton (ca. 85 Mio. Jahre) zu, die Schlüter (6) erstmals stratigraphisch als Emscher-Mergel bezeichnete und als eigenständige Stufe vom Senon abtrennte. Innerhalb des eigentlichen Ruhrreviers übersteigt der Emscher-Mergel eine Mächtigkeit von ca. 400 m in der Regel nicht und weist hier im Durchschnitt 250 m bis 350 m auf (5). Die obersten 1 bis 2 m des Emscher-Mergel sind zu einem tonigen Schluff bzw. schluffigen Ton verwittert und bilden einen Grundwassernichtleiter. Darunter können die Tonmergelsteine bis zu einer Tiefe von 30 bis 50 m geklüftet und wasserführend sein. Aufgrund dieser Klüftigkeit wird der Emscher-Mergel in diesen Horizonten auch zur Wasserversorgung genutzt. Zum Liegenden werden die Klüfte seltener und sind schließlich vollständig geschlossen. Es bildet sich ein Grundwassernichtleiter aus. Der Emscher-Mergel dichtet somit das tiefere Grundwasserstockwerk von Cenoman und Turon gegen das obere Grundwasserstockwerk des Quartär und der Kluftzone des Emscher-Mergel ab. Am Südrand des Ruhrreviers streicht der Emscher-Mergel in einer bis zu 15 km breiten Senke unter geringmächtigen Schichten des Quartär zutage aus (Bild 1).

5 Schichtung in wassererfüllten Schächten und Bohrungen

5.1 Ruhrrevier

Im Ruhrrevier wurden an verschiedenen Standorten Dichteschichtungen im Grubenwasser nachgewiesen. Diese zeichnen sich durch signifikante Veränderungen der Leitfähigkeit, der Temperatur und der Mineralisation aus und trennen somit verschiedene homogene Wasserkörper. Die einzelnen Wasserkörper zeichnen sich hierbei durch konstante Temperatur, Leitfähigkeit, Mineralisation und Dichte aus (Bild 2).

Die Dichteschichtungen wurden sowohl in Schächten als auch in tiefen Deckgebirgsbohrungen nachgewiesen. Dabei ist die Dichteschichtung unabhängig von der eigentlichen Zusam-

5 Stratification in water-filled shafts and boreholes

5.1 Ruhr coalfield

Density stratifications in mine water have been identified at various sites in the Ruhr coalfield. These are characterised by significant changes in conductivity, temperature and mineralisation and as a result separate off various homogenous bodies of water. These individual bodies typically have constant levels of temperature, conductivity, mineralisation and density (Figure 2).

The density stratifications were found both in mine shafts and in deep surface boreholes. Here the density stratification is not related to the actual composition of the water, or therefore to the water type. Such stratifications are known to exist between hydrogen carbonate and sodium chloride water and also between individual sodium water bodies of different concentration. In such cases the depth of the homogeneous water bodies can vary from just a few metres to as much as several hundred metres. However, the boundary layer is usually no more than a few decimetres in depth.

The formation of density stratification in the Ruhr coalfield has been identified both in shafts that have already been flooded as well as in shafts that are still undergoing this process. According to present knowledge the formation of boundary layers is largely based on water inflow from the surrounding rock and on rock-specific properties such as thermal conductivity and jointing. However, the shaft support system can also play a role here, as this provides the route for water inflow at the individual horizon levels. The density stratification can be determined by measuring the temperature and conductivity as a function of depth.

The depth-specific geothermal gradient, which indicates the change in temperature with increasing depth, essentially serves as a driver for the convection currents (7). This can vary from place to place depending on mineralogy, geology, morphology and, particularly, volcanic activity. The average geothermal gradient is $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ and is constant over time (Figure 2). In near-surface zones down to about 1.5 m this factor plays a much reduced role, as the temperature gradients generated by seasonal and daily fluctuations are much larger (8). In an underground water column the geothermal gradient warms up the deeper-lying mine water and causes currents that can develop into convection cells. These prevent the mixing of inflows with different composition, which leads to the formation of a further convection cell (Figure 3).

The varying mineralisation of the water bodies also contributes to the presence of density-driven currents. Concentration gradients are produced as a result of the influx of water bodies of varying composition. This can occur as a result of the inflow of different types of formation water from the surrounding strata, or may be due to infiltration and/or anthropogenic activities such as pumping and so on. In geochemical terms, the mine water generally equates to a mixture of ground water and soil leachate that has been geochemically altered by the various processes taking place in and around the mine workings. As a result, processes such as gas dissolution and release, evaporation and condensation can produce a difference in concentration within the water column. It is therefore quite likely that stratification will occur in the water columns under the premise of hydraulic routing both in the basement rock and in the overburden.

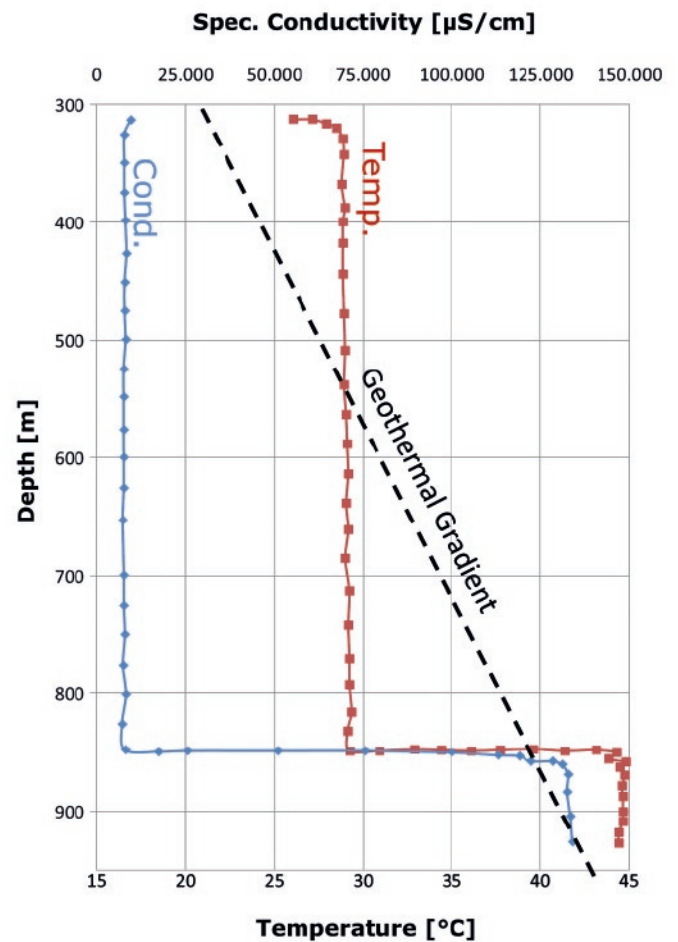


Fig. 2. Conductivity and temperature log for the flooded Hermann 1 shaft (2).

Bild 2. Leitfähigkeit und Temperaturlog des gefluteten Schachtes Hermann 1 (2).

mensetzung des Wassers und somit des Wassertyps. So sind Dichteschichtungen sowohl zwischen Hydrogencarbonat- und Natriumchlorid-Wässern als auch zwischen Natriumchlorid-Wässern mit unterschiedlichen Konzentrationen bekannt. Die Mächtigkeit der homogenen Wasserkörper kann hierbei zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern variieren. Die Grenzschicht macht jedoch meist nur wenige Dezimeter aus.

Für das Ruhrrevier ist die Ausbildung von Dichteschichtungen sowohl an bereits gefluteten Schächten als auch an Schächten während des eigentlichen Prozesses der Flutung nachgewiesen. Nach jetzigem Kenntnisstand beruht die Ausbildung der Grenzschichten im Wesentlichen auf Wasserzuflüssen aus dem anstehenden Gebirge sowie auf gesteinspezifischen Eigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit und der Klüftigkeit. Ebenso kann der Schachtausbau eine Rolle spielen, da hierüber die Wasserzuflüsse der einzelnen Sohlen erfolgen. Über Messungen von Temperatur und Leitfähigkeit als Funktion der Tiefe, lässt sich die Dichteschichtung darstellen.

Als Antrieb der Konvektionsströmungen kann grundsätzlich der tiefspezifische geothermische Gradient herangezogen werden, welcher die Temperaturänderung mit zunehmender Tiefe angibt (7). Dieser kann je nach Mineralogie, Geologie, Morpho-

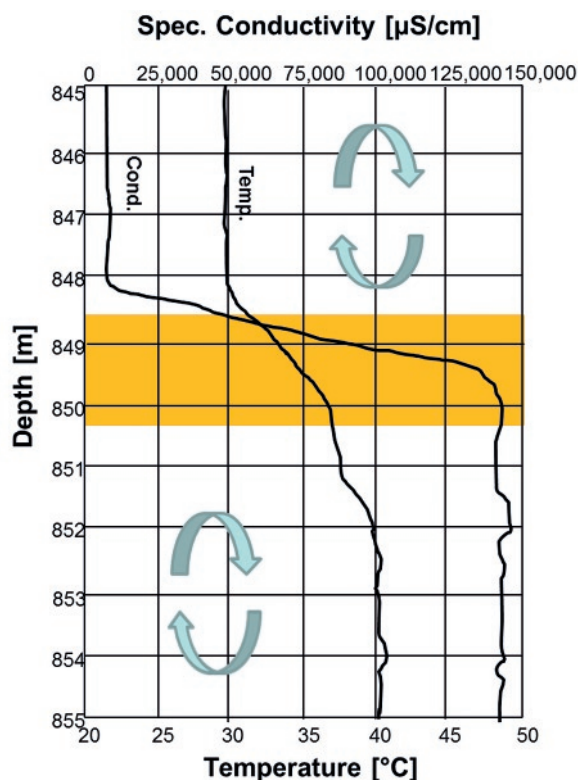


Fig. 3. Conductivity and temperature log for the Hermann 1 shaft transition zone (2).

Bild 3. Leitfähigkeit und Temperaturlog des Sprungbereiches von Schacht Hermann 1 (2).

5.2 Experience from other mining areas

Density stratification is found not just in the surface shafts of the Ruhr coalfield but also in shafts that were sunk for ore and uranium mining and for salt mining too (2, 9, 10). Stable stratification phenomena were for example recorded in the Sicilia shaft at the Meggen ore mine as mine-water levels rose. Density stratification has also been identified in boreholes and at ground-water measuring points.

Comprehensive studies have been carried out in this area by Berthold (11). In this case numerous experimental tests were used to record density-driven convection currents even at low temperature gradients (<0.1 K/m) and in water columns with a very low diameter (5 cm), with the result that the critical threshold level needed to promote free convection can be assumed as being relatively low. The author also analysed that the induced flow velocities and the intensity of the mass transfer increase with the temperature gradient. In this process the convective heat transport was 100,000 times greater than the conductive heat transport (thermal conduction). Another important finding was that the density-driven currents passing through the water column vary from one section to another and can either cancel each other out or intensify the density contrast. This observation also verified the temporal stability of the stratification conditions.

The phenomenon of density stratification in water bodies is therefore essentially unrelated to the geological or lithological character of the deposits and rock strata.

logie und besonders vulkanischer Aktivität örtlich variieren. Der Mittelwert des geothermischen Gradienten beträgt $3,7$ °C/100 m und ist zeitlich konstant (Bild 2). Für oberflächennahe Bereiche bis ca. 1,5 m Tiefe hat er nur eine untergeordnete Bedeutung, da die Temperaturgradienten, die durch jahres- und tageszeitliche Schwankungen entstehen, deutlich größer sind (8). In einer untertägigen Wassersäule führt der geothermische Gradient zur Erwärmung des tieferen Grubenwassers und verursacht Strömungen, die sich zu Konvektionszellen entwickeln können. Diese verhindern die Vermischung von zufließenden Wässern anderer Zusammensetzung, was zur Ausbildung einer weiteren Konvektionszelle führt (Bild 3).

Zudem trägt die unterschiedliche Mineralisation der Wasserkörper zu dichtegetriebenen Strömungen bei. Es entstehen Konzentrationsgradienten, wenn es zum Eintritt von Wässern mit unterschiedlicher Beschaffenheit kommt. Dies kann über Zuflüsse von verschiedenartigen Formationswässern aus der umgebenden Gesteinsformation, über Infiltration und/oder über anthropogene Einflüsse (Pumparbeit etc.) geschehen. Das Grubenwasser entspricht geochemisch zumeist einem Mischwasser aus Grund- und Bodensickerwasser, welches durch die verschiedenen Prozesse im Grubengebäude geochemisch verändert wird. Prozesse wie Gaslösung und -freisetzung, Verdampfung und Kondensation können hierbei einen Konzentrationsunterschied innerhalb der Wassersäule hervorrufen. Demnach ist durchaus zu erwarten, dass sich Schichtungen in Wassersäulen unter der Voraussetzung hydraulischer Wasserwegsamkeiten sowohl im Grund- als auch im Deckgebirge einstellen können.

5.2 Erfahrungen aus anderen Revieren

Neben der Steinkohlenlagerstätte im Ruhrrevier sind Dichteschichtungen aus Schächten im Erz- und Uranbergbau sowie im Salz bekannt (2, 9, 10). So ließen sich beispielsweise auch stabile Schichtungen im Sicilia-Schacht des Meggener Erzbergwerks während des Grubenwasseranstiegsprozesses verzeichnen. Außerdem sind Dichteschichtungen in Bohrungen und Grundwassermessstellen nachgewiesen.

Umfassende Untersuchungen hierzu wurden von Berthold (11) durchgeführt. Mithilfe von zahlreichen experimentellen Untersuchungen konnten dichtegetriebene Konvektionsströmungen schon bei geringen Temperaturgradienten ($<0,1$ K/m) und bei Wassersäulen mit sehr kleinem Durchmesser (5 cm) erfasst werden, sodass der kritische Schwellenwert zum Einsetzen der freien Konvektion als relativ niedrig angenommen werden kann. Zudem analysierte die Autorin, dass die induzierten Strömungsgeschwindigkeiten und die Intensität des Stofftransports mit dem Temperaturgradienten zunehmen. Hierbei war der konvektive Wärmetransport 100.000mal größer als der konduktive Wärmetransport (Wärmeleitung). Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass die in der Wassersäule ablaufenden dichtegetriebenen Strömungen je nach Abschnitt variieren und sich ausgleichen oder den Dichtekontrast verstärken können. Hierbei wurde auch die zeitliche Stabilität der Schichtungsverhältnisse nachgewiesen.

Die Dichteschichtungen in Wasserkörpern sind somit grundsätzlich unabhängig von geologischen oder lithologischen Ausbildungen der Lagerstätte und des Gebirges.

6 Future outlook for rising mine-water levels

Density stratification causes a natural demarcation to be formed that is unrelated to the lithology and geology of the deposits and strata. Because of the sharply defined convection cells this demarcation can be crucial for the protection of the near-surface, fresh ground-water and drinking-water horizons. However, further investigations are needed in this area, not only to provide a more complete understanding of the formation conditions but also to acquire data on the spatial and temporal formation of the density stratification process.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Kays, W., Crawford, M. & Weigand, B. (2004): Convective heat and mass transfer. McGraw-Hill, New York, 512 p.
- (2) Kories, H., Rüterkamp, P., Sippel, M. (2004): Field and numerical studies of water stratification in flooded shafts. IMWA-Tagung 2004, Newcastle upon Tyne, 17 S.
- (3) Hahne, C., Schmidt, R. (1982): Die Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes. Glückauf (118), Essen, 106 S.
- (4) Hilden, H. D., Drozdowski, G., Hiß, G., Lehmann, F., Michel, G., Skupin, K., Staude, H., Thiermann, A., Dahm-Ahrens, H. (1995): Geologie im Münsterland. Krefeld, 195 S.
- (5) Kukuk (1938): Geologie des nordrhein-westfälischen Steinkohlengebietes. Springer, Berlin, 706 S.
- (6) Schlüter, C. (1874): Der Emscher Mergel. Z. dt. geol. Ges., Jg. 26, Berlin, S. 775 - 782.
- (7) Leonhardt, J. (1983): Die Gebirgstemperaturen im Ruhr-Revier. In: Das Markscheidewesen, Jg. 90, S. 218–230.
- (8) Berthold, S. (2009): Geophysikalischer Nachweis freier Konvektion in Grundwassermessstellen und Bohrungen. Proceedings of DGFZ e.V., Dissertation, Jg. 39, Dresden, 230 S.

6 Ausblick auf den Grubenwasseranstieg

Durch die Dichteschichtung bildet sich eine natürliche Abgrenzung aus, die unabhängig von der Lithologie und Geologie der Lagerstätte und des Gebirges ist. Dieser Abgrenzung kann aufgrund der scharf getrennten Konvektionszellen zum Schutz der oberflächennahen, süßen Grund- und Trinkwasserhorizonte eine wesentliche Bedeutung zukommen. Hierzu sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich, die einerseits zu einem vertieften Verständnis der Bildungsbedingungen beitragen und andererseits die Dichteschichtung hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Ausbildung erfassen.

- (9) Czolbe, P., Kretschmar, H.-J., Klafki, M., Heidenreich, H. (1992): Strömungszellen im gefluteten Salzschant. Neue Bergbautechnik, Jg. 22, S. 213 - 218.
- (10) Luckner, L., Morgenstern, A. (2006): Grundlagen von Schichtungsprozessen in gefluteten Untertagebergwerken. World of Mining – Surface & Underground (58) Heft 5, S. 311–315.
- (11) Berthold, S. (2010): Synthetic convection log – characterization of vertical transport processes in fluid-filled boreholes. Journal Applied Geophysics, Vol. 72, pp. 20–27.

Authors / Autoren

Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers,
Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet und Laura Henkel, M. Sc.,
Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Fachhochschule (TFH) Georg Agricola, Bochum,
Prof. em. Dr. rer. nat. Wilhelm G. Coldewey,
Dominik Wesche, M. Sc., Institut für Geologie und Paläontologie der Westfälischen Wilhelms-Universität (WWU), Münster