

Der Flutungsraum des Grubenfeldes Freiberg: Hydrochemie, Isotopengeochemie und Hydraulik

S. KOLITSCH, M. JUNGHANS, W. KLEMM, M. TICHOMIROWA

Abstract:

As a result of investigations of mine water in the central part of the Freiberg mine the quantity and quality of the flushing water, seepage water and groundwater could be estimated. The high concentrations of heavy metals as for example Zn, Cd, and of As in the flushing water are primarily caused by seepage from the unflooded part of the mine. With time the dynamics of mineralisation decrease slows down considerably. A significant decrease of contaminant concentrations can therefore not be expected for at least 10-20 years which means a continuous pollution of the Elbe river. Mass balance calculations proof the existence of a so far unknown influx into the flushed part of the mine, maybe from a neighbouring mine. Isotopic investigations and hydrochemical data support the existence of a hydraulic connection to the Morgenstern mine, possibly along the medium mine levels (inflow of $^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ enriched waters). In contrast to 1982 and 1997, in 2001 physico-chemical parameters and contaminant concentrations show little variations along the complete shaft profile. This implies a fairly good mixing of the chemically very different influx waters in the flushed mine workings before entering the shaft. Flow measurements show an upward current along the entire shaft. Indications of lateral flow (inflow and outflow) could also be found.

Ziel der Arbeiten

Der intensive Bergbau im Freiberger Revier hat gewaltige Hohlräume geschaffen, die aufgrund der beständigen Wasserhaltung Jahrzehnte und z.T. Jahrhunderte einer Frischluftzufuhr ausgesetzt waren. In diesem Milieu entstanden durch den Prozess der Sulfidverwitterung große Mengen leicht löslicher schwermetallhaltiger Oxidationsprodukte, die seit der Teilflutung der Gruben 1968-71 über das Flutungswasser ausgetragen werden. Darüber hinaus finden im kleineren ungefluteten Teil der Grube diese Oxidationsvorgänge noch immer statt. Das in die Vorfluter abfließende Grubenwasser weist daher hohe Frachten insbesondere an Schwermetallen (z.B. Cd und Zn) sowie an As und SO_4 auf. Es trägt zusammen mit anderen Freiberger Grubenwässern mit rund 37% der Zn- und 5% der Cd-Fracht der Elbe (Martin et al. 1994) stark zu deren Belastung bei.

Zum Verständnis der Bildungs-, Transport- und Migrationsprozesse von Sicker- und Flutungswasser und zur Ableitung einer Prognose für die zukünftige Entwicklung der Schadstoffgehalte im Flutungswasser wurden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 546 „Geochemische Prozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sickerwasser und Grundwasser“ Arbeiten durchgeführt, die sich unter anderem auf folgende Schwerpunkte konzentrierten:

- Quantifizierung des Eintrages von Grund- und Sickerwässern in den Flutungsraum (Wasserbilanz für das Grubenfeld Freiberg)
- Strömungsverhältnisse im Flutungsraum
- Zeitliche und teufenabhängige Entwicklung der Qualität des Flutungswassers an dessen Überlauf im Schacht Reiche Zeche
- Indikatoren für hydraulische Verbindungen zu anderen Grubenteilen (Zu- bzw. Abströme)
- Isotopenchemische Zusammensetzung von Grund-, Sicker- und Flutungswasser ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$)

Lage und Geologie

Die Polysulfiderzlagerstätte Freiberg liegt in Mittelsachsen zwischen Chemnitz und Dresden. Sie ist mit über 1000 bekannten Gängen und einer N-S Erstreckung von rund 30 km die größte Gangerzlagerstätte Europas. Der Freiberger Lagerstättenbezirk bildet den zentralen und wichtigsten Teil der Lagerstätte. Er unterteilt sich in die Grubenfelder Halsbrücke im Norden, Brand-Erbisdorf im Süden und Freiberg im Zentrum. Das Grubenfeld Freiberg mit seinem Teilrevier Morgenstern steht im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchungen (vgl. Abb. 1).

Es umfasst bei einer Fläche von rund 23,7 km² (davon Revier Morgenstern 7,7 km²) das gesamte Stadtgebiet Freibergs sowie sein nördliches und östliches Umland.

Der Abbau erfolgte auf meist steil einfallenden Gängen verschiedener Orientierung. Abgebaut wurden sulfidische Gangvererzungen wie Silber-Erze, Sphalerit, Galenit und Chalkopyrit zur Gewinnung von Ag, Pb, Zn, Cu und Nebenprodukten. Die Ganglagerstätte ist im Raum Freiberg in den Freiberger Graugneis, einem grob- bis mittelschuppigen Biotit- oder Biotit-Plagioklasgneis granodioritischer Zusammensetzung eingebettet (PIETZSCH 1963 und SCHMIDT 1959).

Nach fast ununterbrochenem 800jährigem Bergbau erfolgte ab dem Jahre 1968 die endgültige Stilllegung und Flutung der Gruben. Bis zum Frühjahr 1971 wurden rund 2,6 Mio. m³ Grubengebäude (AUTOREN-KOLLEKTIV 1973) (das sind rund 500m vertikaler Gruberraum) bis zum Niveau des wasserabführenden Hauptstolln (Rothschönberger Stolln) in 225 m Tiefe geflutet). (Abb.2)

Hydrogeologie

Die Zuläufe in den Flutungsraum (ca. 4 m³/min) setzen sich zu ungefähr gleichen Teilen aus Grundwasser und aus zumeist höher mineralisierten Sickerwässern der hangenden ungesättigten Zone zusammen.

Die Grundwasserneubildung und damit Qualität und Menge des dem Grubenfeld Freiberg zusitzenden Grundwassers werden von den hydrogeologischen Eigenschaften des Gneises und seiner Zersetzungspprodukte bestimmt. Vom Hangenden zum Liegenden kann folgende vereinfachte Abfolge hydrogeologisch relevanter Einheiten im Raum Freiberg beschrieben werden (nach HEILMANN & SYMMANK 1994, BERRIOS 1995, POESER 1996, KOLITSCH 1996):

- Bodenschicht (durchschnittlich 0,2m mächtig, gut durchlässig)
- Oberlage (grobklastischer Deckschutt, nur lokal von Bedeutung)
- Hauptlage (Löblehm, durchschnittlich 2-4m, gering durchlässig)
- Mittellage (Fließerde, grobklastisch/Löß, nur lokal von Bedeutung)

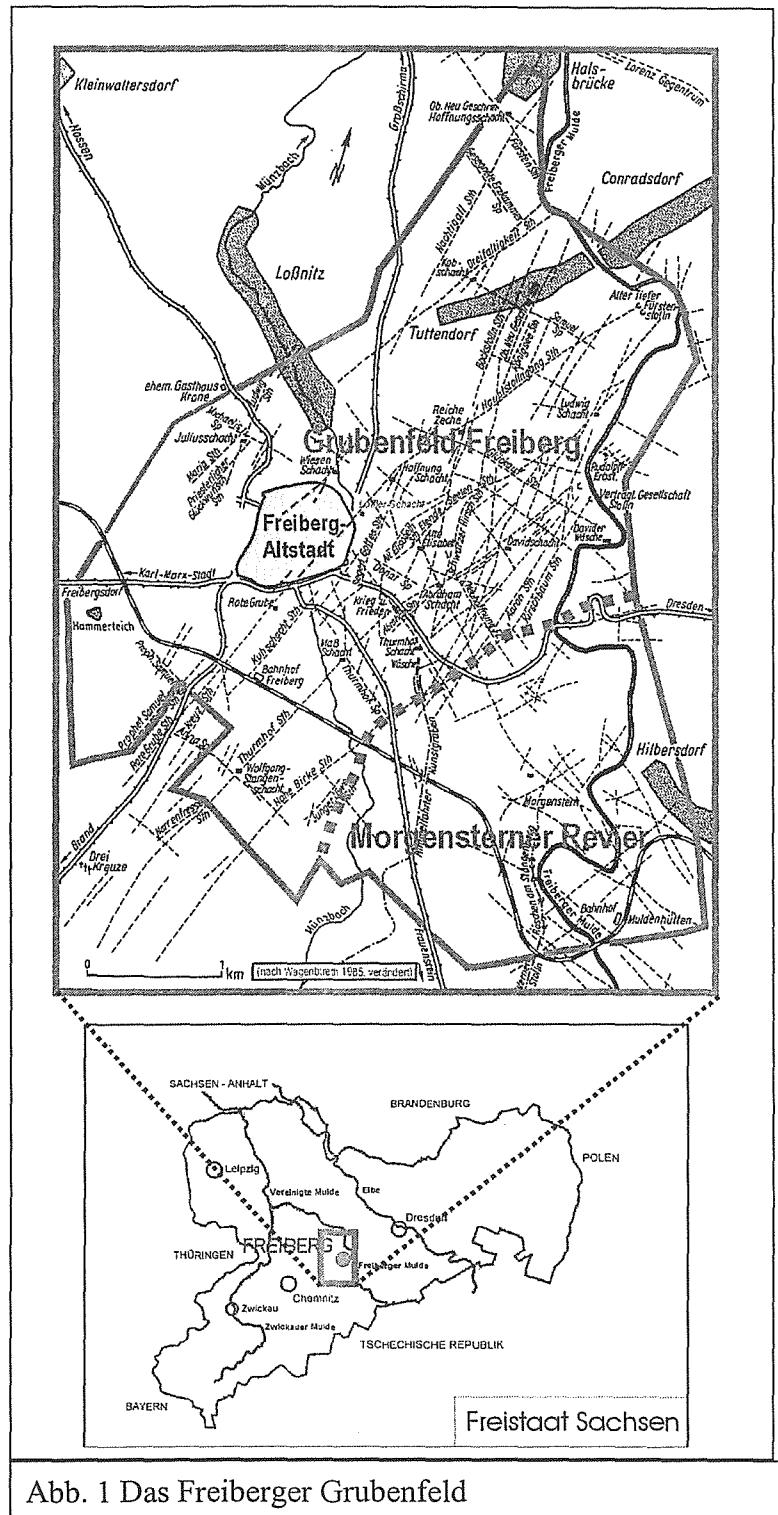


Abb. 1 Das Freiberger Grubenfeld

- Basislage (Gneiszersatz / mürber Gems, Gesteinsbruchstücke in schluffig bis kiesiger Matrix, zusammen mit dem liegenden festen Gems 0,1 – 20 m (entlang einiger Klüfte/Gänge) mächtig, hydraulische Leitfähigkeit im Gems allgemein in Abhängigkeit vom Verlehmungsgrad zwischen sehr gut und sehr gering schwankend)
- Fester Gems (angewitterter Gneis, aber noch Festgesteinsscharakter, siehe mürber Gems)
- Unverwitterter Gneis (Kluftgrundwasserleiter, hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Klüftung (geringer bis mäßiger Zerrüttungsgrad) gering bis gut)

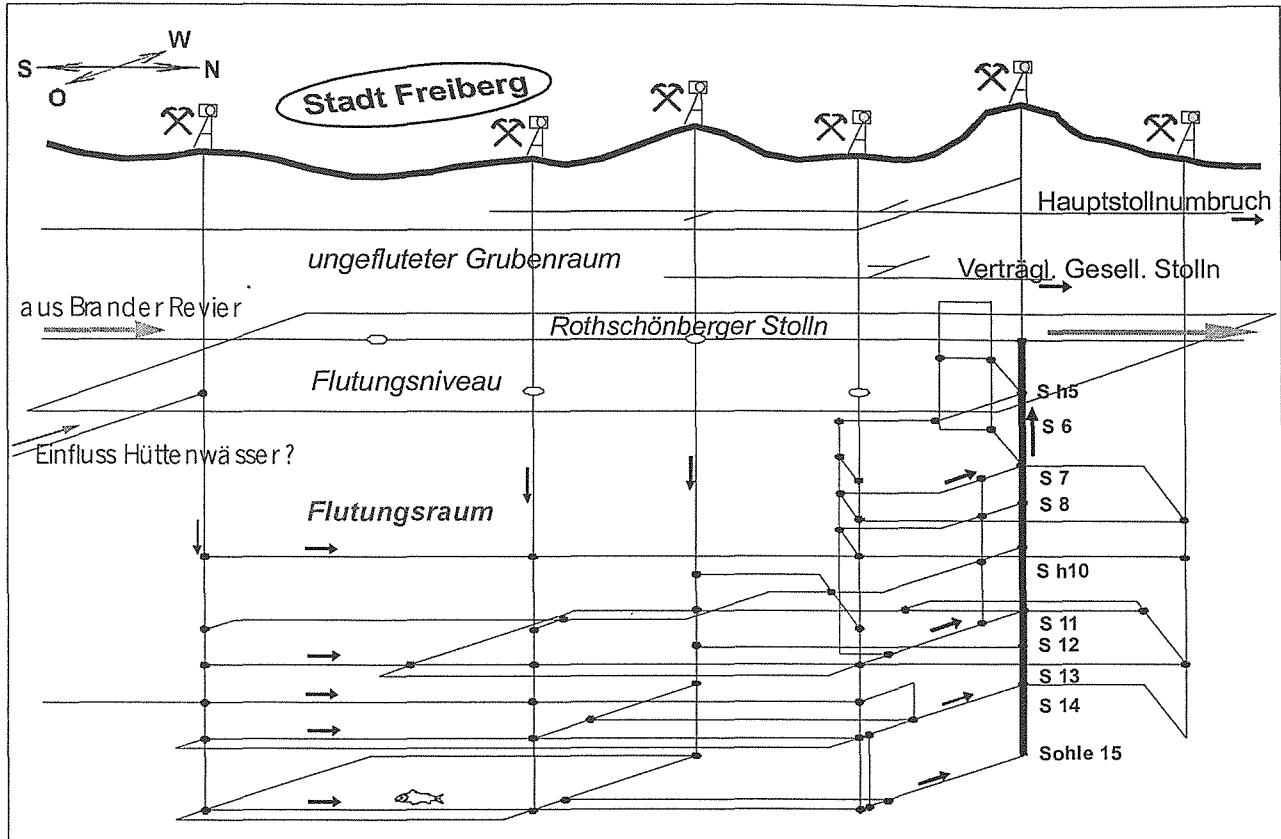


Abb. 2 Schematische Raumdarstellung des Freiberger Grubenfeldes

Die Durchlässigkeit des Untergrundes und damit die Höhe der Grundwasserneubildung ist nach dieser Gliederung vor allem von der gering durchlässigen Hauptlage und der lokal sehr unterschiedlichen Durchlässigkeit des Gneises abhängig. Die Grundwasserneubildungsrate wurde unter Berücksichtigung verschiedener Ermittlungsmethoden ($2,1\text{--}3,5 \text{ l/s/km}^2$ nach RÖSNER 1987, KRAFT & SCHRÄBER 1982, BERRIOS 1995) mit durchschnittlich $3,2 \text{ l/s/km}^2$ festgelegt. Die Größe des Einzugsgebiets für das Grubenfeld Freiberg wurde mit rund $34,3 \text{ km}^2$ (ohne Morgensterner Revier = $23,7 \text{ km}^2$) berechnet. Damit ergeben sich für das Einzugsgebiet des Grubenfelds Freiberg (mit und ohne Teilrevier Morgenstern) und für verschiedene Grundwasserneubildungsraten die in Tab. 1 aufgeführten Grundwassermengen pro Zeiteinheit. Die Berechnungen zeigen, dass die aus historischen Recherchen (MEYER 1960) und eigenen untertägigen Messungen abgeleiteten Grundwasseranteile am Flutungswassers (rund $2 \text{ m}^3/\text{min}$) tatsächlich aus dem Prozess der Grundwasserneubildung ($3,0$ bis $7,2 \text{ m}^3/\text{min}$ nach Tab. 1) zur Verfügung stehen.

Der Volumenanteil der Grubenbaue am Gesamtgesteinsvolumen ist trotz des langen intensiven Bergbaus sehr gering (< 0,05 %). Werden grundwasserführende Strukturen (Klüfte, Störungen, Gänge) von Grubenbauen geschnitten, hängt die Stärke des Grundwasserzuflusses in erster Linie von der Ergiebigkeit des angeschnittenen Elementes ab (z.B. von der Transmissivität der Kluft, vom hydrostatischen Druck der überlagernden Wassersäule). Eine vollständige Entwässerung des Kluft-

grundwasserleiters (Gneis) bzw. eine Absenkung des Grundwasserspiegels ist deshalb auch oberhalb des Flutungsniveaus nur im unmittelbaren Bereich von Schächten zu erwarten.

Tab. 1 Potentiell zur Verfügung stehende Grundwassermengen je Minute im Einzugsgebiet des Grubenfeldes Freiberg

	Einzugsgebiet [km ²]	Grundwassermenge [m ³ /min]*)	Grubenfeld Freiberg ...
Grundwasser-neubildungsra-ten [l/s/km ²]	3,2	34,3 23,7	mit Morgenst. Revier ohne Morgenst. Revier
	2,1 (Min)	34,3 23,7	mit Morgenst. Revier ohne Morgenst. Revier
	3,5 (Max)	34,3 23,7	mit Morgenst. Revier ohne Morgenst. Revier

*) davon sitzen rund 2 m³/min dem Grubenraum zu

Altersbestimmungen an in der Grube austretendem Grundwasser mittels Tritium werden dazu weitere Anhaltspunkte liefern. Die Abführung des nicht in den Grubenraum eintretenden Grundwassers (1 – 5,2 m³/min nach Tab. 1) erfolgt über höhere Stollenniveaus, Anzüchte, Drainagen sowie durch Eintritt von Grundwasser in die Vorfluter. Ein regionaler Zu- oder Abstrom von Grundwasser aus dem betrachteten Einzugsgebiet, z.B. im Sinne eines regionalen Grundwasserstroms oder entlang von hydraulisch leitfähigen Gang- oder Störungszonen ist prinzipiell möglich, konnte aber für das Gebiet Freiberg bisher nicht nachgewiesen werden.

Die höher mineralisierten Sickerwässer können in gering bis mäßig mineralisierte Tageswässer (ca. 90 % des Sickerwassers) und hochmineralisierte Gangwässer (ca. 10%) unterteilt werden (Tab. 2).

Tab. 2 Charakteristik der im Grubenraum auftretenden Wässer und ihrer Anteile am Grubenwasser (Grubenmischwasser = 4 m³/min = 100%)

Wassertyp	Kurzcharakteristik	Anteil
Grundwasser	▪ Auftreten im ungefluteten und gefluteten Grubenbereich ▪ niedrig mineralisiert (Gesamtmin.: < 400 mg/l)	50 % 2 m ³ /min
Tageswasser	▪ entlang bergmännischer Hohlräume versickerndes Oberflächenwasser ▪ mittlere Mineralisation (Gesamtmin.: 500-1000 mg/l) ▪ deutliche kurzfristige Reaktion auf Niederschlagsereignisse	45 % 1,8 m ³ /min
Sickerwasser	▪ migriert auf (z.T. abgebauten) Gangzonen ▪ lange Verweilzeiten ▪ hohe Mineralisation (Gesamtmin.: > 1200 mg/l) ▪ kaum/keine Reaktion auf Niederschlagsereignisse	5 % 0,2 m ³ /min

Sicker- und Grundwasser mischen sich nach Eintritt in den Flutungsraum und strömen, sicherlich auf bevorzugten Bahnen (hochdurchlässige/offene Grubenbaue, Strecken) durch den gefluteten Bereich, um am Reiche Zeche Schacht wieder aufzusteigen. Abb. 3 skizziert den Bildungsprozess von Mischwässern im Flutungsraum. Es muss dabei eine sehr gute Mischung der am Strömungsprozess beteiligten Grubenwässer vorliegen, da die am Schacht auf verschiedenen Sohlen zuströmenden Wässer eine bemerkenswerte Ähnlichkeit ihrer chemischen und physikochemischen Parameter aufweisen. Haupströmungsbahnen sind im einzelnen nicht bekannt. Die nur am Reiche Zeche Schacht möglichen Tiefenmessungen lassen auch nur dort qualitative und quantitative Aussagen zu den Zuströmen auf einzelnen Sohlenniveaus zu (siehe unten). Unsicher ist weiterhin die Verweildauer der Wässer im Flutungsraum. Bei einer Größe des Flutungsraumes von rund 2,6 Mio. m³ (AUTOREN KOLLEKTIV 1973) ergibt sich 2001 bei einer Zulaufrate von 4 m³/min eine theoretische Flutungsdauer von 451 Tagen. Geht man davon aus, dass nur ein Teil des drainablen Hohlräumvolumens aktiv in die Strömungsvorgänge eingebunden ist, so wird die mittlere Verweildauer

des Großteils der Wässer deutlich unter 451 Tagen liegen. Hier können nur Tracerversuche genauere Angaben liefern.

Chemische Reaktionen zwischen Grubenwasser, Resterzen und Nebengestein (Gneis) in der ungesättigten Zone und im Flutungsraum führen zu Lösungs- als auch zu Fällungsprozessen, die umweltrelevante Schadstoffe freisetzen bzw. fixieren. Nach eigenen Schätzungen steigen rund 95 % der in den Flutungsraum gelangten Wässer am Reiche Zeche Schacht auf und fliessen über Rothschorberger Stolln/ Triebisch in die Elbe ab. Etwa 5 % sitzen über andere Grubenbaue bzw. Klüfte dem Rothschorberger Stolln zu.

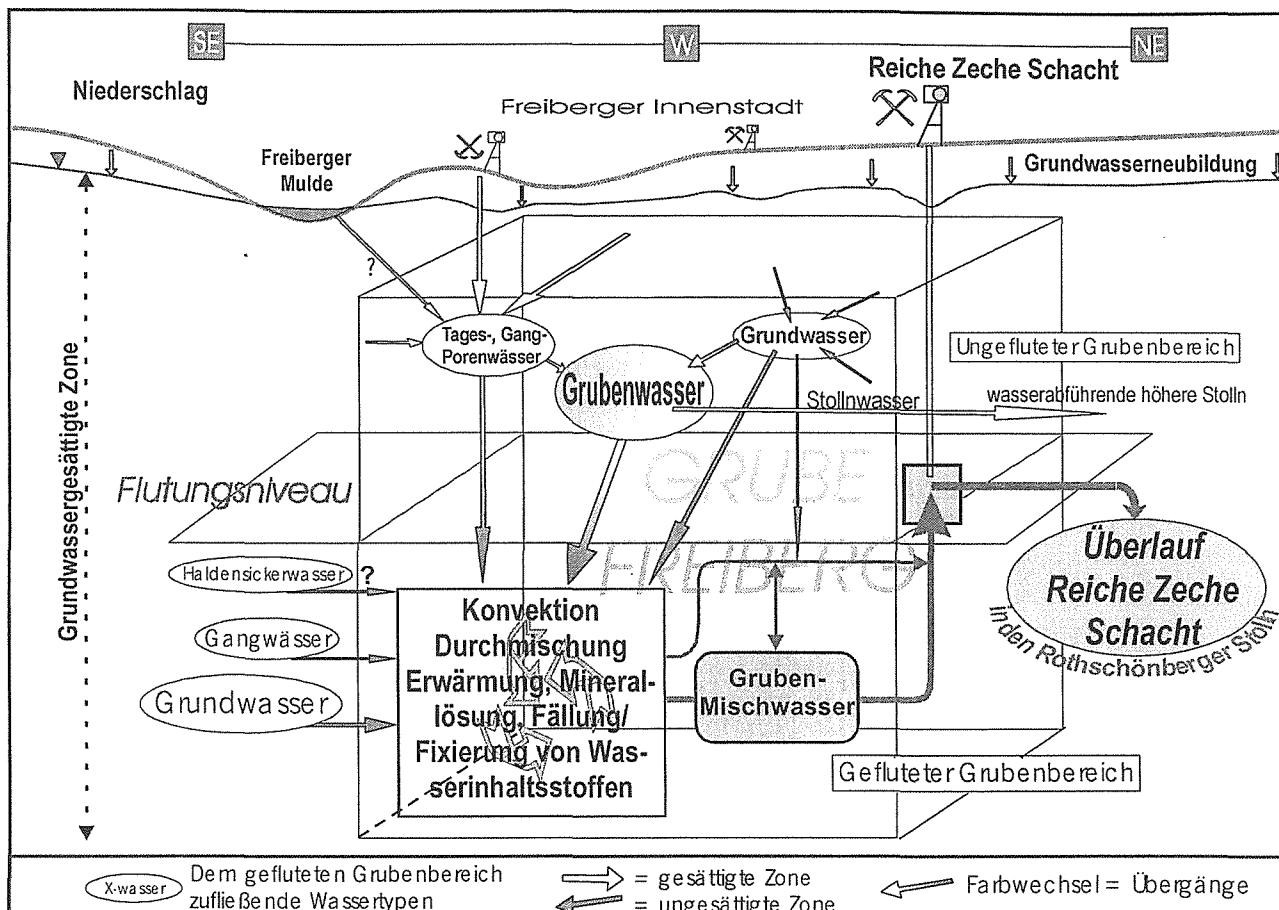


Abb. 3 Bildung von Mischwässern im gefluteten und ungefluteten Grubenraum

Chemische, physikochemische und isotopengeochemische Charakteristik des Flutungswassers

Hydrochemie

Langjährige Messungen am Überlauf des Flutungsraumes (Reiche Zeche Schacht) bestätigen die seit Flutungsende 1971 diskontinuierliche Abnahme der Mineralisation des Flutungswassers (MILDE 1973, SACHER 1995, BAACKE 1999). So verringerte sich die Gesamtmineralisation von 1971 7500 mg/l auf 2001 etwa 1700 mg/l. Im selben Zeitraum stieg der pH-Wert von etwa 3,7 auf 6,1 an. Die Temperatur des Überlaufwassers sank von 22 °C 1982 auf rund 19 °C 2001. Dabei kam es auch zu gegenläufigen Entwicklungen (Abb. 4). So sank die elektrische Leitfähigkeit des Flutungswassers zunächst bis ca. 1982 (2250 µS/cm), stieg dann auf rund 3700 µS/cm 1995 an und dann bis heute allmählich bis unter das Niveau von 1982 abzufallen (ca. 2000 µS/cm). Ursachen hierfür sind sicherlich anthropogene Einflüsse auf das Grubenwasser (siehe unten). Die Temperatur sank zwischen 1982 und 1997 von 22 °C auf 18 °C und stieg bis 2001 wieder auf etwas über 19 °C an. Auch

das Redoxpotential erhöhte sich seit 1997 leicht. Ursache für diese Entwicklungen ist die zunehmende Homogenisierung der chemisch-physikalischen Parameter im Schacht aufgrund der verstärkten Mischung der Wässer im Grubengebäude (siehe unten).

Seit Flutungsende 1971 ist eine Abnahme der meisten lagerstättentypischen Stoffkonzentrationen zu verzeichnen. So beträgt heute z.B. die SO₄-Konzentration 65 %, und die Cd-Konzentration 63 % der des Jahres 1982. Die Dynamik der Konzentrationsabnahme verlangsamt sich dabei zusehends. Diese Entwicklungen sind insgesamt auf den Zufluss neutralisierender schwach mineralisierter Grundwässer, das geringe Dargebot an gelöstem Sauerstoff (Einschränkung der Sulfidoxidation) und die rasche Auflösung von Sulfidoxidationsprodukten zu Beginn der Flutung zurückzuführen.

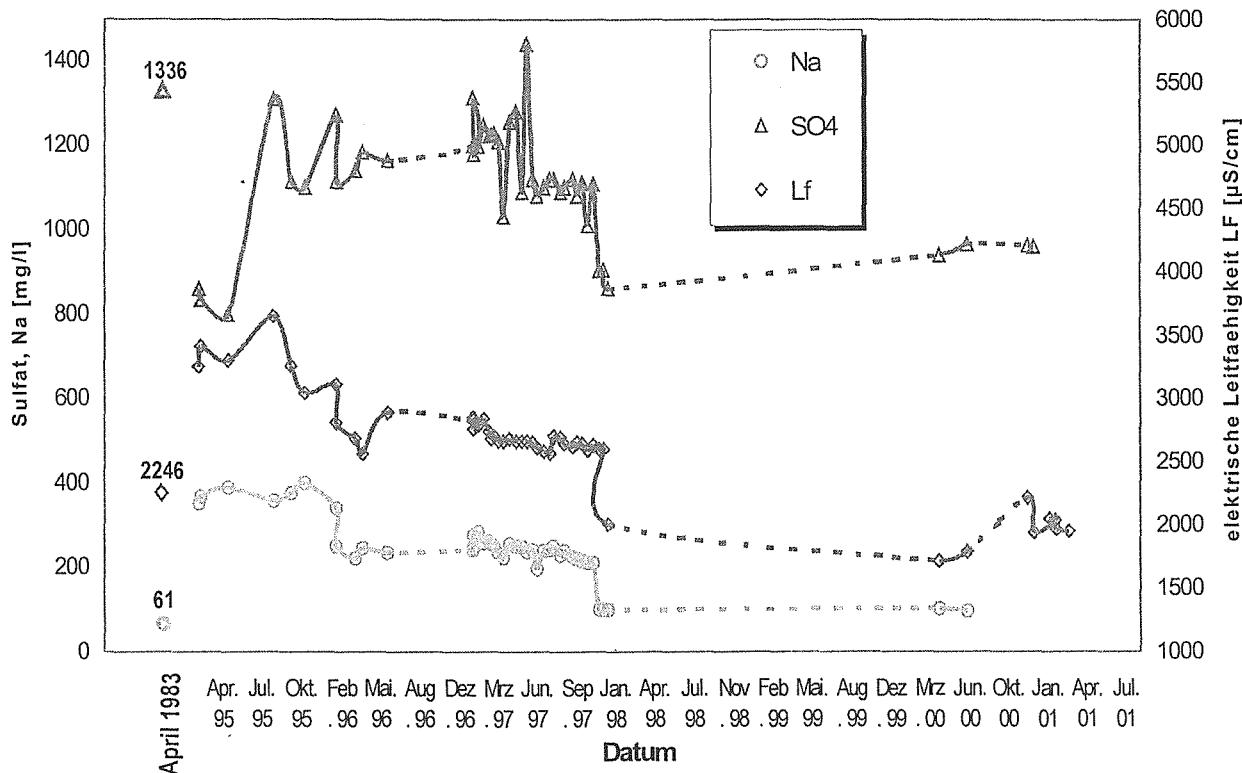


Abb. 4 Entwicklung ausgewählter Parameter am Überlauf des Flutungsraumes

Bei einigen Elementen ist jedoch eine andere Konzentrationsentwicklung zu erkennen. So veränderten sich die Mg-Gehalte seit dem Überlauf des Flutungsraumes nicht wesentlich.

Die Na-Konzentration erhöhte sich zwischen 1982 und 1997 von 64 auf 240 mg/l, verringerte sich seitdem jedoch wieder auf heute ca. 100 mg/l. Ursache hierfür ist der saisonal variierende Einfluss anthropogener Faktoren (z.B. der Einsatz von Tausalz und Dünger). Möglicherweise führt auch ein seit Ende 1997 verringelter Zustrom von Na-belastetem Wasser aus dem Teilrevier Morgenstern zu sinkenden Na-Gehalten. Die Konzentration an Zn (gesamt) sank zwischen 1982 und 1997 von 27 mg/l auf 14,5 mg/l, stieg bis heute jedoch wieder auf 24,5 mg/l an. Die Konzentrationen an partikular gebundenem und gelöstem As schwanken seit 1997 beträchtlich. Ursache hierfür können die in Abhängigkeit vom Strömungsregime schwankenden Mengen an ausgefälltem Fe(OH)₃ sein.

Stoffmengenbilanz

Auf Grundlage historischer Recherchen und langjähriger qualitativer und quantitativer Untersuchungen an zahlreichen Sickerwässern und an Grundwasser im ungefluteten Bereich der Freiberger Grube kann für die in den gefluteten Bereich übergehenden Grund-, Tages- und Gangwässer hypo-

thetisch eine mittlere Zusammensetzung errechnet werden. Entsprechend ihres Mengenanteils kann so anhand ausgewählter Parameter ein hypothetisches Mischwasser für den gefluteten Grubenbereich ermittelt werden. Tab. 3 zeigt die Differenz zwischen diesem Mischwasser und dem am Reichen Zeche Schacht aufsteigendem „realen“ Mischwasser. Extreme Unterschiede können nur durch Lösungs- bzw. Fixierungsprozesse im Flutungsraum oder aber durch einen Zustrom nicht berücksichtigter Wässer erfolgen.

Tab. 3 Ermittlung eines hypothetischen Mischwassers für den Flutungsraum und Vergleich mit dem „realen“ Flutungswasser des Reiche Zeche Schachtes

INPUT	Menge [m ³ /min]	max. [mg/l]	durchschnittliche			Gehalte	Isotopensignaturen [%]	
			SO ₄	Zn	Cd		δ ³⁴ S _{SO4}	δ ¹⁸ O _{SO4}
Grundwasser (50 %)	2	130	0,15	0,005	9	22	0,5	3,9 bis 6,2*)
Tageswasser (45%)	1,6	500	20	0,1	33	73	0,2	-0,8 b. 4,3
Gangwasser (5%)	0,4	2000	200	1,0	12	16	0,06	-2,9 b. -0,1
Hypothetisches Mischwasser	4	390	19	0,098	20	45	0,34	0,6 b. 3,2
OUTPUT								
Flutungswasser Reiche Zeche Schacht	4	1222	14,4	0,067	240-100	210-135	0,1-5,1	0,8 b. 3,2
DIFFERENZ		826			80+	90+	< 4,8	> 2

*) aus HAUBRICH (2001)

Deutlich ist vor allem der hohe Überschuss an F, Na, Cl und vor allem SO₄. Letzterer kann auch durch Oxidationsprozesse im Flutungsraum (Sulfatbildung) bei Einbau sämtlichen gelösten O₂ nicht erklärt werden kann. Diese großen Differenzen können vermutlich, zumindest teilweise nur durch einen Zustrom entsprechender Wässer in den Freiberger Flutungsraum erklärt werden (z.B. aus dem Revier Morgenstern, siehe oben). Darüberhinaus tragen zum Lösungsinhalt des Flutungswassers auch weiterhin hochmineralisierte Lösungen aus Zeiten des aktiven Bergbaus (heutiger Flutungsraum = ungesättigte Zone) bei. Dies ist plausibel, da wie oben diskutiert, ein Großteil der Grubenbaue nur geringfügig in das Strömungsregime eingebunden ist und so konstant geringe Mengen höhermineralisierter Wässer beisteuert.

Isotopengeochemie

Im Rahmen der Untersuchungen wurden ebenfalls Analysen am Sauerstoff des Wassers ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$), am Sauerstoff des gelösten Sulfats ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) sowie am Schwefel des gelösten Sulfats ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$) der Grubenwässer durchgeführt. Dabei wurden Isotope als Tracer für Sulfidoxidationsprozesse sowie für den Nachweis von Mischungsprozessen genutzt.

KOLITSCH (1996) klassifizierte die Grubenwässer des Freiberger Grubenfeldes nach ihrem Chemismus sowie nach ihrer Reaktion auf Niederschlagsereignisse in Grundwasser, Tageswasser und Gangwasser (vgl. Tab. 2). Grundwasser, Tageswässer und Gangwässer zeigen charakteristische Isotopensignaturen (Abb. 5) und können somit dieser Klassifikation zugeordnet werden.

Oberflächennahes Grundwasser, das nicht durch Sulfat aus der Sulfidoxidation beeinflusst ist, weist hohe δ³⁴S_{SO4}- und δ¹⁸O_{SO4}-Werte auf. Tageswässer – Wässer, die auf bergmännischen Hohlräumen fließen – zeigen eine Beeinflussung durch Sulfidoxidationsprozesse. Auf ihrem Fließweg treten diesen Wässern hochmineralisierte Verwitterungslösungen aus der Sulfidverwitterung zu. Dabei kommt es zur Anreicherung der leichten Isotope bei gleichzeitiger Erhöhung der Sulfatkonzentration.

on (HAUBRICH 2001), was in einer Verschiebung der Isotopensignatur in Richtung der Isotopensignatur der Verwitterungslösungen im $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Diagramm deutlich wird. Die Tageswässer sind somit gegenüber dem oberflächennahen Grundwasser an leichten Isotopen (^{32}S , ^{16}O) angereichert und weisen eine höhere Sulfatkonzentration auf. Lange Verweilzeiten von Wässern auf z.T. abgebauten Gangzonen, die in einer hohen Mineralisation dieser Wässer resultieren, haben eine Verschiebung der δ -Werte in negative Bereiche zur Folge. Der $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Wert der Gangwässer entspricht dem der Sulfide.

Das Flutungswasser nimmt anhand seiner Isotopensignatur eine Sonderstellung ein, die zusammen mit der hohen Sulfatkonzentration nicht allein durch Sulfidoxidationsprozesse erklärt werden kann.

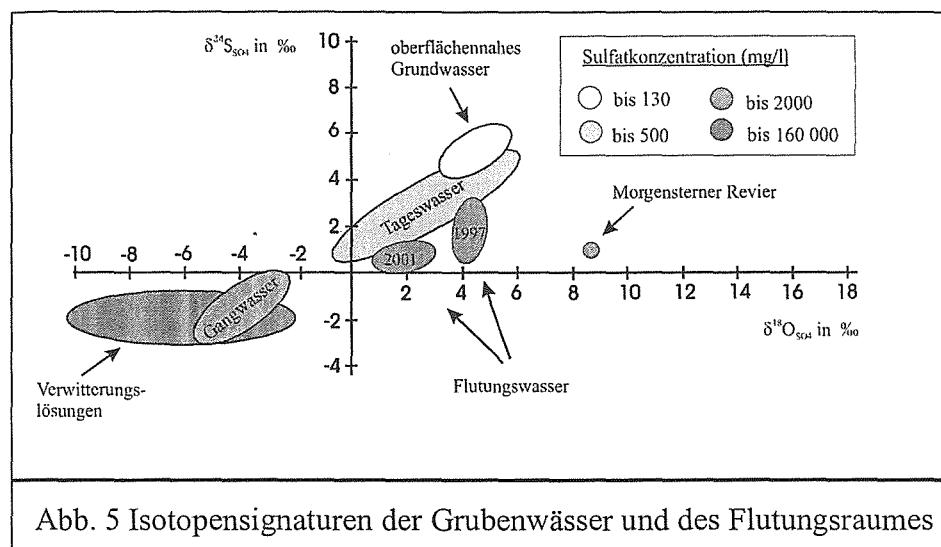


Abb. 5 Isotopensignaturen der Grubenwässer und des Flutungsraumes

Berechnungen des hypothetischen Mischungswassers aus den verschiedenen Anteilen von Grund- und Sickerwasser (vgl. Tab. 3) ergeben $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte (0,9 bis 1,5 ‰), die mit den gemessenen (0,4 bis 4,5 ‰) nur teilweise übereinstimmen. Die berechneten Sulfatkonzentrationen liegen mit 390 mg/l erheblich unter den gemessenen sowohl von 1997 (1222

mg/l) als auch von 2000/01 (920 mg/l).

Isotopenuntersuchungen an Wässern des Morgensterner Reviers zeigen, dass diese ebenfalls eine von den Grubenwässern des Freiberger Reviers stark unterschiedliche Isotopensignatur aufweisen. Als Besonderheit fällt dabei der hohe $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Wert auf. Die Sulfatgehalte betragen im Jahr 2000 1670 mg/l. Aufgrund der isotopengeochemischen und ebenfalls geochemischen Parameter (vgl. oben) wird vermutet, dass Wässer des Morgensterner Reviers dem Flutungsraum zufließen.

Messungen am Flutungswasser in den Jahren 2000/01 lassen eine Abnahme der Sulfatkonzentration auf 75 % der des Jahres 1997 erkennen (Tab. 4). Damit verbunden ist eine Verschiebung der Isotopensignatur des Sulfates in Richtung niedrigerer $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte. Dies könnte auf eine Abnahme des Zuflusses aus dem Morgensterner Revier als Folge einer Stollnsanierung 1997 zurückzuführen sein.

Tab. 4 Zeitliche Änderung der Sulfatkonzentration und der Isotopensignaturen im Flutungswasser

Parameter	1997*) (Mittelwert)	2000/01 (Mittelwert)
Sulfatkonzentration [mg/l]	1222	920
$\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ [%] (CDT)	2,1	1,3
$\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ [%] (SMOW)	3,9	1,7

*) Messungen 1997 aus HAUBRICH (2001)

Teufenabhängige chemische, physikochemische und isotopengeochemische Charakteristik des Flutungswassers

In den Jahren 1982 (KATZWEDEL 1982) und 1984 (PETER 1984), 1997 (BAACKE 1999), 2000 und 2001 wurden physikochemische und hydrochemische Tiefenmessungen in verschiedenen Ni-

veaus des gefluteten Teil des Schachtes „Reichen Zeche“ durchgeführt. Sie belegen deutliche Änderungen der teufenabhängigen Wasserchemie und des Strömungsregimes in Schacht und Flutungsraum. Die Probennahmen wurden immer einige Meter oberhalb des entsprechenden Sohlenniveaus durchgeführt (Ausnahme: Messungen PETER 1984).

Hydrochemie

Die Konzentrationen der lagerstättentypischen Wasserinhaltsstoffe (Zn, Cd, Pb, As, Ca, SO₄) zeigten 1982 generell eine diskontinuierliche Zunahme in der Tiefe. Die mittleren Sohlen mit dem größten Abbauvolumen wiesen dabei erhöhte Ca, Fe, Mn und Zn-Gehalte und etwas niedrigere pH-Werte auf. Die Temperatur stieg von 22°C am Überlauf auf 37-45°C im Bereich der Schachtsohle.

Im Jahr 2001 dagegen sind Temperatur (19,0-19,3 °C), elektrische Leitfähigkeit (1913-1980 µS/cm) und die Stoffkonzentrationen über das gesamte Schachtprofil, insbesondere aber unterhalb der 11. Sohle, relativ ausgeglichen. Dies lässt die Annahme zu, dass noch vor Zustrom des Flutungswassers auf den verschiedenen Sohlen zum Reiche Zeche Schacht eine weitestgehende Mischung der in den Flutungsraum versickernden, chemisch sehr unterschiedlichen Wässer stattfindet. Im Bereich der oberen Sohlen kommt es zur Ausbildung von geringen Temperatur-, Leitfähigkeits-, pH- und Eh-Sprüngen, die Zuströme auf einzelnen Sohlen markieren (Abb. 6 und Abb. 7). Diese Parameteränderungen sind direkt abhängig vom Sickerwasserzustrom in den Flutungsraum und damit vom Niederschlag oder von (saisonalen) anthropogenen Einleitungen (z.B. Streusalzeinsatz, NaCl). Höhe und Verteilung der Schwankungen („Parametersprünge“) im Schachtprofil können sich deshalb innerhalb einiger Wochen bis Monaten ändern.

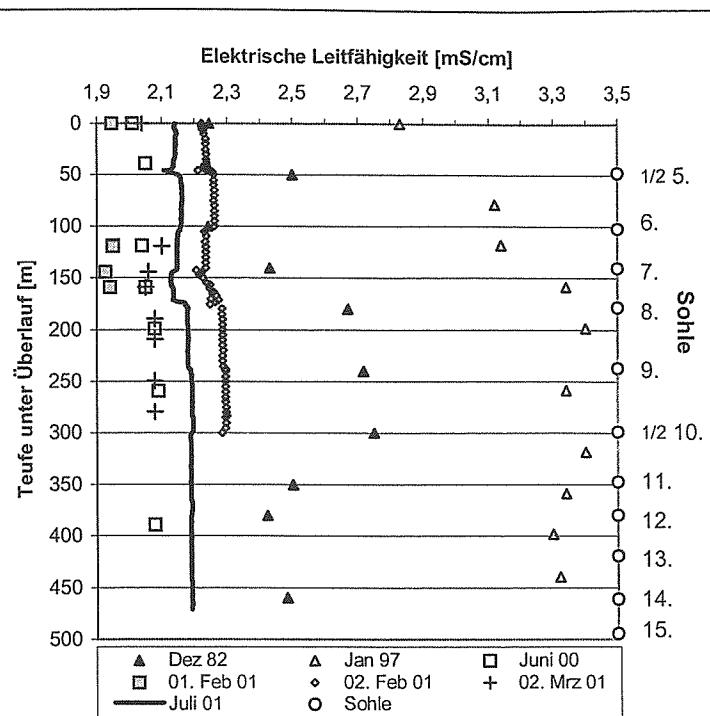


Abb. 6 Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit im Schachtprofil

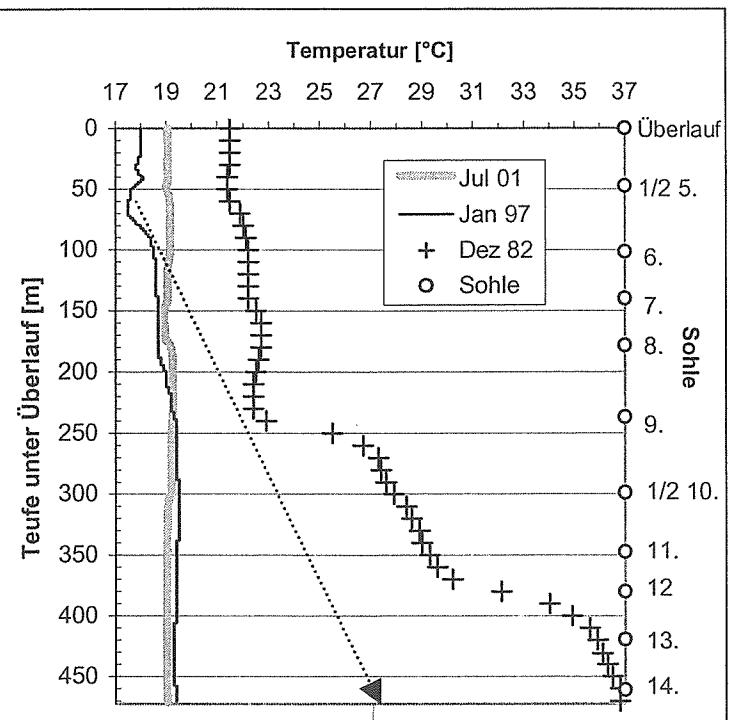


Abb. 7 Temperatur-Entwicklung im Reiche Zeche Schacht

Strömungsmessungen

Hochauflösende Strömungsmessungen weisen eine deutliche aufwärts gerichtete Strömung bis hinab zur 13. Sohle nach (Abb. 8).

Die Konstanz der physikochemischen Parameter, insbesondere der Temperatur die hier deutlich unter der geothermischen Tiefenstufe liegt, auch zwischen 13. und 15. Sohle ist darüber hinaus Indiz für eine Strömung auch im tiefsten Bereich des Schachtes. Damit ist ein Zustrom entlang der 15. Sohle nachgewiesen. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt zwischen 1,4 und 2,5 m/h im Bereich der unteren und zwischen <1 und 3,5 m/h im Bereich der oberen Sohlen. Dies stimmt prinzipiell mit den Ergebnissen eigener Strömungsmodellierungen auf Grundlage eines digitalen 3D Prinzipmodells der Freiberger Grube über ein. Ein beständiger Wechsel zwischen laminaren und turbulenten Strömungsverhältnissen im Schacht konnte in 5 von 11 Messteufen beobachtet werden. Laterale Strömungsrichtungen konnten im Bereich zweier Sohlenanschlüsse zwar nachgewiesen werden. Sie lassen jedoch keine sicheren Rückschlüsse auf Zu- bzw. Abströme entlang dieser Sohlen zu. Möglich wäre ein Abstrom von Wässern entlang der 8. Sohle sowie ein Zustrom auf dem Niveau der $\frac{1}{2}$ 5. Sohle (Abb. 8).

Die geringen Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung des Flutungswassers entlang des Schachtprofils (siehe oben) könnten auch auf kurzfristige Änderungen des Strömungsregimes im Flutungsraum zurückzuführen sein, z.B. indiziert durch Niederschlagsereignisse/Niederschlagsperioden (Erhöhung des hydrostatischen Drucks durch Anstieg des Grundwasserspiegels).

Isotopengeochemie

PETER (1984) stellte fest, dass das Flutungswasser in den Teufen mit dem größten Abbauvolumen an $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ angereichert ist (Abb. 9) und führte diese Beobachtung auf den Zustrom isotopisch schwerer Wässer auf diesen Sohlen sowie auf eine unvollständige Durchmischung des Schachtwas-

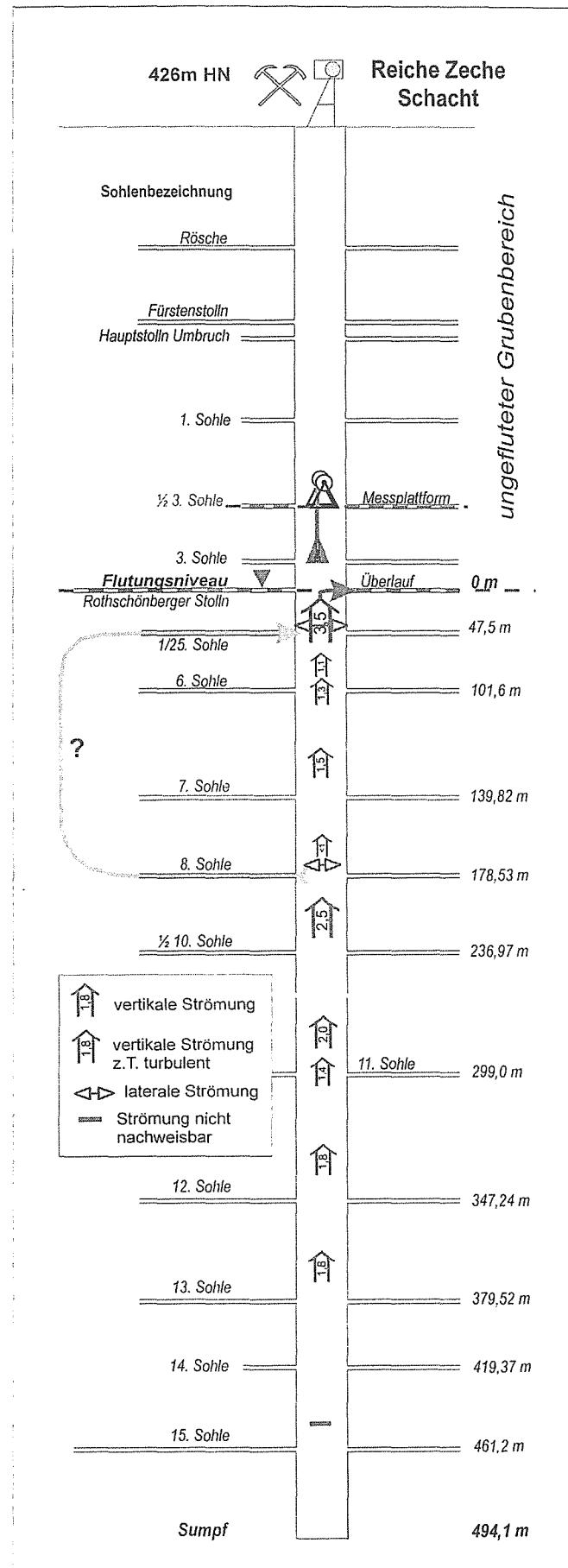
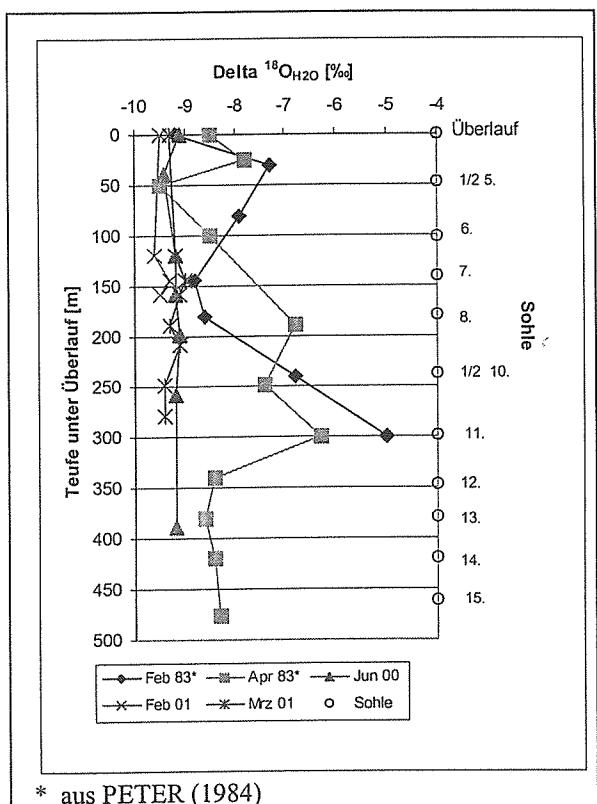


Abb. 8 Strömung im Schacht Reiche Zeche

sers zurück. Die Anreicherung an ^{18}O korreliert dabei mit Konzentrationspeaks verschiedener lagerstättentypischer Wasserinhaltsstoffe wie Zn, Mn und Cd. Geringe Unterschiede der $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Messungen der Jahre 2000 und 2001 unterstützen die Aussage einer zunehmend guten Mischung der Wässer im Flutungsraum, die anhand der über das gesamte Schachtprofil relativ ausgeglichenen Stoffkonzentrationen getroffen wurden (Abb. 10).

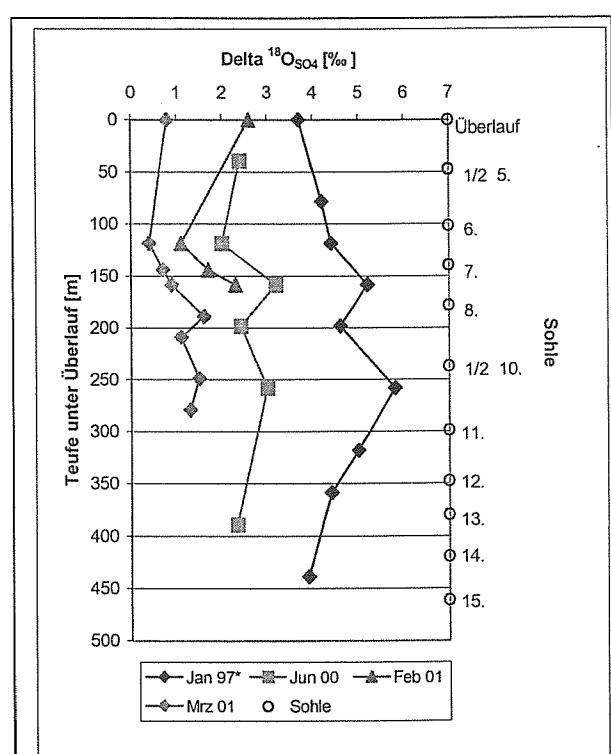
Die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Signaturen der Grubenwässer im ungefluteten Bereich werden durch den Zufluß sulfidoxidationsbeeinflusster Wässer bestimmt (vgl. Abb. 5). Eine Sonderstellung, die nicht allein auf Sulfidoxidationsprozesse zurückgeführt werden kann, nimmt das Flutungswassers aufgrund seiner $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ - und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Isotopensignatur ein.

Während die $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte in den Messungen seit 2000 nur geringe Schwankungen zeigen, weisen $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ und $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ deutliche Schwankungen im Schachtprofil auf (Messungen seit 1997). Dabei können für $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ gleiche Tendenzen während verschiedener Beprobungszeitpunkte beobachtet werden. An ^{18}O angereicherte Wässer im Bereich der 8. und 11. Sohle können auf einen Zufluss von isotopisch schwereren Wässern zum Flutungsraum in diesen Sohlenbereichen hinweisen. Im Gegensatz zum $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ zeigen die $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ -Werte unterschiedliche Tendenzen während verschiedener Beprobungszeiträume. Da dieses Verhalten bisher nicht erklärt werden kann, soll versucht werden, anhand zukünftiger Messungen Aufschluß darüber zu gewinnen.



* aus PETER (1984)

Abb. 9 Zeitliche und teufenabhängige Änderungen der $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte im Schachtprofil



* aus HAUBRICH (2001)

Abb. 10 Zeitliche und teufenabhängige Änderungen der $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ -Werte im Schachtprofil

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Untersuchungen an Grubenwässern des Grubenfeldes Freiberg konnten Menge und Qualität des Flutungswassers und der dem Flutungsraum zusitzenden Sicker- und Grundwässer näherungsweise bestimmt werden. Die hohen Schwermetallkonzentrationen im Flutungswasser sind danach vor allem auf den Eintrag aus dem auch in Zukunft ungefluteten Grubenbereich (O_2 -gesättigt) zurückzuführen. Die Dynamik der Konzentrationsabnahme wichtiger Schadstoffe im Flutungswasser verlangsamt sich zunehmend, seit Mitte der 90er Jahren sind nur geringfügige Änderungen zu erkennen. Deshalb ist eine wesentliche Abnahme umweltrelevanter Schadstoffkonzentrationen und damit eine Entlastung der Vorfluter Triebisch, (Mulde) und Elbe in den nächsten 10-20 Jahren nicht zu erwarten. Der Vergleich eines berechneten Mischwassers mit dem Flutungswasser zeigt aber, dass bisher nicht sicher bekannte Prozesse oder Zuflüsse weitere hohe Gehalte an umweltrelevanten Schadstoffen (insbesondere an SO_4) liefern. Isotopengeochemische Untersuchungen unterstützen dabei die Vermutung eines Zustroms hochmineralisierter Wässer, vermutlich entlang der mittleren Sohlen (an $^{18}O_{SO_4}$ angereichertes Wasser) aus dem Revier Morgenstern. Die Stoffkonzentrationen und physikochemischen Parameter sind 2001, im Gegensatz zu 1997, über das gesamte Schachtprofil relativ konstant. Dies weist auf eine gute Mischung der Sicker- und Grundwässer im Flutungsraum hin. Strömungsmessungen belegen eine bis in das tiefste Niveau (15. Sohle) hinabreichende aufwärtsgerichtete Strömung, die sich durch weitere Sohluflüsse nach oben hin verstärkt. Es konnten Indikatoren für laterale Strömung im Bereich der 8. und ½ 5. Sohle gefunden werden.

Zukünftige Arbeiten werden sich auf das Monotoring des Flutungswassers sowie die Entwicklung der chemischen und isotopengeochemischen Verhältnisse im Schachtprofil konzentrieren. Von entscheidender Bedeutung ist weiterhin die Klärung der hohen Sulfatgehalte im Flutungswasser, z.B. durch den sicheren Nachweis eines Zustroms aus dem Morgensterner Grubenteil. Hier könnte ein Tracerversuch weitere Anhaltspunkte liefern.

Danksagung

Die Arbeiten zu dieser Veröffentlichung wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 546 „Geochemische Prozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sickerwasser und Grundwasser“ gefördert (Publikationsnummer: 175).

Literatur

- AUTORENkollektiv (1973): Chronik der Grube Freiberg.- Staatsarchiv Dresden, Aussenstelle Freiberg.
- BAACKE, D. (1999): Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube Freiberg/Sachsen.- Unveröff. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.
- BERRIOS D. (1995): Hydrologisch-hydrogeologischer Überblick für die Stadt Freiberg.- Unveröff. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- HAUBRICH F. (2001): Schwefel- und Sauerstoffisotopen als Tracer für Wechselwirkungen zwischen Atmo-, Pedo-, Hydrosphäre und der Sulfiderzlagerstätte in der Region Freiberg.- Wissenschaftliche Mitteilungen 17, Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg.
- HEIMANN H. & SYMMANGK R. (1994): Beiträge zum Bodenschutz in der Region Chemnitz-Erzgebirge.- Staatliches Umweltfachamt, Chemnitz.
- KATZWEDEL A. (1982): Geothermische Bohrlochmessungen im Erzgebirge.- Unveröff. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg.

- KOLITSCH S. (1996): Hydrogeologische Untersuchungen in der Himmelfahrt Fundgrube.- Unveröff. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- MARTIN M., BEUGE P., KLUGE A., HOPPE T. (1994): Grubenwässer des Erzgebirges – Quelle von Schwermetallen in der Elbe.- Spektrum der Wissenschaften 5/94, 102-107.
- MEYER M. (1960): Wasserverhältnisse der BA Freiberg des VEB Bleierzgruben „Albert Funk“ unter besonderer Berücksichtigung der Hochwassersicherungsmaßnahmen.- Freiberger Forschungshefte, A 176, S. 26-40, Freiberg.
- MILDE G. (1973): Gutachterliche Stellungnahme zur Qialität der Wässer des Rothschönberger Stollns und sich andeutenden Tendenzen.- Unveröff. Gutachten, TU Bergakademie Freiberg.
- PETER G. (1984): Untersuchungen zu Dynamik, Chemismus und Temperaturregime von Wässern erstoffener Grubenbaue.- Unveröff. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- PIETZSCH K. (1963): Geologie von Sachsen.- VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- POESER H. (1996): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen von Anzüchten im Freiberger Stadtgebiet.- Unveröff. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg.
- RÖSNER G. (1987): Übersichtsgutachten Hydrogeologie, Kreis Freiberg.-Unveröff. Gutachten, VEB GFE Freiberg
- SACHER G. (1995): Persönliche Auskünfte und Datenmaterial der Saxonia AG i. L.- In BAACKE D. (1999): Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube Freiberg/Sachsen.- Unveröff. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.
- SCHMIDT K. (1959): Zur tektonischen Analyse des Sächsischen Erzgebirges.- Abhandlung zur Geotektonik, Nr. 18, Berlin.