

Ausbildung von Dichteschichtungen in Schächten des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier

Christian Melchers¹, Dominik Wesche², Wilhelm G. Coldewey²

¹Technische Fachhochschule Georg Agricola zu Bochum für Rohstoff, Energie und Umwelt

²Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Geologie und Paläontologie

ZUSAMMENFASSUNG:

In den gefluteten Schächten des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier lassen sich scharfe Grenzen zwischen unterschiedlich mineralisierten Wässern an diversen Lokalitäten beobachten. 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, das durch die Mineralisation und Temperatur des Wassers in den Schächten bestimmt wird.

Das Phänomen der Dichteschichtung ist ein wichtiges Kriterium bei der Flutung vorhandener Grubenräume nach der Stilllegung und bedarf weitergehender Standortuntersuchungen. Die Bildungsbedingungen der natürlichen Dichteschichtung beruhen auf thermodynamischen Vorgängen.

ABSTRACT:

In the flooded shafts of the Ruhr mining industry sharp boundaries between different mineralized waters can be observed at various locations. Because of the influx of highly mineralized water from the carboniferous rocks and from the mine workings, as well as the percolation of low mineralized surface water, significant differences in the water density exist in the shafts. This formation of stable stratification can be detected in the wells using conductivity and temperature measurements.

These stable conditions are caused by convection currents, which develop due to the influx of highly temperate and mineralized mine waters. The observed density stratification is thus seen as the result of a complex flow pattern, which is determined by the temperature and mineralization of the water in the wells.

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.

1 Einleitung

Nach der 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 eine entscheidende Rolle für eine Einschätzung möglicher Auswirkungen auf die Umwelt.

2 Theorie der Dichteschichtung

2.1 Physikalische Grundlagen der freien Konvektion

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

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

Diese Eigenschaften bestimmen zum einen das Verhalten der Konvektionsströmung, und hängen selber von den Druck-/Temperaturbedingungen und der Salinität ab.

Für die Fluid-Eigenschaften bestehen folgende sensiblen 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 Stofftransportes sind Massenerhaltungsgesetz und Gleichungen der freien Konvektion.

Die freie Konvektion, d. h. die dichtegetriebene Strömung, lässt sich mittels der Navier-Stokes-Gleichung (Gl. 1) bestimmen, welche den Zustand des an einem bestimmten Ort des Fluids beschreibt (KAYS et al. 2004):

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

mit: \vec{v} = Geschwindigkeit (m/s),

t = Zeit (s),

\vec{f} = Kraft, 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 des Navier-Stokes-Gleichung stehen die zeitliche $\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right)$ und räumliche $(\nabla \vec{v})$ Änderung der Geschwindigkeit. Auf der rechten Seite der Gleichung stehen die auf die 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) und die viskose innere Reibungskraft η und den temperaturabhängigen Reibungskoeffizienten η' (Widerstand gegenüber einer Form- bzw. Volumenänderung; 3. und 4. Term) beschrieben.

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

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

mit: ρ = Massendichte (kg/m^3),
 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 (Gl. 3). Da hierbei die Wärme in Richtung des Temperaturgefälles fließt, besitzt diese ein negatives Vorzeichen.

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

mit: \vec{J}_t = Wärmestromdichte (W/m^2),
 λ = Wärmeleitfähigkeit ($\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$),
 ∇ = Nabla-Operator
 T = Temperatur (K)

Die Diffusionsgleichung nach den Fick-Gesetz (Gl. 4) beschreibt äquivalent zur Wärmeleitungsgleichung die molekulare Diffusion von Teilchen aufgrund eines Konzentrationsgradienten.

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

mit: \vec{J}_c = Teilchenstromdichte ($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),
 D = Diffusionskoeffizient (m^2/s),
 ∇ = Nabla-Operator,
 C = Konzentration (mol/m^3).

3 Messmethodik

Die Wassersäulen in den Schächten wurden mittels einer Multiparameter-Messsonde mit einem Durchmesser von bis zu 2 Zoll und einer Auslegung der Messkabel von bis zu 1.000 m untersucht. Die Multiparameter-Messsonde erfasst neben der Temperatur und Leitfähigkeit weitere Parameter wie den pH-Wert, das Redoxpotenzial sowie den hydrostatischen Druck. Die Sonden-Spezifikationen sind in der Tabelle 1 aufgeführt (KORIES et al 2004).

Der Messbereich der Temperatursonde liegt im Bereich von 0 °C bis 70 °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.

Tabelle 1: Spezifikation der Multiparameter-Messsonde.

Parameter	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur	0 °C bis 50 °C	± 0,15 %
elektr. Leitfähigkeit	0 µS/cm bis 200 µS/cm	± 0,5 %
	0,2 mS/cm bis 2,0 mS/cm	± 0,5 %
	2,0 mS/cm bis 20 mS/cm	± 0,5 %
	20 mS/cm bis 200 mS/cm	± 0,5 %
pH-Wert	0 bis 14	± 0,1 %
Redoxpotenzial	-2000 mV bis +2000 mV	± 2 mV
hydrostatischer Druck	0 m bis 600 m	± 0,3 %

4 Geologisch-hydrogeologischer Überblick

Das gesamte Gebirge im Hangenden des gefalteten flözführenden Oberkarbon bis zur Tagesoberfläche wird zusammenfassend als Deckgebirge bezeichnet. Im südlichen Ruhrrevier, wo das flözführende Oberkarbon direkt an der Tagesoberfläche ausstreckt, 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 übersättigtem Flachmeer wurden im Zeitraum von Cenoman bis zum Campan mächtige Kalksteinpakete abgelagert. Das mit ca. 2° - 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 (Abbildung 1).

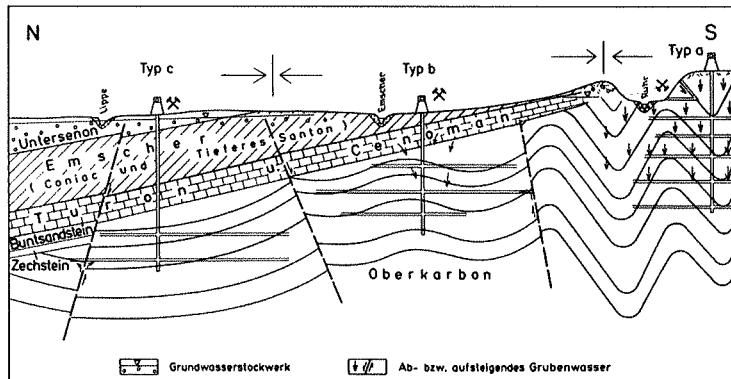


Abbildung 1: Schematischer Schnitt durch das Steinkohlenrevier (stark überhöht, HAHNE & SCHMIDT 1982).

Schichten der Unterkreide, des Jura und der Trias fehlen im Münsterländer Becken aufgrund der transgressiven Überlagerung durch die Oberkreide (HAHNE & SCHMIDT 1982). Die Grenze des Ausgehenden der Kreide verläuft im südlichen Ruhrrevier entlang der Linie Duisburg - Essen - Bochum - Dortmund (Abbildung 1). Südlich dieser Linie streicht das flözführende Oberkarbon direkt an der Tagesoberfläche aus. Die Mächtigkeit der Kreide-Sedimente nimmt auf ca. 900 m im Norden des Ruhrreviers zu (HILDEN et al. 1995).

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 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 (KUKUK 1938). Auf dem Essener Grünsand folgen klüftige Kalksteine und Kalkmergelsteine des Cenoman, die wasserführend sein können. Die folgenden Plänerkalke 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 (KUKUK 1938). 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 Ma) bis unteren Mittelsanton (ca. 85 Ma) zu, die SCHLÜTER (1874) erstmals stratigraphisch als Emscher-Mergel bezeichnete, und diese als eigenständige Stufe vom Senon abtrennte. Innerhalb des eigentlichen Ruhrrevier 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 (KUKUK 1938). Die obersten ein bis zwei Meter 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 - 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 ab. Am Südrand des Ruhrreviers streicht der Emscher-Mergel in einer bis zu 15 km breiten Senke unter geringmächtigen Schichten des Quartär zutage aus (Abbildung 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 (Abb. 2).

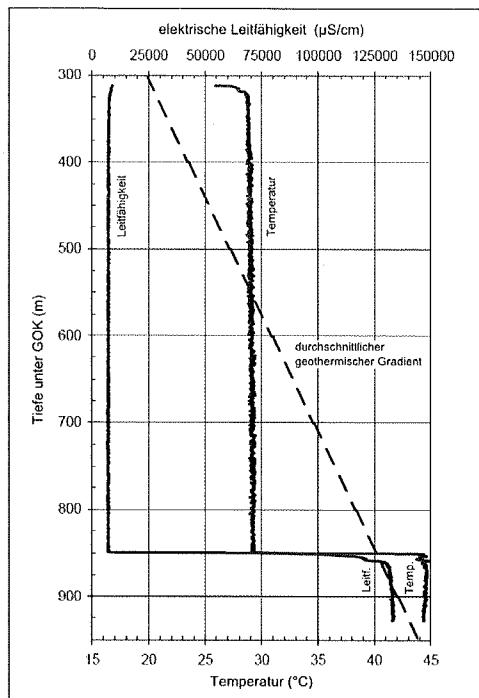


Abbildung 2: Leitfähigkeit und Temperaturlog des gefluteten Schachtes Hermann 1 (nach KORIES et al. 2004).

Die Dichteschichtungen wurden sowohl in Schächten als auch in tiefen Deckgebirgsbohrungen nachgewiesen. Dabei ist die Dichteschichtung unabhängig von der eigentlichen Zusammensetzung des Wassers und somit des Wassertyps. So sind Dichteschichtungen sowohl zwischen Hydrogencarbonat- und Natrium-Chlorid-Wässern, als auch zwischen Natrium-Chlorid-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 gesteinsspezifischen Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit und Klüftigkeit. Ebenso kann der Schachtausbau eine Rolle spielen, da hierüber die Wasserzuflüsse der einzelnen Sohlen erfolgt.

Der Antrieb der Konvektionsströmungen beruht grundsätzlich auf dem geothermischen Gradienten. Dieser führt zur Erwärmung des tieferen Grubenwassers und bedingt dadurch diese Strömungen. Die Konvektionsströmung verhindert die Vermischung von zufließenden Wässern anderer Zusammensetzung, was zur Ausbildung einer weiteren Konvektionszelle führt.

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. Außerdem sind Dichteschichtungen an Bohrungen und selbst an Grundwassermessstellen nachgewiesen. Die Dichteschichtungen in Wasserkörpern sind somit grundsätzlich unabhängig von geologischen oder lithologischen Ausbildungen der Lagerstätte und des Gebirges.

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.

Quellenangaben

- HAHNE, C. & SCHMIDT, R. (1982): Die Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes. – 106 S., 88 Abb., 11 Tab.; Essen (Glückauf).
- HILDEN, H.D., DROZDZEWSKI, G., HIB, G., LEHMANN, F., MICHEL, G., SKUPIN, K., STAUDE, H., THIERMANN, A. & DAHM-AHRENS, H. (1995): Geologie im Münsterland. – 195 S., 50 Abb., 6 Tab., 1 Anl.; Krefeld.
- KAYS, W., CRAWFORD, M. & WEIGAND, B. (2004): Convective heat and mass transfer. – 512 S.; New York (McGraw-Hill).
- KORIES, H., RÜTERKAMP, P., SIPPEL, M. (2004): Field and numerical studies of water stratification in flooded shafts. - IMWA-Tagung 2004: 17 S., 13 Abb., 1 Abb.; Newcastle upon Tyne.
- KUKUK (1938): Geologie des nordrhein-westfälischen Steinkohlengebietes. - 706 S., 743 Abb., 48 Tab., 14 Taf., Berlin.
- SCHLÜTER, C. (1874): Der Emscher Mergel. – Z. dt. geol. Ges., 26: 775-782; Berlin.