

seraufbereitung den Kosten des Ressourcenschutzes gegenüberzustellen stellt den Grundsatz der Vorsorge und des Multi-Barriernsystems in Frage. Es ist weitaus nachhaltiger und auch sicherer, möglichen Gefährdungen an der „Quelle“ entgegenzuwirken, als dies mit enormem technischem Aufwand später zu sanieren.

Das Ziel von Wasserschutzgebieten ist die langfristige Daseinsvorsorge von natürlichen Ressourcen zur Trinkwassergewinnung. Um dieses Ziel nicht zu gefährden, soll in Wasserschutzgebieten bereits die abstrakte Gefahr des Eintrags von Stoffen in das Grundwasser verringert werden. Bei der Festsetzung von Schutzbestimmungen kommt es deshalb nicht darauf an, dass ein Eintrag schon stattgefunden hat. In der Konsequenz bedeuten die Schlussfolgerungen der Autoren, dass Beschränkungen in der Landwirtschaft grundsätzlich zu teuer und auch gar nicht notwendig sind, da das Wasser erforderlichenfalls desinfiziert werden kann. Diese klassische End-of-Pipe-Philosophie kann nicht Grundlage einer nachhaltigen und auch sicheren Trinkwassergewinnung sein. Sie steht im eindeutigen Widerspruch zum Wasserhaushaltsgesetz, zur Trinkwasserverordnung und dem technischen Regelwerk von DIN und DVGW.

Berthold Niehues
DVGW-Geschäftsführer



umweltpraxis

erreicht die verantwortlichen Entscheider in der Industrie, der Entsorgungswirtschaft, bei Dienstleistern und Beratern sowie die Planungsverantwortlichen in Verbänden, Institutionen und bei Bund, Ländern und Gemeinden.

KURZCHARAKTERISTIK

umweltpraxis ist die „unabhängige“ und branchenübergreifende Fachzeitschrift für praxisnahe umwelttechnische und umweltwirtschaftliche Fragen. Die ständigen Rubriken sind u.a.:

- Abwasser / Pumpen / Kanalisation
- Abfall / Entsorgung
- Recycling / Verwertung
- Umweltmanagement

AUFLAGE

8.500

ERSCHEINUNGSWEISE

10 x jährlich



**GWV ANZEIGEN
MARKETING**
GWV Fachverlage GmbH
Abraham-Lincoln-Str. 46
65189 Wiesbaden
www.gvw-anzeigen.de

Ein Unternehmen
der Fachverlagsgruppe
BertelsmannSpringer

Sebastian Kolitsch, Manuela Junghans, Werner Klemm

Die Auswirkungen des Flutereignisses 2002 auf die Grubenwässer der Erzlagerstätte Freiberg

Effects of the Flood of August 2002 on Mine Water of the Freiberg Ore Deposit

Zusammenfassung

Das Hochwassereignis im August 2002 und die nachfolgende Flutung von Grubenteilen führte in den Freiberger Grubenwässern zu wesentlichen Änderungen von Wasserchemie und Hydraulik. Die in die Triebisch/Elbe abgegebenen Schwermetall-, Al- und As-Frachten stiegen im Hauptstollen des Freiberger Lagerstättenbezirkes auf das 40- bis 2600fache der Normalfracht an. Im Flutungstraum des Grubenfeldes Freiberg kam es zu signifikanten Änderungen der Hydraulik verbunden mit einer deutlichen Erhöhung der Schadstoffgehalte. Ein Rückgang der Schadstofffrachten auf das Ausgangsniveau bzw. eine Normalisierung des hydraulischen Regimes im Flutungstraum ist im Zeitraum von einigen Monaten bis Jahren zu erwarten.

Summary

In the central part of the Freiberg sulfide ore deposit the major flood event of August 2002 caused the flushing and flooding of large parts of the Freiberg mine causing changes in water chemistry and hydraulics. The load of heavy metals, Al and As discharging via the mine's main adit into the Triebisch/Elbe river rose up to 2600 times the normal level in the first days. Three months later, only deposit related elements such as Cd, Zn, As, and Pb showed significantly higher concentrations compared to the pre-flood average. In the flooded mine workings of the Freiberg mine major changes in the hydraulic regime in connection with strongly increased contaminant concentrations could be observed. However, some 6 1/2 months after the flood event only Cd and As showed concentrations still above the average. The re-establishment of the former hydraulic regime in the flooded mine workings, together with a normalization of mine water chemistry, can be expected within several months to years.

1 Die Grube Freiberg

Die Polysulfiderzlagerstätte Freiberg liegt in Mittelsachsen zwischen Chemnitz und Dresden. Sie ist mit rund 1100 bekannten Gängen und einer N-S Erstreckung von über 30 km eine der weltweit größten Gangerzlagerstätten. Der Freiberger Lagerstättenbezirk bildet den zentralen und wichtigsten Teil der Lagerstätte. Das im Zentrum gelegene Grubenfeld Freiberg steht im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchungen. Es umfasst bei einer Fläche von 23,7 km² (davon

der nur über einen Querschlag hydraulisch verbundene Feldteil Grube Morgenstern 7,7 km²) das gesamte Stadtgebiet Freibergs sowie sein nördliches und östliches Umland (Bild 1).

In 800 Jahren fast ununterbrochenen Bergbaus wurden sulfidische Gangverzerrungen wie Silber-Erze, Sphalerit, Galenit und Chalkopyrit und Pyrit zur Gewinnung von Ag, Zn, Pb, As, Cu und Schwefelsäure bis in Teufen von über 700 m abgebaut. Ab dem Jahre 1968 erfolgte die endgültige Stilllegung und Flutung der Gruben. Bis zum Frühjahr 1971 wurden rund 500 m vertikaler Grubenraum, das sind 2,6 Mio. m³ (Chronik 1973) von mehr als 3,5 Mio. m³ Gesamthohlräum (eigene Schätzung) bis zum Niveau des wasserabführenden Hauptstollens, dem Rothschönberger Stolln, in 225 m Tiefe geflutet (Bild 2).

Chemische Reaktionen zwischen Grubenwasser und Restzonen (Sulfidverwitterung) und dem Nebengestein Gneis führen seit Hunderten von Jahren insbesondere in der sauerstofffreien wasserungesättigten Zone aber auch im Flu-

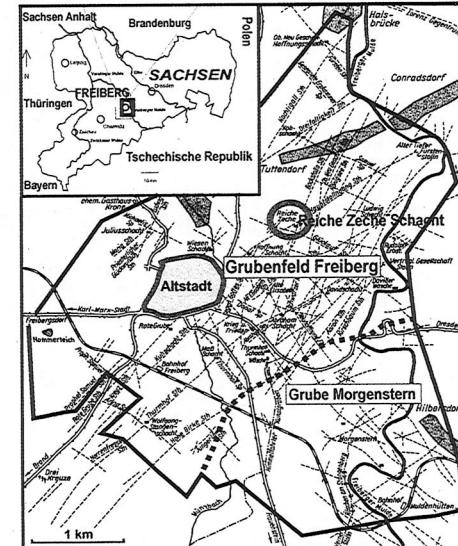


Bild 1 Das Grubenfeld Freiberg mit der Grube Morgenstern und wichtigen Gangzügen.
Figure 1 The central Freiberg mining area with the Morgenstern mine and important ore veins.

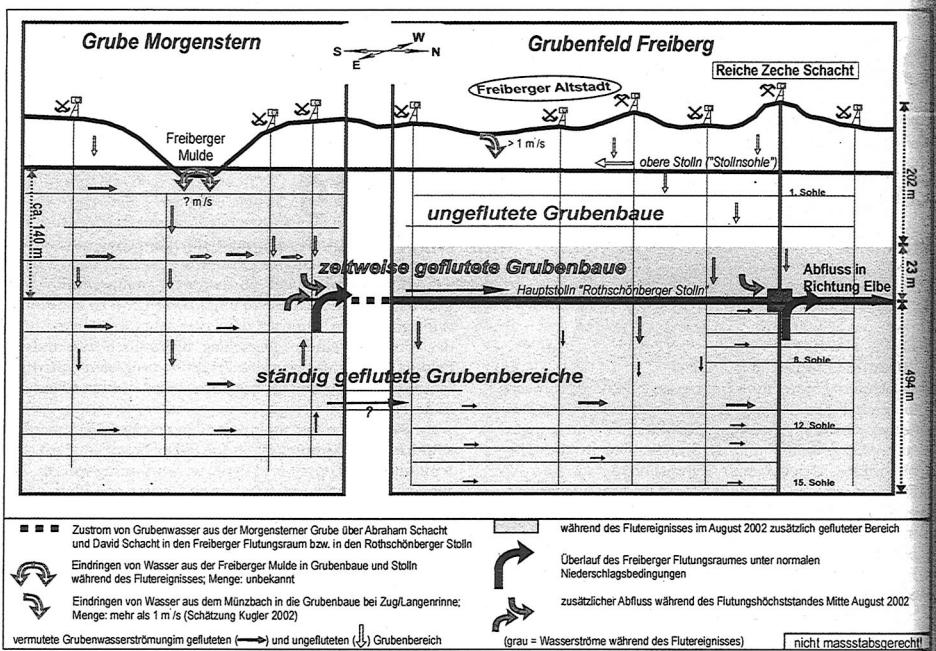


Bild 2 Schema des Grubenfeldes Freiberg mit Fließwegen des Grubenwassers im gefluteten und ungefluteten Bereich (mit Flutungshöchststand).

Figure 2 Scheme of the central Freiberg mine with flow paths of mine water in the flooded and non-flooded mine workings.

tungraum zu Lösungs- und Fällungsprozessen, die umweltrelevante Schadstoffe freisetzen (Acid Mine Drainage) bzw. fixieren.

Im Flutungsräum des Grubenfeldes Freiberg mischen sich rund $2 \text{ m}^3/\text{min}$ höher mineralisierte Sickerwässer mit ebensoviel Grundwasser (Kolitsch et al. 2001). Rund 95 % der Mischwässer steigen nach einer mittleren Verweilzeit von 100–400 Tagen (Kolitsch et al. 2003) am Entlastungspunkt des Grubenfeldes, dem Schacht Reiche Zeche, auf. Hier fließen sie zusammen mit anderen Wässern des zentralen Freiberger Lagerstättenbezirkes entlang des Rothschönberger Stollns ($> 30 \text{ m}^3/\text{min}$) über die Triebisch in die Elbe ab. Weitere $3,6 \text{ m}^3/\text{min}$ Sicker- und Grundwässer

des Grubenfeldes entwässern über zwei höher gelegene Stollen (Hauptstollen Umbruch und Königl. Verträgl. Ge. sell. Stolln) in die Freiberger Mulde und Elbe (Bild 2). Der Glücksberstern Stolln führt auf gleichem Niveau geringere Wassermengen aus dem östlich der Mulde gelegenen Teil der Grube Morgenstern in die Mulde ab. Die jährlichen Austräge aus dem Grubenfeld Freiberg über diese Stollen betragen für Zn 71 t, Cd 0,53 t, As 0,19 t und für Pb 0,17 t (Kolitsch et al. 2003). Der zentrale Freiberger Lagerstättenbezirk insgesamt (mit den Grubenfeldern Brand-Erbisdorf und Halsbrücke) trägt mit rund 37 % des Zn- und 5 % des Cd-Gesamtinhalts wesentlich zur Schwermetallbelastung der Elbe bei (Martin et al. 1994).

2 Die Flutung der Gruben

2.1 Ausgangssituation und Zielstellung

Zwischen dem 11. und 13. August 2002 erreichten die Starkniederschläge im Freiberger Stadtgebiet Mengen von über 180 mm in 24 h (IÖZ 2002). Dies sind mehr als 21 % des durchschnittlichen Jahresniederschlages von rund 840 mm (Bild 3). In den südlich gelegenen Ein-

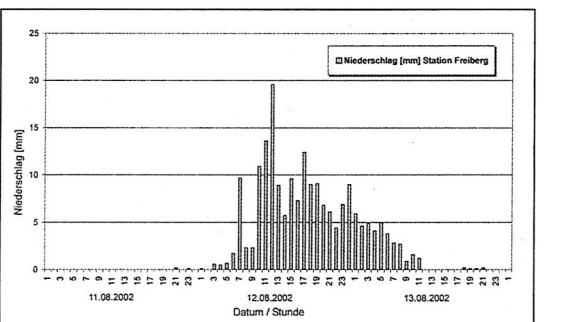


Bild 3 Niederschläge in Freiberg vom 11. bis 13. August 2002.

Figure 3 Precipitation in Freiberg August 11th to 13th 2002.

ugsgebieten des oberen Erzgebirges, wurden deutschlandweit Maxima bis über 300 mm/24 h gemessen (DWD 2002).

Diese extremen Niederschläge führten ab dem 12.8.2002 zu einem schnellen Anstieg der Pegel, insbesondere in der Elbe und ihren Zuflüssen, so auch in der Freiberger Mulde. Es folgte ein Hochwasser das in seinen Dimensionen alle bisherigen – seit Beginn der Aufzeichnungen im 19. Jahrhundert – übertraf. Dabei drangen die Wassermassen auch in die Grubenbaue des Freiberger Reviers ein und verursachten kurzfristig wesentliche Änderungen der Geochemie des Sicker- und Flutungswassers sowie der Hydraulik im Flutungsräum. Ziel dieser Arbeit war deshalb die Untersuchung der Veränderungen von Geochemie und Hydraulik der Freiberger Grubenwässer während und nach dem Hochwasser und ihre Auswirkungen auf die Vorfluter Mulde und Triebisch/Elbe bezüglich der eingebrachten Schadstofffrachten. Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Messpunkte sind zur besseren Visualisierung mit Linien verbunden. Diese stellen nicht notwendigerweise eine Linearität der Parameterentwicklung dar.

2.2 Auswirkungen der Starkniederschläge auf die Grubenbaue

Die Starkniederschläge führten zu einem beträchtlichen insgesamt nicht quantifizierbaren zusätzlichen Zustrom von Oberflächenwasser (Tageswasser) in die Freiberger Grubenbaue. Der Zustrom erfolgte direkt über den oberflächennahen Altbergbau sowie über Röschen, Wassersammler/Anzüchte und die Kanalisation. Auch die zeitweise Überstauung von Stollenmundlöchern entlang der Freiberger Mulde (Verträgliche Gesellschaft Stolln, Tiefer Stolln, Glücksberstern Stolln) führte zum Eindringen von Flutungswasser in die Gruben. Über Tagebrüche an Münzbach bei Zug/Langenrinne (ca. 1 m/s nach Kugler 2002) und Mulde (unbekannte Mengen im Bereich des Halsbrücker Spates) saßen den Grubenbauen weitere große Wassermengen zu.

Ein großer Teil der in die Gruben eindringenden Oberflächenwässer wurde über den Freiberger Hauptstollen (Rothschönberger Stolln) in die Triebisch/Elbe geleitet. Die maximale Durchflussmenge am Mundloch betrug nach Schätzungen am Mittag des 13. August ca. $840 \text{ m}^3/\text{min}$ ($14 \text{ m}^3/\text{s}$) (UBG 2003), fast das 30fache der normalen Menge. Im Verlaufe des Hochwassers erfolgten der Einsturz und die teilweise Zusetzung des Rothschönberger Stollns im Bereich des Halsbrücker Spates.

Der verminderte Abfluss zusammen mit den deutlich erhöhten Zuflüssen führte zunächst zu einer vollständigen Flutung des völlig überlasteten Stollens (Bild 4), gefolgt von einem Aufstau in den Grubenbauen. Dieser betrug im Maximum rund 23 m in der Freiberger und 140 m in der über Querschläge hydraulisch angeschlossenen Morgensterner Grube. Damit wurden 25–30 % der seit Jahrhunderten in weiten Teilen stauwasserfreien Oxidationszone des Grubenfeldes Freiberg geflutet (Bild 2). Mitte Februar 2003 lag der Wasserstand in der Freiberger Grube noch immer 2–3 m über normal, im Morgensterner Feldteil sind zurzeit keine Messungen möglich.

Große Mengen hochmineralisierter Porenlösungen, Gangwässer und Standwässer wurden während des Aufstaus mobilisiert und gingen so in das Flutungswasser über. Dies wird in der hydrochemischen Entwicklung sowohl der Wässer des gesamten zentralen Freiberger Lagerstättenbezirkes (Mundloch des Rothschönberger Stollns) als auch des Flutungswassers am Überlauf des hydraulisch isolierten Flu-

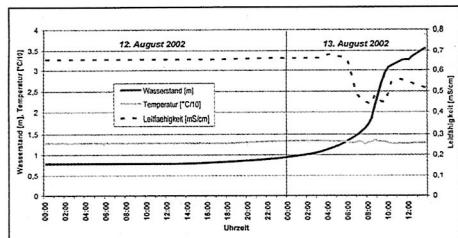


Bild 4 Entwicklung von Wasserstand, Temperatur und Leitfähigkeit im Rothschönberger Stolln am 12. und 13. August 2002.

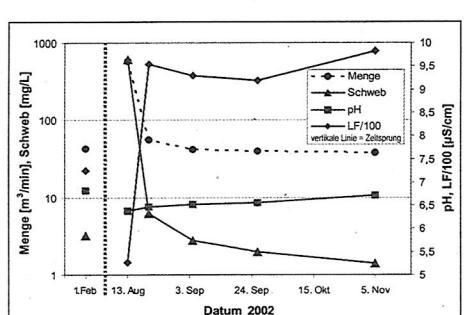


Bild 5 Wassermenge, Schweb, pH und Leitfähigkeit am Mundloch des Rothschönberger Stollns.

Figure 5 Water quantity, particle load and electric conductivity at the outlet of the adit Rothschönberger Stolln.

tungraumes des Grubenfeldes Freiberg (Überlauf am Reiche Zeche Schacht) deutlich.

3 Wasserqualität am Mundloch des Rothschönberger Stollns

Der Rothschönberger Stolln führt als Hauptabfluss des gesamten Freiberger Lagerstättenbezirkes neben den eigentlichen Grubenwässern auch große Mengen gering mineralisierten Oberflächenwassers aus dem südlichen Erzgebirge ab. Der Einfluss der Grubenwässer des Grubenfeldes Freiberg (siehe Abschnitt 4) ist hier deshalb nur noch in abgeschwächter Form zu beobachten.

Am Mundloch des Rothschönberger Stollns erreichte am 13. August 2002 der Durchfluss mit einem Tagesmittel von rund $9,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (UBG 2003) sein Maximum und fiel dann kontinuierlich bis Ende August auf ein Normalniveau von rund $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ab (Bild 5). Zum Durchflussmaximum (21fach über normal) konnte ein starker Anstieg der Schwebkonzentration (rund 170fach über normal) von 3,2 auf 608 mg/L verzeichnet werden. Der pH sank dabei leicht ab. Schwebmenge und pH weisen heute wieder Normalwerte wie vor dem Hochwasserereignis auf. Die Leitfähigkeit sank zunächst deutlich ab (Verdünnungseffekt durch Oberflächenwasser während des größten Durchflusses), stieg wenige Tage später stark an (Ausspülung hochmineralisierter Verwitterungslösungen der gefluteten Oxidationszone)

Tabelle 1 Tagesfrachten an Schweb und ausgewählten Elementen am 13.08.02 und im Jahresdurchschnitt
Table 1 Daily and average annual particle load and concentrations of selected elements August 13th 2002

	Tagesfrachten [t/d]		Faktor**
	Normalfracht*	13.08.2002	
Schweb	0,208	518.	2490
As Gesamt	0,0016	1,12	700
Al Gesamt	0,0035	6,15	1757
Al Gelöst	0,0035	0,53	151
Fe Gesamt	0,059	155	2627
Fe Gelöst	0,0064	0,0213	3,3
Pb Gesamt	0,0032	2,39	747
Cd Gesamt	0,0021	0,1	48
Cd Gelöst	0,0021	0,05	24
Zn Gesamt	0,29	11,5	40
Zn Gelöst	0,28	6,21	22
Wassermenge [m ³ /s]	0,67	9,86	14,7

* Mittelwert aus 6-11 Messwerten 1996 (Baacke 1999); Übertragbarkeit auf Mengen und Konzentrationen im Jahr 2002 überprüft

** Faktor der Vervielfachung der Normalgehalte

und lag auch 3 Monate nach dem Flutereignis 2002 bis 250 μ S/cm über dem Ausgangswert (Bild 5). Ebenso verhalten sich die meisten Hauptionenkonzentrationen, nur der K-Gehalt ist bereits zum Durchflussmaximum deutlich erhöht. Bis auf Ca und F (noch immer leicht erhöht) entsprachen die Gehalte Anfang November 2002 wieder denen vor dem Hochwassereignis.

Die extrem hohen Schwebgehalte am 13. August führten zu einem deutlichen Anstieg der As-, Al- und Schwermetallfrachten gegenüber dem Jahresdurchschnitt (Tabelle 1). Der Hauptanteil des Schwebes besteht aus Eisenverbindungen. Der Eisenanteil erhöhte sich proportional zur Schwebmenge. Bei Fe, Al, Pb und As erreicht oder übersteigt die Tagesfracht des 13.08.2002 deutlich die durchschnittliche Fracht zweier Jahre an diesen Elementen. Zum Durchflussmaximum wurden auch rund 50 % der sonst meist in gelöster Form auftretenden Zn- und Cd-Fracht partikular ausgetragen. Dafür ist neben der Ausspülung zuvor in der Grube sedimentärer Präzipitate auch der Austrag unvollständig verwitterter Primärerze verantwortlich.

Die Konzentrationen der meisten gelösten Elemente sanken zum Durchflussmaximum ab. Nur die von Zn und Cd stiegen an. Eine Woche später lagen die meisten Elementkonzentrationen wieder höher. Die Pb-Konzentration stieg dabei bis deutlich über das Normalniveau. Bis Anfang November sanken die meisten wieder auf oder unter das Ausgangsniveau ab. Nur die gelösten Konzentrationen typischer Erz-Elemente wie Cd, Pb und Zn lagen bei fallender Tendenz zu diesem Zeitpunkt noch darüber (Bild 6 und Bild 7).

4 Wasserqualität am Überlauf des Flutungsraumes des Grubenfeldes Freiberg

Das Grubenfeld Freiberg wurde am 13./14. August 2000 bis 23 m, der Grubenteil Morgenstern bis 140 m über das

Hauptstollenniveau geflutet. Die Probenahmen am noch im Frühjahr 2003 um mehrere Meter überstauten Überlauf des Flutungsraumes konnten deshalb erst vier Wochen nach dem Hochwassereignis fortgesetzt werden. Zu diesem Zeitpunkt lagen die Konzentrationen der Hauptionen deutlich unter dem Niveau der Vormonate, nur Fluorid wies ein Jahresmaximum auf. Bis Anfang März 2003, rund 200 Tage nach Flutungshöchstand, fielen die Konzentrationen aller Hauptionen auf ein bisheriges Minimum ab. Der Sulfatgehalt zeigt dabei weiterhin eine fallende Tendenz. Lediglich die Hydrogenkarbonat-, Nitrat- und Fluorid-Konzentrationen lassen keine wesentliche Veränderung gegenüber den Konzentrationen vor dem Hochwassereignis erkennen. Diese Entwicklung ist sicherlich auf den zunehmenden Einfluss der Niederschlagswässer des 13. August 2002 zurückzuführen, die nach einer mittleren Verweilzeit im Flutungsraum von 100–400 Tagen (Abschnitt 1) jetzt als breite „Niederschlagsfront“ am Überlauf entlasten.

Die Konzentrationen vorwiegend partikular gebundener Schwermetalle und von Al und As stiegen nach dem Hochwassereignis zunächst deutlich an (Bild 8, der Pfeil kennzeichnet das Hochwassereignis am 13. August 2002). Die Al- und Cu-Gehalte sanken dann wieder ab und stagnierten Anfang März 2003 auf, im Vergleich zu den Konzentrationen vor dem Hochwasser, leicht erhöhtem Niveau. Die Fe-

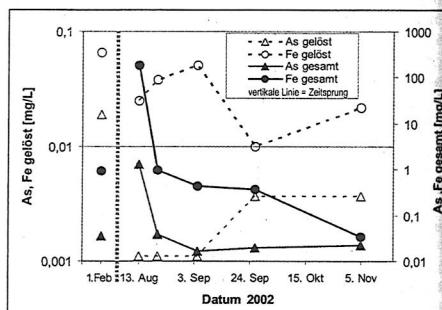


Bild 6 As- und Fe-Konzentrationen am Mundloch des Rothschönberger Stollns.
Figure 6 As- and Fe concentrations at the outlet of the adit Rothschönberger Stolln.

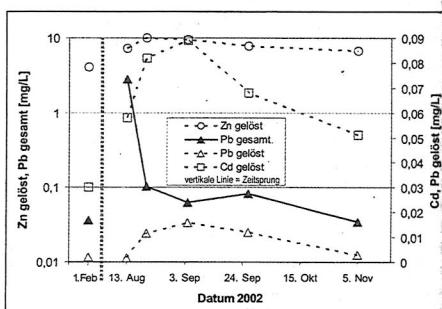


Bild 7 Zn-, Pb- und Cd-Konzentrationen am Mundloch des Rothschönberger Stollns.
Figure 7 Zn-, Pb- and Cd concentrations at the outlet of the adit Rothschönberger Stolln.

Konzentration war, im Gegensatz zu den Wässern am Mundloch des Rothschönberger Stollns, bis Ende Oktober 2002 deutlich erhöht und erreichte am 22.10. das 2 1/2fache der Ausgangskonzentration vor dem Flutereignis. Bis Anfang März 2003 sank Fe bis auf Gehalte geringfügig über denen vor dem Hochwasser. Die As-Konzentration erreichte 8 Wochen nach dem Flutungsmaximum einen Jahreshöchstwert (vierfaches der Konzentrationen der Vormonate). Bei deutlicher Tendenz war sie auch Anfang März 2003 noch deutlich erhöht (Bild 8).

Die Konzentrationen vorwiegend gelöst auftretender umweltrelevanter Schwermetalle wie Zn und Cd betragen 4 Wochen nach dem Hochwassereignis rund das Doppelte der mittleren Konzentrationen vor dem Hochwasser (Bild 9). Da erst zu diesem Zeitpunkt beprobten konnte, ist ein möglicher erhöhter Anteil partikular ausgetragenen Zn oder Cd zum Flutungsmaximum, wie am Mundloch des Rothschönberger Stollns beobachtet (Abschnitt 3), nicht nachweisbar. Bis Ende Oktober sanken die Zn- und Cd-Gehalte wieder ab, lagen jedoch noch immer deutlich über dem Niveau der ersten sieben Monate des Jahres 2002. Anfang März 2003 wies nur noch Cd erhöhte Konzentrationen auf. Im Gegensatz zu Fe lagen die Mn-Konzentrationen auch Anfang März 2003 deutlich unter den Konzentrationen vor dem Hochwassereignis (4,1 zu >10 mg/L).

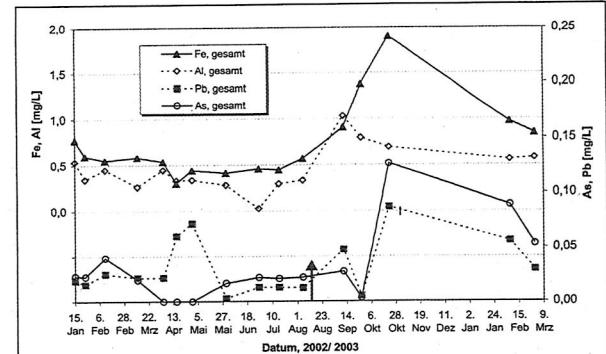


Bild 8 Fe-, Al-, As- und Pb-Konzentrationen am Überlauf des Flutungsraumes am Schacht Reiche Zeche.

Figure 8 Fe-, Al-, As- and Pb concentrations at the outfall of the flooded mine workings at shaft Reiche Zeche.

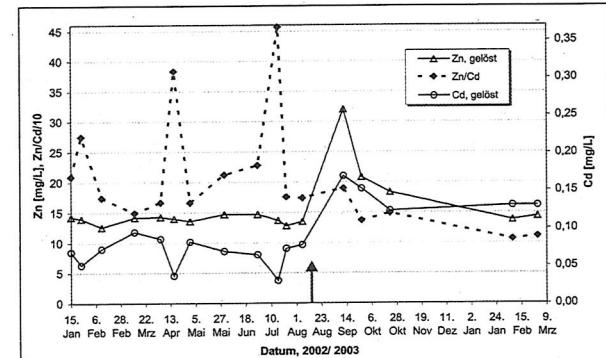


Bild 9 Zn- und Cd-Konzentrationen und Zn/Cd-Verhältnis am Überlauf des Flutungsraumes am Schacht Reiche Zeche.

Figure 9 Zn- and Cd concentrations and Zn/Cd ratio at the outfall of the flooded mine workings at shaft Reiche Zeche.

diese „Frischwasserfronten“, auf den tiefsten Sohlenniveaus beginnend, den Schacht zu und steigen auf. Da im gesamten Schacht eine aufwärtsgerichtete Strömung nachgewiesen werden konnte (Kolitsch et al. 2001 und 2003) strömen auf den höheren Sohlen zunächst weiterhin höher mineralisierte Wässer zu, ehe die „Frischwasserfront“ auch hier eintrifft. Folgt man dieser Interpretation so ist anzunehmen, dass im Verlaufe des Jahres 2003 eine Verflachung und schließlich Umkehrung der Mineralisationskurve erfolgt (Abnahme der Mineralisation), bevor sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Für die allmähliche Entlastung der „Frischwasserfront“ am Überlauf des Flutungsraumes am Schacht Reiche Zeche spricht auch die dort bis März 2003 beobachtete stetige Abnahme der Gesamtmineralisation.

Bei allen Messungen früherer Jahre konnte auch nach größeren Niederschlagsereignissen eine so deutliche Mineralisationsabnahme mit der Teufe nicht beobachtet werden. Es ist daher anzunehmen, dass eine „kritische Zustrommenge“ in den Flutungsraum überschritten werden muss, um eine solche Änderung der Grubenhydraulik hervorzurufen.

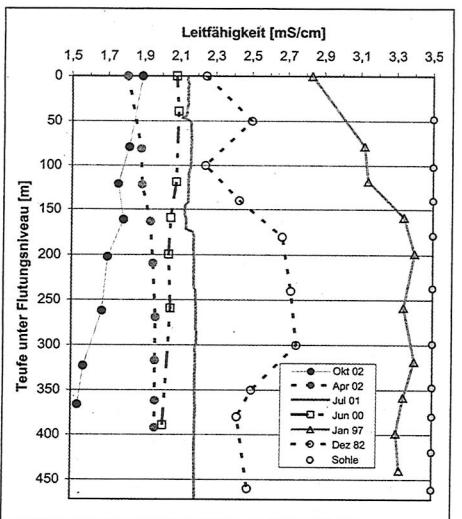


Bild 10 Zeitliche und teufenmässige Änderung der Leitfähigkeit im gefluteten Schacht Reiche Zeche.

Figure 10 Variations of electric conductivity in the flooded shaft Reiche Zeche with respect to time and depth.

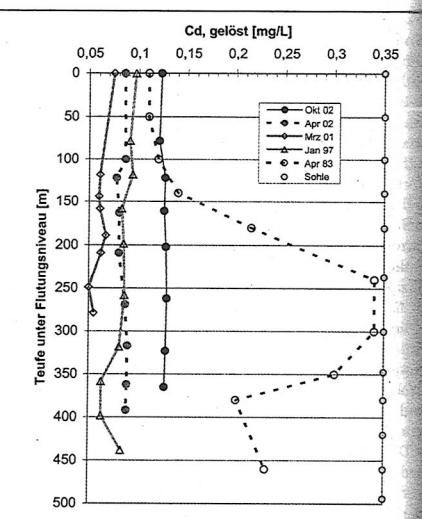


Bild 11 Zeitliche und teufenabhängige Änderung der Cadmiumkonzentrationen im gefluteten Schacht Reiche Zeche.

Figure 11 Variations of Cd concentration in the flooded shaft Reiche Zeche with respect to time and depth.

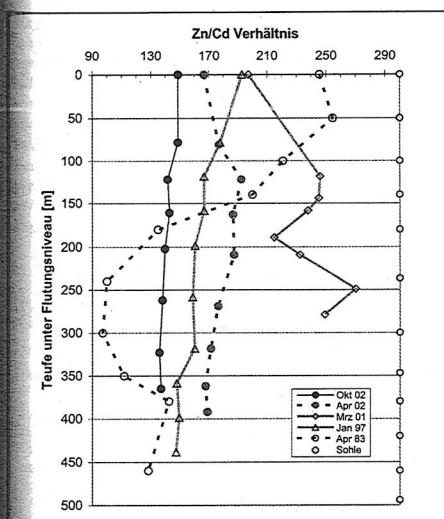


Bild 13 Zn/Cd-Verhältnis im gefluteten Schacht Reiche Zeche.

Figure 13 Zn/Cd ratio in the flooded shaft Reiche Zeche.

Die Konzentrationen vorwiegend partikular gebundener Schwermetalle, von Al und As schwanken wie auch in den Messungen der vorangegangenen Jahre mit der Teufe deutlich, oft um ein Vielfaches (z. B. Fe, As und Pb). Dafür sind im Schacht verteilte „Schwemwolken“ verantwortlich, die langsam aufsteigen. Da die Schachtbauten vor der Flutung nicht entfernt und später verschiedene Materialien im Schacht versenkt wurden, kann auch durch den Kontakt mit dem Probenehmer Sediment freigesetzt worden sein. Die Interpretation der Vorgänge im Flutungsräum vor und nach dem Flutungereignis stützt sich deshalb vor allem auf die Auswertung der gelösten Stoffgehalte.

Die Konzentration von Cd nach der Flut (Messung Oktober 2002) ist über die gesamte Teufe nahezu konstant (Bild 11), die von Zn sinkt geringfügig mit der Teufe (Bild 12). Die genannte „Frischwasserfront“ ist anhand dieser Entwicklung nicht erkennbar, zumal die Konzentrationen beider Elemente deutlich über denen aller bisherigen Messungen seit 1983 liegen. Cd erreicht im Bereich der oberen Sohlen die bisher höchsten gemessenen Gehalte überhaupt. Auch die gelösten Pb- und As-Gehalte sind gegenüber früheren Messungen deutlich erhöht.

Die hohen Konzentrationen dieser lagerstättentypischen Kontaminanten im Flutungswasser sind sicherlich auf die genannte Teilstützung der Gruben Freiberg und Morgenstern zurückzuführen. In diesen gut belüfteten Bereichen findet seit Jahrhunderten eine intensive Sulfidverwitterung statt, die zu extrem hohen Schwermetallgehalten in Poren- und Ganglösungen führte. Während der Flutung wurde ein Teil dieser hoch mineralisierten Lösungen ausgewaschen und in den Flutungsräum gespült. Das Zn/Cd-Verhältnis widerspricht den Einfluss der Sulfidverwitterung auf die Grubenwasserzusammensetzung. Das durchschnittliche Freiberger Erz zeigt ein Zn/Cd-Verhältnis um 100. Dieser Wert findet sich auch in den durch die

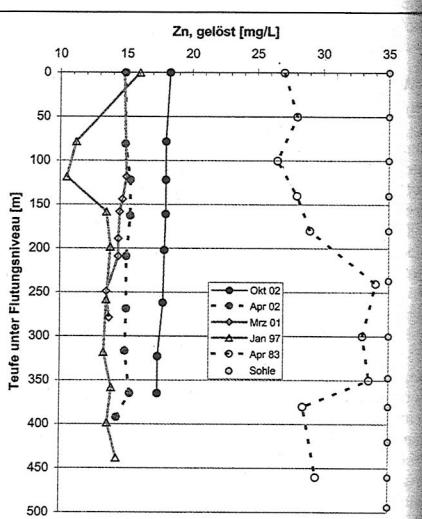


Bild 12 Zeitliche und teufenabhängige Änderung der Zinkkonzentrationen im gefluteten Schacht Reiche Zeche.

Figure 12 Variations of Zn concentration in the flooded shaft Reiche Zeche with respect to time and depth.

zur Erhöhung der Zn- und Cd-Gehalte gegenüber Sulfat geführt haben. Und viertens, kann eine Verdrängung adsorptiv gebundenen Zn und Cd aus Tonminerale durch das hochmineralisierte Flutungswasser nicht ausgeschlossen werden. Allerdings fehlen im Bereich des Grubenfeldes Freiberg quantitative Daten, die eine Bilanzierung erlauben.

6 Die Auswirkungen des Hochwasserereignisses auf die höher gelegenen Stollen

Das Teilstück Morgenstern wurde bis zum Niveau der oberhalb des Rothschönberger Stollins gelegenen Stollen durch sich aufstauende Wässer geflutet, die z. B. über den Glücksilberstern Stolln und den Tiefen Stolln eindrangen. In der Grube Freiberg war lediglich der Königlicher Verträgliche Gesellschaft Stolln, über dem Flusswasser in die Grubenbäume floss, von einem Rückstau durch die Freiberger Mulde betroffen.

Der Großteil der eindringenden Niederschlagswässer verfiel auf die tiefere Rothschönberger Stollnsohle und wurde dort abgeführt. Deshalb zeigten die oberen Stollen während des Hochwassers zwar erhöhte Abflüsse, die sich jedoch schnell wieder normalisierten. Fünf bzw. acht Wochen nach dem Hochwasserereignis wurden der Hauptstollen Umbruch und Königlicher Verträgliche Gesellschaft Stolln der Grube Freiberg sowie der Glücksilberstern Stolln der Grube Morgenstern an den Mundlöchern beprobt. Ein Vergleich mit geeigneten Daten vor dem Hochwasserereignis (Tabelle 3) ergab beim Königlicher Verträgliche Gesellschaft Stolln lediglich eine geringfügige Erhöhung der meisten Schwermetall- und As-Konzentrationen nach dem Hochwasser. Beim Hauptstollenumbruch konnten geringere Gehalte an Pb und gelöstem Fe beobachtet werden. Die Gesamtmineralisation (Sulfat und Mg) verringerte sich geringfügig. Der Glücksilberstern Stolln wies bei ähnlicher Gesamtmineralisation geringere Cd- und erhöhte As-Konzentrationen auf.

Tabelle 2 Zn, Cd und Sulfatkonzentrationen am Überlauf des Flutungsräumes vor und nach dem Flutereignis

Table 2 Zn-, Cd- and sulfate concentrations at the outfall of the flooded mine workings before and after the flood event

Konzentration [mg/L]	Zn	Cd	Sulfat	Sulfat/Cd	Sulfat/Zn	Zn/Cd*
12.03.02	14,2	0,091	922	10 133	65	156
04.04.02	14,3	0,082	862	10 577	60	174
30.04.02	13,6	0,070	887	12 653	65	194
30.05.02	14,7	0,065	953	14 662	65	226
28.06.02	14,7	0,058	920	15 862	63	253
16.07.02	13,7	0,078	935	11 987	68	176
23.07.02	12,8	0,074	951	12 851	74	173
06.08.02	14,0	0,081	974	12 069	70	173

12.-13. 08. 2002 Flutung der Freiberger Grube

11.09.02	32,0	0,169	920	5444	29	189
27.09.02	20,8	0,155	844	5445	41	134
22.10.02	18,3	0,126	794	6302	43	145
07.02.03	13,8	0,130	735	5654	53	106
01.03.03	14,4	0,130	704	5415	49	111

* Zn/Cd im Primärerz und in den Verwitterungslösungen der Gänge beträgt rund 100 (Baacke 1999)

Tabelle 3 Wasserqualität der Freiberger Stollen vor und nach dem Hochwasserereignis vom August 2002
Table 3 Water quality in Freiberg tunnels before and after the flood event in August 2002

	Hauptstollen Umbruch ¹		Kgl. Vertrgl. Gesell. Stollen ²		Glücksilberstern Stollen ³	
	vor HW	nach HW	vor HW	nach HW	vor HW	nach HW
LF [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	779	686	541	547	2060	2030
Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	9,4	9,7	17,3	17,5	12,2	10,4
PH	6,86	6,64	5,34	4,98	4,98	4,52
[mg/L]						
Schweb	9,6	6,08	n. b.	28,93	n. b.	0,852
Na	24	24,9	18,4	15	130	140
K	5	5,5	3,7	4,4	16,7	18,7
Ca	82	81,7	51,8	52,6	209	253
Mg	34	25	18,2	18,9	34,6	40,9
Sulfat	287	239	199	197	865	811
Chlorid	53	62,4	37,1	31,2	212	234
[$\mu\text{g/L}$]						
Zn ges.	6600	5440	9320	11700	49000	55000
Cd ges.	40	41,7	86,8	106	1750	1280
As ges.	40	46,6	14,8	27,9	70,7	178,3
Pb ges.	53	17,5	15,7	16,1	3320	3020
Fe ges.	3000	2930	943	1710	300	780
Fe gel.	400	210	87,8	80,0	490	347

HW: Hochwasserereignis; n. b.: nicht bestimmt

¹ vor HW: arithmetisches Mittel aus 6–11 Einzelproben 1996; nach HW: 20.09.2002

² vor HW: 7. Mai 2002; nach HW: 20.09.2002

³ vor HW: 8. Oktober 2001; nach HW: 10. Oktober 2002

Einschränkend muss bemerkt werden, dass sich der Vergleich, außer beim Hauptstollenumbruch, auf Einzelbeproben stützt, die ein Jahr bzw. drei Monate vor dem Hochwasserereignis unter ähnlichen Witterungs- und Abflussbedingungen durchgeführt wurden.

7 Ausblick

Der kontinuierliche Eintrag gering mineralisierten Oberflächenwassers in die Grube zusammen mit den dargestellten Entwicklungen der Wasserchemie im Rothschönberger Stollen und im Flutungsraum der Grube Freiberg lässt mittelfristig, d. h. in einigen Monaten bis Jahren, einen Rückgang bzw. Wideranstieg aller Schadstoffkonzentrationen und Hauptionengehalte auf das Niveau vor dem Hochwasserereignis erwarten. Diese Entwicklung deutet sich am Überlauf des Flutungsraumes und am Rothschönberger Stollen bereits an und scheint im Bereich der oberen Stollen bereits abgeschlossen zu sein. Ein Absinken der Schadstofffrachten deutlich unter das Ausgangsniveau, hervorgerufen durch einen so genannten „Auswascheffekt“ hochmineralisierter Grubenwässer während der Überstauung, ist nicht zu erwarten.

Aufgrund der Einmaligkeit des Hochwasserereignisses ist im Flutungsraum des Freiberger Grubenfeldes eine Wiedereinstellung der ursprünglichen Grubenwasserzirkulation zu erwarten, die allmählich zu einer teufunenabhängigen Homogenisierung der Wasserqualität von Eintritt in den Entlastungsschacht Reiche Zeche führen wird. Eine zeitliche Abschätzung dieses Vorganges ist auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nicht möglich.

Danksagung

Ein Großteil der Untersuchungen wurde im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 546 durchgeführt. Wir danken zudem Herrn Dr. A. Kluge, dem IÖZ Freiberg und der UBG Radebeul für die freundliche Bereitstellung von Messdaten.

Literatur

- Baacke, D. (1999): Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube Freiberg/Sachsen. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.
- Chronik (1973): Autorenkollektiv, Chronik der Grube Freiberg. Unveröffentl. Bericht. Staatsarchiv Dresden, Außenstelle Freiberg.
- IÖZ (2002): Daten der Messstation des Interdisziplinären Ökologischen Zentrums, AG Geoökologie der TU Bergakademie Freiberg.
- DWD (2002): Amtliches Gutachten „Beurteilung des Niederschlagsgeschehens im Zusammenhang mit der Hochwassersituation im August 2002“ (vorläufige Einschätzung). Deutscher Wetterdienst, Berlin.
- Kolitsch, S.; Junghans, M.; Klemm, W.; Tichomirowa, M. (2001): Der Flutungsraum der Gangerzgrube Freiberg: Hydrochemie, Isotopengeochemie und Hydraulik. Wissenschaftl. Mitteil. Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg 18, 14–26.
- Kugler, J. (2002): Persönliche Mitteilung, TU Bergakademie Freiberg.
- Martin, M.; Beuge, P.; Kluge, A.; Hoppe, T. (1994): Grubenwässer des Erzgebirges, Quelle von Schwermetallen in der Elbe. Spektrum d. Wiss. 5, 102–107.
- Kolitsch, S.; Junghans, M.; Klemm, W.; Degen, T.; Scheel, M. (2003): Hydrochemical and Hydraulic Processes in a Flooded Vein Ore Mine in Freiberg, Saxony. Mine Water and Environment (in Veröffentlichung).
- UBG (2003): Schriftliche Mitteilung über die vorläufigen Ergebnisse der Durchflussmessungen am Mundloch des Rothschönberger Stollns v. 27.01.2003. Staatl. Umweltbetriebsgesellschaft, Radebeul.

Anschrift der Verfasser

Dipl. Geol. Sebastian Kolitsch (kolitsch@merkur.hrz.tu-freiberg.de), TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09596 Freiberg; Dipl. Geol. Manuela Junghans, (junghans@mailstud.tu-freiberg.de) und Prof. Dr. habil. Werner Klemm (wklemm@mineral.tu-freiberg.de), TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie, Brennhausgasse 14, 09596 Freiberg

Wilhelm Ripl, Klaus-Dieter Wolter

Intakter Wasserhaushalt und Hochwasserschutz

Intact Water Balance and Flood Protection

1 Einleitung – Wasserhaushalt und Hochwasserschutz

Etwa 20 Mrd. Euro Schaden bei den Hochwässern im Einzugsgebiet der Elbe und Donau. Ökologische Schäden werden zu einer schweren Belastung unserer Volkswirtschaft. Welche naturwissenschaftlichen Erkenntnisse sind die Grundlage zur Erklärung der Prozesse und führen zu national umsetzbaren, wirkungsvollen Maßnahmen gegen eine fortgesetzte Wiederholung solcher Katastrophen?

Die über uns hereingebrochene Sintflut ist kein Einzelfall. In anderen Teilen Europas und der Welt gab es in den letzten Jahren ähnliche Überflutungen. Die im Erzgebirge in 48 Stunden gefallenen Niederschläge von 400 l/m² im August oder in Frankreich von 650 l/m² im September werden in Zukunft zu unseren alljährlichen Nachrichten gehören, wenn nicht gehandelt wird.

Auch wenn die Entwicklung in Deutschland noch nicht das Ausmaß der spanischen Wüstenausbreitung erreicht hat, so sind im norddeutschen Raum in den letzten 30 Jahren Rückgänge der Sommerniederschläge zu verzeichnen, die für Land-, Forst- und Wasserwirtschaft ein Problem darstellen (Ripl et al. 1996, Freude 2001). In Bild 1 ist dieser Rückgang im Juli für die 20-jährige Jahresreihe 1970 bis 1989 für Berlin Dahlem dargestellt, an anderen norddeut-

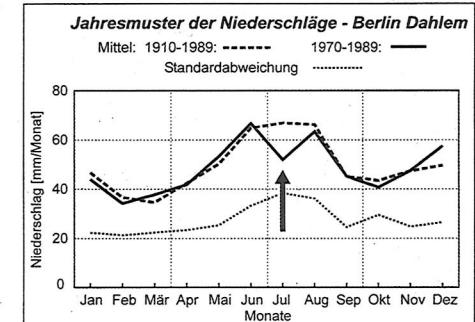


Bild 1 Jahresmuster (Monatsmittelwerte) der Niederschläge in Berlin Dahlem 1910 bis 1989 (—) und 1970 bis 1989 (—). Standardabweichung 1910 bis 1989 pro Monat (o o o). Tagesdaten des Niederschlags: Meteorologisches Institut Berlin Dahlem (Auswertung Ripl et al.).

Figure 1 Annual pattern (monthly mean) of precipitation in Berlin Dahlem 1910 to 1989 (—) and 1970 to 1989 (—). Standard deviation 1910 to 1989 on a monthly basis (o o o). (daily data of precipitaton: Meteorological Institute Berlin Dahlem (Evaluation Ripl et al.).