

Endbericht

PROBENNAHME AN STOLLEN- REPRÄSENTATIVE ENTNAHMEPUNKTE UND SCHWEBSTOFFVERHALTEN



Auftraggeber:

**Landesbetrieb für Hochwasserschutz und
Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW)**

Gewässerkundlicher Landesdienst

Willi-Brundert-Str. 14

06132 Halle (Saale)

Auftragnehmer:

Göttelmann + Ross

Beratende Geowissenschaftler GbR

Jahnstraße 1

79206 Breisach

Bearbeitung: J.-H. Ross

PROBENNAHME AN STOLLEN- REPRÄSENTATIVE ENTNAHMEPUNKTE UND SCHWEBSTOFFVERHALTEN

Laufzeit: 20.05.-20.08.2008

Inhalt	Seite
Veranlassung	2
1 Einführung	2
2 Untersuchungsgebiet und Methodik	3
3 Ergebnisse	5
3.1 Probennahmen Schlüsselstollen	5
3.2 Probennahmen Segen-Gottes-Stollen	8
4 Diskussion	9
4.1 Probennahme bei Sedimentaufwirbelung	10
4.2 Grubengebäude und Beprobungsorte	11
4.3 Probeentnahmetechnik	11
4.4 Vergleich zur Schwebstoffproblematik bei ungefassten Quellen	12
5 Schlussfolgerungen	13
6 Danksagung	14
7 Literatur	14
Anhang 1: Analysenergebnisse	15
Anhang 2: Photodokumentation	21

0 VERANLASSUNG

Für das Handbuch „Grundwasserbeobachtung des LfUG Sachsen (2004) wurde das Merkblatt „Grundwasserprobennahme“ erarbeitet, welches Vorbereitung, Durchführung und Qualitätssicherung bei der Grundwasserprobennahme beschreibt. Besondere Hinweise zu Probennahme und zur Dateninterpretation an Stollen sind bisher in diesem Handbuch nicht enthalten. Auch in Regelwerken und in der Fachliteratur (LAWA 1995, LfU 1993, LfU 1999, LfU 2001, DVGW 2001, ATV-DVWK 2002) fehlen weiterführende Hinweise für die Durchführung von repräsentativen Probennahmen an Stollen. In den Grundwassermessnetzen von Sachsen-Anhalt und Sachsen sind zahlreiche Stollenmundlöcher enthalten. Deshalb beauftragte der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft, Sachbereich Gewässerkunde, des Landes Sachsen-Anhalt (LHW) das Büro Göttelmann + Ross, Beratende Geowissenschaftler GbR mit der Durchführung einer Studie zur Grundwasserprobennahme an Stollen. Bearbeiter seitens des Auftragnehmers war J.-H. Ross, Betreuer seitens des Auftraggebers waren E. Barthel und Ch. Schenkling.

1 EINFÜHRUNG

Als Stollen werden allgemein im Untergrund angelegte, langgestreckte Hohlräume mit horizontalem oder leicht geneigtem Verlauf bezeichnet. Beispiele finden sich in den Bereichen Bergbau, Tunnelbau, Eiskeller, Festungsanlagen und Stollen zur Fassung von Kluftquellen. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf Bergwerksstollen. Auf die hydrogeologischen Verhältnisse in einem Einzugsgebiet können diese Stollen einen erheblichen Einfluss haben:

1. Bergwerksstollen sind durch das Grubengebäude mit Lagerstätten verbunden. Deshalb können hier besonders hohe Stoffkonzentrationen und –frachten vorkommen
2. durch die räumliche Ausdehnung des Grubengebäudes können Grundwasserverhältnisse verändert werden. Mögliche Auswirkungen sind künstliche Fließwege (auch durch grundwassergeringdurchlässige Schichten hindurch) oder auch veränderte Einzugsgebietsgrenzen

Stollen sammeln diffus austretendes Grundwasser oder schneiden stark wasserführende Klüfte an. Diese Wässer werden im Bergbau auch allgemein als Gebirgswasser oder Bergwasser bezeichnet. Räumlich eng begrenzte Kluftwasseraustritte können als Quellen unter Tage bezeichnet werden. Der Ausdruck Grubenwasser bezieht sich auf das Wasser im Grubengebäude. Engräumig begrenzte Grundwasseraustritte bei Stollenmundlöchern können als Sonderformen von Quellen eingestuft werden (vgl. DIN 4049-3). Bergwerksstollen sind wichtige Messorte zur Grundwasserbeobachtung für Bergbaufolgeschäden, Einzugsgebiete und Flussgebiete (Wasserkörper der WRRL, EU 2006). Im Grundwassermessnetz von Sachsen-Anhalt sind deshalb Stollenmundlöcher als Messstellen integriert. Ein wesentlicher Unterschied bei der Grundwasserprobennahme an Stollen gegenüber normalen Quellen oder Bohrungen und Brunnen/Schächten ist der Fließweg durch das Grubengebäude:

1. außerhalb gefluteter Abschnitte fließt das Wasser in Freispiegelgerinnen mit Atmosphärenkontakt
2. Wässer verschiedener Herkunftsbereiche mit unterschiedlichen geogenen Hintergrundwerten können durchmischt werden
3. Grundwasser aus Lagerstätten kann besonders hohe Stoffkonzentrationen aufweisen
4. die Wasserbeschaffenheit kann sich durch biogeochemische Prozesse an Partikeln und an anderen Oberflächen verändern
5. durch chemisch-physikalische Veränderungen können in den Bereichen von der Fließstrecke im Grubengebäude und Mundloches Fällungs- und Lösungsvorgänge auftreten

6. auf dem Fließweg im Grubengebäude können Partikel sedimentieren oder durch Erosion aufgenommen werden
7. anthropogene Einträge können auch aus Einrichtungen aus dem Grubengebäude selbst stammen (z. B. Holz zum Grubenverbau oder Hydrauliköle)

Bei Stollen bestehen für Schwebstoffe im Vergleich zu anderen Grundwassermessstellen umfangreichere Möglichkeiten für Eintrag oder Sedimentation. Gleichzeitig treten auch partikulär gebundene Stoffe wie Arsen oder Blei (DVWK 1998, LAWA 1999) in manchen Stollen in hohen Konzentrationen auf (Ross et al 2006). Schwebstoffeinfluss auf ausgewählte Parameter und Repräsentativität der Entnahmepunkte sind deshalb Schwerpunkte dieser Studie.

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND METHODIK

Für Probennahmen wurden zwei Stollen mit Messstellen der LHW an den Mundlöchern ausgewählt. Diese Stollen liegen im südlichen Harzvorland in den Landkreisen Mansfeld-Südharz und Sangerhausen im südlichen Sachsen-Anhalt. Der **Schlüsselstollen** wurde 1879 fertiggestellt und ist mit 31 km Länge einer der bedeutendsten Entwässerungsstollen Europas. Er dient zur Entwässerung der Bergwerke im Kupferschieferflöz der Mansfelder Mulde (LAGB 2007). Der Kupferschiefer ist im unteren Zechstein mit einer Mächtigkeit von einigen Dezimetern ausgebildet. Die Zechsteinsedimente bestehen in erheblichem Umfang aus Steinsalz und Anhydrit. Im Liegenden steht das Rotliegende an. Vorfluter des Schlüsselstollens ist die Schleize. Der **Segen-Gottes-Stollen** wurde 1885 mit in Nord-Süd-Richtung mit 5 km Länge durch die Sangerhäuser Mulde erstellt. Er dient als Vorfluter für ost-west-ausgerichtete Entwässerungsstollen mit 3,5 km Länge von Osten (über Junger Adolph-Schacht und Röhrigschacht) und 1 km Länge von Westen (LAGB 2007). Neben dem angebauten Kupferschiefer stehen hier Stinkschiefer, Anhydrit und Basalanhydrit mit Verkarstungen an. Bis zum Stollenmundloch durchquert der Segen-Gottes-Stollen auch Buntsandstein und Pleistozän. Vorfluter des Segen-Gottes-Stollens ist die Gonna (Völker und Völker 1982, Korte, Osterloh und Völker 1982).

Im Zeitraum der Probennahme am 3./4. Juni 2008 war die Witterung überwiegend trocken und warm, teilweise mit abendlichen Gewitterschauern. Der Jahreszeit entsprechend lagen Niedrigwasserverhältnisse vor. Wesentliche Durchflussschwankungen kamen in dieser Zeit nicht vor. Die Probenentnahmen wurden als Schöpfprobe durchgeführt, da die Entnahme an allen Stellen für die zu analysierenden Stoffe problemlos möglich war. Die Messung der Vor-Ort-Parameter erfolgte mit der Standardausrüstung des LHW (WTW-Geräte) und Handmessgeräten des Auftragnehmers (Temperatur und elektr. Leitfähigkeit: WTW Cond 340i, WTW LF318 (nachfolgend werden Werte bei Referenztemperatur 25 °C verwendet), pH-Wert: Meinsberg TM39, gelöster Sauerstoff: Meinsberg Oxy AM 39). Durchflussmessungen erfolgten mit Induktionsmessgerät durch das LHW (Ch. Schenkling). Die Auswahl der Laborparameter erfolgte anhand von früheren Untersuchungsergebnissen (Tab A4) und nach der Tochterraichtlinie Grundwasser der WRRL (EU 2006). Die Labor-Analytik wurde beim LHW durchgeführt. Wegen der extrem hohen Salzmatrix, musste das Probengut im Labor zur Analyse hoch verdünnt werden. Deshalb lagen auch die Bestimmungsgrenzen für einzelne Parameter höher als in unbelasteten Wässern. Proben für gelöste Stoffe wurden vor Ort filtriert (0,45 µm Porenweite). Für Rückschlüsse auf Schwebstoffverhalten wurden die Ergebnisse unfiltrierter und filtrierter Proben verglichen. Frachtberechnungen erfolgten auf der Grundlage von gemessenem Durchfluss und Konzentrationen für den Zeitraum mit Extrapolation auf einen Tag. Um den möglichen Einfluss von aufgewirbeltem Sediment einschätzen zu können, wurden am Mundloch Schlüsselstollen Vergleichsproben bei normaler Strömung und bei oberstromig aufgewirbeltem Sediment durchgeführt. Schwebstoffmengen selbst konnten im Rahmen des Projektes nicht bestimmt werden. Tab. 1 gibt eine Übersicht der Beprobungsorte. Die Stollenbefahrungen erfolgten mit Hilfe von Mitarbeitern der GVV.

Tab. 1: Beprobungsorte.

Stollen	Probennahmestelle	Mst.-Nr.	Teufe / km bis Mundl.	Lage	Datum	Parameter
Schlüsselstollen	Freiesleben Schacht	302559	-113 m u.F. / 20 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Schlüsselstollen	Freiesleben, Anstau Mansfelder Mulde	302560	-113 m u.F. / 20 km	Zufluss	03.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Schlüsselstollen	Lichtloch 26	302561	-130 m u.F. / 18 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Schlüsselstollen	Lichtloch 26		-130 m u.F. / 18 km	Gebirgswasser	03.06.08	Vor-Ort
Schlüsselstollen	Lichtloch 20Z	302562	-90 m u.F. / 8 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Schlüsselstollen	Mundloch, innen	302563	72 m NN / 0 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab.
Schlüsselstollen	Mundloch, außen	302565	71,5 m NN / 0 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Schlüsselstollen	Mundloch, außen, Aufwirbelung	302564	71,5 m NN / 0 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort, Lab.
Schlüsselstollen	Friedeburg (u. h. Mundloch)	346130	71 m NN / -0,1 km	Hauptstrom	03.06.08	Vor-Ort
Segen-Gottes-St.	Röhrigschacht 1	302555	-170 m u.F. / 7 km	Hauptstrom	04.06.08	Vor-Ort, Lab.
Segen-Gottes-St.	Röhrigschacht 2, untere Sole	302556	-285 m u.F. / 7 km	Pumpwasser	04.06.08	Vor-Ort, Lab.
Segen-Gottes-St.	Junger Adolph Schacht	302557	< -113 m u.F. / 6 km	Hauptstrom	04.06.08	Vor-Ort, Lab., Q
Segen-Gottes-St.	Sangerhausen, Mundloch	302558, 346135	140 m NN / 0 km	Hauptstrom	04.06.08	Vor-Ort, Lab., Q

Q: Durchfluss, Vor-Ort und Labor-Parameter vgl. Anhang Tab. A1 u. A2, u.F.: unter Flur, NN: Normalnull



Abb. 1: Übersichtsplan Probenentnahmepunkte (Kartengrundlage GVV)

3 ERGEBNISSE

3.1 Probennahmen Schlüsselstollen

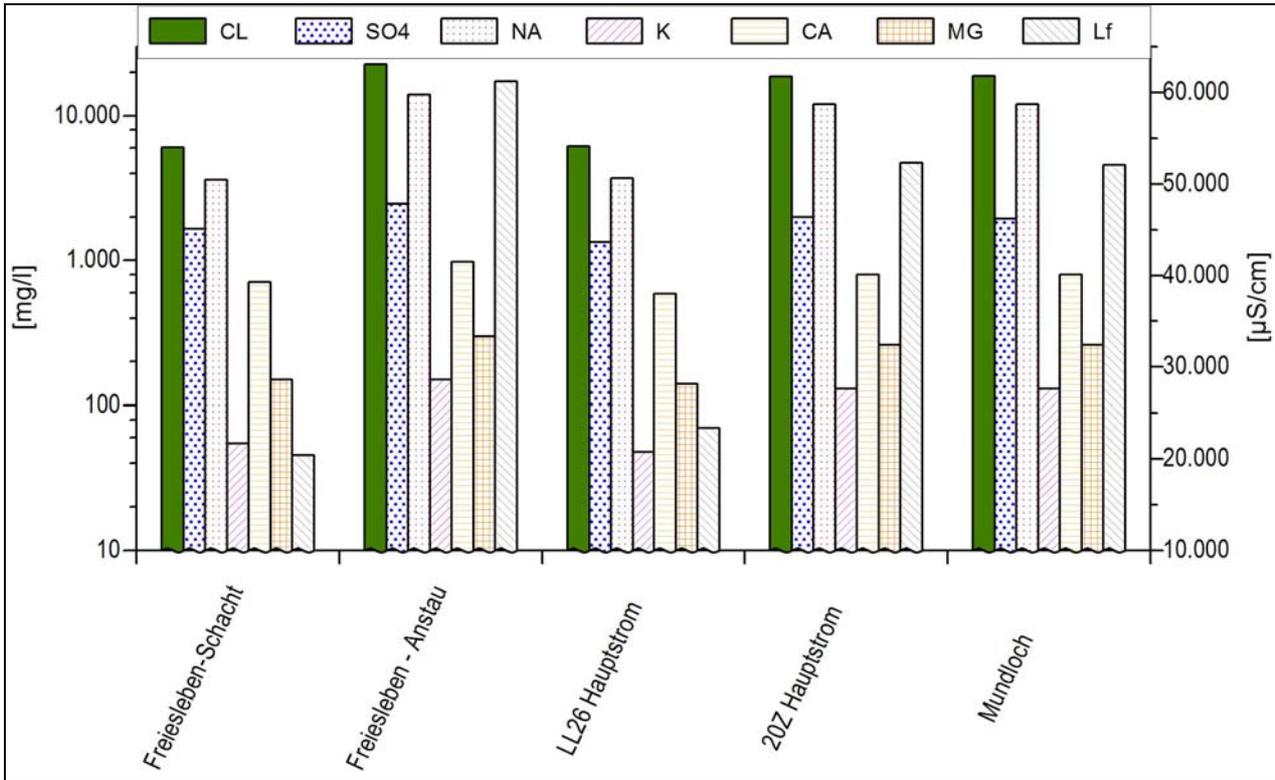


Abb. 2: Anionen und Kationen zur Salzbelastung im Schlüsselstollen.

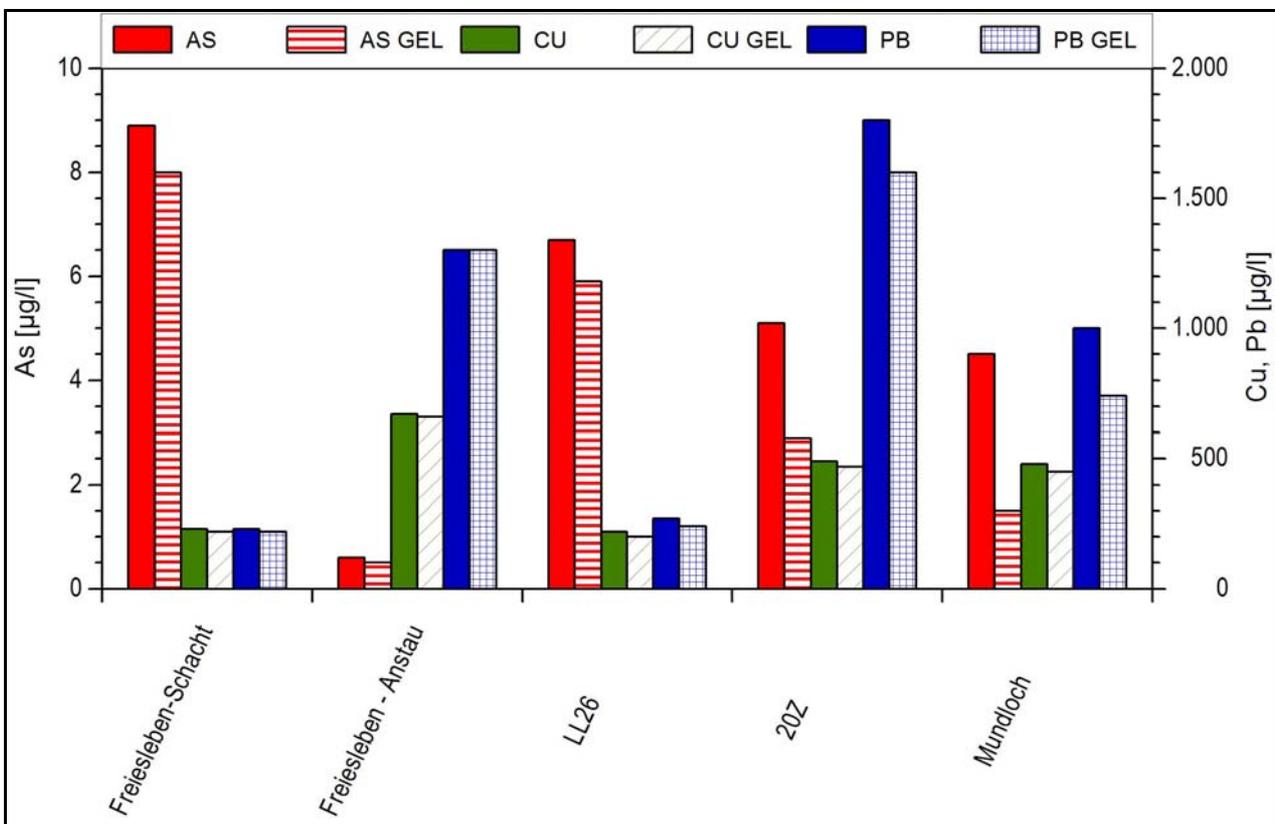


Abb. 3: Arsen, Kupfer und Blei im Schlüsselstollen.

Freiesleben-Schacht (Mansfeld)

Die Probennahme im Hauptstrom des Entwässerungsstollens (161 l/s) wurde aus der freien Welle geschöpft. Wassertemperatur mit 11,9 °C und 9,4 mg/l O₂ (88 % Sättigung) entsprechen dem Einfluss der Atmosphäre im Stollen. Die elektrische Leitfähigkeit ist mit 20400 µS/cm der auffälligste Messwert. Als Anionen tragen zu diesem hohen Leitfähigkeitswert vor allem Chlorid (6070 mg/l) und Sulfat (1650 mg/l) bei. Dominierende Kationen sind Natrium (3600 mg/l) und Calcium (710 mg/l). Kalium (55 mg/l) und Magnesium (150 mg/l) sind ebenfalls verhältnismäßig hoch konzentriert. Entsprechend diesen hohen Härtebildner-Konzentrationen ist das Wasser mit 134 °dH sehr hart, wobei die Carbonathärte mit 15 °dH einen relativ geringen Anteil hat. Bei Metallen und Arsen sind hier die Konzentrationen für Gesamtanalyse kaum höher als für gelöste Stoffe. Während Arsen mit 8,9 µg/l noch unterhalb des Trinkwassergrenzwertes lag, traten Kupfer (230 µg/l), Blei (230 µg/l) und Zink (12 mg/l) in hohen Konzentrationen auf.

Der im Anstau bei Schacht Freiesleben beprobte Zulauf aus der Mansfelder Mulde betrug nur 19 l/s. Oberhalb der Probennahmestelle strömte das Wasser nur sehr langsam. Die Leitfähigkeit betrug hier 61200 µS/cm und der Sauerstoffgehalt lag bei 1,5 mg/l (14 % Sättigung). Die noch höhere Mineralisation dieses Wasser war vor allem auf Chlorid (22600 mg/l) und Natrium (14000 mg/l) zurückzuführen, wobei auch Sulfat, Calcium Magnesium und Kalium in höheren Konzentrationen als im Hauptstrom vorlagen. Die im Hauptstrom untersuchten Schwermetalle traten hier in nochmals deutlich höheren Konzentrationen auf, wobei die Werte für Gesamtanalyse und gelöste Stoffe hier wieder praktisch gleich hoch waren (Kupfer 670 µg/l, Blei 1300 µg/l, Zink 31 mg/l). Zusätzlich traten hier 79 µg/l Cadmium auf, während Arsen nur in Spuren (0,6 µg/l) vorkam.

Lichtloch 26 (Großörner)

Über Lichtloch 26 (LL 26) erfolgt ein Zugang zum Entwässerungsstollen stromabwärts von „Freiesleben“. Der Durchfluss war mit 205 l/s etwas höher. Die Stoffkonzentrationen waren ähnlich wie bei Schacht Freiesleben, wenn man die unterschiedlichen Anteile von Hauptstrom und Zulauf „Anstau“ berücksichtigt. Die Leitfähigkeit lag bei 23400 µS/cm. Teilweise waren die Konzentrationen auch etwas niedriger (Sulfat, Kalium, Calcium, Magnesium, Kupfer, Bor, Arsen, Zink). Für Bor und Arsen waren an dieser Messstelle auch die Frachten eindeutig etwas geringer als im Hauptstrom bei „Freiesleben“ (Tab. A3).

Zusätzlich wurde an dieser Messstelle für gesondert abgeführtes Gebirgswasser (ca. 2 l/s) die Vor-Ort-Parameter bestimmt. Dieses Wasser wurde früher zur Trinkwasserversorgung genutzt. Mit 1670 µS/cm war hier die elektrische Leitfähigkeit um mehr als eine Größenordnung geringer. Temperatur, pH, und Sauerstoff unterschieden sich kaum vom Hauptstrom.

Lichtloch 20Z (Gerbstedt)

Der Hauptstrom bei Lichtloch 20Z (LL 20Z) zeigte eine Durchflusszunahme auf 365 l/s mit einer sehr hohen elektr. Leitfähigkeit von 52300 µS/cm. Deutlich erhöhte Stoffkonzentrationen für fast alle Untersuchungsparameter deuten auf weitere, belastete Zuflüsse hin. Für Blei und Arsen fielen die Gesamtanalysen etwas höher als für gelöste Stoffe aus. Die Konzentration für gelöstes Arsen lag mit 2,9 µg/l um 2 µg/l unter dem Wert von LL 26.

Schlüsselstollen Mundloch bei Friedeburg

Der Durchfluss am Stollenmundloch betrug 424 l/s. In der freien Welle wurden innerhalb des Mundlochgebäudes und über Tage unterhalb der Wehrstufe Proben entnommen. Über Tage erfolgte eine zusätzliche Probennahme, während künstlich Sediment aufgewirbelt wurde. Vor-Ort-Parameter wurden auch an der etwa 100 m abwärts liegenden Fließgewässermessstelle Friedeburg bestimmt.

Für die Vor-Ort Parameter ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede zu Lichtloch 20Z und auch nicht zwischen den einzelnen Messstellen im Bereich des Mundlochs. Die Sauerstoffwerte

nahmen nach dem Überfallwehr im Bereich über Tage nochmals von 8,9 mg/l auf 9,7 mg/l zu und lagen nach einem weiteren Wehr bei der letzten Messstelle bei 10,0 mg/l. Auf dieser Strecke stieg der pH-Wert von 7,1 auf 7,2 an. Die Laboranalysen zeigten für die meisten Parameter wie bei Lichtloch 20Z hohe Konzentrationen an. Lediglich die Bleikonzentrationen gingen etwas zurück. Die ohne Aufwirbelung entnommen Proben innerhalb und außerhalb des Stollenmundlochs unterschieden sich in den Ergebnissen kaum.

Das Ergebnis der während absichtlicher Sedimentaufwirbelung entnommenen Probe fiel für Arsen, Blei, Kupfer, Eisen und Cadmium in gelöster Form praktisch unverändert aus. In der in der Gesamtanalyse ohne Partikelfiltration zeigten jedoch Arsen, Blei, Eisen, Kupfer und Phosphor erheblich höhere Werte (Abb. 4). Der stärkste Anstieg war für Arsen-Gesamt mit von 4,8 µg/l auf 69 µg/l. Eisen- und Phosphorkonzentration nahmen bei der Gesamtanalyse ebenfalls um ein mehrfaches zu. Die Konzentrationen der Härtebildner (Chlorid, Sulfat, Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Hydrogencarbonat) und auch Cadmium, Mangan, Zink blieben praktisch unverändert.

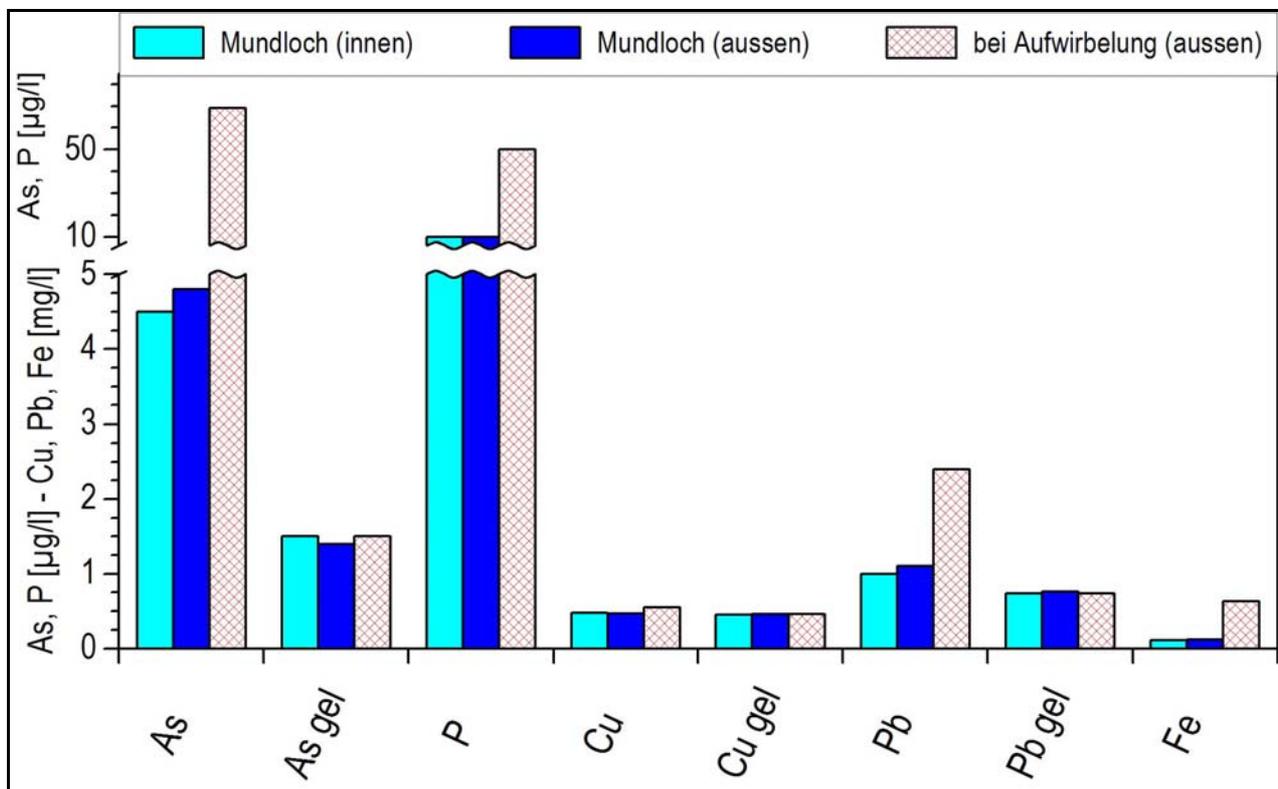


Abb. 4: Vergleich von Schöpfproben am Mundloch Schlüsselstollen ohne und mit Sedimentaufwirbelung.

3.2 Probennahmen Segen-Gottes-Stollen

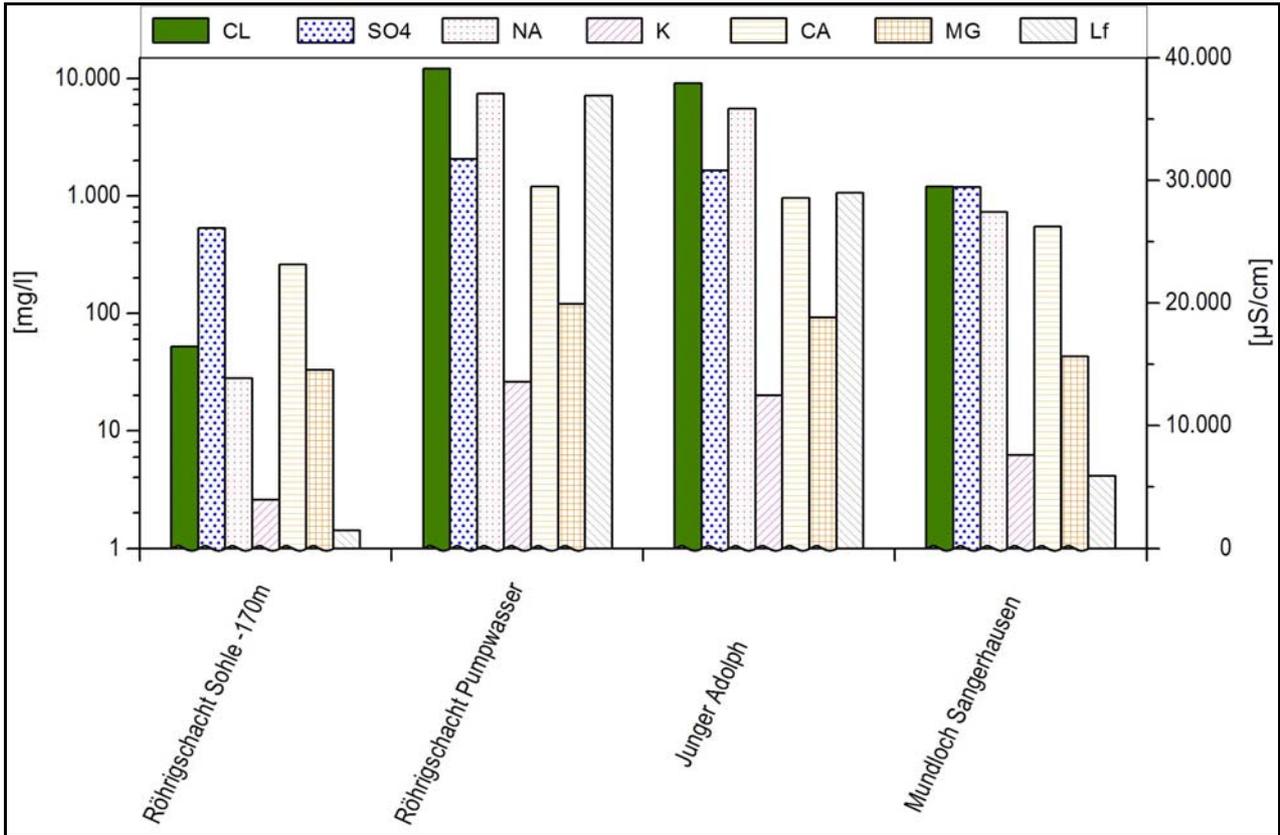


Abb. 5: Anionen und Kationen zur Salzbelastung im Segen-Gottes-Stollen.

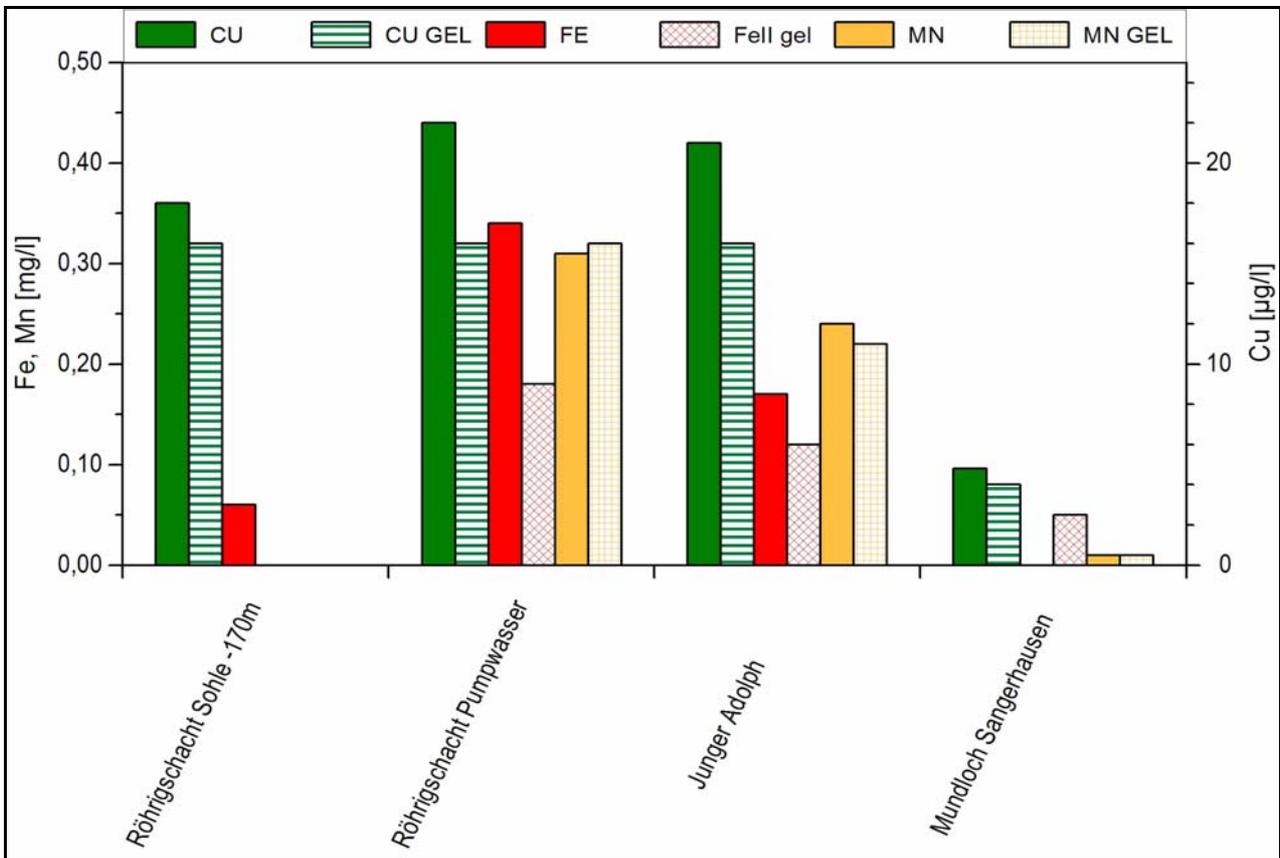


Abb. 6: Kupfer, Eisen und Mangan im Segen-Gottes-Stollen.

Röhrigschacht (Wettelrode)

Das Wasser der befahrenen Sohle (-170 m Teufe) zeigt keine deutliche Beeinflussung durch Lagerstätten. Mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 1484 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und einer Gesamthärte von 44 $^{\circ}\text{dH}$ entsprach es in seiner Beschaffenheit Grundwässern im Anhydrit. Dominierender Härtebildner war hier Sulfat mit 531 mg/l gegenüber Chlorid mit 52,4 mg/l. Arsen und Metalle traten nur in geringen Mengen auf, wobei die Konzentration für Blei-Gesamt mit 7,1 $\mu\text{g}/\text{l}$ mehrfach höher als für gelöstes Blei mit 2,7 $\mu\text{g}/\text{l}$ war. Im Röhrigschacht konnten wegen enger Entnahmestelle keine Durchflüsse gemessen werden.

Von der tieferen Sohle 1 (-285 m Teufe) gepumptes Wasser war mit 13,2 $^{\circ}\text{C}$ etwas wärmer und zeigte mit 36900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (196 $^{\circ}\text{dH}$) eine hohe Salzbelastung. Bei den Anionen dominierte Chlorid mit 12100 mg/l vor Sulfat mit 2060 mg/l. Cadmium trat in geringen Konzentrationen (gesamt 2,7 $\mu\text{g}/\text{l}$, gelöst 2,6 $\mu\text{g}/\text{l}$) auf. Blei-Gesamt betrug 25 $\mu\text{g}/\text{l}$, während gelöstes Blei unterhalb der probenspezifischen Nachweisgrenze lag ($< 20 \mu\text{g}/\text{l}$). Eine Durchflussmessung des Pumpwassers wäre mit einem Rechteckgefäß von ca. 100 l Volumen möglich.

Schacht Junger Adolph (Wettelrode)

Die Analysenergebnisse des Entwässerungsstollen beim Schacht Junger Adolph lagen für fast alle Werte zwischen den Werten der beiden Zuflüsse aus dem Röhrigschacht. Dominierend war das Pumpwasser. Die Stoffkonzentrationen waren hier etwas geringer (Chlorid 9120 mg/l, Sulfat 1640 mg/l, Natrium 960 mg/l, Calcium 960 mg/l). Der Durchfluss betrug 17 l/s.

Stollenmundloch Sangerhausen

Am Stollenmundloch war der Durchfluss mit 169 l/s wesentlich höher als beim Schacht Junger Adolph. Die Durchflussmessung erfolgte bei geöffnetem Gitter im Stollenprofil. Ein Teil der Parameter wurde in zwei Proben analysiert, deren Ergebnisse sehr gut übereinstimmten. Die elektrische Leitfähigkeit war mit 5900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ immer noch hoch, aber deutlich geringer als bei der oberstromigen Probennahmestelle beim Schacht Junger Adolph. Chlorid und Sulfat kamen in gleich hohen Konzentrationen von 1190 mg/l vor. Dominierende Kationen waren Natrium (730 mg/l) und Calcium (550 mg/l). Arsen und Metalle traten nur noch in sehr geringen Konzentrationen auf und lagen teilweise unter der Bestimmungsgrenze.

4 DISKUSSION

An allen Probennahmestellen zeigen Vor-Ort-Parameter und Analysenergebnisse eine Beeinflussung durch die geologischen Lagerstätten (Tab. A1 und A2). Neben dem abgebauten Kupfer kamen im Schlüsselstollen auch Cadmium, Blei und Zink in sehr hohen Konzentrationen vor, während am Mundloch des Segen-Gottes-Stollen Schwermetalle unterhalb der Trinkwassergrenzwerte lagen. In beiden Stollen weichen die Messergebnisse der Beprobungsstellen unter Tage teilweise erheblich von den Werten an den Stollenmundlöchern ab. Die eindeutige Identifizierung und Erfassung einzelner Prozesse, welche die Wasserbeschaffenheit verändern, war jedoch nicht Ziel dieses Vorhabens und hätte eines wesentlich umfangreicheren Messprogramms bedurft. Ausfällung von Mangan, Calcit und Gips können z. B. bei Kluftwasseraustritten an Stollenwänden beobachtet werden (Abb. A18, A21, A23). Durchflussmessungen und hiermit berechnete Stofffrachten geben einen bilanzierenden Überblick zu Veränderungen zwischen zwei Beprobungspunkten. Die Stoffkonzentrationen an den Stollenmundlöchern liegen innerhalb der langjährigen Schwankungsbereiche der Grundwassermessstellen (Tab. A4). Bei der Interpretation der Stofffrachten müssen jedoch, wegen der schwierigen Bedingungen zur Durchflussmessung unter Tage und der größeren Fehlergrenzen bei der Analyse extrem salzhaltiger Proben, Fehlertoleranzen von etwa 10-25 % einkalkuliert werden.

Die Vor-Ort-Parameter lassen deutlich den Einfluss der Atmosphäre im Grubengebäude erkennen. Unter Tage lagen Wasser- und Lufttemperaturen stets relativ nah beieinander und unterschieden sich auch zwischen den einzelnen Probennahmestellen kaum. Die etwas höheren Temperaturen des Pumpwassers im Röhrgschacht können durch die tiefere Lage dieser Sohle erklärt werden. Die hohen Sauerstoffgehalte des frei fließenden Stollenwassers mit Sättigungsgraden von 84-99% entsprechen eher Oberflächengewässern, als Grundwasser mit hohen Flurabständen. Der niedrige Sauerstoffgehalt im Anstau des Zulaufes von der Mansfelder Mulde (Schlüsselstollen/Freiesleben) entspricht Grundwasserverhältnissen in der Mansfelder Mulde (Schelking, pers. Mitt.). Die Strömung war in diesem Bereich sehr gering und ohne Turbulenzen, so dass wohl noch kein bedeutender Sauerstoffeintrag stattfinden konnte. Eine chemische Sauerstoffzehrung kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber mit den vorliegenden Daten nicht erkennbar. Wichtigster Vor-Ort-Parameter im Hinblick auf die Salzbelastung ist die elektrische Leitfähigkeit, welche ein Maß für die Gesamtmineralisation eines Wassers ist. Anhand der Leitfähigkeit ist bereits eine Einschätzung des Herkunftsbereiches möglich. Diese Messwerte sind teilweise extrem hoch und spiegeln die hohen Chlorid- und Natriumkonzentrationen gut wieder. Die pH-Werte lagen überwiegend im leicht basischen Bereich und zeigten zwischen Stollenmundlöchern und Messstellen unter Tage nur geringe Unterschiede. Im Schlüsselstollen nehmen Konzentrationen und Frachten für Chlorid, Sulfat, Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium im Entwässerungstollen bis zum Lichtloch 20Z zu, die Chlorid und Natriumkonzentrationen steigen bis zum Mundloch sogar noch weiter an (Abb. 2). Für die Wasserbeschaffenheiten der untersuchten Stollen waren die hohen Salzkonzentrationen prägend.

Für Arsen fällt im Schlüsselstollen zwischen LL26 und Mundloch der deutlichere Rückgang von Arsen-Gelöst (5,9 µg/l nach 1,5 µg/l) im Vergleich zu Arsen-Gesamt (6,7 µg/l nach 4,5 µg/l) auf; die Fracht bleibt auf dieser Strecke mit 0,16 kg/d in etwa gleich. Blei-Gesamt verringert sich von LL 20Z bis zum Mundloch auf 56% von 1800 µg/l auf 1000 µg/l und gelöstes Blei auf 46% von 1600 µg/l auf 740 µg/l (Abb. 3). Die Blei-Fracht verringert sich deutlich von ca. 57 kg/d auf 36 kg/d (Tab. A3). Das sich verändernde Verhältnis von „Gelöst“ zu „Gesamt“ ist ein Hinweis auf mögliche Bindungen an Partikeln. Abnehmende oder quasi gleichbleibende Frachten zwischen zwei Messpunkten bei gleichzeitig deutlich zunehmendem Durchfluss sind ein Indiz für Akkumulationsvorgänge (Ausfällungen, Anlagerungen, Sedimentation).

Der Segen-Gottes-Stollen entwässert zwei unterschiedliche Wassertypen: extrem salzhaltiges Grubenwasser und vom verkarsteten Anhydrit („Schlotten“) Gebirgswasser. Das Wasser am Stollenmundloch ist ein Mischwasser. LAGB (2007) schätzt den Anteil des Schlottenwassers auf etwa 80 %, die vorliegenden Ergebnisse entsprechen dieser Einschätzung gut. Während die Sulfatkonzentrationen im Verlauf der Entwässerungsstrecke relativ geringe Veränderungen zeigen, gehen die Konzentrationen von Chlorid und Natrium um ein Vielfaches zurück (Abb. 5) und die Frachten nehmen nur leicht zu (Tab. 3). Arsen und Metalle werden ebenfalls verdünnt. Die Eisen- und Mangankonzentrationen gingen im Streckenverlauf überproportional zurück (Abb. 6). Vermutlich fanden Ausfällungen statt, was bei diesen beiden Stoffen allgemein ein typisches Phänomen ist (DVWK 1998).

4. 1 Probennahme bei Sedimentaufwirbelung

Bei dieser Probennahme wurde bewusst ein Artefakt untersucht, wie es beispielweise beim durchwaten oberhalb einer Probennahmestelle oder durch Grundberührung beim Schöpfen/Pumpen von Proben entstehen könnte. Dass diese Manipulation sich im vorliegenden Experiment nicht auf Vor-Ort-Parameter, dominierende Anionen und Kationen (Cl, SO₄, NO₃, Na, K, Ca, Mg) oder gelöste Metalle und Arsen auswirkt, ist bemerkenswert. Dieses Ergebnis kann jedoch nicht einfach auf die Schwebstoffaufwirbelungen durch Hochwasser übertragen werden, weil dann die Reaktionszeiten für Partikel und Stoffe wesentlich länger wären.

Die erhöhten Konzentrationen für Gesamtanalysen für As, Pb, Cu, Fe, Fe-II, P zeigen, dass im Sediment für diese Stoffe eine Akkumulation erfolgte (Abb. 4). Dieses Ergebnis passt sehr gut mit dem beobachteten Rückgang der Pb- und As-Konzentration im Verlauf des Entwässerungsstollens von LL 20Z zum Mundloch zusammen (Abb. 3).

4.2 Grubengebäude und Beprobungsorte

Die einzelnen Ergebnisse bestätigen theoretische Überlegungen zum möglichen Einfluss des Grubengebäudes auf die Grundwasserbeschaffenheit. Charakteristisch ist die Sauerstoffzufuhr aus der Atmosphäre in Freispiegelgerinnen in Streckenabschnitten mit turbulenter Strömung. Dies ist auch von Bedeutung, weil gelöster Sauerstoff als oxydierendes Element Auswirkungen auf die Spezierung anderer Elemente auf geochemische Reaktionen hat. Die deutlichsten Veränderungen der Wasserbeschaffenheit treten bei Zusammenflüssen aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen auf. Die Stollensohle bietet Sedimentationsräume, welche als Speicher für partikulär gebundene Stoffe dienen können. Die Sedimentation kann in Einzelfällen mehrere Meter mächtig sein (Penzel et al. 2007). Ob eine Akkumulation dauerhaft ist, oder ob Erosion, bzw. Rücklösung Stoffe später wieder mobilisieren, hängt von den jeweiligen Verhältnissen vor Ort ab.

Das Stollenmundloch ist für Fragen zur anthropogenen Belastung oder zu Einträgen in Flussgebiete der entscheidende Ort zur Grundwasserprobennahme. Um Einflüsse durch temporäre Remobilisierungsprozesse im Grubengebäude am Mundloch erkennen zu können, wären ereignisorientierte Probennahmen bei Hochwasser und Niedrigwasser sinnvoll. Für die Repräsentativität für das Einzugsgebiet können bei Bergbau-Stollen Einschränkungen bestehen, weil künstliche Hohlräume im Bereich der Lagerstätten einen relativ starken Einfluss auf die Konzentrationen einzelner Stoffe haben können. Diese Werte entsprechen dann nicht den natürlichen, geogenen Verhältnissen des Einzugsgebietes. Beprobungsorte unter Tage bieten die Möglichkeit, Herkunftsbereiche unterschiedlicher Wässer zu bestimmen. Gebirgswasser welches nicht aus räumlich begrenzten Lagerstätten stammt, kann zur Bestimmung geogener Hintergrundwerte verwendet werden. So könnten auch einzelne Bereiche gezielt beobachtet werden oder Daten für Prognosen zur Wasserbeschaffenheit bei veränderndem Grubenwasserhaushalt (z. B. bei einer Flutung) gewonnen werden.

4.3 Probenentnahmetechnik

Maßgeblich für die Probenentnahmetechnik sind die spezifischen Anforderungen der zu analysierenden Parameter und die räumlichen Verhältnisse vor Ort, welche vor allem von Gerinnegeometrie und hydraulischen Verhältnissen abhängen. Hier bestehen keine grundsätzlichen Unterschiede zur Probennahme bei Quellen. Die Verhältnisse in Schlüsselstollen und Segen-Gottes-Stollen waren eher günstiger, als bei den 2007 für das LHW beprobten Quellen (Ross 2007). An allen Entnahmepunkten waren Schöpfproben möglich.

Die Beprobung einzelner Kluftwasseraustritte direkt an der Stollenwand war nicht Gegenstand dieser Studie. Hierfür wären gegebenenfalls je nach örtlichen Verhältnissen besondere Auffangvorrichtungen (z. B. Trichter) erforderlich. Eine Beprobung ohne Atmosphärenkontakt des Probengutes wäre technisch möglich, aber sehr aufwändig.

Vor Ort ist zu beachten, dass Sauerstoffsonden in der Regel luftdruckabhängig sind: durch die Stollenbewetterung können sich Druckänderungen ergeben (Marbach und Tourte 2000); bei Fahrten durch Schächte entstehen auf jeden Fall erhebliche Druckänderungen im Vergleich zur Oberfläche. Deshalb ist die Kalibrierung der Sauerstoffsonde vor jeder Beprobungsstelle unter Tage notwendig.

Für die Probennahme sind auch die Arbeitsbedingungen durch die allgemeinen Verhältnisse unter Tage wichtig. Unter Umständen ist ein längerer, erschwerter Zugang durch Schächte und Stollen erforderlich, für den es auch sehr guter Ortskenntnisse bedarf. Wenn Untersuchungsparameter und Entnahmebedingungen es zulassen, sind wegen Transport und Zeitaufwand eher einfachen Techniken (z. B. Schöpfprobe) vorteilhaft. Die repräsentative Grundwasserprobennahme muss ohne Sedimentaufwirbelungen erfolgen. Wenn der Zugang zur Probennahme durch den Zufluss im Stollen erfolgen muss, sind für sensible Parameter vor der Probennahme ausreichende Zeiten zum Absetzen von Schwebstoffen einzuhalten.

4.4 Vergleich zur Schwebstoffproblematik bei ungefassten Quellen

Die zur Probenentnahme bei ungefassten Quellen (Ross 2007) oder bei komplizierten gefassten Quellen (Ross 2006, Ross et al. 2006) zur Verfügung stehenden Techniken (Schöpfprobe, mobile Pumpe oder Absaugen mit Spritze) können ebenso in Entwässerungsstollen eingesetzt werden. Bei Beprobungspunkten in Schlüsselstollen und Segen-Gottes-Stollen waren die Entnahmebedingungen meist einfacher als bei Quellen, weil Durchflussmengen und Wassertiefen größer waren. Die Gefahr von Sedimentaufwirbelungen war deshalb geringer. Empfehlungen für die Durchführung von Schöpfproben werden in Ross (2007) und Ross et al. (2006) zusammengefasst. Auch Durchflussmessungen waren an den meisten Stellen in Stollen besser als bei Quellen durchzuführen, weil die Stollen relativ regelmäßige Querprofile aufweisen. Weitgehende Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen und ähnliche Temperaturen von Stollenluft und Wasser können auch Vorteile für die Probennahme unter Tage sein.

Ein wesentlicher Unterschied zu Quellen ergibt sich für Grubenwässer häufig durch die Wasserbeschaffenheit. Bei Solen mit hoher Salzmatrix liegen wegen der erforderlichen Verdünnung bei der Laboranalytik höhere Bestimmungsgrenzen und Nachweisgrenzen vor. Arsen und Schwermetalle treten in Stollen oft in höheren Konzentrationen auf und werden auch von Schwebstoffen beeinflusst.

Ein weiterer Unterschied zwischen natürlichen Quellen und Stollen sind die langen Fließstrecken in Entwässerungsstollen. Auf diesen Fließstrecken sind Anlagerungen gelöster Stoffe an Partikel und die Sedimentation von Partikeln möglich. In der Konsequenz kann dann die Stollensohle einen Zwischenspeicher für Stoffe bilden, welche bei hohen Durchflüssen wieder ausgetragen werden können. In diesem Fall spiegelt die zeitliche Dynamik der Stoffausträge am Stollenmundloch nicht exakt die Verhältnisse im Grundwasserleiter weiter.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Stollen unterscheiden sich durch den „Reaktionsraum Grubengebäude“ zwischen Grundwasserleiter und Messstelle von anderen Grundwassermessstellen. Wichtigste Grundwasserbeobachtungsstelle ist das Stollenmundloch, weil hier der Eintrag in das Oberflächengewässer erfolgt. Der pragmatische Aspekt des einfacheren Zugangs ist ebenfalls relevant. Als Messstelle für die Belastung des Vorfluters sind Stollenmundlöcher repräsentativ. Im Hinblick auf das Einzugsgebiet kann die Repräsentativität eingeschränkt sein:

1. das Grubenwasser kann aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen stammen
2. durch die künstlichen Hohlräume in Lagerstättenbereichen können Stoffkonzentrationen anthropogen erhöht sein
3. gegenüber dem Grundwasserleiter kann sich die Wasserbeschaffenheit durch verschiedene Prozesse im „Reaktionsraum Grubengebäude“ verändern. Wesentlich sind hier der Eintrag von atmosphärischem Sauerstoff, die Anlagerung von gelösten Stoffen an Schwebstoffpartikeln und Sedimentation. Fällungsreaktionen können ebenfalls auftreten. Bereits die wenigen Stichproben im Rahmen dieser Studie belegen diese Vorgänge für einzelne Stollenabschnitten für Arsen, Blei, Eisen und Mangan

Probennahmen unter Tage ermöglichen die Beschreibung einzelner Stollenabschnitte und zugehöriger Herkunftsbereiche. So können auch Konzentrations- und Frachtänderungen innerhalb des Grubengebäudes festgestellt werden. Bei der Probennahme an Stollen ergeben sich im Vergleich zu Quellen nur aus den Arbeitsbedingungen unter Tage wesentliche Unterschiede. Für die Probenentnahmetechniken selbst bestehen in der Regel keine zusätzlichen Anforderungen. Zur Probennahme an Stollen ergeben sich aus dieser Studie folgende Empfehlungen:

1. für den sicheren Zugang und für das eindeutige Auffinden der richtigen Probennahmestelle ist eine ortskundige Begleitung sehr hilfreich
2. Vor-Ort-Messgeräte erlauben bereits die Unterscheidung verschiedener Grubenwasserherkünfte und können auch zur Vorauswahl von Probennahmepunkten dienen. Sauerstoffsonden müssen Luftdruckveränderungen unbedingt vor Ort kalibriert werden
3. Durchflussmessungen liefern wertvolle Informationen zu den hydrogeologischen Verhältnissen. Mittels Durchflüssen berechnete Frachten geben eine Interpretationsmöglichkeit für Prozesse im Grubengebäude und zeigen den Stoffeintrag in den Vorfluter an
4. je nach Untersuchungsparameter können einfache Entnahmetechniken, wie die Schöpfprobe, zulässig sein. Dies ist vor allem bei erschwerten Arbeitsbedingungen unter Tage vorteilhaft. Sedimentaufwirbelungen bei der Probennahme müssen vermieden werden
5. für Arsen und Metalle sollte die Elementanalytik "gesamt" und "gelöst" erfolgen. Der Vergleich der Konzentrationen erlaubt Rückschlüsse auf den Schwebstoffeinfluss. Zur direkten Untersuchung von Schwebstofffrachten kann auch der Einsatz von Sedimentfallen (LAWA 1999) sinnvoll sein
6. für die Beurteilung der Repräsentativität von Messstellen an Stollenmundlöchern sind ereignisbezogene Probennahmeterminale bei Hoch- und Niedrigwasser hilfreich. Zur Beurteilung der räumlichen Repräsentativität bezüglich des Einzugsgebietes sind Beprobungen in verschiedenen Bereichen des Grubengebäudes erforderlich. Über Gebirgswasser können auch geogene Hintergrundwerte ermittelt werden
7. innerhalb eines Grundwassermessnetzes ist, wegen der hydrogeologischen Besonderheiten von Stollen, eine zusammenfassende Ausweisung von Messstellen an Stollen als „Stollenmessnetz“ gerechtfertigt

6 DANKSAGUNG

Wir danken den Mitarbeitern der Gesellschaft für Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV) für die Begleitung und Beratung bei den Probennahmen unter Tage. Ihre Mithilfe war für Durchführung und Umfang dieser Studie von entscheidender Bedeutung.

7 LITERATUR

- ATV-DVWK (2002): Messeinrichtungen an Quellen, ATV-DVWK Merkblatt M 604, Hennef.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie, Begriffe zur Quantitativen Hydrologie. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme. Schriften 117. Verlag P. Parey, Hamburg.
- EU (2006): Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung „Tochtrichtlinie Grundwasser der WRRL“.
- Korte, Osterloh, Völker (1982): Die Geschichte des Sangerhäuser Kupferschieferbergbaus. (in www.karstwanderwege.de)
- LAGB Sachsen-Anhalt (2007): Sachsen-Anhalts verdeckte Ströme Band 13
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1995): Grundwasser – Richtlinien zur Beobachtung und Auswertung: Teil 4 Quellen.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1999): Fließgewässer der Bundesrepublik Deutschland – Schwebstoffmessungen. Bestandsaufnahme Stand 1996, Empfehlungen.
- LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2003): Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern Probenahmestrategien und Berechnungsverfahren.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1993): Verfahrensempfehlungen für die Probenahme bei Altlasten (Boden, Abfall, Grund-, Sickerwasser, Bodenluft).
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001): Grundwasserüberwachungsprogramm. Leitfaden für Probenahme und Analytik von Grundwasser.
- Marbach G., Tourte B. (2000): Techniques de la spéléologie alpine. Verlag Expe.
- Penzel M., Focke C., Haufe T., Einicke O. (2007): Probleme bei der Verwahrung eines alten Schachtes Altbergbau - Kolloquium Freiberg 2007
- Ross J.-H. (2007): Probennahme an ungefassten Quellaustritten - Schwebstoffverhalten. Bericht für das LHW Sachsen-Anhalt, unveröffentlicht.
- Ross J.-H. (2006): Probennahme an komplizierten Quellaustritten. Bericht für die Sächsische Landesanstalt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht.
- Ross J.-H., Barthel E., Geletneky J., Schubert H, (2006): Eignung von Quellen und Stollen als repräsentative Grundwassermessstellen. Tagungsband „Repräsentative Grundwasserprobennahme“ unter Leitung der Sächsischen Akademie für Natur und Umwelt, 02.-05.11.2006 in Magdeburg.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Umweltschutz, UFZ-Forschungszentrum Leipzig-Halle (2000): Repräsentative Grundwasserprobennahme. Lehrgang am 02. und 03. November in Bitterfeld.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Umweltschutz, UFZ-Forschungszentrum Leipzig-Halle (2004): Handbuch Grundwasserbeobachtung, Teil 5 Grundwasserprobennahme. Materialien zur Wasserwirtschaft.
- Völker R., Völker C. (1982): Die Segen Gottes Schlotte. Karstmuseum Heimkehle und Arbeitskreis Höhlen- und Karstforschung beim KB der DDR. Heft 3.
- www.mineralienatlas.de: Lexikon: Deutschland/Sachsen-Anhalt/Mansfelder Mulde

Tab. A1: Vor-Ort-Parameter.

Stollen	Name	Datum	Zeit	T-Luft [°C]	T-Wasser [°C]	LF₂₀ [µS/cm Ref 20°]	LF₂₅ [µS/cm-Ref 20°]	pH [-]	O2 mg/l	O2 [%]	Q [l/s]
Schlüsselstollen	Freiesleben Schacht, (Mansfeld)	03.06.2008	8:41	13,2	11,9	18520	20400	7	9,4	88	161,2
Schlüsselstollen	Freiesleben - Anstau Mansfelder Mulde	03.06.2008	9:10	11,3	12,6	55600	61200	6,7	1,5	14	19,3
Schlüsselstollen	LL26 Hauptstrom, (Großörner)	03.06.2008	10:21	11,5	12	21300	23400	7,2	9,4	88	204,6
Schlüsselstollen	LL26 Gebirgswasser	03.06.2008	10:30	11,5	10,9	1520	1670	7,64	10,2	92	
Schlüsselstollen	20Z Hauptstrom, (Gerbstedt)	03.06.2008	12:10	13	11,8	47500	52300	7,05	9,1	84	364,7
Schlüsselstollen	Mundloch (außen)	03.06.2008	14:00	26	11,8	48000	52100	7,14	9,7	89	423,6
Schlüsselstollen	Mundloch (innen)	03.06.2008	14:20	11,9	11,8	48000	52900	7,14	8,9	82	
Schlüsselstollen	100m u. h. Mundloch	03.06.2008	15:20	24	11,8	47800	52900	7,23	10	92	
Segen-Gottes	Röhrigschacht Sohle -170m	04.06.2008	8:30	13	11,4	1314	1484	7,6	10,5	96	
Segen-Gottes	Röhrigschacht Pumpwasser	04.06.2008	8:45	13,5	13,2	33400	36900	7,6	10,3	99	
Segen-Gottes	Junger Adolph, (Wettelrode)	04.06.2008	9:58	14	12,6	25700	29000	7,7	10,4	98	17,3
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	04.06.2008	11:51	21,5	9,9	5390	5900	7,54	9,6	86	168,6

Probennahme an Stollen - Endbericht

Tab. A2: Laborparameter.

Stollen	Probennahmestelle	Mst.-Nr.	Probennr.	Datum	Zeit	CL mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l	NH ₄ mg/l	PO ₄ mg/l	P mg/l	TOC mg/l	DOC mg/l
Schlüsselstollen	Freiesleben Schacht	302559	08H03812	3.6.08	8:30	6070	1650	27,3	<0,10	0,08	0,031	0,01	1,4	1,4
Schlüsselstollen	Freiesleben - Anstau	302560	08H03813	3.6.08	9:00	22600	2460	15,9	<0,10	0,75	<0,031	0,01	2,7	<2,0
Schlüsselstollen	LL26 Hauptstrom	302561	08H03814	3.6.08	10:25	6140	1340	33,8	<0,10	0,09	0,031	0,01	1,1	1,0
Schlüsselstollen	20Z Hauptstrom, Gerbstedt	302562	08H03815	3.6.08	12:30	18600	1990	28,2	<0,10	0,77	<0,031	0,01	<2,0	<2,0
Schlüsselstollen	Mundloch (innen)	302563	08H03816	3.6.08	14:00	18800	1940	28,7	<0,10	0,52	<0,031	0,01	<2,0	<2,0
Schlüsselstollen	Mundloch (außen)	302565	08H03957	3.6.08	14:25	18800	1980	29,2	<0,10	0,52	<0,031	0,01	<2,0	<2,0
Schlüsselstollen	Mundloch (außen), Aufwirbel.	302564	08H03817	3.6.08	15:30	18800	1970	28,6	<0,10	0,52	<0,031	0,05	<2,0	<2,0
Segen-Gottes	Röhrigschacht Sohle -170m	302555	08H03808	4.6.08	8:15	52,4	531	22,3	<0,10	<0,03	<0,031	0,02	1,3	1,2
Segen-Gottes	Röhrigschacht Pumpwasser	302556	08H03809	4.6.08	8:45	12100	2060	15,4	<0,10	0,09	0,061	0,03	1,3	<1,0
Segen-Gottes	Schacht Junger Adolph	302557	08H03810	4.6.08	9:45	9120	1640	17,0	<0,10	0,06	0,031	0,05	1,2	<1,0
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	302558	08H03811	4.6.08	11:45	1200	1190	18,5	<0,10	<0,03	0,031	0,03	0,9	0,8
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	346135	08H03806	4.6.08	11:45	1190	1190	18,6	<0,10	<0,03	0,031	0,02		0,9

Tab. A2: Laborparameter (Fortsetzung).

Stollen	Probennahmestelle	Datum	Zeit	TOC mg/l	DOC mg/l	KS 4,3 mmol/l	KB 8,2 mmol/l	SAK 254 /m	NA mg/l	K mg/l	CA mg/l	MG mg/l	Ges-Härte °dH	CO ₃ Härte °dH	HCO ₃ mg/l
Schlüsselst.	Freiesleben Schacht	3.6.08	8:30	1,4	1,4	5,6	0,76	3,1	3600	55	710	150	133,9	15,7	341,7
Schlüsselst.	Freiesleben – Anstau	3.6.08	9:00	2,7	<2,0	5,6	1,8	5,1	14000	150	980	300	206,3	15,7	341,7
Schlüsselst.	LL26 Hauptstrom	3.6.08	10:25	1,1	1,0	5,4	0,53	2,2	3700	48	590	140	114,8	15,1	329,5
Schlüsselst.	20Z Hauptstrom	3.6.08	12:30	<2,0	<2,0	5,3	1,2	4,2	12000	130	800	260	171,9	14,8	323,4
Schlüsselst.	Mundloch (innen)	3.6.08	14:00	<2,0	<2,0	5,4	1,2	3,7	12000	130	800	260	171,9	15,1	329,5
Schlüsselst.	Mundloch (außen)	3.6.08	14:25	<2,0	<2,0	5,4	1,2	3,7	12000	130	800	260	171,9	15,1	329,5
Schlüsselst.	Mundloch (außen) Aufwirb.	3.6.08	15:30	<2,0	<2,0	5,4	1,2	3,7	12000	130	790	260	170,5	15,1	329,5
Segen-Gottes	Röhrigschacht Sohle -170m	4.6.08	8:15	1,3	1,2	4,5	0,16	1,8	28	2,6	260	33	44,0	12,6	274,6
Segen-Gottes	Röhrigschacht Pumpwasser	4.6.08	8:45	1,3	<1,0	4,8	0,31	1,2	7400	26	1200	120	195,6	13,4	292,9
Segen-Gottes	Schacht Junger Adolph	4.6.08	9:45	1,2	<1,0	4,6	0,24	1,6	5500	20	960	92	155,5	12,9	280,7
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	4.6.08	11:45	0,9	0,8	4,6	0,29	1,2	730	6,2	550	43	86,9	12,9	280,7
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	4.6.08	11:45		0,9	4,6	0,32		720	6,2	550	40	86,2	12,9	280,7

Probennahme an Stollen - Endbericht

Tab. A2: Laborparameter (Fortsetzung).

Stollen	Probennahmestelle	Datum	Zeit	AS µg/l	AS GEL µg/l	B mg/l	B GEL mg/l	CD µg/l	CD GEL µg/l	CU µg/l	CU GEL µg/l	PB µg/l	PB GEL µg/l	ZN µg/l	ZN GEL µg/l
Schlüsselst.	Freiesleben Schacht	3.6.08	8:30	8,9	8,0	0,41	0,44	<25	<25	230	220	230	220	12000	12000
Schlüsselst.	Freiesleben – Anstau	3.6.08	9:00	0,6	0,5	<0,50	<0,50	79	78	670	660	1300	1300	31000	31000
Schlüsselst.	LL26 Hauptstrom	3.6.08	10:25	6,7	5,9	0,27	0,25	<25	<25	220	200	270	240	11000	11000
Schlüsselst.	20Z Hauptstrom	3.6.08	12:30	5,1	2,9	0,55	0,54	62	60	490	470	1800	1600	25000	25000
Schlüsselst.	Mundloch (innen)	3.6.08	14:00	4,5	1,5	0,50	0,50	59	59	480	450	1000	740	23000	25000
Schlüsselst.	Mundloch (außen)	3.6.08	14:25	4,8	1,4	<0,50	<0,50	60	59	470	460	1100	760	25000	25000
Schlüsselst.	Mundloch (außen), Aufwirb,	3.6.08	15:30	69	1,5	<0,50	<0,50	60	61	550	460	2400	740	24000	24000
Segen-Gottes	Röhrigschacht Sohle -170m	4.6.08	8:15	3,5	3,3	0,06	0,06	<0,20	<0,20	18	16	7,1	2,7	120	110
Segen-Gottes	Röhrigschacht Pumpwasser	4.6.08	8:45	3,0	1,0	<0,20	<0,20	2,7	2,6	22	16	25	<20	470	500
Segen-Gottes	Schacht Junger Adolph	4.6.08	9:45	2,8	2,1	<0,20	<0,20	2,0	2,0	21	16	18	<10	420	380
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	4.6.08	11:45	1,3	1,2	0,07	0,07	0,48	0,48	4,8	4,0	<2,0	<2,0	120	120

Tab. A2: Laborparameter (Fortsetzung).

Stollen	Probennahmestelle	Datum	Zeit	FE mg/l	FE GEL mg/l	FE II GEL mg/l	MN mg/l	MN GEL mg/l	AL µg/l	AL GEL µg/l	F mg/l	SIO ₂ GEL mg/l
Schlüsselst.	Freiesleben Schacht	3.6.08	8:30	<0,05	<0,05	<0,05	0,33	0,32	<500	<500	n.b.	11
Schlüsselst.	Freiesleben - Anstau	3.6.08	9:00	<0,10	0,10	<0,05	0,63	0,62	<500	<500	n.b.	9,4
Schlüsselst.	LL26 Hauptstrom	3.6.08	10:25	<0,05	<0,05	<0,05	0,27	0,26	<500	<500	n.b.	12
Schlüsselst.	20Z Hauptstrom	3.6.08	12:30	<0,10	<0,10	0,05	0,39	0,39	<500	<500	n.b.	11
Schlüsselst.	Mundloch (innen)	3.6.08	14:00	0,11	<0,10	0,10	0,39	0,39	<500	<500	n.b.	11
Schlüsselst.	Mundloch (außen)	3.6.08	14:25	0,12	<0,10	0,09	0,39	0,39	<500	<500	n.b.	11
Schlüsselst.	Mundloch (außen) mit Aufwirbelung	3.6.08	15:30	0,63	<0,10	0,18	0,40	0,39	<500	<500	n.b.	11
Segen-Gottes	Röhrigschacht Sohle -170m	4.6.08	8:15	0,06	<0,05	<0,05	<0,01	<0,01	<50	<50	0,2	11
Segen-Gottes	Röhrigschacht Pumpwasser untere Sohle	4.6.08	8:45	0,34	<0,05	0,18	0,31	0,32	500	<500	n.b.	11
Segen-Gottes	Schacht Junger Adolph	4.6.08	9:45	0,17	<0,05	0,12	0,24	0,22	<500	<500	n.b.	11
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	4.6.08	11:45	<0,05	<0,05	0,05	0,01	0,01	<50	<50	0,4	12

Probennahme an Stollen - Endbericht

Tab: A3: Frachtberechnungen.

Stollen	Messort	Datum	Zeit	Q [l/s]	CL [t*d]	SO ₄ [t*d]	NO ₃ [kg*d]	NA [t*d]	K [kg*d]	CA [t*d]	MG [kg*d]	B [kg*d]	MN [kg*d]
Schlüsselstollen	Freiesleben-Schacht, Mansfeld	03.06.08	8:30	161	84,5	23,0	380,2	50,1	766	9,9	2089	5,7	4,6
Schlüsselstollen	Freiesleben - Anstau Mansfelder Mulde	03.06.08	9:00	19	37,7	4,1	26,5	23,3	250	1,6	500	< 1	1,1
Schlüsselstollen	LL26 Hauptstrom, Großörner	03.06.08	10:21	205	108,5	23,7	597,5	65,4	849	10,4	2475	4,8	4,8
Schlüsselstollen	20Z Hauptstrom, Gerbstedt	03.06.08	12:30	365	586,1	62,7	888,6	378,1	4096	25,2	8193	17,3	12,3
Schlüsselstollen	Mundloch (innen)	03.06.08	15:00	424	688,1	71,0	1050,4	439,2	4758	29,3	9516	18,3	14,3
Segen Gottes	Junger Adolph, Wettelrode	04.06.08	9:45	17	13,6	2,5	25,4	8,2	30	1,4	138	< 0,3	0,4
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	04.06.08	11:45	169	17,5	17,3	269,5	10,6	90	8,0	626	1,0	0,1

Tab: A3: Frachtberechnungen (Fortsetzung).

Stollen	Messort	Datum	Zeit	Q [l/s]	AS [kg*d]	CD [kg*d]	PB [kg*d]	CU [kg*d]	ZN [kg*d]
Schlüsselstollen	Freiesleben Schacht, Mansfeld	03.06.08	8:30	161	0,12	< 0,3	3,2	3,2	167
Schlüsselstollen	Freiesleben - Anstau Mansfelder Mulde	03.06.08	9:00	19	0,00	0,1	2,2	1,1	52
Schlüsselstollen	LL26 Hauptstrom, Großörner	03.06.08	10:21	205	0,12	< 0,4	4,8	3,9	194
Schlüsselstollen	20Z Hauptstrom, Gerbstedt	03.06.08	12:30	365	0,16	2,0	56,7	15,4	788
Schlüsselstollen	Mundloch (innen)	03.06.08	15:00	424	0,16	2,2	36,6	17,6	842
Segen-Gottes	Junger Adolph, Wettelrode	04.06.08	9:45	17	0,004	0,003	0,027	0,031	1
Segen-Gottes	Mundloch Sangerhausen	04.06.08	11:45	169	0,02	0,007	< 0,03	0,070	2

Probennahme an Stollen - Endbericht

Tab. A4.1: Laborparameter Zeitreihen Schlüsselstollen Mundloch.

Datum	W-T	LEITF	PH	O2	O2	CL	SO4	NO3	PO4	P	NA	K	CA	MG	HCO3	AS	CU	PB	PB GEL	FE	MN	ZN	CD	CD GEL
	°C	µS/cm		mg/l	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l
04.04.01	11,6	28700	7,5	10,2		9180	1590	47,9	0,08		5350	57	642	115	292,9	6,5	217	678		0,136	0,22	12700	29,7	
08.08.01	12,8	32000	7,5	10,2		10600	1710	27,3	0,05		6940	42,6	696	150	341,7	5,5	252	638		0,162	0,246	16500	34,6	
13.03.02	11,7	24300	7,4	10,4	96,1	7700	1450	42,6	0,07		5000	49,4	595	126	299	6,9	206	493				12600	24,6	
24.07.02	13,4	29700	7,4	10	96,1	10900	1670	48	0,09		7330	64	639	155	317,3	5,1	361	699				17700	35,3	
11.03.03	11,6	25900	7,5	15,4	142	8280	1560	30,4	0,04		5100	51,8	664	140	317,3	7,7	258	512				16200	33,1	
12.11.03	11,4	53200	7,5	10,4	95,4	19000	2140	25,6	0,03		11100	109	752	200	329,5	5,8	616	1240				26600	58,4	
08.01.04	11,1	51600	7,6	10,2	92,9	18200	2090	25,1	0,04		11900	125	748	202	317,3	6,6	530	1100				22900	54	
24.02.04	11,7	42200	7,4	9	83,2	14000	1800	26,7	0,06		9550	83,5	760	192	311,2	4,9	370	820				18700	40	
05.05.04	12,2	46200	7,3	9,6	89,8	16400	1960	25,3	0,06		9850	88,5	745	199	323,4	4,2	390	940				19600	40	
20.07.04	13	46100	7,3	9,6	91,4	16200	2020	24,9	0,03		10600	111	795	204	329,5	4,7	420	910				22000	47	
20.09.04	12,5	46800	7,3	10,3	97	16400	2050	23,9	0,04		9950	97,5	795	203	335,6	3,8	480	890				21400	48	
02.02.06	11,2	37700	7,5	9,3	84,9	14300	1900	23,3	<0,02	0,01	8950	91	767	209	317,3	4,2	310		600	0,17	0,3	19000		37
08.03.06	11	39100	7,7	10,3	93,6	13200	1850	24,7	<0,02	0,028	8210	85,4	767	206	323,4	4,3	290		510	0,17	0,286	17000		35
18.05.06	12,1	36800	7,4	10,2	95,1	12300	1800	28,3	0,03	0,026	7610	82	728	192	323,4	5,7	340		430	0,16	0,313	17000		29
18.07.06	12,8	42600	7,2	9,8	92,9	14800	1870	25,8	0,02	0,026	9210	101	769	220	329,5	4,6				0,17	0,321	20000		
01.02.07	11,3	43000	7,6	10,4	95,2	15000	1950	23,6	<0,03	0,018	9370	100	789	220	329,5	4,2	340		570	0,18	0,312	18000		44
18.04.07	11,6	40600	7,6	10,2	94,0	13900	1890	23,2	0,015	0,013	8370	94,2	742	200	329,5	3,9	300		590	0,15	0,274	17000		42
27.06.07	11,9	41200	7,5	9,3	86,3	14000	1900	22,4	<0,03	0,02	8680	108	778	208	311,2	4,4	320		680	0,15	0,301	19000		45
21.08.07	12,3	39700	7,5	11,4	107	14000	1870	23,1	<0,03	0,02	8550	102	739	199	323,4	4,3	340		590	0,17	0,278	17000		38
01.11.07	11,3	32500	7,6	n.b.	n.b.	10500	1620	25,9	<0,03	0,01	6290	77,6	674	169	317,3	5,7	350		460	0,14	0,292	17000		38
17.12.07	11,1	35900	7,6	9,6	87,5	12200	1700	28,2	<0,03	0,01	7330	83,4	709	184	317,3	5,2	300		520	0,13	0,294	18000		44
30.01.08						14800	1930	27,9	<0,03	0,01	8900	100	740	220	329,5	5,0	340	980	690	0,15	0,31	19000	47	47
27.03.08	11,2	41200	7,6	10,0	91,3	16400	1930	27,6	<0,03	0,01	10000	110	800	240	329,5	5,2	490	1000	710	0,16	0,40	23000	65	66
03.06.08	11,8	52100	7,1	9,7	89	18800	1940	28,7	<0,03	0,01	12000	130	800	260	329,5	4,5	480	1000	740	0,11	0,39	23000	59	59
26.06.08	12,6	49800	7,2	10,7	101	20000	2040	29,3	<0,03	<0,01	12000	110	820	270	323,4									

Probennahme an Stollen - Endbericht

Tab. A4.2: Zeitreihen Laborparameter Segen-Gottes-Stollen Mundloch (Sangerhausen).

Datum	W-T	LEITF	PH	O2	O2	CL	SO4	NO3	PO4	P	NA	K	CA	MG	HCO3	AS	CU	PB	FE	MN	ZN	CD
	°C	µS/cm		Mg/l	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
14.03.01	9,1	7450	7,9	10,2		1680	1300	39	0,052		940	6,7	672	54	256,3	1,3	3,6	<2,0	0,024	0,015	112	0,72
22.03.01	9,9	7130	7,7	9,8	86,7	1560	1260	20,7	0,033	<0,03	905	5,4	650	51	274,6				0,024	0,013		
18.07.01	11,2	6780	7,6	8,4		1490	1250	20,6	0,031		855	5,2	610	50	274,6	1,3	5,3	<2,0	0,028	0,015	138	0,76
17.10.01	10,1	7650	7,5	10,2	90,7	1770	1280	19,5	<0,030	0,135	1070	6,1	714	51	274,6				0,024	0,012		
20.02.02	9	5050	7,6	10,6	91,8	911	1220	47,6	0,039		545	4,7	608	42	238							111
25.04.02	10	4750	9,9	9,9	87,8	818	1190	18,9	<0,030	0,034	447	5,5	586	38	262,4				0,057	0,012		
31.07.02	12,5	5810	7,3	9,3	87,6	1160	1220	20,2	0,036		660	6,5	622	45	274,6							123
11.03.03	9,8	5150	7,7	10,1	89,2	937	1160	20,6	0,05		575	5	610	42	268,5							370
12.06.03	11,8	6020	7,6	11,8	109	1200	1200	21	0,034	0,018	711	6	588	44	280,7				0,046	0,018		
29.10.03	10	8310	7,6	10,4	92,3	1960	1290	20,2	0,029	0,011	1150	8,3	636	51	280,7				0,021	0,014		
29.10.03	9,8	8330	7,8	10,3	90,9	1980	1300	20,6	0,034		1150	8,7	680	52	274,6							104
10.03.04	9,4	6270	7,7	10,1	88,3	1290	1290	19,6	0,029		730	7,3	658	48	274,6	1,1	3					0,18
13.04.04	9,8	6360	7,6	9,8	86,5	1390	1270	18,7	0,041	0,019	790	5,2	574	44	274,6				0,021	0,012		
30.09.04	10,1	8620	7,6	9,8	87,2	2080	1330	17,7	0,041	0,015	1230	8	704	52	274,6				<0,05	0,01		
16.06.05	10	6910	7,6	9,68	85,9	1580	1290	17,1	0,038	0,011	921	3,41	621	45	268,5	1,3	5,4	1,4	<0,05	0,011	95	0,6
13.10.05	10	9210	7,6	10,4	92,3	2310	1350	16,9	0,022	0,01	1300	6,56	649	54	274,6	1,3	<5	<1	<0,05	<0,05	160	0,86
12.04.06	9,7	6690	7,7	13,3	117	1420	1260	18	0,031	0,015	840	6,19	614	46	268,5							
13.03.07	10,0	10207	7,6	10,3	91,4	2410	1320	15,6	<0,03	0,02	1430	8,83	656	53,4	274,6	1,6	<5	<5	0,18	<0,05	130	0,75
04.06.08	9,8	6050	7,6	9,4	83,0	1200	1190	18,5	0,031	0,03	730	6,2	550	43	280,7	1,3	4,8	<2,0	<0,05	0,01	120	0,48