

# **Hydrogeochemie, Wärmehaushalt und Strömung des Flutungswassers einer untertägigen Erzgrube**

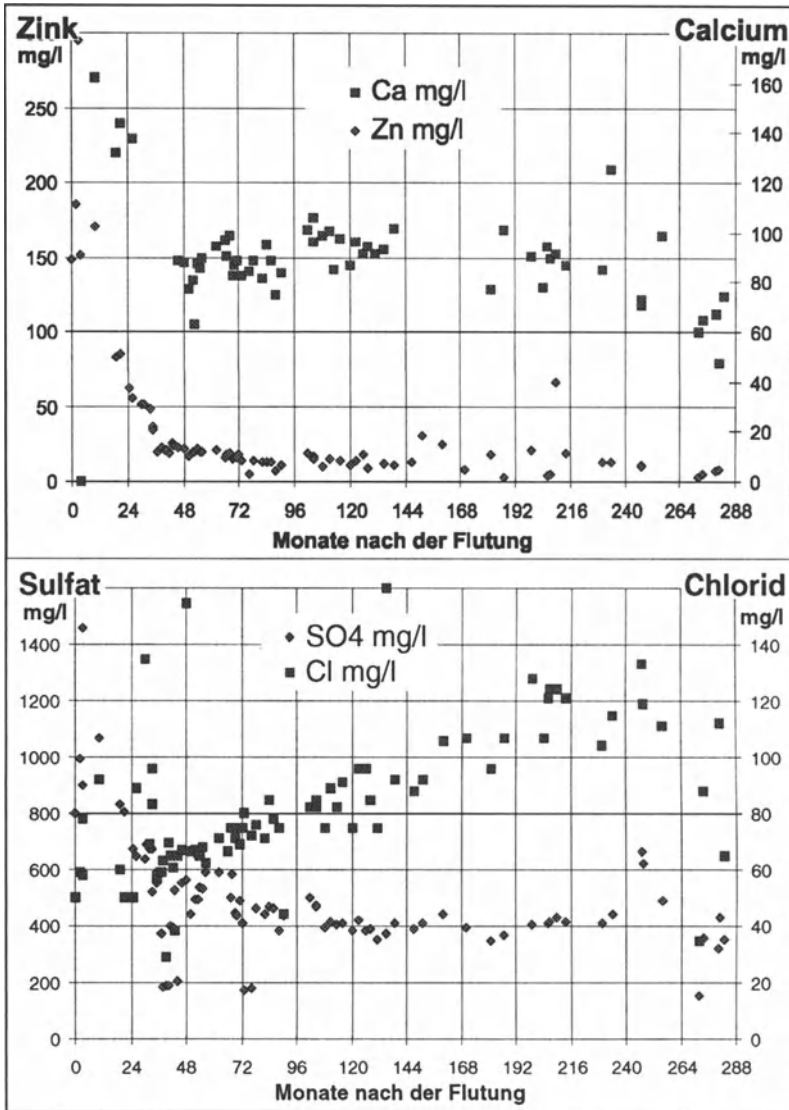
Delf Baacke und Thomas Degner

## **Einleitung**

Die Erzgänge der Polymetallsulfidlagerstätte Freiberg (Sachsen) wurden seit dem 12. Jahrhundert abgebaut. Das Hauptinteresse galt zunächst dem Silber aus dem Galenit, später hauptsächlich dem Blei und Zink. In der letzten Betriebsperiode drang der Bergbau in der „Freiberger Himmelfahrt Fundgrube“ bis in 700 m Tiefe vor. Er hinterließ zum Zeitpunkt seiner Flutung um 1970 ein Hohlraumvolumen von ca. 2,6 Mio. m<sup>3</sup> bis zum tiefsten wasserabführenden Hauptstolln (Rothschönberger Stolln) in ca. 220 m Tiefe. Seit dem Überlauf des Grubenreviers haben sich die hydrogeochemischen Eigenschaften des Flutungswassers stark geändert. Aus der Zusammenfassung historischer Daten und der Auswertung neuer Ergebnisse wird Bilanz über die Entwicklung des Flutungsraumes gezogen. Es lassen sich Ursachen geochemischer Signaturen, eine Modellvorstellung von der Entwicklung des Strömungs- und Temperaturregimes und damit neue Aspekte für die Bewertung bzw. Nutzung von Flutungsräumen ableiten.

## **Geochemische Entwicklung und Bedeutung des Flutungsraumes**

Die entscheidenden Elementfrachten, die aus dem Hauptstolln (Rothschönberger Stolln) des Lagerstättenbezirks Freiberg zunächst in den Fluß Triebisch und bei Meißen in die Elbe gelangen, entstammen dem Flutungsraum der Freiburger Grube „Himmelfahrt Fundgrube“. Sie liefert 12-16% der Gesamtwassermenge dieses Stollns (Baacke et al. 1996). Durch weitere Zuläufe von gering mineralisierten Kluftwässern in den Stolln werden die Konzentrationen lediglich verdünnt (Degner 1996). Anhand stichprobenartiger Datenerfassung wird geschätzt, daß bis zu 20% der Zn- und Cd-Fracht der Elbe aus der Freiburger Grube stammen (Martin et al. 1994, Baacke 1995, Degner 1996).



**Abb. 1a (oben).** Entwicklung der Ca- und Zn-Konzentration am Mundloch des Hauptstolln nach der Flutung der Freiburger Grube 1971

**Abb. 1b (unten).** Entwicklung der Anionenkonzentration am Mundloch des Hauptstolln nach der Flutung der Freiburger Grube 1971

Die Veränderungen des Wasserchemismus im Flutungsraum seit der Flutung lassen sich durch die Entwicklung der Stoffkonzentrationen im Wassers des Stollns abschätzen (Abb. 1a, 1b) (Milde 1973, Sacher 1995).

Zwei Monate nach dem Überlauf des Flutungsraumes (März 1971) erreichte die Mineralisation am Stollnmundloch ihr Maximum (Zn, Cd,  $\text{SO}_4$ , Fe, Mn) und der pH-Wert mit 3,7 sein Minimum. Die Ursache ist in der Auswaschung von verwitterten Gangarten und wasserlöslicher Sulfaten, die sich während der oxidierenden Verhältnisse zu Zeiten der Betriebsperiode aus den Sulfiden (Pyrit, Galenit, Arsenopyrit, Zinkblende) gebildet hatten, zu suchen. Nach ca. vier Jahren konnte eine weitestgehend gleichmäßige Entwicklung beobachtet werden. Die Konzentrationen lagerstättentypischer Elemente ( $\text{SO}_4$ , Fe, Zn, Pb, As, Cd) sinkt immer langsamer ab. Sie liegen heute z.B. für  $\text{SO}_4$  bei ca. 30% und für Zn bei nur 0,03% der Maximalkonzentrationen nach der Flutung. Der pH-Wert ist von 3,7 auf über 7 gestiegen. Die Cl-Konzentration stieg seit der Flutung annähernd linear auf fast das Doppelte an, der Na-Gehalt stieg seit 1982 (wahrscheinlich sprunghaft) auf ein Vielfaches an. Die Ca-Konzentration blieb lange Zeit annähernd stabil, bis sie seit den achtziger Jahren kontinuierlich nachließ.

Die genannten Entwicklungen sind dem Einfluß des Flutungsraumes der Grube Freiberg zuzuordnen, da sich andere Einflüsse nicht bzw. nur saisonal änderten. Der Flutungsraum unterlag in dieser Zeit wahrscheinlich einem Zufluß neutralisierender Grundwässer, ebenso wurde die Sulfidoxidation durch die geringe Zufuhr freien Sauerstoffs in das geflutete Grubengebäude weiter eingeschränkt. Die langfristige Abnahme der Schwermetalle und des Sulfats resultiert aus dem limitierten Angebot löslicher sekundärer Mineralphasen im ehemals luftgefüllten Grubenraum sowie der Umwälzung bzw. des Austauschs der höher mineralisierten Flutungswässer mit nachströmendem, geringer mineralisiertem Wasser.

## **Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Tiefenprofil**

Die Beprobungen des Flutungswassers am Überlauf (Richtschat) im Tiefenprofil von 1982 (Peter 1983) und eigene Untersuchungen 1997 zeigen, daß sich der Flutungsraum nach der Tiefe und am Überlauf verändert. Die K- und Na-Konzentrationen stiegen auf den tieferen Sohlen an, die Na-Konzentration am Überlauf um das Fünffache. Die Konzentrationen aller anderen, vor allem gelösten Inhaltsstoffe gehen zurück. Lediglich die Mg-Konzentration änderte sich nicht. Es ist möglich, daß anthropogene Einträge, z.B. der Einsatz Mg-Cl-haltigen Streusalzes (Winterdienst), den natürlichen Konzentrationsrückgang kompensieren. Während 1982 die Konzentrationen von lagerstättenrelevanten oder lithogenen Inhaltsstoffen (Zn, Cd, Ca) in den Teufen anstieg, in denen die größten Abbauvolumen aufgefahren wurden (7.-13. Sohle) (Bergarchiv), sind die Werte heute über die gesamte Tiefe fast gleich (7.-15. Sohle). Die Elemente Pb, Zn und Fe werden im Bereich der oberen zwei gefluteten Sohlen angereichert, während andere Inhaltsstoffe an gleicher Stelle verdünnt werden.

## Aktuelle Hydrochemische Charakteristik des Flutungsraumes

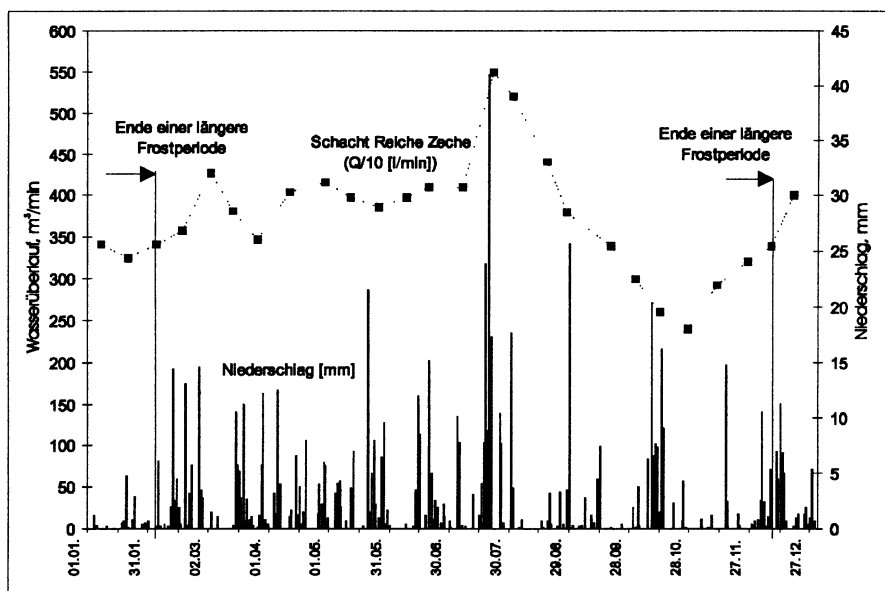
Das Jahresmonitoring 1997 erwies sich für die Feststellung der aktuellen Mittelwerte und Schwankungsbreite hydrochemischer Parameter des Flutungswassers (Tabelle 1) sowie die Abhängigkeit von Niederschlag und Frostperioden als sinnvoll. Bezüglich der Abflußmenge können nur Tendenzen, keine eindeutigen Korrelationen festgestellt werden.

Am Mundloch des Hauptstollns macht sich dagegen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Mineralisation und Wassermenge bemerkbar, was die verdünnende Wirkung anderer Zuläufe anzeigt. Die Leitfähigkeit und der pH-Wert sinken bei erhöhtem Abfluß. Die Konzentrationen von  $\text{SO}_4$ , Na,  $\text{HCO}_3$  werden geringer, die  $\text{NO}_3$ -Konzentration steigt an. Als Ursache für dieses Verhalten wird die Schwankung des Grubenwasserzulaufs bei gleichzeitig relativ stabilem Grundwasserzustrom angesehen.

Nach einsetzendem Tauwetter wurde ein Abflußmaxima nach ca. einem Monat registriert, nach einem Starkregenereignis (13% des Jahresniederschlags) schon

**Tabelle 1.** Mittlere Konzentrationen, Minima und Maxima von gelösten Wasserinhaltsstoffen am Überlauf des Flutungsraumes im Jahr 1997

[mg/l]	Mittelwert	Min. Max.	Fracht [t/a]
<b>Lf</b> [ $\mu\text{S/cm}$ ]	2667	2570 2840	0,95
<b>PH</b>	6,07	5,52 6,26	0,006
<b>T<sub>w</sub></b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	18,4	17,8 19,2	0,13
<b>Schweb</b>	5,7	2,0 12,7	0,081
<b>Ca</b>	290	273 305	2,4
<b>Na</b>	244	196 284	22
<b>HCO<sub>3</sub></b>	101	82 111	0,11
<b>Cl</b>	210	177 242	0,047
<b>SO<sub>4</sub></b>	1200	1032 1440	28
<b>Al</b>	0,5	0,2 1,0	0,95
<b>As</b>	0,003	0,001 0,017	0,006
<b>C</b>	0,07	0,04 0,11	0,13
<b>Cu</b>	0,041	0,005 0,083	0,081
<b>Fe</b>	1,2	0,5 2,3	2,4
<b>Mn</b>	11,1	9,6 12,3	22
<b>Ni</b>	0,058	0,048 0,065	0,11
<b>Pb</b>	0024	0,010 0,032	0,047
<b>Zn</b>	14,4	11,1 16,6	28



**Abb. 2.** Wassermengen am Überlauf des Flutungsraumes und Niederschlag 1997 in Freiberg

nach wenigen Tagen (Abb. 2). Im Spätsommer (Ende September) wurden bei niedrigster Wasserführung die höchste Temperatur mit 19,2°C ermittelt.

Einen entscheidenden Einfluß hat die Fließgeschwindigkeit (Wassermenge) auf den Austrag von partikulärem Material. Über 10 mg/l Schweb wurden bei hohem Abfluß im Frühjahr gegenüber 2 mg/l im November/Dezember gemessen.

Die Flockung des gelösten Eisens als hydratisiertes Eisenhydroxid setzt sich aufgrund der Sauerstoffzufuhr direkt nach dem Überlauf des Flutungsraumes in den Hauptstolln fort. Die dabei stattfindende Adsorptions- und Kopräzipitationsvorgänge steuern die Konzentration an gelösten Schwermetallen und As im Mischwasser aus dem Flutungswasser und dem Stollwasser. Bei hohen gelösten Eisengehalten im Überlaufwasser wird mehr Eisenhydroxid gebildet. Somit stehen mehr Adsorptionsplätze zur Verfügung, an die auch gelöstes As und Pb sowie Cu aus dem Stollwasser angelagert werden. Dies führt zu einer Verarmung des Mischwassers an diesen Elementen (Tabelle 2b). Die Erhöhung der Adsorptionskapazitäten durch die Zunahme an Eisenhydroxiden kann nur tendenziell beurteilt werden, da durch die Filtration gleichzeitig wachsende Artefakte durch Glogging und Kondensationspolymerisation auf der Filteroberfläche zu erwarten sind.

Die von Sorptionsprozessen an Eisenhydroxide weniger beeinflussten Elemente Cd und Zn werden im Mischwasser dagegen stets angereichert. Die Hauptelemente erhöhen die Gesamtmineralisation des Stollwassers signifikant (Anreicherung im Stolln: Tabelle 2a).

**Tabelle 2a (links).** Anreicherungsfaktoren für gelöste Wasserinhaltsstoffe im Stolln-mischwasser nach dem Zustrom des Flutungswassers der Grube Freiberg

**Tabelle 2b (rechts).** Anreicherungs-/Verarmungsfaktoren für As, Cd, Cu, Pb und Zn im Stolln-mischwasser nach dem Zustrom des Flutungswassers mit hoher bzw. geringer Fracht Fe(gelöst)

	Faktor (3 Beprobungen)
Lf	1,8
Cl <sup>-</sup>	3,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,1
K <sup>+</sup>	1,9
Na <sup>+</sup>	5,4

	Faktor bei Fe( <sub>&lt;450</sub> )=0,3 mg/l	Faktor bei Fe( <sub>&lt;450</sub> )=0,05 mg/l
As	0,2	2,0
Cd	1,4	2,0
Cu	0,6	1,5
Pb	0,3	2,0
Zn	1,5	2,4

## Modellvorstellung über das Strömungs- und Temperaturregime

Aus den Eigenschaften des Flutungsraumes ergeben sich wichtige theoretische Konsequenzen und rechnerische Modellansätze.

Freie horizontale Strecken sind bestimmend für die Anbindung der Sohlen an sohlenübergreifende Schächte, Hauptförderrollen und Überhaun. Die Abbaue stehen aufgrund ihrer saigeren bis tonnenlägigen Stellung und ihrer flächenhaften Ausdehnung (Abbauvolumen siehe Abb. 5, links) dem Grundwasseranstrom aus dem Kluftwasseraquifer Gneis als „Grundwasserkollektoren“ entgegen. Vertikale Rollen und Überhaun dienen der Anbindung der Abbaue sowie der Zuflüsse des freien Grubenwassers an das horizontale Streckennetz.

Aufgrund der geringen Öffnungsbreite der Klüfte im Verhältnis zu Abbauen und Strecken sind die Strömungswiderstände (Druckverluste) im Kluftsystem sehr viel größer als in offenen Auffahrungen. Das Grundwasser im Kluftgrundwasserleiter Gneis wird schon bei wenigen Metern unter der Erdoberfläche (bei ca. 400 m NN) angetroffen (Berrios 1995). Der Überlauf in den Hauptstolln markiert den (tiefs-ten) Wasserstand im Flutungsraum bei ca. 200 m NN. Es wird von einer stationären Strömung und damit von einem weitestgehenden Gleichgewicht zwischen treibenden Druckkräften und hemmenden Reibungskräften (Strömungswiderstand) zwischen den hydraulischen Systemen Kluftwasseraquifer, ungesättigter Grubenbereich und Flutungsraum ausgegangen.

Motor der gerichteten Strömung vom Kluftwasseraquifer zum Flutungsraum sowie im Flutungsraum ist die erzwungene Konvektion verursacht durch nachströmendes freies Grubenwasser und Grundwasser. Treibende Kraft ist der Druckgradient (hydraulische Gradient) im durchströmten Raum bzw. die Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausgangsquerschnitt (Merker 1987). Überlagert wird die erzwungene Konvektion von freier Konvektion (Merker 1987), die durch Reakti-

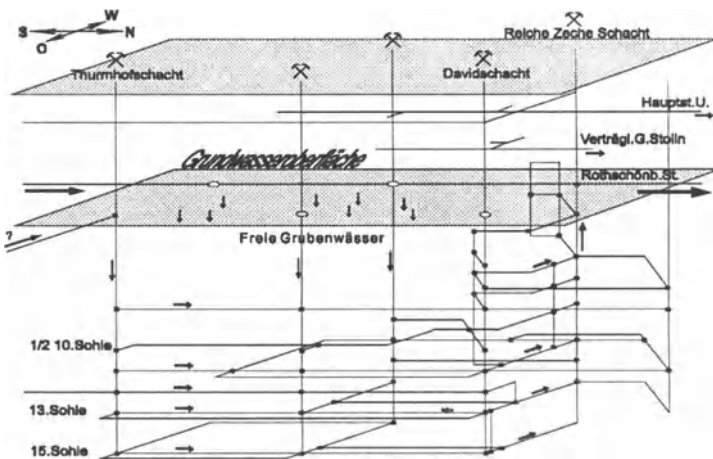
onswärme exothermer Reaktionen und durch den geothermischen Gradienten verursacht wird.

## Eigenschaften des Flutungsraumes

Eine wichtige Basis für die Diskussion der Ergebnisse des jahrzehntelang andauernden Monitorings am Mundloch, des Jahresmonitorings oder der tiefendifferenzierten Beprobung eines Flutungsraumes ist eine genaue Vorstellung über die geometrische Beschaffenheit des Flutungsraumes (Abb. 3). Sie gründet auf der Auswertung umfangreicher historischer Daten über die Entwicklung des Bergbaus (Bergarchiv) sowie auf Ergebnissen aktueller Untersuchungen der Grube. Für eine Vorstellung des gefluteten Hohlraums sind bergbauliche und hydrogeologische Randbedingungen entscheidend.

## Geometrie des Flutungsraumes

Das Volumen des Flutungsraumes beträgt ca. 2,5 Mio. m<sup>3</sup> (Abb. 4). Davon entfallen ca. 70% auf Abbaue, 20% auf horizontale und 10% auf vertikale Auffahrungen. Die Ausdehnung beträgt ca. 7 bis 10 km<sup>2</sup> (Grundriß) \* 2 km<sup>2</sup> \* 1 km<sup>2</sup> bei einer Tiefe von ca. 460 m. Die abgebaute Gangfläche beträgt ca. 2,8 km<sup>2</sup>. Der Hohlraumanteil „Flutungsraum“ im Freiburger Gneis beträgt 0,01 bis 0,02 %. 3 von 12 gefluteten Sohlen sind aufgrund ihres geringen Streckenumfanges oder der hydraulischen Isolation vom Überlaufschacht von untergeordneter Bedeutung für die Strömung (Abb. 4, links). Die 15. Sohle markiert das tiefste Niveau bei ca. – 260 m NN.



**Abb. 3.** Schematische Darstellung wichtiger Strecken mit großem Querschnitt im Flutungsraum

## Hydrogeologie im Lagerstättenbereich

Der jährliche Niederschlag im Freiburger Raum beträgt ca. 800 mm (1997 ca. 760 mm), die Grundwasserneubildung ca. 13 %. Die Transmissivität des Gneises ist mit der Teufe abnehmend ca.  $10^{-4}$  (Oberfläche) bis  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (460 m unter Tage) (Kolitsch 1996). Im Jahresmittel 1997 wurde ein Abfluß von 3,8 m<sup>3</sup>/min gemessen. Er kann auf 5 bis 8 m<sup>3</sup>/min ansteigen. Als Einzugsgebiet für freies (oberhalb der Stollnsohle anfallendes) Grubenwasser kann eine Fläche von 15 bis 20 km<sup>2</sup> angegeben werden. Die geothermische Tiefenstufe beträgt 31 m (0,03 °C/m) (Schössler und Schwarzlose 1959); die spezifische Wärmekapazität des Wassers ist mit 4,4 J/K\*mol etwa fünfmal höher als die des Gneises.

Tiefenlotungen im Richtschacht und Messungen am Überlauf des Flutungswassers ergaben seit den achtziger Jahren ein Absinken der Temperatur von 22 °C auf 18 °C bis 19 °C sowie einen Rückgang des Temperaturgradienten mit der Teufe von über 10 °C auf fast 0 °C (Abb. 5). Daß heißt, daß heute eine homogene Temperatur über das gesamte vertikale Profil zu beobachten ist, welche sich aus der Mischung von Grundwasser und freiem Grubenwasser errechnen läßt.

Mit einem einfachen Modell kann die Entwicklung der absoluten Temperaturen am Überlauf und im Profil nachvollzogen werden. Als Eckparameter wurden ein hoher Abfluß (5,5 m<sup>3</sup>/min) sowie die Verteilung des Grundwassereinflusses und des Beitrags des freien Grubenwassers zu etwa gleichen Teilen gewählt. Die Teilanströme wurden hinsichtlich der Transmissivität des Gneises und der Abbaugrößen normiert (Abb. 6).

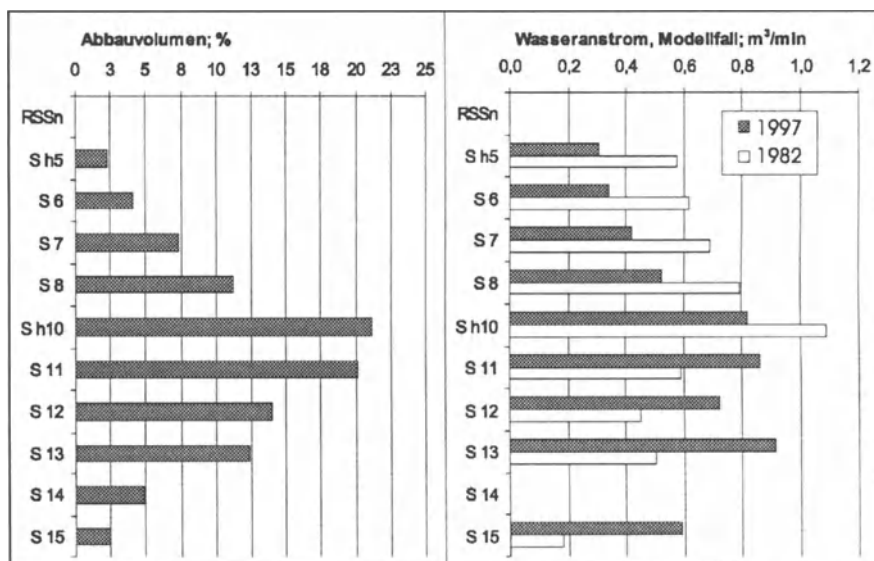
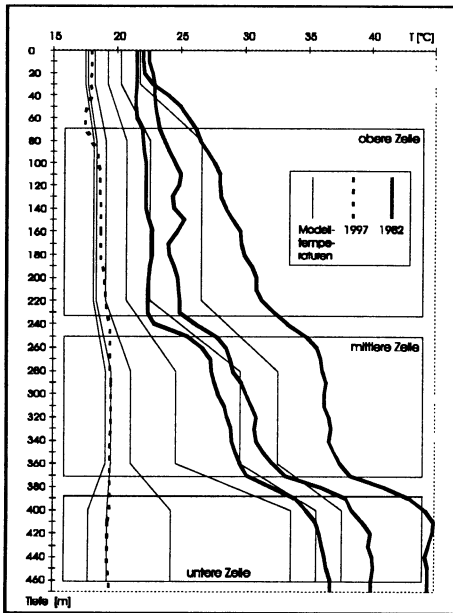


Abb. 4. Abbauvolumen im Flutungsraum und summarischer Wasseranstrom je Sohle, Modellfall „1982“ und „1997“



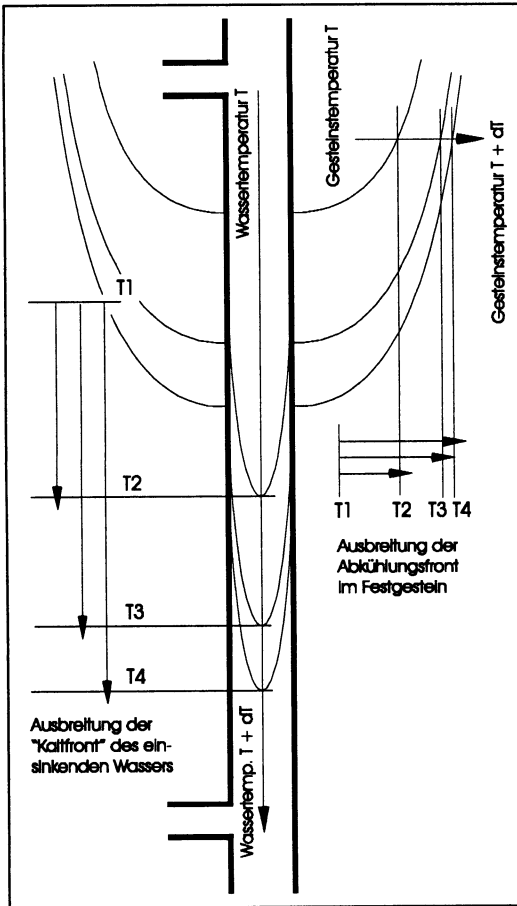


**Abb. 5.** Temperaturprofile im Schacht für 1982 (Peter 1983) und 1997 sowie berechnete Temperaturen im Modell

Die Grundwassertemperatur je Sohle lehnt sich an den geothermischen Gradienten an. Als zeitlich veränderliche Parameter wurden eine linear abnehmende „zusätzliche Wärme“ und ein *veränderliches Strömungsregime* in die Berechnung eingeschlossen. Die „zusätzliche Wärme“ ist für die höhere Temperatur am Überlauf und in der Tiefe (1982) (Peter 1983) notwendig. Sie könnte aus der Reaktionswärme hergeleitet werden, die während der Betriebszeit in abgeworfenen Grubenbauen aus den exothermen Reaktionen der Sulfidoxidation gespeichert wurde (sowie untergeordnet aus einem Zustrom warmer Tiefenwässer). Sie geht mit der Umwälzung des Flutungsraumes (bzw. mit der Abnahme der Depression der Grundwasseroberfläche nach der Flutung) verloren; der Flutungsraum wird abgekühlt.

Das *veränderliche Strömungsregime* ist Ursache für die Homogenisierung des Flutungsraumes. Das freie, 13°C warme Grubenwasser neigt dazu, in den Flutungsraum „einzusinken“ und wird dabei vom umgebenden Gestein erwärmt und auf den oberen Sohlen an den entlastenden Schacht abgeleitet. Nachströmendes Wasser kühlt das Gestein weiter ab und wird erst später, d.h. in tieferen Bereichen des Flutungsraumes erwärmt und abgeleitet. Somit dringt das freie Wasser zwar kontinuierlich in das hydraulische System ein, jedoch verzögert sich, hervorgerufen durch die Dynamik des Wärmeübergangs an der Systemgrenze, das Eindringen der Kalttemperaturfront (Abb. 6).

Da die Temperaturunterschiede verhältnismäßig gering sind und vertikale Fließwege über 80% des Flutungsraumes einnehmen, nimmt der Prozeß mehrere Jahre in Anspruch. Das freie Grubenwasser „erobert“ auf diese Weise Sohle für Sohle als Strömungsraum und Abflußmöglichkeit zum Schacht.



**Abb. 6.** Modellvorstellung zur Ausbreitung von Temperaturfronten im Flutungsraum

Konvektionszelle. Die hydrochemische Homogenität im Tiefenprofil bestätigt die Modellvorstellungen. Veränderungen im Wasser der 6. und  $\frac{1}{2}$  5 Sohle zeigen die Sonderstellung dieser Bereiche an. Die Abbaue, die an diese Sohlen angeschlossen sind, sind auf ein geringes Volumen in Schachtnähe beschränkt. Daher werden chalkogene Elemente angereichert, anthropogene und lithogene Elemente dagegen verdünnt. Eine weitere Abkühlung der tiefsten Wässer (und damit eine erneute Schichtung bzw. weitere Veränderung des Strömungsregimes) ist nicht ausgeschlossen. Ein bedeutender Zustrom geothermaler Wässer wird ausgeschlossen.

Mit diesem Ansatz können die historischen und aktuellen Temperaturverläufe im Tiefenprofil des Richtschachtes in ein Entwicklungsszenario eingepaßt werden. Der ursprüngliche Temperaturverlauf deutet auf die Existenz einer Schichtung des Flutungswassers oder der Existenz von drei offenen Konvektionszellen bzw. Schichten bei freien Grundwasserverhältnissen hin.

Die plötzliche Abnahme der  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration in den achtziger Jahren sowie die Änderung der  $\text{Na}^{+}$ -Konzentration weist zunächst auf eine Stabilität der Konvektionszellen und später auf ein „Umkippen“ der Strömung und die Auswaschung erhöhter Konzentrationen aufgrund zunehmenden Wasseraustauschs hin. Die mittlere Schicht war zusätzlich durch hydrochemische Besonderheiten (erhöhte Mineralisation in Wässern der Abbaue) gekennzeichnet.

Derzeit ist der Flutungsraum gut homogenisiert. Es existiert im Wesentlichen eine große

## Schlußfolgerungen

Vier Jahre nach der Flutung gingen die extrem hohen Frachten von Schwermetallen und Sulfat aus dem Flutungsraum der Grube Freiberg auf ein vergleichsweise geringes Maß zurück. Ursachen sind die Auswaschung wasserlöslicher Sulfate, der neutralisierende Zufluß von Grundwasser und die geringe Zufuhr freien Sauerstoffs in den Flutungsraum. Der darauf folgende, langsame Rückgang ist durch die allmählich Umwälzung des Wassers im Flutungsraum determiniert. Eine ehemalige Schichtung des Wassers bzw. Existenz übereinanderliegender Konvektionszellen wird für sehr wahrscheinlich gehalten. Sie war 1982 anhand von Temperatur- und hydrochemischen Profilen im Richtschacht nachweisbar (Peter 1983). Heute ist der Flutungsraum weitestgehend homogenisiert, obwohl einzelne Grubenteile aufgrund hydraulischer (geometrischer) Besonderheiten spezielle hydrochemische Eigenschaften aufweisen. Erzwangene Konvektion bestimmt das Strömungsregime.

Partikuläre Schwebstoffe (Fe-, Al-Hydroxide und Hydroxosulfate) reagieren besonders empfindlich auf witterungsabhängige Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten. Die Herkunft der Na-Fracht kann nur zum Teil aus allgemeinen anthropogenen Quellen geklärt werden, auf welche z.B. die Erhöhung der  $\text{Cl}^-$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Konzentrationen zurückzuführen ist. Auch heute noch entströmen dem Flutungsraum der Grube Freiberg die höchsten Elementfrachten der gesamten Lagerstätte. Ursache der lagerstättentypischen Schwermetallkonzentrationen in den Wässern sind Mobilisationen aus Erzen und hohe Gleichgewichtskonzentrationen aus wasserhaltiger Sekundärmineralmatrix (z.B. Gips, Aluminit, Jarosite, Scorodit) im wasserfreien und -erfüllten Grubenbereich.

Konsequenzen aus einer solchen Entwicklung kann man z.B. für die Verwahrung einer Grube vor ihrer Flutung sowie für immer wieder angedachte Nutzungen als Wärmespeicher oder Sedimentationsfalle für Wasserinhaltsstoffe ziehen.

## Danksagung

Die Arbeiten zu dieser Veröffentlichung wurden von der DFG im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 546 „Geochemische Prozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sicker- und Grundwasser“ gefördert (Publikationsnr. 46)

## Literatur

- Baacke D (1995) Geochemie untertägiger Stoffflüsse in Stollnwässern der Grube Freiberg. Nat.-wiss. Dipl.-Arbeit, TU BA Freiberg, unveröff.
- Baacke D, Kluge A, Martin M, Beuge P (1996) Geochemische Prozesse beim Stofftransport in Stollnsystemen der Grube Freiberg. In: Merkel B., Dietrich P. G., Struckmeier W., Löhnert E. P. (eds.) (1996)

- Bergarchiv: Chronik der Grube Freiberg. Sohlengrundrisse 1:5000 bzw. Transparente Gangaufnahmen der Grube Freiberg. Acc.Nr.: 1/95, Zg.Nr.: 14186 bzw. 14188, Reißrolle 197 bzw. 199, Bergarchiv Freiberg
- Berrios D (1995) Hydrologisch-hydrogeologischer Überblick über die Stadt Freiberg. Nat.-wiss. Dipl.-Arbeit, TU BA Freiberg, unveröff.
- Degner Th (1996) Der Schwermetalltransport im Rothschnberger Stolln Nat.-wiss. Dipl.-Arbeit, TU BA Freiberg, unveröff.
- Kolitsch S (1996) Hydrogeologische Untersuchungen in der Himmelfahrt Fundgrube. Nat.-wiss. Dipl.-Arbeit, TU BA Freiberg
- Martin M, Beuge P, Kluge A, Hoppe T (1994) Grubenwässer des Erzgebirges – Quelle von Schwermetallen in der Elbe, Spektr. Wiss. 5/94, 102-107
- Merkel B, Dietrich PG, Struckmeier W, Löhnert EP (eds.) (1996) GeoCongress 2, Grundwasser und Rohstoffgewinnung, Verl. Sven von Loga, Köln
- Merker GP (1987) Konvektive Wärmeübertragung. Springer Verl. Berlin Heidelberg
- Milde G (1973) Gutachterliche Stellungnahme zur Qualität der Wässer des Rothschnberger Stollns und sich andeutenden Tendenzen. Gutachten, TU BA Freiberg
- Peter G (1983) Untersuchungen zu Dynamik, Chemismus und Temperaturregime von Wässern ersoffener Grubenbaue. Nat.-wiss. Stud.-Arbeit, TU BA Freiberg, unveröff.
- Sacher G (1995) Daten der Untersuchungen der Saxonia GmbH i.L., persönliche Auskünfte
- Schössler K, Schwarzlose J (1959) Geophysikalische Wärmeßußmessungen. Grundlagen und Ergebnisse. Freiburger Forschungsheft C75, Akademie-Verlag Berlin