

Untersuchungen zum Verständnis von Grubenflutung und der Barrierewirkung von Dichteschichtung

Christian Wolkersdorfer¹, Elke Mugova^{1,2}

¹Tshwane University of Technology (TUT), Südafrika

²TU Bergakademie Freiberg

ZUSAMMENFASSUNG:

Weltweit gibt es zehntausende gefluteter Untertagebergwerke, die entgegen der allgemeinen Vermutung weder Oberflächengewässer noch Grundwasser kontaminieren. Warum ist das so? Diese Frage zu klären, erfordert Kenntnisse der Grubengeometrie, des Flutungsverlaufes, der Hydrodynamik und der Dichteschichtung im Flutungswasserkörper. Durch umfangreiche Untersuchungen konnten die Autoren in den letzten drei Jahrzehnten einige Antworten finden.

Sofern oberhalb der zuletzt gefluteten Sohle keine potenziellen Schadstoffquellen in ehemaligen Grubenbauen existieren, strömt dem Grubenwasserkörper von oben vor allem Grundwasser kurzer oder mittlerer Aufenthaltsdauer im Gebirge zu. Dieses Grundwasser besitzt eine relativ geringere Dichte als das bereits in den gefluteten Grubenräumen befindliche Grubenwasser und bildet folglich einen kühleren CF-Wasserkörper (cool fresh) mit weniger mineralisiertem Wasser aus.

Unter diesem CF-Wasserkörper findet sich Grubenwasser, welches schon länger im Grubengebäude war. Lösungs- und Verwitterungsprozesse haben das Wasser mineralisiert, zudem erfolgte eine graduelle Erwärmung des Wassers durch den geothermischen Gradienten. Dieser WM-Wasserkörper (warm mineralised) größerer Dichte unterschichtet daher den CF-Wasserkörper geringerer Dichte.

Zwischen beiden befindet sich fast immer eine zentimeter- bis meterdicke Zwischenschicht, die annähernd wie eine undurchlässige Barriere wirkt wie bereits durch zahlreiche Markierungsversuche (Tracertests) belegt wurde. Die Barriere verhindert den Austrag von hochmineralisiertem Grubenwasser oder organischen Schadstoffen in die Öko- und Anthroposphäre. Schon während der Bergwerksflutung bildet sich an der Oberfläche des ansteigenden Grubenwassers ein CF-Wasserkörper aus, welcher während des Flutungsverlaufs nach oben seine Position ändert.

Um diese Situation nicht zu stören, sollte eine Grubenflutung möglichst schnell erfolgen und eine Wasserentnahme durch Pumpen für geothermische Nutzung des Grubenwassers oder der Wasseraufbereitung unterbleiben. Optimal ist, wie die Untersuchungen von etwa 60 gefluteten Bergwerken weltweit und dem analogen Agricola Modellbergwerk zeigen, die Flutung zügig vorzunehmen und wenn möglich an der hydraulisch tiefsten Stelle frei auslaufen zu lassen. Im Flutungsverlauf und auch nach der Flutung werden die potenziellen Schadstoffe aus dem Bergwerk ausgespült und verdünnt, was dazu beiträgt, dass sich die Konzentrationen aller Wasserinhaltsstoffe allmählich erniedrigen. Dies wird als Erstspülung (first flush) bezeichnet und verbessert in der Regel die Qualität des Grubenwassers umso schneller, je schneller das Bergwerk geflutet wird.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass fast immer ein möglichst unbeeinflusster, schneller und kontrollierter Flutungverlauf am ehesten dazu beiträgt, das Grund- und Oberflächenwasser im

Umfeld des Bergwerks zu schützen. Pumpaktivitäten sollten möglichst vermieden werden. Bis zum Abklang der Erstspülung oder dem Erreichen vorgegebender Grenzwerte sollte das Grubenwasser aktiv oder wenn möglich passiv gereinigt werden.

ABSTRACT

Contrary to popular belief, tens of thousands of flooded underground mines around the world do not contaminate surface water or groundwater. Why is this the case? Answering this question requires knowledge of mine geometry, flooding processes, hydrodynamics, and density stratification in the mine water pool. Extensive field and laboratory studies by the authors over the past three decades have provided some initial answers.

Provided that there are no potential contaminant sources in historic mine workings above the last flooded mine level, groundwater with a short or medium residence time in the rock will mainly flow into the mine water body from above. This groundwater has a relatively lower density than the mine water already present in the flooded mine workings and, consequently, forms a cooler CF (cool fresh) water body with less mineralized water. Beneath this water body is mine water that has been in the mine workings for a longer period. Weathering processes and the dissolution of efflorescent salts have mineralized the water, and a gradual warming of the water has occurred due to the geothermal gradient. This WM (warm mineralized) water body of higher density, therefore, underlies the CF water body of lower density.

Between the two water bodies there is almost always an intermediate layer, centimeters to meters thick, which acts like an impermeable barrier, which has been proven by numerous tracer tests. The barrier prevents contaminated mine water or organic pollutants from discharging into the environment. Already during mine flooding, a CF body forms on the surface of the rising mine water, which changes its position because of the upward flooding.

To maintain this situation, mine flooding should take place as quickly as possible and water extraction by means of pumps for mine water geothermal use or treatment should be avoided. As studies of about 60 flooded mines and the analogue Agricola Model Mine have shown, the optimal solution is to flood the mine as quickly as possible and allow it to drain freely at the hydraulically deepest point. During and after flooding, potential contaminants are flushed out of the mine and diluted, helping to gradually reduce the concentrations of all water constituents. This is called "first flush", and the quality of mine water improves the faster the mine is flooded.

In summary, an unimpeded, rapid and controlled flooding process is almost always the best way to protect groundwater and surface water in the mine vicinity. Pumping after flooding should be avoided. Mine water should be treated actively or, if possible, passively until the initial flushing has subsided or the specified limits have been reached.

1 Flutungsbeginn und Mineralisierung des Grubenwassers

Mit dem Abbauende eines Rohstoffvorkommens erfolgt in der Regel auch das Ende der Grubenwasserhaltung. Unabhängig davon, ob es sich um einen Tagebau oder einen Tiefbau handelte, führt dies in der Regel dazu, dass der Wasserspiegel im offenen Grubenraum ansteigt, sofern

der Abbau unter dem Grundwasserspiegel stattfand. Dieser Anstieg des Wasserspiegels im Bergbaubereich wird Grubenflutung oder vereinfacht Flutung genannt (Brown 1982; Wolkersdorfer 1996; Burghardt et al. 2017). Grubenflutungen können sich in Abhängigkeit von den hydraulischen, bergbaulichen, geologischen und den meteorologischen Parametern über einen sehr kurzen Zeitraum von wenigen Monaten bis hin zu mehreren Dekaden erstrecken. In allen Fällen handelt es sich bei dem in den offenen Grubenraum fließenden Wasser um Grundwasser unterschiedlicher mittlerer Aufenthaltszeiten im jeweiligen Aquifer und Infiltrationswasser von der Tagesoberfläche. Sobald dieses Grundwasser in den offenen Grubenraum eintritt, wird es sich mit den dort durch Verwitterungsprozesse entstandenen, leicht löslichen Mineralphasen (z.B. wasserfreie und wasserhaltige Sulfate, Hydroxide, Carbonate) anreichern (Nordstrom und Alpers 1999). Dadurch kommt es zur Erhöhung der Gesamtmineralisation und folglich der elektrischen Leitfähigkeit und der Dichte. Dieses Wasser, nunmehr in seiner chemischen Zusammensetzung verschieden vom Grund- und Infiltrationswasser, wird sich gravitativ in das Grubentiefste bewegen und zunächst die offenen Grubenräume fluten. Erst zu einem späteren Zeitpunkt wird sich auch das gegebenenfalls entwässerte Gebirge mit dem mineralisierten Wasser füllen (Jäger et al. 1990; Kessler und Schafmeister 2021). Solange es entweder durch die Verwitterung oder Pyritoxidation zur Neubildung leicht löslicher Phasen kommt (junge Acidität sensu Younger – juvenile acidity) oder noch ein Reservoir von leicht löslichen Phasen vorhanden ist (rudimentäre Acidität sensu Younger – vestigial acidity) wird sich das Grundwasser mineralisieren (Younger 1997). Sobald das Grundwasser in das Grubengebäude eintritt, wird es zum Grubenwasser, dessen chemische Zusammensetzung von Trinkwasserqualität bis zu hoch mineralisierten, sauren Grubenwässern mit pH-Werten von weit unter 3 reichen kann (Nordstrom 2011; Wolkersdorfer et al. 2020).

Wenn die leicht löslichen Phasen weitgehend gelöst sind oder sich die Verwitterungsprozesse durch Sauerstoffzehrung oder Sauerstoffabschluss deutlich verlangsamen, wird das spätere Grubenwasser gegenüber dem ursprünglichen Grubenwasser kurz nach Flutungsbeginn eine deutlich geringere Mineralisation und somit Dichte aufweisen. Diese vorgenannten Prozesse führen dazu, dass ins Grubengebäude fließendes Wasser zunächst höher mineralisiert ist als im weiteren Verlauf der Flutung. Folglich hat das Grubenwasser zum Flutungsbeginn eine höhere Dichte als zu einem späteren Zeitpunkt. Gleichzeitig wird sich das im Grubentiefsten befindliche, mineralisierte Grubenwasser durch die geothermische Tiefenstufe erwärmen, während das im Wesentlichen von oben zufließende, frische Grundwasser weiterhin eine Temperatur aufweist, die mehr oder weniger der mittleren Jahrestemperatur entspricht.

2 Dichteschichtung des Grubenwassers

In nahezu allen bisher untersuchten Fällen gefluteter Bergwerke führen diese Prozesse dazu, dass es im Bergwerk zwei oder mehrere Wasserkörper unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und Temperatur gibt (Erickson et al. 1982; Ladwig 1985; Wolkersdorfer 1996). Innere und äußere Kräfte sorgen dann dafür, dass das Wasser oder dessen Inhaltsstoffe eine Strömung erfahren (Luckner und Morgenstern 2006), wobei es zur freien und erzwungenen Konvektion kommen kann (Wolkersdorfer 1996). In der Regel befindet sich im Grubentiefsten wärmeres und höher mineralisiertes Grubenwasser des WM-Wasserkörpers ("warm mineralised"), der auf

den höheren Niveaus des Bergwerks vom kühleren und weniger mineralisierten CF-Wasserkörper überschichtet wird ("cold fresh"). Da das Grundwasser hydraulisch nur in wenigen, theoretischen Ausnahmesituationen unter die Grubenwasseroberfläche fließen kann, führt diese Anordnung von WM- und CF-Wasserkörpern zu einer hydraulisch und thermisch stabilen Schichtung.

Zwischen den beiden Wasserkörpern gibt es in Abhängigkeit von der Dichte- und Temperaturdifferenz einen Temperatur- oder Massengradienten. Diese hat entweder durch doppelt diffusive Prozesse eine stufenförmige Zwischenschicht oder es erfolgt ein Fingerring zwischen den beiden Wasserkörpern (Mugova und Wolkersdorfer 2022a). In beiden Fällen kommt es zur Ausbildung einer zentimeter- bis meterdicken Zwischenschicht, die wie eine feste Barriere wirkt, solange die Geschwindigkeitsdifferenz der Strömungen in den Wasserkörpern unter einem kritischen Betrag liegt (Aigner et al. 2015). Da Pumpaktivitäten die Wassergeschwindigkeit, und folglich die Geschwindigkeitsdifferenz erhöhen, kommt es zum Zusammenbruch der Schichtung und gegebenenfalls erzwungener Konvektion. In zahlreichen Markierungsversuchen (Tracertests) in gefluteten Bergwerken durch die Autoren und in Laborexperimenten an einem großmaßstäblichen Bergwerksmodell ließ sich nachweisen, dass diese Schichtung einerseits stabil ist und andererseits als Barriere wirkt.

3 Stabilität und Barrierewirkung der Dichteschichtung

Videoaufnahmen mit Schachtkameras haben nicht nur zeigen können, dass diese Schichtgrenzen stabil sind, sondern auch wie Wasser aus einer gefluteten Sohle in einen geschichteten Schacht strömt, ohne dass sich das zufließende Wasser mit dem darunterliegenden Wasserkörper im Schacht mischt (Abb. 1). Im Fall des gefluteten Cu-Ag-Ba-Bergwerks Georgi Unterbau in Tirol war eine Temperaturdifferenz von nur 0,1 K über mehrere Jahre hinweg konstant. Sie wurde durch die Zugabe von gesättigter Salzlauge für einen Tracertest gestört, baute sich aber verhältnismäßig schnell wieder auf (Wolkersdorfer et al. 2002). Ergebnisse eines Tracertests mit Mikrosphären und Uranin zeigten, dass diese Schichtgrenze vom Tracer nicht überwunden werden konnte. Ein Tracertest im Reiche Zeche Schacht der Himmelfahrt Fundgrube in Freiberg, Sachsen, wies nach, dass eine Schichtgrenze mit einer Dichtedifferenz von 1 – 2 K für Uranin unüberwindbar war (Neumann 2007; Wolkersdorfer et al. 2007). Zudem zeigt sich durch mehrmalige Tiefenprofilmessungen und Tracertests, dass Schichtung auch über einen langen Zeitraum stabil bleibt.

Um den Flutungsverlauf in einem 2000 Meter tiefen Bergwerk zu verstehen, wurden über einen Zeitraum von drei Jahren in mehreren Schächten annähernd 200 Messungen von Temperatur und anderen physikochemischen Parametern durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Trennung zwischen WM und CF-Wasserkörper schon früh im Flutungsprozess eintreten kann, die Lage der Zwischenschicht jedoch mit dem Flutungsprozess nach oben hin ansteigt (Wolkersdorfer 1996; 2008) und sich weitere Zwischenschichten und somit Wasserkörper ausbilden können. Wie die etwa 30 von den Autoren angestellten Tracertests und mehrere 100 ausgewertete physikochemische Messungen in über 60 gefluteten Untertagebergwerken zeigen, verhindert diese Barriere zuverlässig den Austrag hochkontaminierter Grubenwassers in die Öko- und Anthroposphäre. Im Falle der Bergwerke Urgeiriça, Portugal, und Metsämonttu, Finnland (Abb. 2), führt diese Dichteschichtung dazu, dass das auslaufende Grubenwasser derart gering mineralisiert ist, dass es

sich mittels passiver Reinigungsmethoden aufbereiten lässt (Mugova und Wolkersdorfer 2022b; Wolkersdorfer 2022). In allen publizierten oder auf Konferenzen vorgetragenen Berichten von zusammengebrochener Schichtung in gefluteten Bergwerken (z.B. Frances (Fife) Colliery, Horden, Blinman Mine Australien) hat das Pumpen des Grubenwassers im CF- oder WM-Grubenwasserkörper zum Aufrag hochkontaminierten Grubenwassers geführt (Frost 1979; Nuttall et al. 2002; Farr et al. 2021). Ursache dafür ist entweder, dass die Geschwindigkeitsdifferenz der Wasserströmungen zwischen den Schichten zu groß wird oder weil es im Schacht zu einem Grubenwasser Upconing kommt (Terminologie an Anlehnung an "salt water upconing" oder "local interface upconing"; Dagan und Bear 1968; Fetter 2001).



Abb. 1: Schichtung in einem gefluteten Untertagebergwerk, aufgenommen mit einer Schachtkamera. Die Kamera befindet sich knapp unterhalb des Übergangs von trübem zu klarem Wasser (mit freundlicher Genehmigung: Thorsten Gökpinar; Bild optimiert mit Farb- und Kontrastverbesserung, Bildbreite ≈1 m); aus: Mugova und Wolkersdorfer (2022).

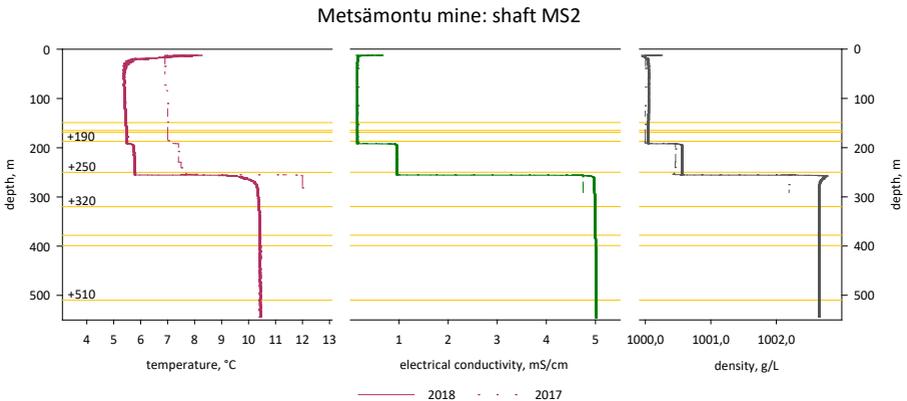


Abb. 2: Dichteschichtung im gefluteten Polymetallbergwerk Metsämontu, Finnland. Am Hauptschacht läuft Grubenwasser mit einer Qualität aus, die im Wesentlichen dem obersten beiden Grubenwasserkörpern entspricht.

Wie sich aus dem Vorgenannten ergibt, erfolgt die Mineralisation des Grubenwassers durch leichtlösliche Phasen, die durch Verwitterung und Pyritoxidation entstehen. In beiden Fällen ist Sauerstoff ein wesentlicher abiotischer Reaktionspartner. Sobald die mineralisierten oder pyrit-haltigen Partien (Pyrit steht hier stellvertretend für Pyrit, Markasit und Pyrrhotin) des Bergwerks geflutet sind, verlangsamen sich die Oxidationsprozesse, da der Diffusionskoeffizient von Sauerstoff in Wasser substanziiell geringer ist als der in Luft (Luft: $1,76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$; Wasser, 0 molar: $2,26 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Je schneller und vollständiger folglich ein Bergwerk geflutet wird, umso schneller kommen potenzielle Schadstoffe unter Luftabschluss und können nur noch langsam verwittern und neue, leicht lösliche Phasen bilden.

Aus der Lösung der bestehenden Phasen und deren zunehmend eingeschränkter Neubildung ergibt sich zusammen mit der Verdünnung und Schichtung des Grubenwasserkörpers eine allmähliche Verbesserung der Grubenwasserqualität. Dieser als Erstspülung ("first flush") bezeichnete Vorgang läuft so lange ab, bis es zwischen Grundwasser, Grubenwasser und den Verwitterungsprozessen zu einem Gleichgewicht kommt.

Vereinfacht ausgedrückt kommt es zu einem Ausspülen der potenziellen Schadstoffe, die in den leicht löslichen Phasen gebunden sind. Younger hat aus der Untersuchung zahlreicher Grubenflutungen abgeleitet, dass der Gleichgewichtszustand zu dem Zeitpunkt erfolgt, der in etwa der drei- bis fünffachen Flutungsdauer entspricht (Younger 2000).

4 Schussfolgerungen und Ausblick

Zusammenfassend sind es im Wesentlichen zwei Prozesse, die neben der Grubengeometrie eine Grubenflutung charakterisieren: Dichteschichtung und Erstspülung. Wie die bisherigen Untersuchungen durch Tracerversuche, physikochemische Messungen sowie analoge und numerische Modellierungen zeigen, können diese beiden Prozesse genutzt werden, um eine Grubenflutung ökonomisch und ökologisch optimal ablaufen zu lassen. Dazu sollte das Bergwerk so schnell und so hoch wie möglich kontrolliert geflutet werden. Solange der Grubenwasserkörper und damit die Schichtung nicht z. B. durch Pumpen gestört wird (Ausbildung einer erzwungenen Konvektion), trägt die stabile Schichtung dazu bei, höher mineralisiertes Grubenwasser im Grubentiefsten zu isolieren. Bis der Wasserkörper im gefluteten Bergwerk noch nicht den Gleichgewichtszustand erreicht hat, sollte das Grubenwasser aktiv oder passiv gereinigt werden. Nach Erreichen des chemisch-thermodynamisch-hydraulischen Gleichgewichts und nach Einhaltung der behördlich vorgegebenen Einleitgrenzwerte kann das Grubenwasser ohne weitere Reinigung eingeleitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Aigner, D., Carstensen, D., Glazik, G., Kraatz, W., Kranawettreiser, J., Martin, H. & Wagner, H. (2015): Dichteströmungen: Technische Hydromechanik – 2. – S. 221–251, 13 Abb., 1 Tab.; Berlin (Beuth).
- Brown, A. (1982): A validated theory of underground mine flooding. – Proceedings, 1st International Mine Water Congress, Budapest, Hungary, B:411–428, 9 Abb.
- Burghardt, D., Coldewey, W. G., Melchers, C., Meßer, J., Paul, M., Walter, T., Wesche, D., Westermann, S., Wieber, G., Wisotzky, F. & Wolkersdorfer, C. (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. – 79 S., Neustadt/Wstr. (Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV).

- Dagan, G. & Bear, J. (1968): Solving the Problem of Local Interface Upconing in a Coastal Aquifer by the Method of Small Perturbations. – *J. Hydraul. Res.*, 6(1):15–44, doi:10.1080/00221686809500218.
- Erickson, P. M., Kleinmann, R. L. P., Posluszny, E. T. & Leonard-Mayer, P. J. (1982): Hydrogeochemistry of a large mine pool. – *Proceedings, 1st International Mine Water Congress, Budapest, Hungary, A:27–42, 7 Abb., 2 Tab.*
- Farr, G., Busby, J., Wyatt, L., Crooks, J., Schofield, D. I. & Holden, A. (2021): The temperature of Britain's coalfields. – *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 54(3):qjieg2020-109, doi:10.1144/qjieg2020-109.
- Fetter, C. W. (2001): *Applied Hydrogeology*, 4th edn. – 598 p., Upper Saddle River (Prentice Hall).
- Frost, R. C. (1979): Evaluation of the rate of decrease in the iron content of water pumped from a flooded shaft mine in County Durham, England. – *J. Hydrol.*, 40(1-2):101–111, 2 Abb., 1 Tab.; doi:10.1016/0022-1694(79)90090-8.
- Jäger, B., Obermann, P., Wilke, F. L., Heidrich, F., Rüterkamp, P. & Skrzyppek, J. (1990): Studie zur Eignung von Steinkohlebergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlebezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen, 1 – 4. – LWA Studie 1990. – 628 S., 54 Anl.; Düsseldorf (Institut für Techn. Umweltschutz der Technischen Universität Berlin, Ruhr Universität Bochum, Institut für Bergbauwissenschaften, Bergbaukunde II der Technischen Universität Berlin).
- Kessler, T. & Schafmeister, M.-T. (2021): Finite-element Modelling Approach To Study Flow Processes During Groundwater Rebound In Abandoned Underground Hard Coal Mines. Paper presented at the Mine Water Management for Future Generations, Cardiff, Wales, United Kingdom. – S. 231–236; Cardiff (Natural Resources Wales, The Coal Authority, Welsh Government, Cardiff University).
- Ladwig, K. J. (1985): Hydrologic aspects of acid mine drainage control. – *Bur. Mines Inf. Circ.*, IC-9027(V):12–18, 4 Abb., 1 Tab.
- Luckner, L. & Morgenstern, A. (2006): Grundlagen von Schichtungsprozessen in gefluteten Untertagebergwerken. – *World of Mining*, 58(5):311–315, 4 Abb.
- Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2022a): Density Stratification and Double-Diffusive Convection in Mine Pools of Flooded Underground Mines – A Review. – *Water Res.*, 214:118033, 6 Abb., 2 Tab.; doi:10.1016/j.watres.2021.118033.
- Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2022b): Monitoring of Flooded Underground Mines – Using Mine Drainage Density Stratification as an Example. Paper presented at the 12th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) 2022 VIRTUAL. – S. 846–852, 2 Abb., 1 Tab.; Brisbane (International Conference on Acid Mine Drainage).
- Neumann, C. (2007): Ermittlung der Hydrodynamik mit Hilfe von Tracertests im Richtschacht Reiche Zeche/Freiberg (Sachsen). – 62 S., 38 Abb., 23 Tab., 7 Anh.; Freiberg (unveröff. Studienarbeit).
- Nordstrom, D. K. (2011): Mine Waters: Acidic to Circumneutral. – *Elements*, 7(6):393-398, 4 Abb., 1 Tab.; doi:10.2113/gselements.7.6.393.
- Nordstrom, D. K. & Alpers, C. N. (1999): Geochemistry of Acid Mine Waters. – In: Plumlee, G. S. & Logsdon, M. J. (eds): *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits 6A*. – S. 133–160, 7 Abb., 14 Tab.; Littleton (Society of Economic Geologists).
- Nuttall, C. A., Adams, R. & Younger, P. L. (2002): Integrated hydraulic-hydrogeochemical assessment of flooded deep mine voids by test pumping at the Deerplay (Lancashire) and Frances (Fife) Colliery. – *Spec. Publ. – Geol. Soc. London*, 198:315–326, 11 Abb., 5 Tab.
- Wolkersdorfer, C. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks – Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. – *Clausthaler Geowiss. Diss.*, 50:1–216, 131 Abb., 61 Tab.
- Wolkersdorfer, C. (2008): *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment*. – 465 S., 126 Abb., 34 Tab.; Heidelberg (Springer); doi:10.1007/978-3-540-77331-3.

- Wolkersdorfer, C. (2022): Mine Water Treatment – Active and Passive Methods. – 328 S., 115 Abb., 29 Tab.; Heidelberg (Springer); doi:10.1007/978-3-662-65770-6.
- Wolkersdorfer, C., Hasche, A., Unger, K. & Wackwitz, T. (2002): Tracer Techniken im Bergbau – Georgi-Unterbau bei Brixlegg/Tirol. – *Wiss. Mitt. Inst. Geol.*, 19:37–43, 4 Abb., 1 Tab.
- Wolkersdorfer, C., Neumann, C. & Hasche-Berger, A. (2007): Tracer Tests in the flooded Himmelfarth Fundgrube Underground Mine (Freiberg/Saxony). – *Wiss. Mitt. Inst. Geol.*, 35:157–162, 3 Abb., 1 Tab.
- Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D. K., Beckie, R., Cicerone, D. S., Elliot, T., Edraki, M., Valente, T. M., França, S. C. A., Kumar, P., Oyarzún Lucero, R. A. & Soler, A. I. G. (2020): Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations. – *Mine Water Environ.*, 39(2):204–228, 7 Abb., 2 Tab., 5 Anl.; doi:10.1007/s10230-020-00666-x.
- Younger, P. L. (1997): The longevity of minewater pollution – a basis for decision-making. – *Sci. Total Environ.*, 194–195:457–466, 5 Abb.; doi:10.1016/S0048-9697(96)05383-1.
- Younger, P. L. (2000): Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation. – *J. Contam. Hydrol.*, 44:47–69, 5 Abb., 3 Tab.; doi:10.1016/S0169-7722(00)00090-5.
- Mugova, E. & Wolkersdorfer, C. (2022): Density Stratification and Double-Diffusive Convection in Mine Pools of Flooded Underground Mines – A Review. – *Water Res.*, **214**:118033, 6 Abb., 2 Tab.; doi:10.1016/j.watres.2021.118033.