

**TU BERGAKADEMIE FREIBERG
INSTITUT FÜR MINERALOGIE
PROFESSUR FÜR GEOCHEMIE**

„Prognose geochemischer Auswirkungen der Nachnutzung stillgelegter Bergbau Stollnsysteme“

**Abschlußbericht über ein Forschungsprojekt
gefördert unter dem Az: 15339
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Prof. P. Beuge

Dr. rer. nat. A. Kluge

Dipl. Min. Thomas Degner

Freiberg, den 11. Januar 2001

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az 15339	Referat 24/0	Fördersumme 40.791,00 DM
-----------------	---------------------	---------------------------------

Antragstitel **Prognose geochemischer Auswirkungen der Nachnutzung stillgelegter Bergbau-Stollensysteme**

Stichworte Energie, regenerativ, Wasser, Umweltrisiken

Laufzeit 17 Monate	Projektbeginn 01.01.1999	Projektende 31.05.2000	Projektphase(n) 1
------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------

Zwischenberichte	1.10.1999
------------------	-----------

Bewilligungsempfänger TU Bergakademie Freiberg
Institut für Mineralogie

Brennhausgasse 14
09596 Freiberg

Tel	03731/39-2665
Fax	03731/39-3129

Projektleitung	Prof. Dr. P. Beuge
----------------	--------------------

Bearbeiter	Dipl. Min. Thomas Degner
------------	--------------------------

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Eine umweltverträgliche Nachnutzung von Bergbau- Stollensystemen setzt exaktes Wissen um die aktuellen geochemischen Mobilisierungs-, Transport- und Fixierungsprozesse und ihr Verhalten bei Veränderung der hydrologischen Bedingungen voraus. Mit diesem Forschungsvorhaben sollen verallgemeinerbare methodische Grundlagen für die Beurteilung derartiger Stollensysteme und entsprechende Prognosen erarbeitet werden. Den praktischen Hintergrund für das beantragte Forschungsvorhaben bildet die angedachte Wiederinbetriebnahme des Kavernenkraftwerkes im Drei-Brüder-Schacht Zug bei Freiberg.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Mit Hilfe eines geochemischen Jahresmonitorings im Wochenabstand, kombiniert mit einer On-line-Erfassung von Durchflusses und der Summe gelöster Stoffe im Stollwasser wird der Istzustand des Stoffaustrages aus den Grubenbauen, die das potentielle Speicherreservoir des Kavernenkraftwerkes bilden, erfaßt und dokumentiert. Dazu wird eine spezielle, untertagetaugliche autonome Langzeitmeßmethodik entwickelt und angewandt. Die geochemische Untersuchung des Stollwassers konzentriert sich neben der Erfassung und qualitativ/quantitativen Charakterisierung des gelösten Stoffaustrages auch auf die Erfassung und Charakterisierung des partikulären Austrages sowie eines möglichen und durchflußabhängigen Schadstoffrückhaltevermögens des Stollensystems. Weiterhin werden durch Langzeitbeobachtungen und geochemische Untersuchungen an einem Modellanstau Aussagen zur Entwicklung des geochemischen Milieus im untertägigen Staureservoir gewonnen. Über die Zusammenhänge von Konzentration und Abflußmengen sollen mögliche Entwicklungen des Schadstoffaustrages bei Nutzung des Stollensystems prognostiziert werden. Möglichkeiten für eine Einflußnahme zur Verbesserung der Wasserqualität der Vorflut durch Steuerung des Abflußgeschehens mittels Stauhaltung sollen konzipiert werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die im Projekt entwickelte Meßmethodik sowie die Konzeption für das geochemische Monitoring haben sich bewährt. Dadurch konnten mit ausreichender Genauigkeit und im notwendigen Umfang die Daten für die geforderten Aussagen gewonnen werden.

Es konnte eine ***Korrelation zwischen dem Abfluß und den Stoffkonzentrationen*** nachgewiesen werden, die sich mit potentiellen Funktionen beschreiben lassen. Hochwasserereignisse treten für gewöhnlich nach einer raschen Schneeschmelze im Frühjahr auf, wobei die relativ rasche Reaktion des Grubengebäudes auf einen anderen hydraulischen Mechanismus als die Versickerung schließen läßt. Am Beginn des Wasserstandsanstieges wird eine kurzzeitige Leitfähigkeits- und Temperaturerhöhung registriert. Nach ca. 8 Stunden sinken Leitfähigkeit und Temperatur infolge des Verdünnungseffektes stark ab. Mit dem Absinken des Wasserstandes verringert sich der Verdünnungseffekt und es wird wieder eine Leitfähigkeits und Temperaturanstieg registriert. Die gelösten Stoffkonzentrationen spiegeln diesen Trend wieder. Die registrierten Schwankungen in der Gesamtkonzentration werden durch die verstärkte Schwebführung bei Hochwasser verursacht, wobei nicht zwischen resuspendierten und frisch gebildeten Schwebstoffen unterschieden werden kann.

Eine ***Sedimentresuspension*** erfolgte bei ca. 800 l/s Abfluß im Frühjahr 1999. Im Frühjahr 2000 konnte keine Trübung des Wassers durch resuspendiertes Sedimentmaterial bei max. 1100 l/s beobachtet werden. Da die Wassermenge 1999 etwa einem 10-Jahresereignis entspricht, ist also von einer regelmäßigen natürlichen Stollenspülung auszugehen, welche die Sedimente der letzten 10 Jahre ausräumt. In den Folgejahren steht kein loses Sediment mehr an. Ein Trockenfallen der Sedimente bei Kraftwerksbetrieb sollte vermieden werden. Andererseits könnte durch Krustenbildung bei längerem Trockenfallen die bereits im Stolln lagernden Sedimente besser fixiert werden. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

Die ***Vorflut Triebisch*** erfüllt bereits vor dem Zulauf des Stollnwassers für die Elemente Zn und Cd nicht die Zielvorgaben (BLAK QZ) für Aquatischen Lebensgemeinschaften (Faktor 3 bzw. 7). Nach dem Zulauf werden auch die Zielvorgaben für Cu und Ni nicht erfüllt und die Faktoren für Zn (173) und Cd (209) steigen dramatisch an. Die gelösten Konzentrationen Al, As, Pb und Fe werden durch den Zufluß des Stollnwassers in der Triebisch verringert. Die Pflanzenverfügbarkeit v.a. von As und Pb wird dadurch deutlich eingeschränkt. Die Gesamtkonzentrationen an Schwermetallen wird allerdings stark erhöht. Insgesamt übergibt der Stolln beispielsweise ca. 80 t Zn und 500 kg Cd im Jahr in die Vorflut.

Eine ***Verbesserung der Wasserqualität*** kann durch die Zufuhr von sauberem Wasser aus dem Kunstgrabensystem der Landes Talsperren Verwaltung erreicht werden. Dies konnte in einem Versuch nachgewiesen werden und wird als Maßnahme zur Verringerung der Konzentrationen empfohlen.

Der ***Modellstauversuch*** ergab keine Indizien für Redox oder Temperaturschichtung im Stauraum. Auch eine mechanische Mobilisierung der im Stauraum lagernden Sedimente kann weitestgehend ausgeschlossen werden. Konzentrationserhöhungen durch die Lösung von Sulfidoxidationsprodukten konnten nicht festgestellt werden, da das Stauraumvolumen nur ca. einem 20000-stel des späteren entspricht kann allerdings eine Konzentrationserhöhung für den späteren Staubetrieb nicht sicher ausgeschlossen werden. Nach den bisherigen Erfahrungen und den Entwicklungen bei Hochwasser wird aber von einer zeitlich auf die Anfangsphase des Anstaus begrenzten Konzentrationserhöhung ausgegangen. Diese könnte durch Frischwasserzufuhr gemildert werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Überregional wurde in der Sächsischen Zeitung am 15.3.2000 auf der Wissenschaftsseite ein vierspaltiger Bericht mit dem Titel „Studium in ewiger Nacht und Stille“ veröffentlicht. Am 13.4.2000, 17:25 Uhr wurde in der Sendung des Mitteldeutschen Rundfunks (MDR) in der Sendung „Hier ab vier“ ein zweieinhalbminütiger Beitrag über die Forschungsarbeiten unter Tage ausgestrahlt. Im Internet wird das Projekt präsentiert unter : http://www.mineral.tu-freiberg.de/geochemie/dbu_kkw/

Fazit

Es konnte eine belastbare Datengrundlage für die Prognose von verschiedenen Nutzungsvarianten geschaffen werden, sowie aufgrund der meteorologischen Bedingungen in der Bearbeitungszeit der Schwankungsbereich für die Schwermetallbelastung des Stolln erfaßt werden. Dieser ermöglicht die Einordnung der Veränderungen der Wasserqualität bei einer Nutzung des Stollns.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	9
2	KONZEPTION UND UMSETZUNG.....	11
2.1	PARAMETERMONITORING	11
2.1.1	Meßstelle „ <i>Reiche Zeche</i> “	12
2.1.2	Meßstelle „ <i>König Johann Spat</i> “	13
2.1.3	Meßstelle „ <i>Mundloch</i> “	13
2.2	GEOCHEMISCHES MONITORING	14
2.3	VERÄNDERUNGEN IN GESTAUTEN GRUBENBEREICHEN	14
2.4	EINFLUß AUF DIE VORFLUT	14
2.5	PROGNOSE	16
2.6	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT UND PRÄSENTATION IM INTERNET	16
3	METHODIK	17
3.1	PROBENAHEME	17
3.2	ANALYTIK	17
3.2.1	HCO_3^-	17
3.2.2	Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-	17
3.2.3	Ca^{2+} , Mg^{2+}	17
3.2.4	Na^+ , K^+	18
3.2.5	Schwermetalle, Arsen und Aluminium	18
3.3	BESTIMMUNGSGRENZEN UND FEHLER	18
4	ERGEBNISSE	19
4.1	ERGEBNISSE DES PARAMETERMONITORING	19
4.1.1	Wasserstand	19
4.1.2	Leitfähigkeit	22
4.1.3	Temperatur	25
4.1.4	Ermittlung einer Abflußbeziehung	26
4.1.5	Abfluß	28
4.1.6	Vergleich der Meßstellen „ <i>Reiche Zeche</i> “ und „ <i>König Johann Spat</i> “	29
4.2	ERGEBNISSE DES GEOCHEMISCHEN MONITORINGS	31
4.2.1	Aktuelle Verhältnisse	31
4.2.2	Veränderungen mit dem Fließweg	34
4.2.3	Veränderungen mit dem Durchfluß	38
4.3	ERGEBNISSE DES STAUVERSUCHS	41
4.4	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUß DES STOLLNWASSERS AUF DIE VORFLUT	48
5	DISKUSSION & ZUSAMMENFASSUNG	54
6	ANLAGEN	61

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Meßstellenschema für das Parametermonitoring im Rothschönberger Stolln	11
Abb. 2:	Multiparametersonde an der Meßstelle „Reiche Zeche“	12
Abb. 3:	Seitenriß der untertägigen Versuchsanlage im Königsee Stehenden zur Ermittlung der Veränderungen der Wasserqualität in gestaute Grubenbauen.	15
Abb. 4:	Wasserstandsentwicklung an der Meßstelle „König Johann Spat“ und Verteilung der Regen- Ereignisse im Stadtgebiet Freiberg	20
Abb. 5:	Entwicklung des Wasserstandes während eines Hochwassers	21
Abb. 6:	Beziehung zwischen Wasserstand und Leitfähigkeit	22
Abb. 7:	Entwicklung der Leitfähigkeit und des Wasserstandes während der Einleitung von Wasser aus dem Konstantin- Teich	23
Abb. 8:	Beziehung zwischen Wasserstand und Temperatur im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“	25
Abb. 9:	Abflußbeziehung der realen Meßwerte	26
Abb. 10:	Abflußbeziehung der Meßstelle „Reiche Zeche“ errechnet aus gemessenen und interpolierten Wassermengen	27
Abb. 11:	Verlauf des Abflusses im Beobachtungszeitraum	28
Abb. 12:	Jahresgang des Abflusses aus dem Rothschönberger Stollnmundloch	28
Abb. 13:	Entwicklung des Wasserstandes an den beiden Meßstellen im Rothschönberger Stolln während eines Hochwassers	29
Abb. 14:	Leitfähigkeitsentwicklung während der 2. Hochwasserwelle an den beiden Meßstellen im Rothschönberger Stolln	30
Abb. 15:	Piperdiagramm der Wässer des Rothschönberger Stolln	32
Abb. 16:	Zusammenhang zwischen dem Durchfluß und dem pH- Wert, sowie der HCO_3^- , SO_4^{2-} , und NO_3^- -Konzentration	38
Abb. 17:	Zusammenhang zwischen den Gesamtkonzentrationen an Al, Cu, Fe, As, Zn und Cd und dem Wasserstand im Stollnwasser	40
Abb. 18:	Ansicht der vorderen Stauwand im Verlauf des Stauversuches	43
Abb. 19:	Verlauf der Leitfähigkeit und der Temperaturmessung im Auslaufwasser der untertägigen Stauversuchs	43
Abb. 20:	Entwicklung des pH- Wertes und des E_H - Wertes in dem den Stauraum entströmenden Wasser während des Stauversuches.	44
Abb. 21:	Entwicklung der gelösten Konzentrationen an Al, Fe, Mn und Zn im auslaufenden Wasser des Stauversuches	45
Abb. 22:	Entwicklung der SO_4^{2-} und Ca^{2+} - Konzentration im Auslaufwasser des Stauversuches	47
Abb. 23:	pH- Wert- und E_H - Wertentwicklung im Staubereiches	47
Abb. 24:	Entwicklung der Wassertrübung am Mundloch des Rothschönberger Stolln während des Hochwassers 1999	48
Abb. 25:	Faktor der Zunahme der Gesamt- (a) und der gelösten Konzentration (b) an Schwermetallen, Aluminium und Arsen im Wasser der Triebisch nach dem Zufluß des Stollnwassers (Daten der UBG, 1999	51
Abb. 25:	Schematische, nicht maßstäbliche Darstellung der vermuteten Mobilisierung von hochmineralisierten Standwässern aus Grubenfeldern	55

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bestimmungsgrenzen in µg/l und relative Standardabweichung [%] für die Schwermetall-, Aluminium- und Arsenbestimmung in Wässern	18
Tab. 2:	Bestimmungsgrenzen in µg/l und relative Standardabweichung [%] für die Ionenbestimmung in Wässern	18
Tab. 3:	Ergebnisse des Parametermonitorings an der Meßstelle „Reiche Zeche“ mit Mittel-, Minimal- und Maximalwert	19
Tab. 4:	Mittelwerte sowie Minima und Maxima der Konzentrationen an Wasserinhaltsstoffen und der Wasserparameter	31
Tab. 5:	Gelöster Anteil an Schwermetallen, Al und As im Stollnwasser	32
Tab. 6:	Frachten an Wasserinhaltsstoffen im Stollnwasser	33
Tab. 7:	Mittlere gelöste Konzentrationen und Wasserparameter in den Hauptzuläufen zum Rothschnberger Stolln	34
Tab. 8:	Mittlere gelöste Frachten der 4 Hauptzuläufe zum Rothschnberger Stolln im Vergleich sowie der Anteil des Brander Reviers an der Gesamtfracht	35
Tab. 9:	Vergleich der mittleren Konzentrationen (geometrisches Mittel) im Wasser an den drei Meßpunkten im Rothschnberger Stolln	36
Tab. 10:	Analytisch ermittelte gelöste Konzentration und theoretische Mischkonzentration im Wasser am Mundloch des Rothschnberger Stolln	37
Tab. 11:	Mittlerer Anteil der gelösten Konzentration für die Schwermetalle, Aluminium und Arsen	38
Tab. 12:	Variation der Wasserqualität des dem Stauraum zulaufenden Wassers während des Flutungsversuches	41
Tab. 13:	Chemische Zusammensetzung der Sedimentschichten im Stauraum	42
Tab. 14:	Vergleich der geometrische Mittelwert des Einlauf- und Auslaufwassers des Stauversuchs	45
Tab. 15:	Vergleich der am 14.9.1999 gemessenen Konzentrationen und Parameter im Einlauf- und Auslaufwasser des Stauversuchs	46
Tab. 16:	Entwicklung von Wasserstand, Leitfähigkeit, Schweb und Sulfatkonzentration im Wasser des Rothschnberger Stolln	48
Tab. 17:	Bedeutung der Igeo- Klassen	49
Tab. 18:	Geometrische Mittelwerte der Wasserinhaltsstoffe Triebisch vor und nach dem Zulauf des Stollnwassers sowie Stollnwassers.	50
Tab. 19:	Faktoren der mittleren Schwermetallkonzentrationen in der Triebisch gegenüber den Zielvorgaben für die Schutzgüter „Aquatische Lebensgemeinschaften“ und „Trinkwasser“	51
Tab. 20:	Mittlere Gesamtfrachten des Rothschnberger Stolln in die Triebisch	51
Tab. 21:	Anteil des Brander Reviers an der Gesamtfracht am Stollnmundloch 1999	51
Tab. 22:	Hydrologische Gegebenheiten und Veränderungen durch die Nutzung des Stollns und die gekoppelten Prozesse,	54
Tab. 23:	Vergleich der theoretischen gelösten Konzentration im Wasser des Brander Reviers mit den gelösten Konzentrationen im Wasser aus dem Freiburger Revier	57
Tab. 24:	Vergleich der benötigten und real vorhandenen Wassermengen für einen kontinuierlichen Kraftwerksbetrieb mit 250 l/	58

Zusammenfassung

Im Rahmen eines einjährigen Monitorings der Wasserqualität eines Bergwerksstolln sowie Flutungsversuchen in Grubenräumen wurde eine komplexe Methodik entwickelt, die für Ermittlung einer statistisch gesicherten Datengrundlage für die Prognose von Wasserqualitätsveränderungen bei Nutzungsänderung geeignet ist. Erstmals wurden dabei in Grubengebäuden ohne aufwendige Klimatisierungs- und Sicherungsmaßnahmen, kostengünstig und langzeitstabil Computer als Datenlogger eingesetzt. Die Fernabfrage der Daten über Modem, bzw. Intranet und Internet eröffnete neue Möglichkeiten zur ereignissabhängigen Probenahme.

Die entwickelte Methodik kombiniert ein Monitoring von Wasserparametern (Leitfähigkeit, Temperatur, Wasserstand) mit einer regelmäßigen und zusätzlich eventgesteuerten geochemischen Probenahme. Dabei wurde nicht nur eine zeitlich Auflösung des Konzentrationsverlaufes im Wasser erreicht, sondern auch eine räumlich.

Im Ergebnis konnten Aussagen zu wahrscheinlichen Veränderungen bei einer Nutzung des betrachteten Stollns getroffen werden. Dabei ließ sich aus der Konzentrationsentwicklung bei hohen Abflüssen zeigen, das bei einem geplanten Anstau des Grubengebäudes mit einer zeitlich begrenzten Konzentrationserhöhung im Wasser vor allem an partikulär gebundenen Schwermetallen zu rechnen ist. Durch die langen Verweilzeiten des Wasser im Stolln erfolgte jedoch für die meisten Elemente eine Fixierung im Stolln, so daß die Belastung für die Vorflut sich nur unwesentlich erhöht. Problematische Elemente sind dabei vor allem Zink und Cadmium, die unter den vorhandenen geochemischen Milieubedingungen mobil bleiben und nicht den effektiven Fixierungsprozessen wie Eisen, Arsen, Aluminium, Kupfer und Blei unterworfen sind.

Die Ergebnisse der Flutungsversuche zeigen, das nur eine starke Änderung der Milieubedingungen zu einem starken Konzentrationsanstieg im Wasser führen. Diese Veränderungen können weitestgehend ausgeschlossen werden. Eine potentielle Schadstoffquelle stellen somit nur die leichtlöslichen Sekundärminerale aus der Sulfidoxidation dar.

Der aktuelle Stand der Belastung der Vorflut wurde als Grundlage für eine spätere Bewertung der Veränderungen erfaßt. Ein Glücksumstand war dabei die starke Schwankung des Abflusses, so daß eine große Spannbreite der natürlichen Belastung dokumentieren werden konnte.

Empfohlen wird vor allem eine Begrenzung des maximalen Abflusses auf ca. 1000 l/s zur Verhinderung einer mechanischen Resuspension von Sedimenten sowie ein nutzungsbegleitendes Monitoring. Die installierte Meßtechnik sollte weiter genutzt werden.

Danksagung

Das Projekt wurde finanziell von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt wird.

Für die gute und konstruktive Zusammenarbeit möchten die Bearbeiter sich vor allem bei den Vertretern der Staatlichen Umweltfachämter Radebeul und Chemnitz, Frau Stuhmann und Herr Berger sowie bei Frau Stein vom Sächsischen Ministerium für Umwelt und Landwirtschaft bedanken.

Vor allem gedankt werden soll Herrn Diplom Geol. W. Rentzsch und Herrn Dipl. Ing. Leistner vom Förderverein "Drei Brüder Schacht", ohne ihre stete fachliche und menschliche Unterstützung wären die anstehenden Aufgaben nicht zu lösen gewesen. Danksagen möchten wir ebenfalls Herrn Gerlach, Herrn Schlegel und Herrn Hiersemann für die Unterstützung bei den anstrengenden Befahrungen untertage.

Durch ihren hohen körperlichen Einsatz im Rahmen der Probenahmen haben sich die Studenten der Mineralogie Sandy Hasler, Ulrike Ebermann, Markus Walter und Markus Schreiner um das Projekt verdient gemacht, was hier dankend honoriert wird. Dank gilt auch Frau Dipl. Geol. Claudia Winkler für die Unterstützung bei den Probenahmen an der Triebisch und die fachliche Beratung in hydrogeologischen Fragen.

Ebenfalls gedankt werden soll den Kollegen des Lehr- und Besucherbergwerkes "Himmelfahrt Fundgrube" der Bergakademie Freiberg unter Dr. Kohlstock und Dr. Bayer sowie den Kolleginnen des Geochemisch -Analytischen Labors des Instituts für Mineralogie unter Prof. Klemm, wobei Frau Bombach und Frau Kodym besonders gedankt wird.

Besonderer Dank gilt den Kollegen des Universitätsrechenzentrums für die Unterstützung bei der Vernetzung der Messstelle "Reiche Zeche" und die Hilfe bei allen computerspezifischen und programmiertechnischen Fragen.

Für die Bereitstellung von Daten soll dem Institut für Geophysik (Durchfluss Reiche Zeche und Wetterdaten) und der UBG Dresden (Hydrochemie Triebisch, Durchfluß Röschenmundloch) gedankt werden.

1 Einleitung

Sulfidische Erzlagerstätten sind unter den Bedingungen der Sauerstofffreiheit – meistens in größeren Erdtiefen – gebildet und unter gleichen Bedingungen unter dem Grundwasserspiegel konserviert worden. Gelangen diese Erze über den Grundwasserspiegel, durch eine Absenkung des Wassers oder durch Aufhaldung, erfolgt durch die Wirkung von Sauerstoff und Wasser und in vielen Fällen durch die Mitwirkung von Mikroorganismen eine intensive Oxidation dieser Erze mit folgenden Konsequenzen:

- Erniedrigung des pH- Wertes,
- Forcierte Verwitterung aller anderen Minerale und Gesteine durch das so entstandene Säurepotential,
- Mobilisierung vieler Elemente darunter auch zahlreicher umweltrelevanter Metalle (Al, As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) durch die Überführung in wasserlösliche Verbindungen
- Erhöhung der Sulfatgehalte der Wässer.

Mengenmäßig betrachtet ist das Eisen in den sulfidischen Erzlagerstätten der Erde das dominante Element, ohne daß es das Ziel des Bergbaues ist. Das Eisen erscheint dabei in Form selbstständiger Minerale wie Pyrrhotin (FeS), Pyrit und /oder Markasit (beides FeS_2) oder als Haupt- und Spurenelement in Fremdmineralen wie Chalkopyrit (CuFeS_2), Arsenopyrit (FeAsS) oder Sphalerit und muß wegen der engen Verwachsung zwangsläufig mit gefördert und aufbereitet werden. Nach der Einstellung des Bergbaues bereitet auch dieses nicht toxische Element an der Erdoberfläche Umweltprobleme, da es in Form seiner Hydroxide (FeOOH) zahlreiche Elemente – insbesondere As und Pb - adsorptiv bindet und zum anderen alle natürlichen und technischen Wasserwege verschlammt.

Diese Probleme treten überall auf, wo Sulfide dem Zutritt von Sauerstoff ausgesetzt werden, sowohl in reinen Erzlagerstätten als auch im Deckgebirge und damit im Kippenmaterial der Braun- und Steinkohle und in den Bergehalden der Dachschieferproduktion.

In gefluteten Gruben verläuft die Oxidation der oft beträchtlichen Mengen an Restsulfiden dann weiter, wenn im Grubengebäude eine Wasserzirkulation besteht, die für den ständigen Eintrag von neuem Sauerstoff sorgt.

Im Freiburger Erzrevier werden die geochemischen Konsequenzen des Sauerstoffzutrittes in eine Erzlagerstätte seit Jahrzehnten untersucht. Hauptaugenmerk lag bisher auf den Prozessen der Mobilisierung und des Transportes sowie der natürlichen Fixierung von umweltrelevanten Elementen aus den Sulfiden. Durch die Nutzung der Grubenbaue wird das bisherige Fließgleichgewicht gestört, und in zunehmendem Maße werden, aufbauend auf den bisherigen Erfah-

rungen bei der Beurteilung vor allem der Mobilisierung und des Transportes, prognostische Verfahren entwickelt.

Hintergrund der aktuellen Forschung ist die Nutzung der alten Wasserwegsamkeiten für Aufschlags- und Abschlagwasser, in Form von Röschen, Kunstgräben und Stolln, welsche nach der Einstellung des Bergbaus im Freiburger Revier nicht mehr benötigt wurden. Die Stolln führen z. T. seit Jahrhunderten schwermetallbelastete Wässer in die Vorflut, gleichzeitig haben sich in den Stolln bis zu Dezimeter mächtige Sedimentablagerungen gebildet, die ebenfalls stark mit Schwermetallen und Arsen belastet sind. Für die Nutzung der Stolln muß gewährleistet sein, das der Austrag von gelösten und partikulären Schadstoffen nicht erhöht wird, eine mögliche Verringerung des Austrages sollte angestrebt werden.

Eine Nutzung der Stollnwässer bzw. der Stolln selbst erfolgte bis Ende der 90-er Jahre nicht. Seit 1998 wird ein Stolln zur Ableitung von Kühlwasser genutzt. Auch eine Einleitung von Regenwasser aus einem Sammelbecken einer Deponie nach Untertage und damit in den Einzugsbereich eines Stolln wurde genehmigt.

Aussagen hierzu sind nur auf der Basis umfassender Daten zur Schwermetallbelastung und zur Wasserführung möglich, die für mindestens ein hydrologisches Jahr gelten sollten.

Ein besonderes Studienobjekt stellt der Rothsönberger Stolln dar, welcher im Projekt als Modellobjekt diente. Durch seine Länge von fast 23 km bietet er einen großen Reaktionsraum, in dem Fällungs- und Sedimentationsprozesse stattfinden. Durch die problemlose Zugänglichkeit von Mundloch und Stolln an der Reichen Zeche, können durch Probenahmen an diesen räumlich weit getrennten Stellen Veränderungen über den Fließweg dokumentiert werden. Des weiteren existieren bereits Wasseranalysen aus zurückliegenden Jahren, so daß auch eine zeitliche Prognose des Rückgangs der Schadstoffbelastung möglich sein sollte. Weiterhin erfordert die geplante Nutzung des Stollns zur Ableitung von Turbinenwasser eines untertägigen Kraftwerkes entsprechende Untersuchungen für das umweltrechtliche Genehmigungsverfahren.

2 Konzeption und Umsetzung

Für allgemeingültige Aussagen mußten die Untersuchungen in 4 Teilbereiche untergliedert werden:

- 1) Monitoring des Jahresganges von Temperatur, Leitfähigkeit und Menge des Stollnwassers;
- 2) Geochemisches Monitoring des Stollnwasser, wenn möglich in Abhängigkeit von der Abflußsituation;
- 3) Entwicklung des geochemischen Milieus im späteren unterirdischen Anstau;
- 4) Einfluß des Stollnwassers auf die Wasserqualität der Triebisch (Vorflut)

Die Lösungskonzeptionen für die einzelnen Teilbereiche sollen im Folgenden jeweils skizziert und begründet werden.

2.1 Parametermonitoring

An prozeßkritischen Parametern wurden die elektrische Leitfähigkeit, die Wassertemperatur und der Wasserstand ausgewählt.

Durch die Ermittlung einer Abflußfunktion durch Flügelradmessungen bei verschiedenen Wasserständen kann eine Umrechnung des Wasserstandes auf die Wassermenge vorgenommen werden. Dies ermöglicht exaktere Frachtberechnungen als bisher, und damit eine genauere Aussage zum Austrag von Schadstoffen aus dem Brand-Erbisdorfer Revier, welches für die spätere Nutzung entscheidend ist. Durch einen Vergleich mit Regendaten könnten auch Aussagen zum hydraulischen Regime der Grubenbaue möglich werden.

Die Wassertemperatur zur Korrektur der Leitfähigkeitsmessung notwendig und erlaubt Rückschlüsse auf Einleitungen von Tageswasser wie sie z.B. für die Deponie Himmelsfürst geplant sind.

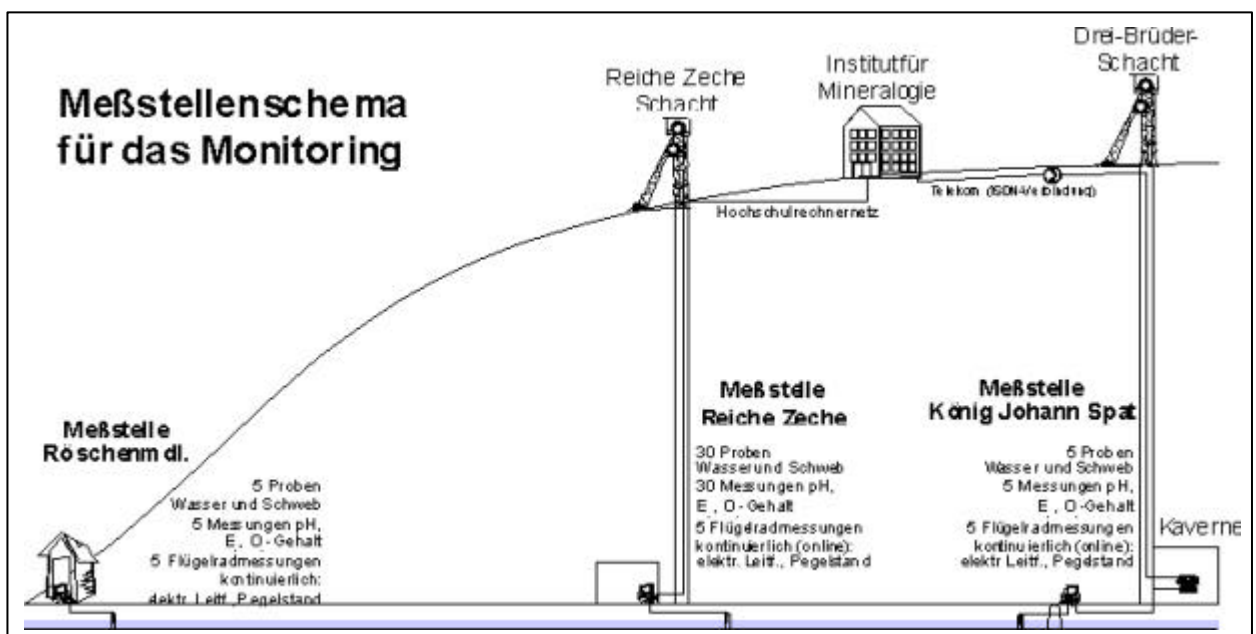


Abb. 1: Meßstellenschema für das Parametermonitoring im Rothschönberger Stolln

Die elektrische Leitfähigkeit als Maß für die Mineralisation des Stollnwassers erlaubt Aussagen zu den Veränderungen der gelösten Konzentrationen im Jahresgang und in Abhängigkeit von der die Grubenbaue durchsetzenden Wassermenge.

Alle drei Parameter wurden an relevanten Stellen im Stolln gemessen. Dazu wurden an diesen Stellen jeweils Meßstationen eingerichtet, die aus den Meßsensoren und einer Datenerfassungseinheit sowie, soweit möglich, einer Netz- bzw. Modemanbindung bestehen. In Abbildung 1 (Seite 5) ist der prinzipielle Aufbau und die Vernetzung der Meßstellen dargestellt.

2.1.1 Meßstelle „**Reiche Zeche**“

Die Umsetzung der in Abbildung 1 skizzierte Meßstelle wurde im Oktober 1998 mit der Installation eines Computers an der Meßstelle „**Reiche Zeche**“ begonnen. Der Computer ist mit einem 386-er Prozessor und 8 MB Arbeitsspeicher sowie 4 seriellen Schnittstellen ausgestattet. Im November wurde über 80 m saigere Teufe mit Unterstützung des Universitätsrechenzentrum ein Glasfaserkabel zur Anbindung des Rechners an das Uni-Netz der Bergakademie gelegt. Am 9.11.1998 konnte die erste Verbindung zum Rechner hergestellt werden.

Im Dezember 1998 wurde mit dem Test von Meßgeräten begonnen. Gemessen wurde mit einer faseroptischen Sonde die Trübung des Stollnwassers nach der Reichen Zeche. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit einer bereits vorhandenen WTW-Sonde wurde durch den Potentialabfluß über galvanische Kopplung der Sonde mit dem untertägigen Stromnetz stark gestört, so daß die Messungen eingestellt wurden. Dieses Problem wurde durch den Einbau einer galvanisch entkoppelten Schnittstelle gelöst. Bis zum Einbau der Multiparametersonde am 26. April 1999 wurde mit der Leitfähigkeitssonde ab dem 19.3. das Stollnwasser überwacht.

Seit dem 26. April 1999 liefert die Meßeinrichtung konstant Informationen über die gewählten Parameter. Der Rechner registriert die ca. jede Sekunde eingehenden Meßwerte 20 Minuten lang und schreibt dann den Mittelwert der Meßwerte in eine Datei. Bei einem Meßabbruch wird die Datei automatisch gespeichert und die Messung neu gestartet, sobald der Rechner wieder gebootet hat.

Durch die Wahl des Betriebssystems FreeBSD erfolgen Unterbrechungen der Messung nur durch Stromausfälle, Systemabstürze wurden bisher nicht registriert.

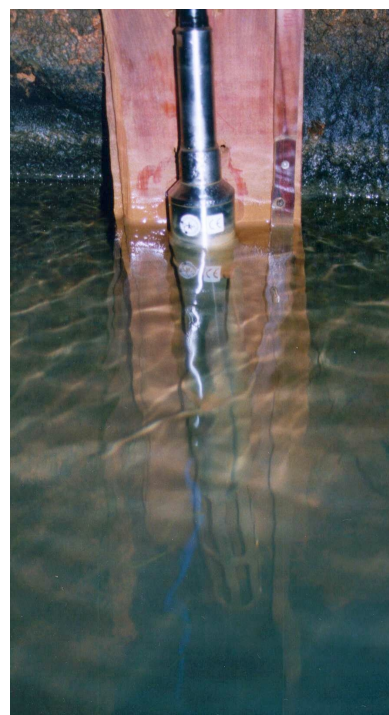


Abb. 2: Multiparametersonde an der Meßstelle „Reiche Zeche“

2.1.2 Meßstelle „**König Johann Spat**“

Nach den Erfahrungen an der Meßstelle „**Reiche Zeche**“ wurden die Planungen für die Meßstelle am König Johann Spat präzisiert. Problematisch war vor allem die Signalübertragung vom Meßort zum Computer, welcher möglichst geschützt stehen sollte. Die Variante der Stromzuführung von der Kaverne bis zum Meßort, um den Computer direkt dort aufzustellen wurde verworfen. Die realisierte Konzeption sah den Datentransfer über 400 m geschütztes Koaxialkabel vom Meßort bis zum Kavernenkraftwerk vor. Zur Sicherung des Computers gegen Stromschwankungen und Stromausfälle wurde eine unterbrechungsfrei Stromversorgung in die Konzeption aufgenommen.

Nach umfangreichen Übertage- Tests wurde am 14.7.1999 während einer 14-stündigen Befahrung die Installation der Meßeinrichtung vorgenommen. Eine ISDN-Verbindung nach Untertage konnte nicht hergestellt werden, da die Signaldämpfung in den alten Steuerkabeln als zu hoch erwies. Der Computer registrierte bis zum 16.7. 1999 Daten, danach fiel der Rechner wegen eines Festplattenfehlers aus. Während der 2. Befahrung am 31.8.1999 wurde der Computer komplett getauscht, und die Messung wieder gestartet. Seitdem läuft der Rechner stabil und liefert mit einer Ausnahme (12 Stunden im Zeitraum 7.9.1999 – 8.9.1999) unterbrechungsfrei Werte. Die Datenerfassung erfolgt nach dem gleichen Algorithmus wie an der Meßstelle „**Reiche Zeche**“.

2.1.3 Meßstelle „**Mundloch**“

Die Einrichtung der Meßstelle am Röschen Mundloch des Rothschönberger Stolln konnte nicht mit den Konzeptionen der beiden anderen Meßstellen realisiert werden, da kein Strom und Telefonanschluß zur Verfügung stand. Aus diesem Grunde wurde eine Meßstation mit Datenlogger beschafft und am 16.4.1999 im Pegelhaus der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft Dresden (UBG Dresden) installiert. Um Speicherplatz zu sparen und den Aufwand für das Datenauslesen zu minimieren, wurde die Abtastrate auf eine Stunde eingestellt. Der Datenlogger registriert immer zur vollen Stunde den aktuellen Meßwert von Wasserstand, elektrischer Leitfähigkeit und Wassertemperatur. Durch die beschränkten Einbaumöglichkeiten wurde der Multiparametersensor direkt hinter der Pegellatte der UBG Dresden angebracht. Diese Einbauart führt bei hohen Wasserständen zu einer Verfälschung der Ergebnisse der Wasserstandsmessung, da es zu einem leichten Anstau an der quer zur Strömung eingebauten Pegellatte kommt. Bis ca. 46 cm Wasserstand können die Werte als gesichert angesehen werden.

2.2 Geochemisches Monitoring

Das geochemische Monitoring wurde als 14-tägige Probenahme an der Meßstelle „Reiche Zeche“ angelegt, da die bisherigen Erfahrungen keine Änderungen im Tagesabstand vermuten ließen. Außerdem sollte in Abstimmung mit den Wasserstandsmessungen Probenahmen zu besonderen Ereignissen wie Hochwasserwellen durchgeführt werden. Ziel war dabei vor allem, die Entwicklung der Elementgehalte im Wasser hochaufgelöst darzustellen. Ebenfalls vorgesehen waren Probenahme in Einzelfällen an den beiden anderen Meßstellen.

Insgesamt wurden 36 Wasserproben an der Meßstelle „Reiche Zeche“ entnommen und analysiert. An der Meßstelle „König- Johann- Spat wurden 4 Proben genommen sowie 5 Proben am Röschenmundloch. Die Probenahme und Analyse der Wasserproben ist in Kapitel 3 beschrieben. Bestimmt wurden die Elemente Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn sowie an 7 Proben U und Tl. An Hauptkomponenten wurden Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- und SO_4^{2-} bestimmt.

2.3 Veränderungen in gestauten Grubenbereichen

Ausgehend von der späteren Nutzungskonzeption für den Stolln als Wasserableiteweg für einen unterirdischen Wasserstau mußte die Frage nach möglichen Veränderungen bei einer Flutung von bisher nicht wassererfüllten Hohlräumen detailliert untersucht werden. Da die Hohlräume nicht zugänglich sind, mußten Vergleichsannahmen getroffen werden. Einfluß auf die Wasserqualität hat vor allen die Lösung von bei der Erzoxidation gebildeten Sekundärmineralen, wie z.B. Jarosit, aber auch die Oxidation der Erze selbst. Eine weiterer Aspekt ist die Zunahme der partikulären Fracht durch die mechanische Mobilisierung von schlammartigen Sedimenten aus den horizontalen Streckenbereichen aufgrund höherer Durchflußmengen, bzw. durch das verstärkte Ausfällen von hydratisierten Eisenoxiden.

Um die Wirksamkeit solcher Prozesse zu überprüfen, wurde im Juli 1999 eine typische Auffahrung mit ca. 30 cm mächtigen Schlammschichten im Bereich des Lehr und Besucherbergwerkes „Himmelfahrt Fundgrube“ vermauert („verspündet“). Die im Stauraum lagernden Sedimente wurden beprobt und auf die Elemente Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn analysiert. Die Probenahme und die Analysenmethoden sind in Kapitel 3.2. beschrieben. Nach dem Verschließen der Strecke wurde der Hohlraum von ca. 80 m^3 mit Wasser geflutet. Durch die Gestaltung des Ablaufes wurde eine gleichmäßige Füllhöhe gewährleistet, die Ablaufmenge wurde durch die Zulaufmenge reguliert. Abbildung 3 zeigt schematisch die Versuchsanlage.

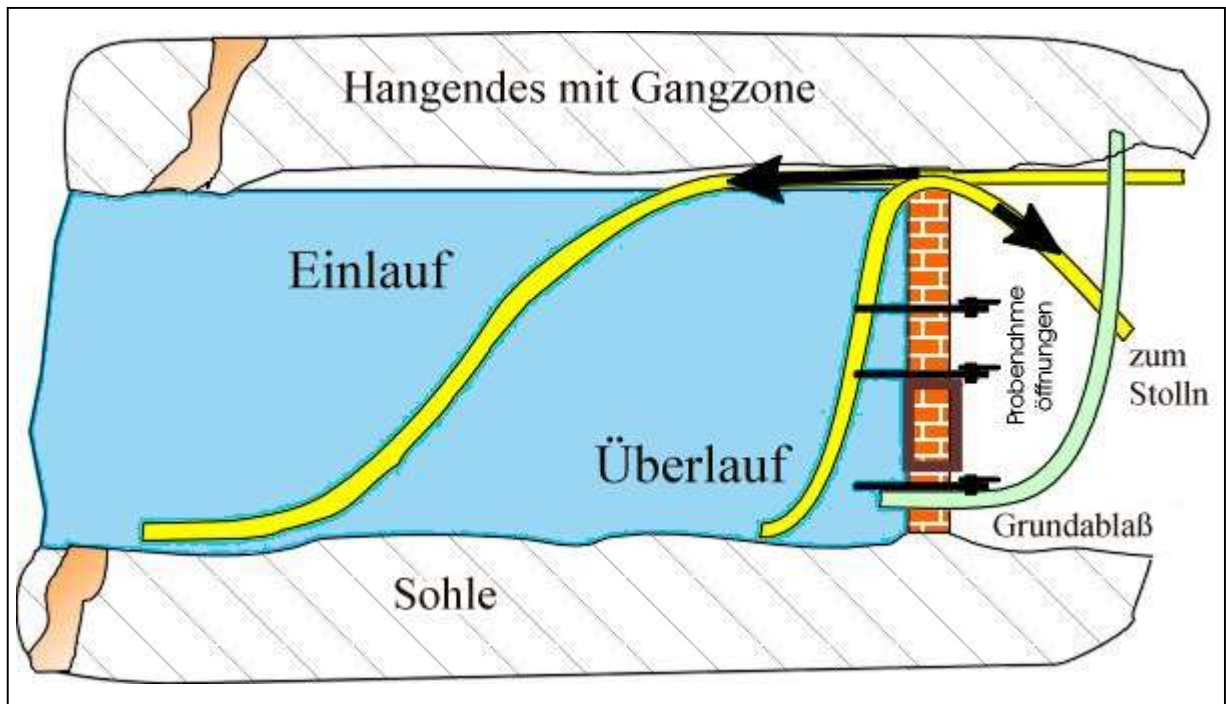


Abb 3: Seitenriß der untertägigen Versuchsanlage im Königsee Stehenden zur Ermittlung der Veränderungen der Wasserqualität in gestaute Grubenbauen.

Am Auslauf wurde im Wochenabstand Probe genommen, bzw. bei einem 2. Versuchszyklus mit einer Sonde die Leitfähigkeit und die Temperatur als 20-minütige Mittelwerte gemessen. Der erste Versuchszyklus dauerte 37 Tage, der zweite Zyklus 74 Tage. Während des Ablasses des Stauraumes wurde die Leitfähigkeit hochaufgelöst alle 60 Sekunden gemessen und das Wasser beprobt sowie visuell überwacht.

2.4 Einfluß auf die Vorflut

Das Wasser des Rothschnberger Stolln fließt unterhalb des Ortes Rothschnberg bei Meißen in das Flößchen Triebisch, welches ca. 10 km stromab in die Elbe mündet. Für Aussagen zum Umweltgefährdungspotential des Wassers des Rothschnberger Stolln's sind vor allem die Veränderungen der Wasserqualität der Triebisch entscheidend. Dazu müssen der Zustand vor und nach dem Zulauf des Stollnwassers festgestellt werden, sowie der Zustand des Stollnwassers selbst.

Ab Juni 1999 wurde darum das Wasser am Röschenmundloch in Abstimmung mit den Probenahmen der Umweltbetriebsgesellschaft (UBG) Dresden beprobt, welche die Triebisch vor und nach dem Zulauf des Stollnwassers untersucht. Da bei der UBG nicht für jede Probenahmeaktionen auch die relevanten Metallgehalte analysiert wurden, konnten insgesamt nur 3 Proben in dieser Verfahrensweise genommen werden. Zusätzlich erfolgten weitere Beprobungen des Stollnwassers bei Hochwasserereignissen. Die Ergebnisse der Beprobung der UBG wurden vom StUFA Radebeul zur Auswertung an das Institut für Mineralogie übergeben.

2.5 Prognose

Es wird ein Zusammenhang zwischen der abfließenden Wassermenge und den Elementgehalten sowie der Leitfähigkeit des Wassers vermutet. Anhand der in der Projektlaufzeit ermittelten Abhängigkeit kann eine Berechnung der Elementgehalte zu verschiedenen Abflußsituationen erfolgen. Dies würde die Grundlage für die Abschätzung der Konsequenzen einer Nachnutzung bilden. Nach den bisherigen Erfahrungen können solche Zusammenhänge mit potentiellen oder logarithmischen Gleichungen beschrieben werden. Solche Beziehungen werden für die untersuchten Elemente ermittelt und dargestellt. Wenn keine eindeutigen Abhängigkeiten gefunden werden, wird eine Trendbetrachtung mit verminderter Zuverlässigkeit durchgeführt

2.6 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation im Internet

Ein wichtiger Aspekt bei der Durchführung des Projektes war die Öffentlichkeitsarbeit. Überregional wurde in der Sächsischen Zeitung am 15.3.2000 auf der Wissenschaftsseite ein vierspaltiger Bericht mit dem Titel „Studium in ewiger Nacht und Stille“ veröffentlicht. Am 13.4.2000, 17:25 Uhr wurde in der Sendung des Mitteldeutschen Rundfunks (MDR) in der Sendung „Hier ab vier“ ein zweieinhalbminütiger Beitrag über die Forschungsarbeiten unter Tage ausgestrahlt.

Im Internet wurden projektbegleitend, aktuelle Ereignisse und Ergebnisse vorgestellt. Dazu wurde eine Art Online- Tagebuch gepflegt, welches die wichtigsten Stationen der Projektbearbeitung darstellt. Über ein virtuelles Meßgerät werden die jeweils aktuellen Daten der Meßstelle „Reiche Zeche“ angezeigt. Die Seiten sind zu finden unter http://www.mineral.tu-freiberg.de/geochemie/dbu_kkw/index.shtml Auch fotografisch wurde das Projekt umfangreich dokumentiert. Insgesamt entstanden über 280 Fotos. Eine Multimedia-CD soll nach Abschluß des Projektes in Zusammenarbeit mit dem Universitätsrechenzentrum entstehen.

3 Methodik

3.1 Probenahme

Die Wasserentnahme erfolgte in 2 Liter PE- Flaschen, welche zuvor mit dem betreffenden Wasser mehrfach gespült wurden. Von diesen 2 Litern wurden sofort 100 ml in eine 100 ml- PE- Flasche überführt. 1000 ml wurden mit Unterdruck über einen Zellulose- Acetat- Membranfilter $< 0,45 \mu\text{m}$ filtriert. Die Membranfilter waren zuvor gewässert und bei 105°C 14 Stunden getrocknet worden. Das Filtrat wurde in einer 100 ml PE- Flasche sowie in einer 500 ml PE- Flasche bis zur Analyse aufbewahrt. Zur Konservierung wurden die zur Metall und Arsen- Analyse bestimmten 100 ml PE- Flaschen mit 0,5 ml konzentrierter HNO_3 angesäuert und bis zur Analyse eingefroren. Die für die Bestimmung der Hauptwasserinhaltsstoffe vorgesehenen 500 ml Stollnwasser wurde sofort am Tag der Probenahme auf HCO_3^- , $\text{K}_{\text{S } 4,5}$ und $\text{K}_{\text{B } 8,2}$ sowie Ca^{2+} und Mg^{2+} analysiert. Bis zur Weiterbearbeitung wurden diese Wasserproben bei ca. 8°C im Kühlschrank gelagert. Die verwendeten Filter wurden wiederum 14 Stunden bei 105°C getrocknet. Die Differenz der Auswaagen ergab die Menge an suspendierten Partikel (Schweb) je Liter Stollnwasser.

Im fließenden Wasser wurden mit Meßgeräten der Firma WTW die Wasserparameter pH- Wert, E_{H} - Wert, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt absolut und in Prozent sowie die Wassertemperatur bestimmt. Ebenso wurden mit einem behelfsmäßigen Pegel der Wasserstand an der Sonde sowie als Abstand von einem Bezugspunkt an der Stollnwand ermittelt. Dieses Verfahren ermöglicht die Ermittlung der realen Wasserstände für den Zeitraum der Probenahme, in welchen die automatische Meßstation noch nicht in Betrieb war. Der jeweils exakte Wasserstand und die Fließmenge wurden aus den Werten der Meßstation ermittelt

3.2 Analytik

3.2.1 HCO_3^-

Die Bestimmung erfolgt titrimetrisch gegen den pH- Wert nach EN ISO9963-2, 1995. Ebenfalls ermittelt wurden $\text{K}_{\text{S } 4,5}$ und $\text{K}_{\text{B } 8,2}$.

3.2.2 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-

Diese Anionen werden gemeinsam mittels Ionenchromatographie bestimmt. Dabei kommt als Eluent 2 mmol Phtalsäure mit 2 % Acedonitril zum Einsatz. Als Trennsäule wird eine Säule aus Polymethacrylat mit quarternären Ammoniumgruppen (Super-Sep) verwendet. Die Stollnwässer werden 1:5 verdünnt, die Wässer des Stauauslaufes 1:10.

3.2.3 Ca^{2+} , Mg^{2+}

Beide Kationen werden in den Stollnwässern titrimetrisch mittels m/20 K III (Komplexon) bestimmt. Dazu wird in beiden Fällen Triethanolaminhydrochlorid und Hydroxylaminchlorid zur Maskierung von Eisen und Mangan zugegeben. Für die Calciumbestimmung werden 25 ml Probelösung mit den genannten Verbindungen sowie KOH im Überschuß versetzt, als Indikator

kommt eine Mischung aus Fluorexon und Thymolphthalein zur Anwendung. Bei Magnesium werden statt KOH Ammoniumchlorid und Calcein- Indikator verwendet.

In den Wasserproben des Stauauslaufes werden Ca und Mg mittels AAS gemessen, da vor allem die hohen Eisen und Mangankonzentrationen störend wirken.

3.2.4 Na^+ , K^+

Die einwertigen Kationen werden mittels Emissions- Flammen- Photometrie ohne Zusatz von Puffern bestimmt. Die gemessenen Emissionslinien liegen für Natrium bei 589,3 nm und für Kalium bei 768,2 nm. Die Messungen werden durch Standardlösungen kalibriert und durch Wiederholungsmessungen kontrolliert. Proben außerhalb des Kalibrierbereichs werden entsprechend verdünnt.

3.2.5 Schwermetalle, Arsen und Aluminium

Die Elemente Al, Cu, Cd, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn werden in den Wässern mit Hilfe der ICP -MS analysiert. Ebenfalls mit ICP-MS wurden an 7 Proben Uran (U) und Thorium (Th) gemessen. Arsen wird mit AAS -Hydridtechnik bestimmt, da die Nachweisgrenze mit der ICP-MS zu hoch liegen. Die Wässer aus dem Stauauslauf werden mit dem ICP- Gerät „Plasma 1000“ analysiert, da in den Wässern entsprechend hohe Konzentrationen vorliegen.

3.3 *Bestimmungsgrenzen und Fehler*

In Tabelle 1 sind die Bestimmungsgrenzen sowie die relative Standardabweichung für die Schwermetall, Aluminium und Arsenbestimmung in Wässern dargestellt. Sie wurden durch die 10-fache Bestimmung einer Probe ermittelt.

Element	Al	As	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Bestimmungsgrenze [µg/l]	2	1	2	2	5	2	2	2	20
Relative Standardabweichung [%]	3,4	6,0	4,1	4,4	1,5	1,5	4,2	2,8	1,6

Tab. 1: Bestimmungsgrenzen in µg/l und relative Standardabweichung [%] für die Schwermetall-, Aluminium- und Arsenbestimmung in Wässern für die Verfahren ICP-MS, ICP-AES und AAS/FIAS ermittelt durch 10-fachbestimmung einer Probe in Geochemisch Analytischen Labor des Institut's für Mineralogie.

Tabelle 2 zeigt die Bestimmungsgrenzen sowie die relative Standardabweichung für die Ionen-Bestimmungen:

Element	Cl^-	NO_2^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Bestimmungsgrenze [mg/l]	0,1	0,01	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Relative Standardabweichung [%]	3,8	15,0	4,6	3,9	0,3	1,2	2,1	0,7

Tab 2: Bestimmungsgrenzen in µg/l und relative Standardabweichung [%] für die Ionenbestimmung in Wässern für die Verfahren IC, AAS und Titration ermittelt durch Mehrfachbestimmung einer Probe in Geochemisch Analytischen Labor des Instituts für Mineralogie.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse des Parametermonitoring

Die Messung der Wasserparameter an den drei Meßstellen im Stolln wurden über unterschiedliche Zeiträume durchgeführt. Die längste Meßreihe wurde an der Meßstelle „Reiche Zeche“ aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Durchflußmengen sind aus einer Beziehung errechnet, die in 4.1.4 beschrieben ist. Die Darstellung der Ergebnisse im Einzelnen erfolgt an den Meßwerten der Meßstelle „Reiche Zeche“, damit statistisch gesicherte Werte in die Interpretation eingehen.

	Leitfähigkeit µS/cm	Wasserstand cm	Temperatur °C	Durchfluß l/s	Durchfluß l/min
Mittelwert	684	93	12,7	300	18.020
Maximum	740	157	13,4	1.261	75.687
Minimum	586	78	11,4	163	9.792

Tab. 3: Ergebnisse des Parametermonitorings an der Meßstelle „Reiche Zeche“ mit Mittel-, Minimal- und Maximalwert

An der Meßstelle „Röschenmundloch“ wurde ab Juli 1999 nur noch die Temperatur und der Wasserstand erfaßt, da der Leitfähigkeitssensor aufgrund des Zusetzen der Platinplatten des Sensorkopfes keine realen Werte lieferte. Eine Reinigung des Sensorkopfes hatte nur einen kurzfristigen Effekt, so daß die Werte aus der Betrachtung herausgelöst wurden.

4.1.1 Wasserstand

Die Ergebnisse der Druckmessung für den Wasserstand an der Meßstelle „Reiche Zeche“ mußten, bedingt durch die Einbauvariante der Sonde, um 54 cm korrigiert werden. Dieser Abstand wurde durch Wiederholungsmessungen von der Sohle bis zum Sondenkopf ermittelt und zu den ermittelten Wasserständen addiert.

In der Entwicklung des Wasserstandes über den beobachteten Zeitraum konnte kein eindeutiger Zusammenhang mit der Wettersituation über Tage hergestellt werden. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung des Wasserstandes an der Meßstelle „König Johann Spat“ und die Regenmengen für Freiberg (registriert vom Institut für Geophysik) im entsprechenden Zeitraum dargestellt.

Das System des Grubengebäudes reagiert unterschiedlich auf verschiedenen Wettersituationen. So wird eine um etwa 5 Tage verzögerte Reaktion des Wasserstandes auf die Schneeschmelze, sowohl 1999 als auch 2000 festgestellt. Am 27.2.1999 setzte in Freiberg das Tauwetter ein, am Mundloch wurde am 5.3.1999 der Maximalwasserstand registriert, an der Reichen Zeche wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht gemessen. Im März 2000 setzte die Tauperiode am 25.1.2000 ein, die Reaktion des Grubengebäudes erfolgte am 30.1.2000. Die endgültige Hochwasserwelle wurde im Zeitraum 26.2 bis 13. 3.2000 registriert, vermutlich weil dann das Tauwetter in den Höhenlagen des Einzugsgebietes einsetzte. Dafür liegen keine Werte vor.

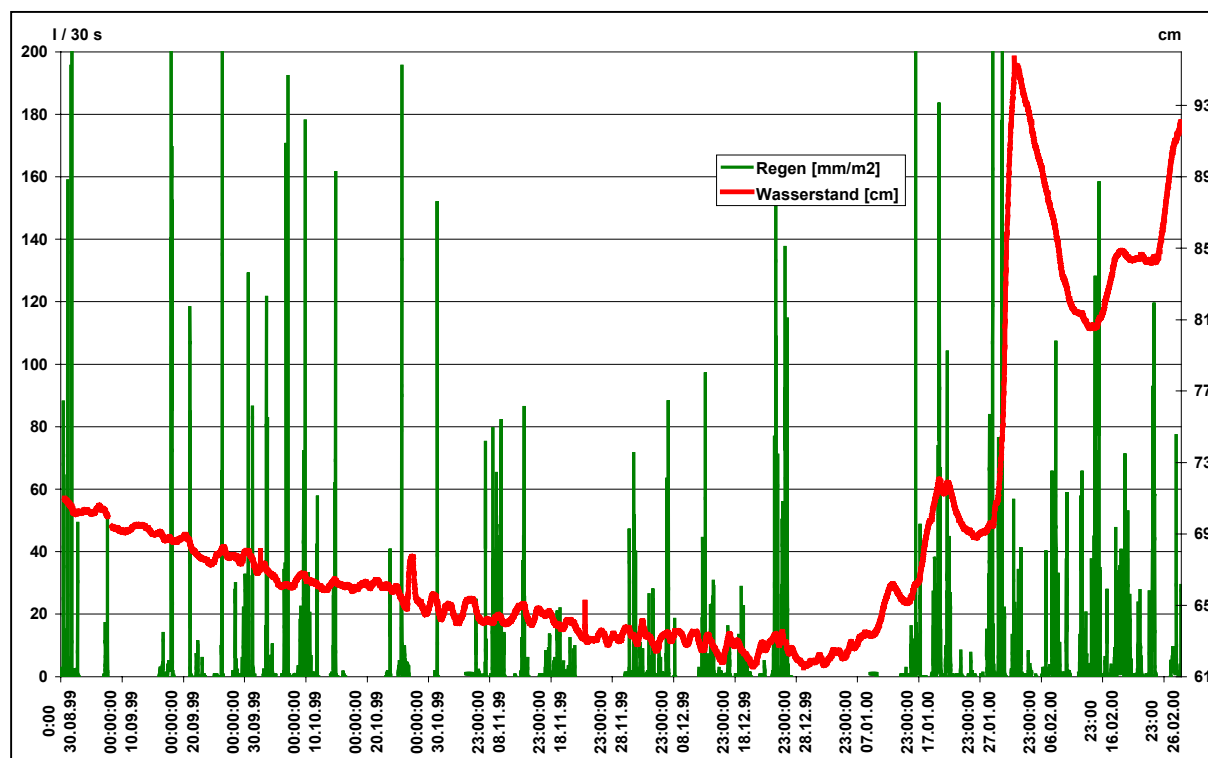


Abb. 4: Wasserstandsentwicklung an der Meßstelle „König Johann Spat“ und Verteilung der Regen-Ereignisse im Stadtgebiet Freiberg von 8/99 bis 2/00

Die hydrologische Situation im Einzugsgebiet des Brand- Erbsdorfer- Grubengebäudes ist sehr kompliziert. Die Fläche des Grubengebäudes wird mit ca. 20 km² angegeben. Das Einzugsgebiet wurde überschlägig aus hydrologischen Daten berechnet. Dabei wurde eine Versickerungsrate von 8,3 %, ein Jahresniederschlag von 860 l/m² (nach Rösner, 1987 und GLU, 1992) und ein mittleren Abfluß von 300 l/s (eigene Messungen) angesetzt. Bei Berechnung mit diesen Werten ergibt sich ein Einzugsgebiet von 133 km² Größe. Nicht bekannt sind die Flächenanteile oberflächennaher Auffahrungen aus den spätmittelalterlichen Bergbauperioden, welche stark drainierend wirken können.

Die Reaktion des Grubengebäudes auf Niederschlagsereignisse ist wahrscheinlich abhängig von der Situation vor dem Niederschlag. Nach längeren Trockenperioden muß mit verstärktem oberflächlichem Abfluß gerechnet werden, da die aufquellenden oberen Bodenschichten eine Trennschicht bilden. Bei guter Durchfeuchtung des Bodens ist mit einem raschen Durchsickern des Niederschlags bis in Gesteins- und damit Auffahrungs- und Erzgangnähe zu rechnen, so daß eine rasche Reaktion des Wasserstandes beobachtet werden kann. Ähnliches gilt für die Zeit der Schneeschmelze, obwohl das Problem des verstärkten Oberflächenabflusses aufgrund des gefrorenen Bodens noch nicht geklärt ist. Ob zusätzlich ein Anstrom von höhergelegenen Gebieten über den Kluftgrundwasseraquifer erfolgt, kann nicht ausgeschlossen, aber auch nicht bewiesen werden. Die genauen untertägigen Fließwege im Brand- Erbsdorfer Revier sind nicht bekannt, da die Grubenbaue unzugänglich sind. Auffällig ist ein Muster, welches sich für Hochwassersituationen im Stolln abzeichnet. Abbildung 5 zeigt stellvertretend die Entwicklung des Wasserstandes für das Hochwasser vom 20.2.2000 bis zum 14.4.2000.

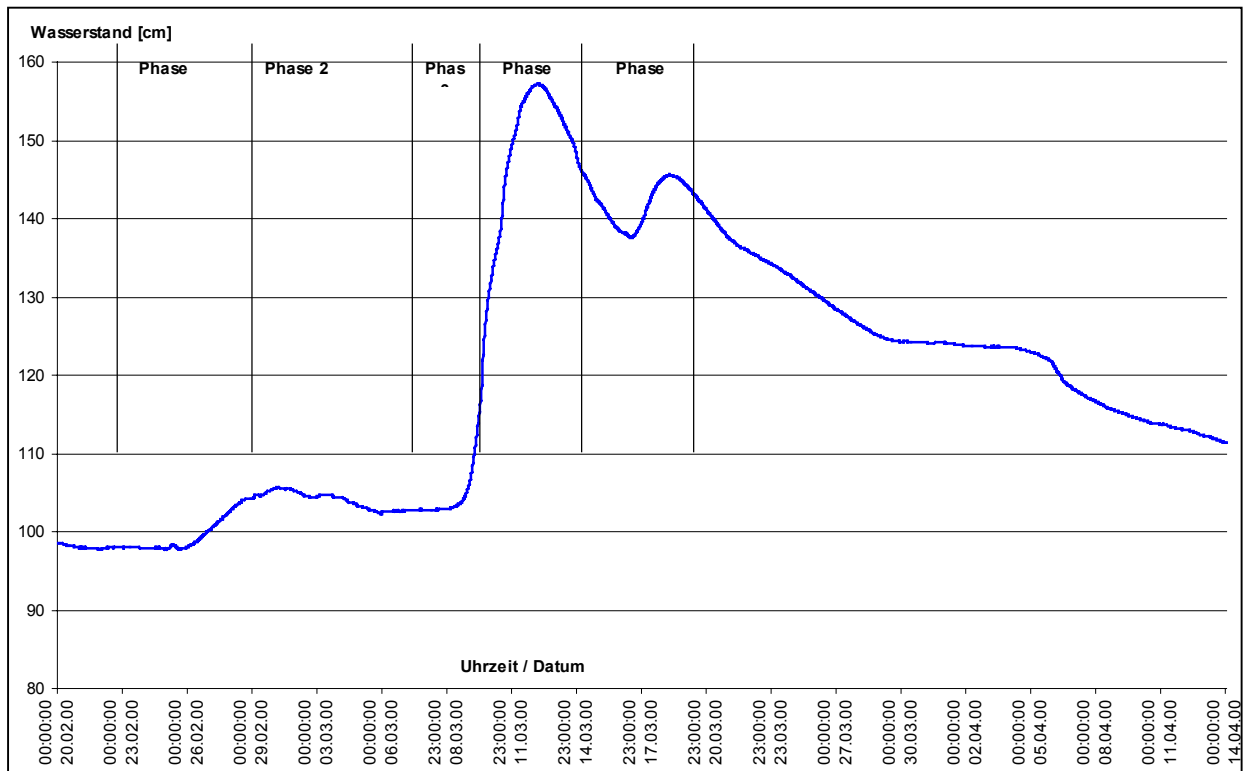


Abb. 5: Entwicklung des Wasserstandes während des Hochwassers im Zeitraum 20.02 bis 14.04.2000

Der Verlauf entspricht der Wasserstandsentwicklung im Zeitraum 31.1. bis 15.2. 2000. Es können 5 Phasen der Entwicklung unterschieden werden.

1. Anstieg und Wiederabfall des Wasserstandes im Zeitraum 26.2. bis 6.3.2000
2. Nach kurzer Plateauphase rascher Wasserstandsanstieg auf den Maximalwert im Zeitraum 9.3.2000 bis 13.3.2000, dann wieder ein Absinken bis zum 17.3.2000
3. Erneuter Wasseranstieg und Abfall im Zeitraum 17.3. bis 22.4.2000
4. Abflachen der Abfallkurve im Zeitraum 22.3. bis 29.3.
5. Plateauphase bis zum 5.4.2000, nach einer kurzen Steilabfall dann kontinuierlicher Abfall des Wasserstandes

Die Ursachen für diesen Verlauf sind unklar, hängen jedoch wahrscheinlich mit der Verbindung der Fließwege und der großen räumlichen Erstreckung der Grubenbau zusammen. Die erste Welle könnte eine Reaktion der auslaufenden Grubengebäude darstellen, bzw. eine Reaktion des tieferen gefluteten Grubenbereichs, der auf den hydrostatischen Druck der zufließenden Wässer in entfernteren Grubengebäuden reagiert. Gestützt wird diese Theorie von der Temperaturerhöhung und der Leitfähigkeitserhöhung in dieser Phase. Die folgende Plateauphase ist der Ausgleich des Zustroms von Tiefenwasser und „Drainage“-wasser, dann erfolgt das Abfließen der Hauptmenge des „Drainage“-wassers in der großen Welle. Dabei werden wiederum steile und abflachende Bereiche im Anstieg der Kurve beobachtet, was möglicherweise mit dem „Voll-Laufen“ einzelner Sohlen im Grubengebäude erklärt werden kann. Phase 3 könnte eine Reaktion der weiter entfernten Grubenbaue sein, bei geringeren Hochwasserwellen wird die 3. Welle nicht so deutlich ausgeprägt festgestellt. Das flache Abfallen und die anschließende Plateauphase

se in Phase 4 und 5 lassen ein Leerlaufen von Sohlen vermuten, oder einen verspäteten und abnehmenden Zufluß von Grundwasser. Am Ende von Phase 5 beginnt die über das Jahr zu beobachtende relativ gleichmäßige Abnahme des Wasserstandes durch die Verminderung des Zustromes von Wasser aus dem Boden und der ungesättigten Zone.

Durch die sehr trockene 2. Jahreshälfte 1999 kann geschätzt werden, daß der Wasserstand und damit der Abfluß wahrscheinlich nicht unter die gemessenen Werte sinkt. Konkrete Anhaltspunkte dafür sind vor allem der späte Wasserstandsanstieg. Im langjährigen Mittel wird im Oktober am Mundloch die geringste Wassermenge registriert (DEGNER, 1996), 1999 begann der Wasserstandsanstieg an der Meßstelle „Reiche Zeche“ erst am 30.12.1999 bei 77,51 cm. Damit können die Prognosebetrachtungen wahrscheinlich auf die gemessenen Extremsituationen eingeschränkt werden. Weiter Beobachtungen des Pegels sind zur Verifizierung dieser Hypothese notwendig.

4.1.2 Leitfähigkeit

Der Parameter Leitfähigkeit als Maß für die Gesamtmineralisation des Wassers schwankt im Verlaufe des Meßzeitraumes in relativ engen Grenzen, so daß kleinmaßstäbliche Veränderungen interpretiert werden müssen. Wie in Tabelle 3 gezeigt hat das Wasser der Rothschröberger Stolln eine mittlere Leitfähigkeit von 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sie schwankt im Bereich von 740 bis 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$, die maximale Differenz beträgt also 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

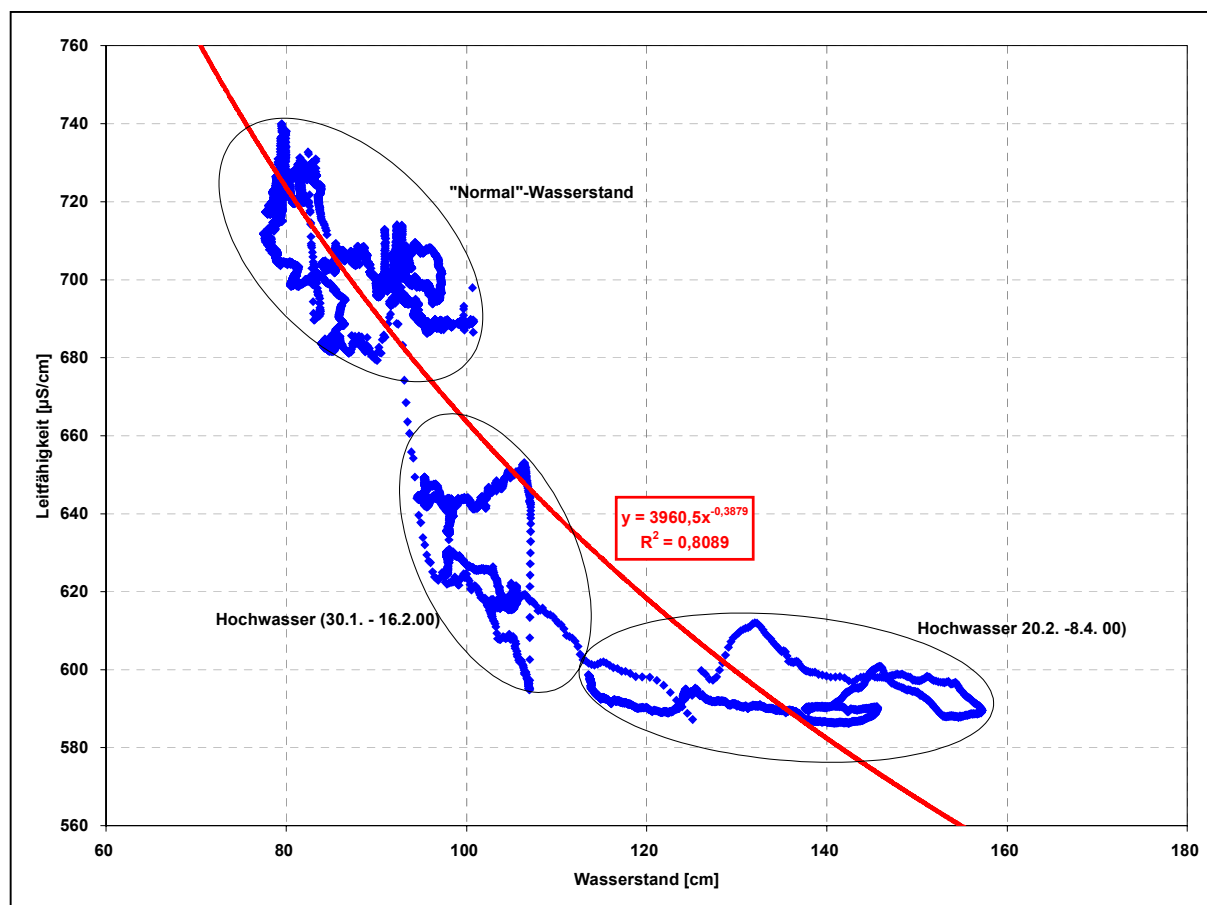


Abb. 6. Beziehung zwischen Wasserstand und Leitfähigkeit an der Meßstelle „Reiche Zeche“ für den Beobachtungszeitraum.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Wasserstand kann festgestellt werden. Abbildung 6 zeigt die Beziehung zwischen Wasserstand und Leitfähigkeit.

Die Leitfähigkeitsentwicklung zeigt deutliche Hysterese-Erscheinungen, die auch für geringe Wasserstandsschwankungen nachzuweisen sind. Wahrscheinlich sind sie auf die beobachtete Leitfähigkeitserhöhung am Beginn von Hochwasserwellen zurückzuführen, die Verdünnung setzt erst später ein. Auch während der Wasserstands- Plateauphasen ist eine Verringerung bzw. Erhöhung der Leitfähigkeit festzustellen. Die im Diagramm dargestellte potentielle Beziehung hat einen Regressionskoeffizienten von $R=0,89$ bzw. $R^2=0,809$, d.h. die über die Funktion aus dem Wasserstand errechnete Leitfähigkeit stimmt zu 90 % mit der gemessenen überein. Damit kann zumindest für Abflüsse $> 100 \text{ l/s}$ ungefähr auf die Leitfähigkeit umgerechnet werden, bzw. eine Abschätzung der möglichen Entwicklung der Leitfähigkeit bei höheren Abflüssen gegeben werden. Bei niedrigeren Abflüssen ist die Streuung der Werte höher, die Sicherheit der Prognose wird dadurch eingeschränkt.

Im Zeitraum 26.10.1999 bis 27.10.1999 wurde ein Wasserstandsanstieg registriert, der mit einer starken Leitfähigkeits- und Temperaturerniedrigung verbunden war. Abbildung 7 zeigt den Verlauf des Wasserstandsanstieges und der Leitfähigkeit an der Meßstelle „König Johann Spat“.

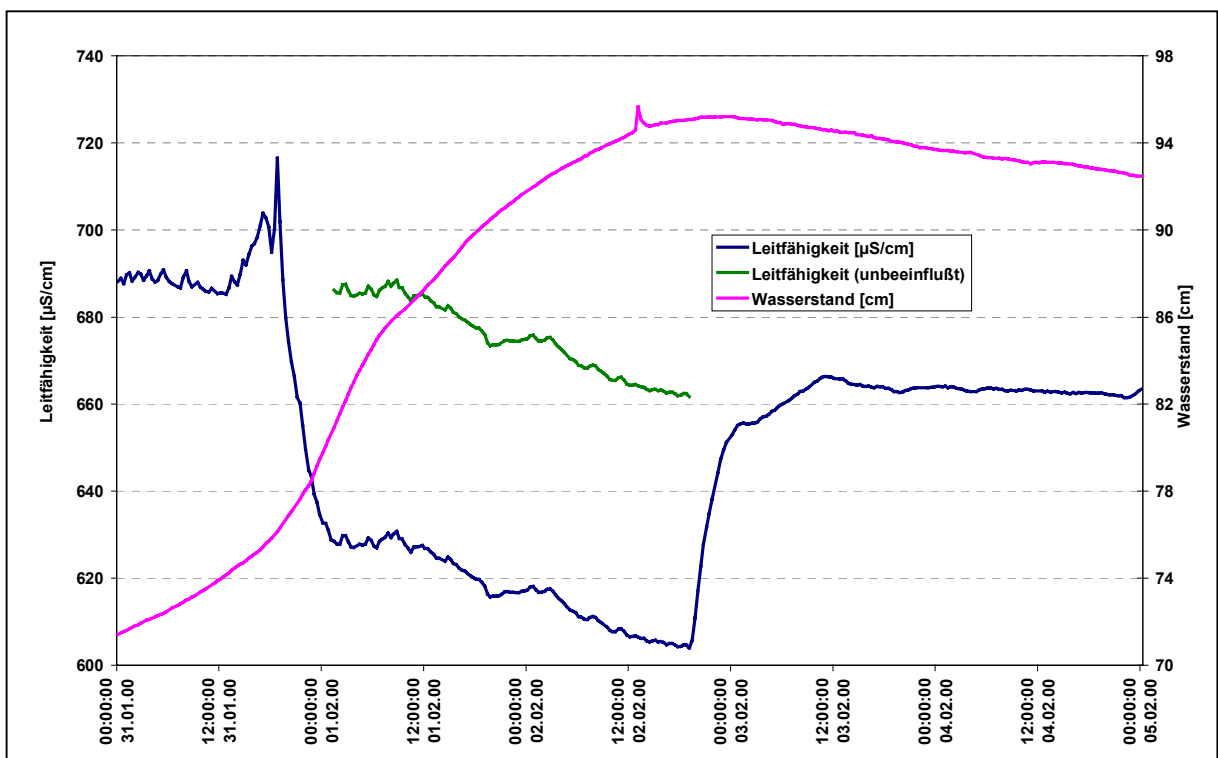


Abb. 7: Entwicklung der Leitfähigkeit und des Wasserstandes während der Einleitung von Wasser aus dem Konstantin- Teich in die Grubenbaue, sowie die theoretische unbeeinflusste Leitfähigkeitsabnahme durch den natürlichen Wasserstandsanstieg

Als Ursachen dafür konnte eine Einleitung von Wasser des Konstantin- Kunstteiches über die alte Zuleitung zum Oberwerk des Kavernenkraftwerkes ermittelt werden. Diese Einleitung war im Zuge von Reparaturen notwendig geworden, da über den normalen Teichablauf der Wasserspiegel im Teich nicht auf die erforderliche Höhe gesenkt werden konnte. Auf Anfragen wurde

diese Einleitung über einen Zeitraum von 3 Tagen noch einmal wiederholt. Ziel war es, die eingeleiteten Mengen und ihre Auswirkung zu bestimmen. Leider fiel die Einleitung genau mit dem natürlichen Wasserstandsanstieg am 31.1.2000 zusammen, so daß eine Mengenbestimmung unter Tage nicht möglich war.

Mit einer Verzögerung von 4 Stunden nach dem Aufdrehen des Schiebers am Konstantin-Teich wird der Leitfähigkeitsabfall registriert, ebenso der Leitfähigkeitsanstieg nach dem Verschließen des Zulaufes. Die mittlere Ablaufmenge wurde aus dem Wasserstandsrückgang im Einlaufbauwerk über dem Mönch am Konstantin- Teich zu ca. 13 l/s errechnet. Die Wassermengendifferenz des natürlichen Anstieges betrug 200 l/s, der höchste Abfluß am König Johann Spat betrug etwa 400 l/s, der Abfluß am Beginn ca. 200 l/s. Eine Mischungsrechnung mit den Parametern der Probe KT 01/44 (Anlage 6.3) ergab bei einem Verhältnis am Beginn von 87 % Bergwasser zu 13 % Teichwasser die gemessenen Leitfähigkeit. Danach ergeben sich ca. 40l/s Teichwasser die nach Untertage flossen. Die Differenz zu den gemessenen Werten liegt wahrscheinlich in der Meßmethodik begründet, sowie in der nicht exakt zu ermittelnden Grundfläche des Einlaufbauwerkes. Die Einleitung von sauberem Wasser (Leitfähigkeit ca. 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$) auch in kleinen Mengen führt also zu einer deutlichen Verdünnung des Stollnwassers und wirkt sich positiv auf die Wasserqualität aus.

4.1.3 Temperatur

In Abbildung 8 ist die Temperatur gegen den Wasserstand aufgetragen. Die ermittelte Beziehung ist weniger eindeutig als die Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Wasserstand.

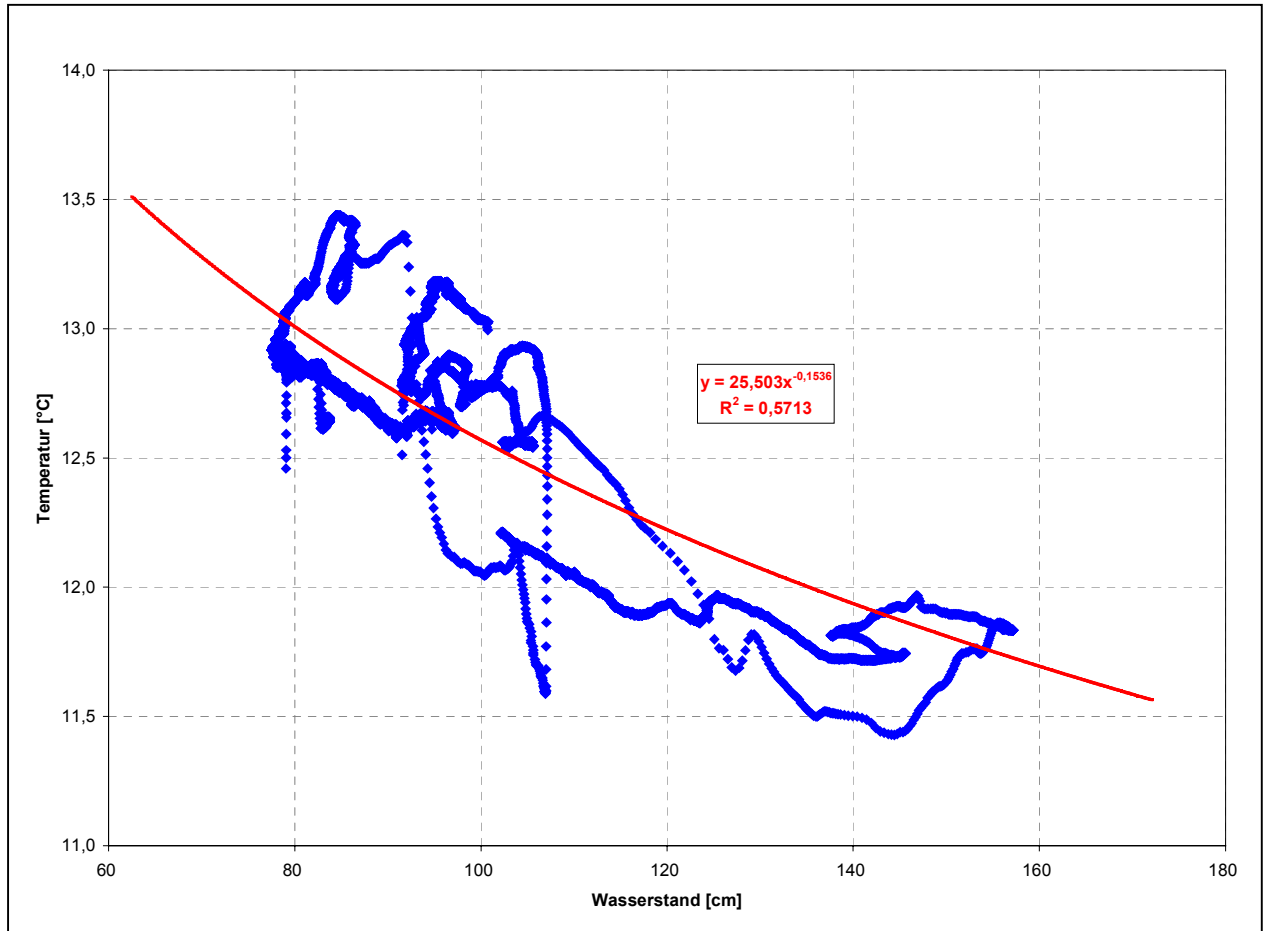


Abb. 8: Beziehung zwischen Wasserstand und Temperatur im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“ im Beobachtungszeitraum 26.4.1999 bis 26.4.2000

Daß die aus der Beziehung ermittelten Werte stimmen, ist nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% gegeben. Ursache sind die ausgeprägteren Hysterese-Erscheinungen, hervorgerufen durch den großen Anteil an kalten Oberflächenwasser (Schneeschnmelze) in der Hochwasserzeiten. Die Temperaturerhöhung im Grubengebäude wird aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeiten während der Hochwässer und der damit verkürzten Kontaktzeiten mit dem Gestein verringert, so daß auch der Wiederanstieg der Temperatur verlangsamt wird.

Die maximalen Temperaturschwankungen von ca. 2 °C haben keinen Einfluß auf die thermodynamisch gesteuerten Fällungsprozesse im Wasser. Eine Temperaturerhöhung um ca. 5 °C könnte sich positiv auf die Fällungsreaktionen auswirken, wie bereits in KLUGE ET. AL. 1997 nachgewiesen.

4.1.4 Ermittlung einer Abflußbeziehung

In der Projektlaufzeit wurden 4 Flügelradmessungen an der Meßstelle „Reiche Zeche“ durchgeführt. Dabei wurde in 3 Tiefen (10 cm, 30 und 70 cm unter Wasseroberfläche) in 30 cm breiten Lamellen die Strömungsgeschwindigkeit anhand der Umdrehungen des kalibrierten Flügelrades ermittelt. Durch die Berechnung des Fließquerschnittes wurden dann mit den Fließgeschwindigkeiten die entsprechenden Lamellenabflüsse ermittelt und durch Addition der Gesamtabfluß ermittelt. Aufgrund der Stollnbeschaffenheit braucht der für Oberflächenwässer wichtige Verkrautungsfaktor nicht berücksichtigt zu werden, es wird von ungehemmtem Abfluß ausgegangen. In Abbildung 9 ist der Wasserstand gegen die gemessenen Wassermenge in l/s aufgetragen.

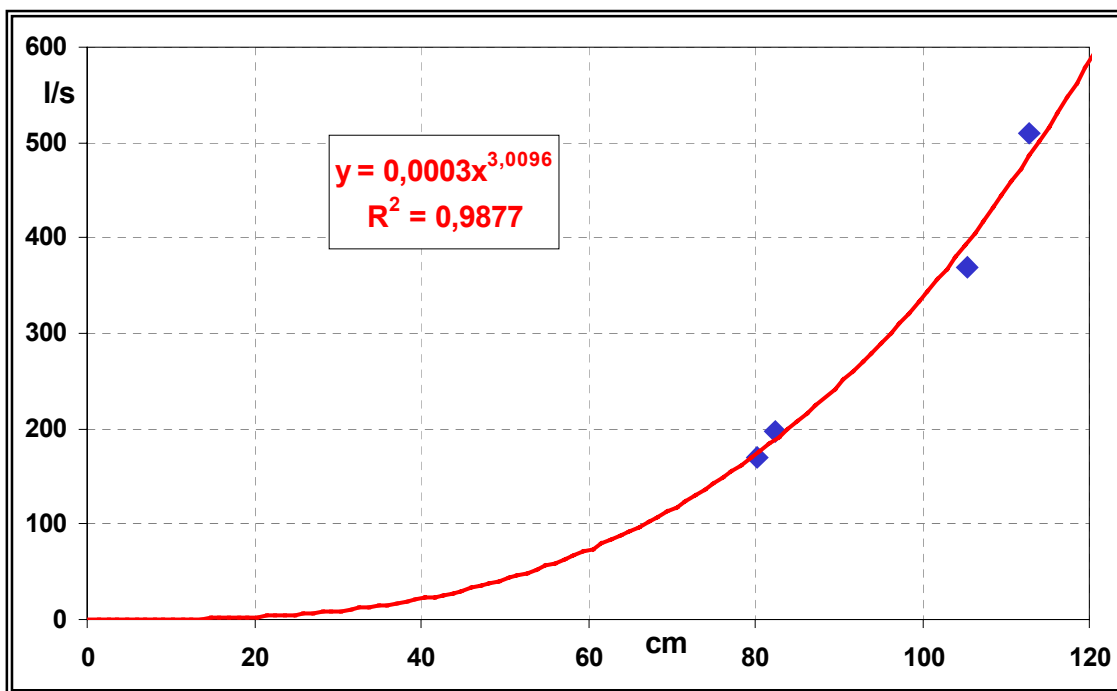


Abb. 9: Abflußbeziehung der realen Meßwerte der Flügelradmessungen an der Meßstelle „Reiche Zeche“

Im Bereich der Messungen werden für die aus den Wasserständen errechneten Werte gute Übereinstimmungen mit den realen Werten zu erwartet sein. Bei höheren Wasserständen wird u.U. ein zu hohe Wassermenge errechnet. Um eine möglichst realitätsnahe Berechnungsformel zu erhalten, wurde über die Beziehung Wasserstand und durch Flügelradmessung ermittelte Fließgeschwindigkeit für sehr hohe Wasserstände die Wassermengen berechnet. Hohe Wasserstände können aufgrund der Unzugänglichkeit des Stollns ab ca. 130 cm Wasserstand nicht direkt gemessen werden. Die errechneten Werte wurden gemeinsam mit den gemessenen Werten dargestellt und, wie in Abbildung 10 gezeigt, eine neue Beziehung ermittelt.

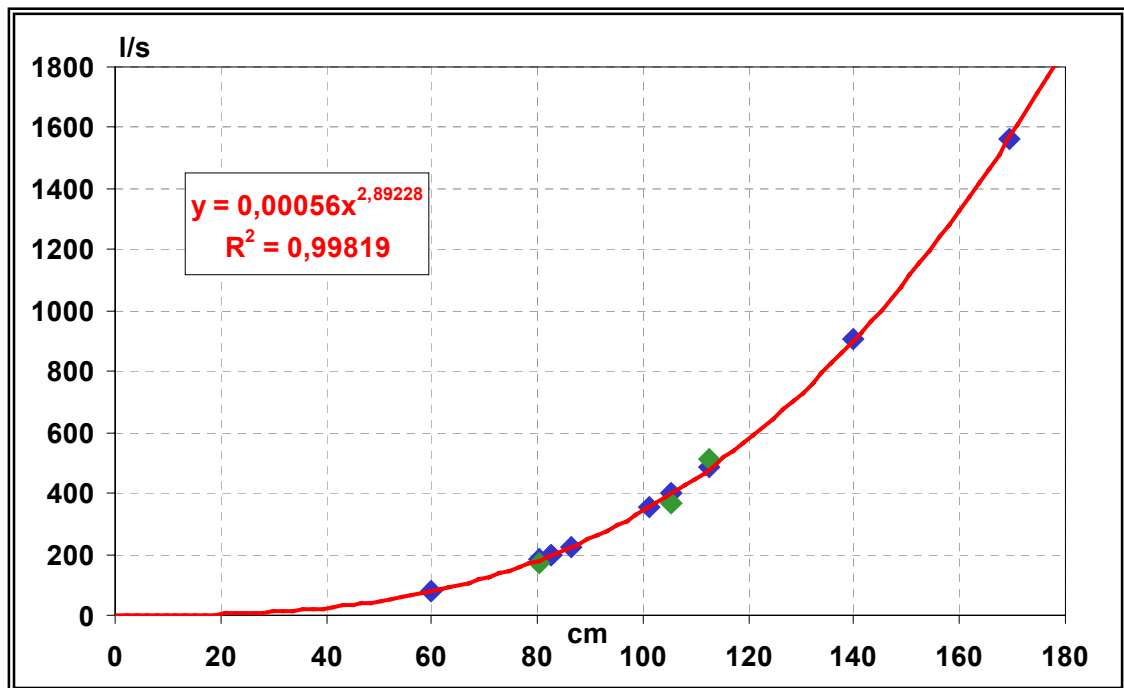


Abb. 10: Abflußbeziehung der Meßstelle „Reiche Zeche“ errechnet aus gemessenen und interpolierten Wassermengen

Die für die jeweiligen Probenahmen ermittelten Wasserstände an der Sonde wurden für die Frachtberechnung auf die Wassermengen nach dieser Formel umgerechnet.

Durch die geringe Anzahl von Messungen im niederen und mittleren Abflußbereich können die Abflußwerte für hohe Wasserstände bei der Umrechnung stärker fehlerbehaftet sein. Die Kalibrierung der Umrechnung wird nach Projektende weiter fortgesetzt. Im Folgenden wurde allerdings mit den ermittelten Werten gerechnet, um Aussagen treffen zu können. Die Frachtwerte bei hohen Abflüssen sind als Orientierungswerte anzusehen.

4.1.5 Abfluß

Mit der unter 4.1.4 ermittelten Abflußfunktion wurden die gemessenen Wasserstände auf den Abfluß umgerechnet. In Abbildung 11 ist der Jahresgang vom 26. April 1999 bis zum 26. April 2000 dargestellt. Eine größere Übersicht ist als Anlage 6.2 angefügt.

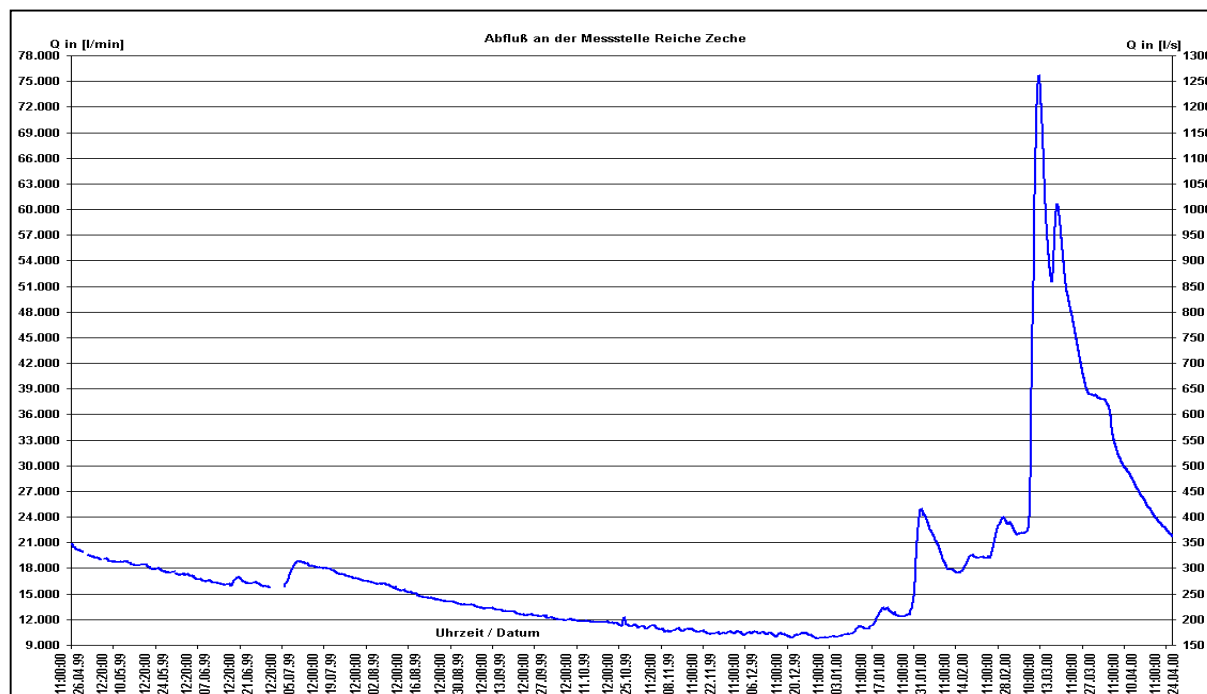


Abb. 11: Verlauf des Abflusses im Beobachtungszeitraum vom 26.4.1999 bis zum 26.4.2000 an der Meßstelle „Reiche Zeche“

Vergleicht man die Kurve mit den langjährigen Monatsmittelwerten am Mundloch in Abbildung 12 zeigt sich ein atypischer Verlauf des Abflusses. Im langjährigen Mittel (1877 bis 1999) erreicht der Abfluß sein Maximum im April und sein Minimum im Oktober. Im Beobachtungszeitraum wird Ende Dezember, Anfang Januar 2000 der niedrigste Wasserstand registriert. Noch deutlicher tritt der Unterschied beim Vergleich mit den Monatsmittelwerten des Zeitraumes nach der Stilllegung des Bergbaues hervor. Das Maximum ver-

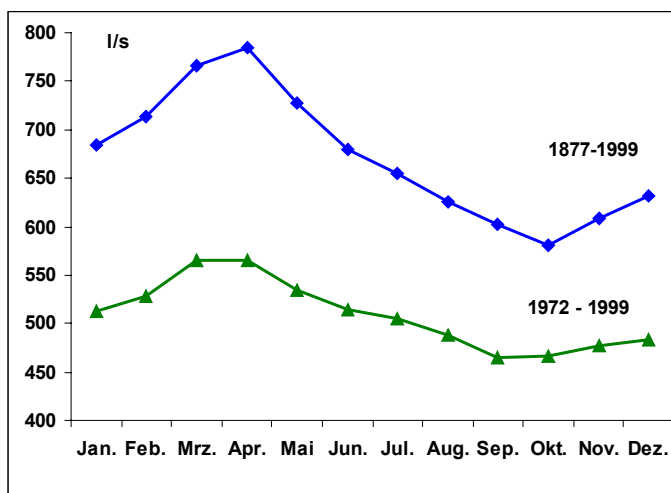


Abb. 12: Jahresgang des Abflusses aus dem Rothschönberger Stollnmundloch als Monatsmittelwerte für die Zeiträume seit der Inbetriebnahme des Stollns und nach der Stilllegung des Bergbaus (1972) bis heute

teilt sich fast gleichmäßig auf die Monate März und April, während das Minimum bereits im September registriert wird. Ursache für das vergleichsweise späte Ansteigen des Abflusses 1999 ist wahrscheinlich das geringe Wasserdargebot in der niederschlagsarmen zweiten Jahreshälfte 1999.

4.1.6 Vergleich der Meßstellen „Reiche Zeche“ und „König Johann Spat“

Die Meßstelle „König Johann Spat“ diene vor allem als Frühwarnsystem, damit eine hochaufgelöste Beprobung von Hochwasserwelle möglich war. Die Ermittlung einer Abflußbeziehung für die Meßstelle war nicht möglich, es kann aus den Abflüssen der Meßstelle „Reiche Zeche“ aber der Abfluß geschätzt werden. Auf der Fließstrecke zwischen den beiden Meßstellen sitzen dem Stolln ca. 10 l/s zu, welche von den an der Meßstelle „Reiche Zeche“ ermittelten subtrahiert werden müssen.

Ein Vergleich der Meßwerte der beiden Sonden gibt Aufschluß über Fließgeschwindigkeiten zwischen den beiden Meßstellen, sowie die geochemische Entwicklung des Wassers auf dem Fließweg. Abbildung 13 zeigt die Entwicklung der Wasserstände an den beiden Meßstellen während des Hochwassers im März 2000.

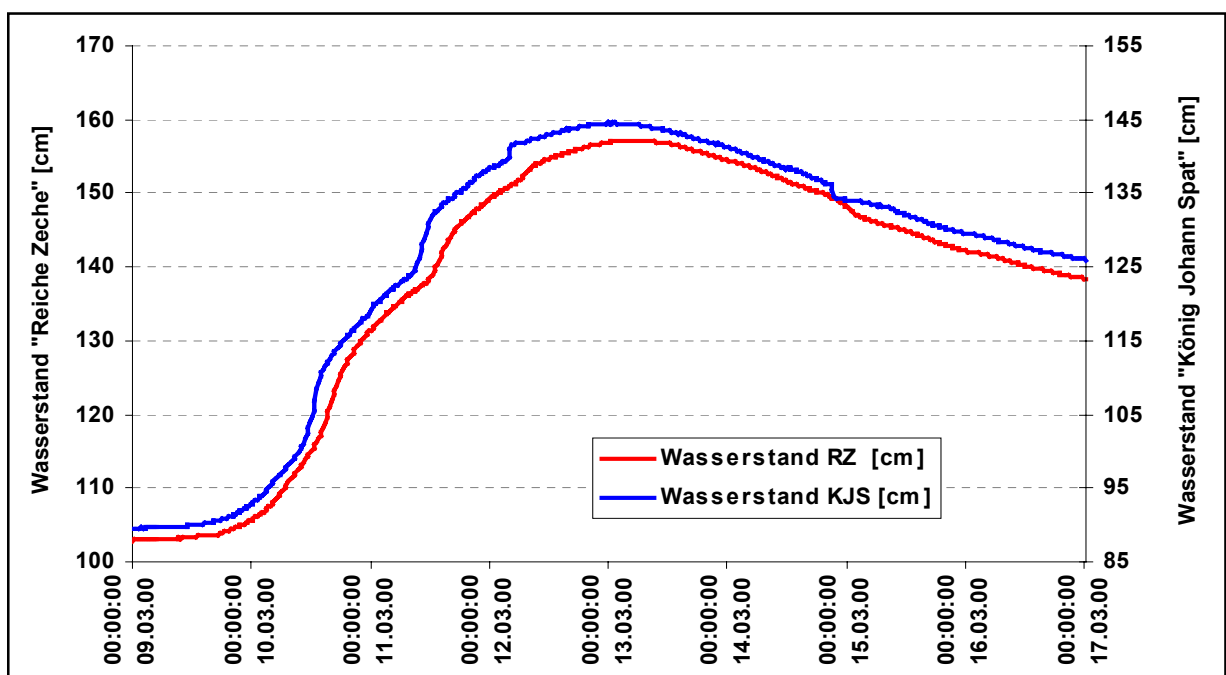


Abb. 13: Entwicklung des Wasserstandes an den beiden Meßstellen im Rothschönberger Stolln während des Hochwassers im Zeitraum 09.03.2000 bis 17.03.2000

Mit dem Fließweg werden die Veränderungen im Wasserstand unschärfer, so daß die Ereignisse, z.B. Sprünge im Anstieg der Kurve nicht mehr eindeutig zugeordnet werden kann. Die geschätzte mittlere Differenz zwischen den beiden Sonden beträgt 3 Stunden, was bei ca. 5 km Fließweg einer Fließgeschwindigkeit von 0,46 m/s entspricht.

Deutlicher zu unterscheiden sind Änderungen in der Leitfähigkeit wie Abbildung 14 zeigt. Es kommt nicht zu einer Unschärfe oder „Peak“- Verbreiterung über den Fließweg, so daß wahrscheinlich die exakteren Fließgeschwindigkeiten aus der Leitfähigkeitskurve ermittelt werden können.

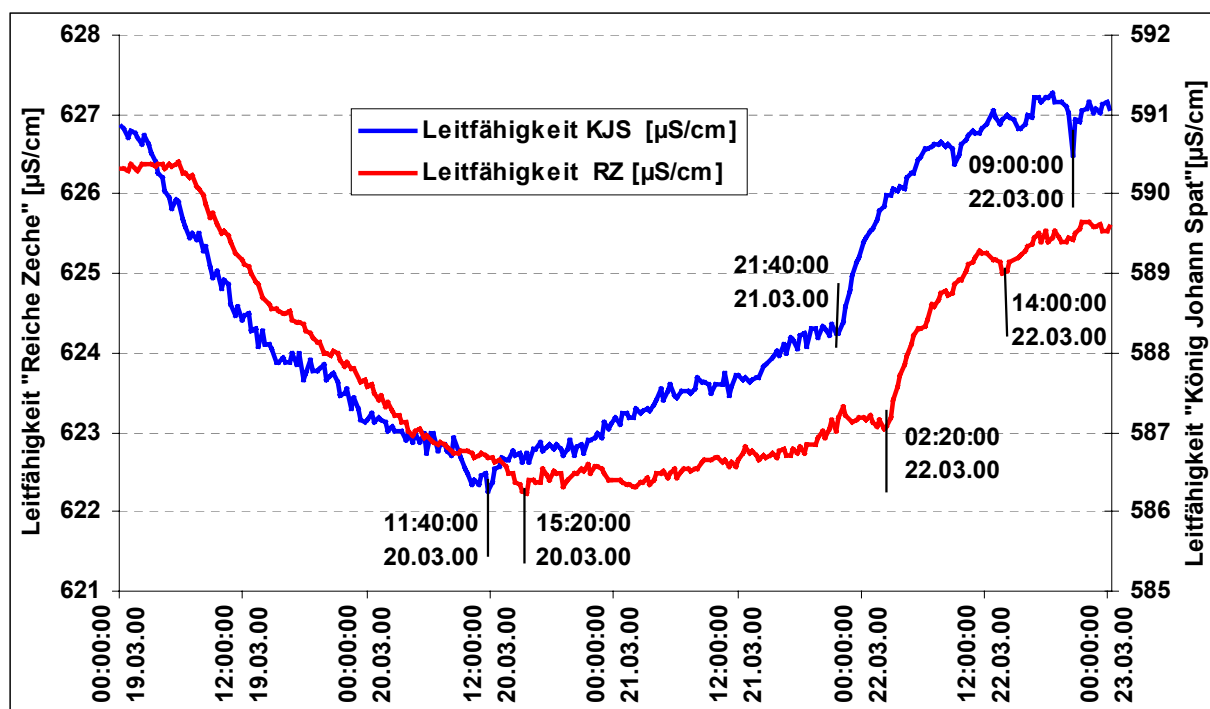


Abb. 14: Leitfähigkeitsentwicklung während der 2. Hochwasserwelle im Zeitraum 19.03.2000 bis 23.03.2000 an den beiden Meßstellen im Rothschnberger Stolln

Da sich die Fließgeschwindigkeit mit der Wassermenge ändert wurden 3 Punkte zu verschiedenen Abflusssituationen verglichen. Es ergaben sich Fließzeiten von 3h 40 min, 4h 40 min und 5h, was entsprechend ca. 0,38, 0,3 und 0,28 m/s bzw. 142, 140 und 136 cm Wasserstand an der Meßstelle „Reiche Zeche“ entspricht. In Niedrigwasserzeiten werden Differenzen von 6 h ermittelt, was 0,23 m/s bzw. 77,5 cm Wasserstand entspricht.

4.2 Ergebnisse des geochemischen Monitorings

4.2.1 Aktuelle Verhältnisse

Die im Zeitraum 05.03.1999 bis 12.04.2000 ermittelten Wasserparameter sowie die Konzentrationen an Wasserinhaltsstoffen im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“ sind in Tabelle 4 als Mittelwerte (arithmetisch und geometrisch) sowie mit den registrierten Minima und Maxima dargestellt.

Allgemeine Wasserparameter					
Parameter	Einheit	Mittelwert	Maximum	Minimum	Geom. Mittel
Abfluß	l/s	363	1564	169	304
pH Original		6,8	7,7	6,3	6,8
pH Labor		7,2	7,9	6,6	7,2
E _H	mV	432	532	373	431
Leitfähigk.	µS/cm	593	719	509	588
O ₂ - Konz.	mg/l	10,4	13,2	9,0	10,3
Temperatur	°C	12,9	13,7	12,1	12,9
Schweb	[mg/l]	2,0	6,6	0,3	1,7
K _{S4,5}	[mmol/l]	1,6	2,0	0,9	1,6
K _{B8,2}	[mmol/l]	0,2	1,2	-0,3	0,2
An- und Kationen					
Cl ⁻	mg/l	34,4	38,7	28,5	34,3
HCO ₃ ⁻	mg/l	96,7	119,0	57,3	95,3
NO ₃ ⁻	mg/l	11,9	28,0	5,8	10,7
NO ₂ ⁻	mg/l	0,9	1,7	0,1	0,3
SO ₄ ²⁻	mg/l	227,7	252,0	185,0	226,9
Ca ²⁺	mg/l	80,0	88,2	64,1	79,8
Mg ²⁺	mg/l	25,7	30,2	20,9	25,7
Na ⁺	mg/l	19,6	20,7	17,8	19,6
K ⁺	mg/l	4,6	5,2	4,3	4,6
Schwermetalle, Aluminium und Arsen - gelöste Konzentration					
Al	µg/l	33	88	14	28
As	µg/l	2,7	4,4	0,9	2,5
Cd	µg/l	22,6	30,0	14,0	22,2
Cu	µg/l	14	49	4	12
Fe	µg/l	77	180	21	69
Mn	µg/l	775	1040	400	754
Ni	µg/l	16	28	11	16
Pb	µg/l	2,9	10	0,5	2,4
Zn	µg/l	3963	5940	2240	3917
Schwermetalle, Aluminium und Arsen - Gesamtkonzentration					
Al	µg/l	89	300	25	79
As	µg/l	40	902	5	12
Cd	µg/l	24,4	54,0	18,9	23,9
Cu	µg/l	22	68	10	19
Fe	µg/l	677	2029	449	641
Mn	µg/l	832	1106	563	821
Ni	µg/l	16	27	9	16
Pb	µg/l	17	42	1	15
Zn	µg/l	4176	5960	3380	4145

Tab 4: Mittelwerte sowie Minima und Maxima der Konzentrationen an Wasserinhaltsstoffen und der Wasserparameter im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“ im Beobachtungszeit-

Die Wässer am Meßpunkt „Reichen Zeche“ werden als calcium- sulfat- hydrogenkarbonatisch bis calcium- sulfatische Wässer eingestuft. In Abbildung 15 sind die Wässer im Piperdiagramm dargestellt, aufgrund dessen diese Einteilung vorgenommen werden kann.

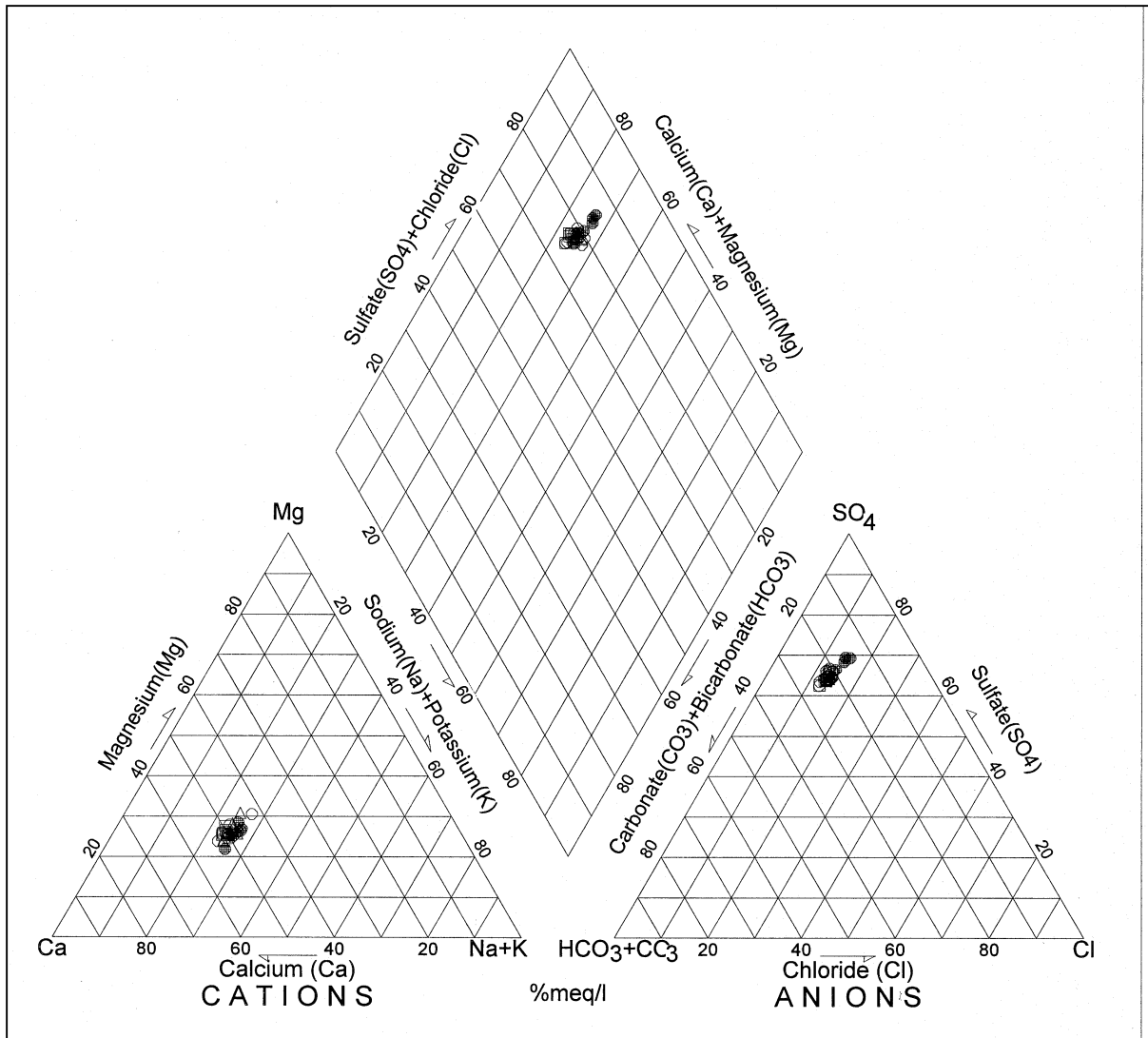


Abb. 15: Piperdiagramm der Wässer des Rothschnberger Stolln im Beobachtungszeitraum

Die Streuung der Werte ist mit ca. 20 % relativ gering. Veränderungen treten vor allem mit der Änderung des Abflusses auf, wie in 4.2.2 gezeigt wird.

Uran und Thallium wurden an 8 Proben gemessen, dabei konnte Tl bei einer Bestimmungsgrenze von 1 µg/l nicht nachgewiesen werden. Die maximal ermittelte Urankonzentration betrug 2 µg/l.

Deutliche Unterschiede im Verhalten der Schwermetalle sowie von Arsen und Aluminium können in ihrem jeweilig gelösten Anteil festgestellt werden. Wie in Tabelle 5 dargestellt ist werden **Al**, **As**, **Fe** und **Pb** sowie untergeordnet auch **Cu** vorrangig partikulär transportiert, d.h. in einer festen Form mit einem Teilchendurchmesser > 0,45 µm.

Element	% gelöst
Al	36
As	26
Cd	94
Cu	67
Fe	12
Mn	93
Ni	100
Pb	18
Zn	96

Tab 5: Gelöster Anteil an Schwermetallen, Al und As im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“

Diese Partikel bestehen zum größten Teil aus hydratisierten Eisenoxiden, welche vor allem **As** und **Pb** sehr fest an sich binden. Die Bindung kann dabei durch Oberflächenreaktionen oder durch Gittereinbau (Kopräzipitation) hervorgerufen werden.

Hydratisierte Aluminiumoxide kommen vermutlich nur untergeordnet vor und binden wahrscheinlich das Kupfer. Die Elemente **Cd**, **Mn**, **Ni** und **Zn** werden aufgrund ihrer geringen Neigung zur Komplexbildung zu über 90 % gelöst transportiert. Eine adsorptive Bindung an die vorhandenen Partikel ist nicht zu erwarten, da die Oberflächenladung der hydratisierten Eisenoxide die Adsorption der positiv zweiwertigen Elemente verhindert.

Um konkrete Aussagen zum Austrag an Schwermetallen, Aluminium und Arsen machen zu können wurden aus den Abflußmengen und den Konzentrationen Frachten errechnet. Da die Schwankungen des Abflusses recht groß sind wurde nur auf Gramm/Stunde gerechnet und die Spannweiten für den maximalen (1547 l/s) und den minimalen (163 l/s) Abfluß in Tabelle 6 angegeben. Die Unterschiede zwischen den Frachten bei Hochwasser und den mittleren Frachten (geometrisch) betragen z.T. das 20-fache. Das geometrische Mittel gibt die mittlere Fracht realistischer wieder, da die Abflußmenge durch die Berechnung mit gewichtet wird. Eine Beurteilung der Ergebnisse der Frachtberechnung wird in 4.3 durchgeführt.

Frachten gelöst [g/h]				
Element	Mittelwert	Maximum	Minimum	Geo-Mittel
Cl	43.640	175.093	22.703	37.446
HCO ₃	112.613	329.919	65.246	104.257
NO ₃	21.358	157.640	3.664	11.949
SO ₄	284.859	1.126.002	151.734	247.750
Ca	101.498	416.621	51.104	87.266
Mg	32.917	135.120	15.142	28.082
Na	24.905	100.777	12.387	21.282
K	5.968	26.968	2.648	4.909
Frachten gelöst [g/h]				
Element	Mittelwert	Maximum	Minimum	Geo-Mittel
Al	56	388	9,1	32
As	3,4	16	0,8	2,5
Cd	32	169	8,6	24
Cu	29	276	2,4	13
Fe	107	428	13	75
Mn	1061	5230	243	824
Ni	22	124	7	17
Pb	4,2	17	0,3	2,7
Zn	5345	23989	2137	4284
Frachten gesamt [g/h]				
Element	Mittelwert	Maximum	Minimum	Geo-Mittel
Al	164	1689	15	86
As	19	175	4,9	11
Cd	33	163	13	26
Cu	41	383	6,6	21
Fe	1147	11423	298	701
Mn	1142	6227	396	898
Ni	21	96	7,9	17
Pb	29	208	5,8	18
Zn	5616	24817	2312	4533

Tab. 6: Frachten an Wasserinhaltsstoffen im Stollnwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“ während des Beobachtungszeitraumes

4.2.2 Veränderungen mit dem Fließweg

Informationen über die Veränderungen der Elementkonzentrationen mit dem Fließweg geben wichtige Hinweise auf mögliche Fixierungsprozesse, die im Falle einer zukünftigen Nutzung positiv oder negativ verändert werden könnten. Zur Interpretation der Daten soll zuvor kurz ein Überblick über die wesentlichen Zuläufe zum Rothschnberger Stolln sowie, soweit möglich, deren Charakteristik vorgestellt werden.

Dem Rothschnberger Stolln werden an 4 Stellen größere Wassermengen zugeführt. Am Beginn des Stolln am König Johann Spat entwässert das Brand Erbsdorfer Grubenrevier, an der Reichen Zeche läuft der geflutete Bereich des Freiburger Grubenrevieres in den Stolln über. In der Nähe des 7. Lichtloches des Stolln übergeben die Reviere Halsbrücke und Großschirma ihre Wässer in den Stolln. Die Schüttungsmengen betragen im Verhältnis Brand : Freiberg : Halsbrücke : Großschirma etwa 63 : 14 : 12 : 11. Die mittleren Konzentrationen in den Wässern sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tab 7: Mittlere gelöste Konzentrationen und Wasserparameter in den Hauptzuläufen zum Rothschnberger Stolln (nach DEGNER, 1996 und BAACKE & DEGNER, 2000)

Parameter	Einheit	Brand E.-dorf	Freiberg	Halsbrücke	Großschirma
Abfluss	l/s	300	65	58	54
pH-Wert Org.		6,8	6,07	6,77	7,0
E_H-Wert	mV	527	351	352	332
Leitf	µS/cm	581	2667	986	863
O₂ Konz.	mg/l	9	0,5	8,5	9,4
Temperatur	°C	13,1	18,4	14,1	13,8
Schweb	mg/l	1,4	5,7	1,5	1,1
Cl⁻	mg/l	34,0	210	75	63
HCO₃⁻	mg/l	106	101	98	87
NO₃⁻	mg/l	9,1	3,6	5	6,4
SO₄²⁻	mg/l	235	1200	224	235
Ca²⁺	mg/l	82	290	91	89
Mg²⁺	mg/l	25	19	17	19
Na⁺	mg/l	19	244	48	39
K⁺	mg/l	4,5	16	7,3	7,2
Al	µg/l	43	500	1	7
As	µg/l	7	3	64	44
Cd	µg/l	22	70	23	14
Cu	µg/l	14	41	136	48
Fe	µg/l	90	1200	1778	1867
Mn	µg/l	768	11100	2543	2323
Ni	µg/l	16	58	n.b.	n.b.
Pb	µg/l	6	24	52	46
Zn	µg/l	3737	14400	1680	3248

Das Wasser des Freiburger Reviers ist am höchsten mineralisiert, das Wasser aus Brand Erbsdorf am geringsten. Durch die Dominanz des Abflusses aus dem Brander Revier wird für viele Elemente von dort die höchste Fracht geliefert. In Tabelle 8 sind die Frachten der einzelnen Reviere einander gegenübergestellt sowie der Anteil des Brander Reviers an der sich ergebenden Gesamtfracht errechnet.

Gelöste Frachten	Einheit	Brand E.-dorf	Freiberg	Halsbrücke	Großschirma	Anteil Brand
Cl^-	g/h	36.756	49.140	15.660	12.247	32%
HCO_3^-	g/h	114.696	23.634	20.462	16.913	65%
NO_3^-	g/h	9.868	842	1.044	1.244	76%
SO_4^{2-}	g/h	253.800	280.800	46.771	45.684	40%
Ca^{2+}	g/h	88.992	67.860	19.001	17.302	46%
Mg^{2+}	g/h	27.468	4.446	3.550	3.694	70%
Na^+	g/h	20.916	57.096	10.022	7.582	22%
K^+	g/h	4.831	3.744	1.524	1.400	42%
Al	g/h	47	117	0,2	1,4	28%
As	g/h	7,5	0,7	13	8,6	25%
Cd	g/h	24	16	4,8	2,7	50%
Cu	g/h	15	10	28	9,3	24%
Fe	g/h	97	281	371	363	9%
Mn	g/h	829	2.597	531	452	19%
Ni	g/h	17	14			55%
Pb	g/h	6,3	5,6	11	8,9	20%
Zn	g/h	4.036	3.370	351	631	48%

Tab 8: Mittlere gelöste Frachten der 4 Hauptzuläufe zum Rothschnberger Stolln im Vergleich sowie der Anteil des Brander Reviers an der Gesamtfracht

Trotz der geringen Schüttungsmengen übergibt das Freiburger Revier die höchsten Frachten an **Mn**, **Al**, **Fe** sowie an SO_4^{2-} , **Cl** und Na^+ in den Stolln. Auffällig sind die hohen **As**- Frachten der Reviere Halsbrücke und Großschirma. Da **Ni** in den Wässern dieser Reviere nicht bestimmt wurde kann der Anteil des Brander Reviers an der Gesamtfracht für dieses Element nicht als real angesehen werden.

Vor diesem Hintergrund muß Tabelle 8 betrachtet werden. In ihr sind die mittleren Konzentrationen an den drei Meßpunkten im Rothschönberger Stolln dargestellt.

Allgemeine Wasserparameter an den Meßstellenen				
Parameter	Einheit	"König Johann Spat"	"Reiche Zeche"	"Mundloch"
Abfluß	l/s	n.a.	304	507
pH Org.		6,8	6,8	7
pH Labor		7,0	7,2	7
EH-Wert	mV	527	431	492
Leitf	µS/cm	581	588	800
O ₂ Konz.	mg/l	9,1	10,3	10
Temperatur	°C	13,1	12,9	14
Schweb	mg/l	1,4	1,7	5
K _{S 4,5}	mmol/l	1,8	1,6	2
K _{B 8,2}	mmol/l	0,02	0,2	0
An- und Kationen				
Cl ⁻	mg/l	34,0	34,3	53
HCO ₃ ⁻	mg/l	106	95,3	103
NO ₃ ⁻	mg/l	9,1	10,7	10
NO ₂ ⁻	mg/l	n.n.	0,3	0,5
SO ₄ ²⁻	mg/l	235	226,9	313
Ca ²⁺	mg/l	82,4	79,8	112
Mg ²⁺	mg/l	25,4	25,7	29
Na ⁺	mg/l	19,4	19,6	39
K ⁺	mg/l	4,5	4,6	6
Schwermetalle, Aluminium und Arsen - gelöste Konzentration				
Al	µg/l	43	28	42
As	µg/l	7	2,5	1,5
Cd	µg/l	22	22,2	30
Cu	µg/l	14	12	16
Fe	µg/l	90	69	17
Mn	µg/l	768	754	2015
Ni	µg/l	16	16	43
Pb	µg/l	6	2,4	6
Zn	µg/l	3737	3917	4735
Schwermetalle, Aluminium und Arsen - Gesamtkonzentration				
Al	µg/l	89	79	291
As	µg/l	8	12	17
Cd	µg/l	24	23,9	31
Cu	µg/l	17	19	40
Fe	µg/l	356	641	1217
Mn	µg/l	853	821	2180
Ni	µg/l	15	16	44
Pb	µg/l	16	15	40
Zn	µg/l	3988	4145	4852

Tab. 9: Vergleich der mittleren Konzentrationen (geometrisches Mittel) im Wasser an den drei Meßpunkten im Rothschönberger Stolln im Beobachtungszeitraum

Bis zum Meßpunkt Reiche Zeche werden kaum Veränderungen der Konzentration an Wasserinhaltsstoffen registriert, lediglich die Gesamt- **Fe**- Konzentration und –**Zn**- Konzentration ist gestiegen. Dies ist wahrscheinlich auf den Zulauf von Wasser an der Roten Grube zurückzuführen.

Durch die Zuläufe der anderen Reviere steigen bis zum Mundloch die Gesamtkonzentrationen für **Cu** und **Fe** auf das Doppelte, für **Pb**, **Ni** und **Mn** auf das Dreifache. Auf das Vierfache der Konzentration am Meßpunkt „Reiche Zeche“ steigt die **Al**- Konzentration am Mundloch. Der geringe Anstieg der **Zn**- Konzentration kann durch die Verdünnung erklärt werden, trotz der hohen gelösten Konzentration im Wasser aus dem Freiburger Revier wird eine theoretische Mischkonzentration aus allen 4 Wässern von 4884 µg/l im Mittel errechnet, welche nur um ca. 150 µg/l über der analytisch ermittelten Konzentration liegt. Für die gelösten Elementkonzentrationen ist die Differenz zwischen der theoretischen Mischkonzentration und der analytischen gelösten Konzentration in Tabelle 10 dargestellt. Für die Gesamtkonzentration kann diese Rechnung leider nicht durchgeführt werden da von den Zuläufen Halsbrücke und Großschirma keine Werte dafür vorliegen.

Element	theoretische Mischkonzentration	Analytische Konzentration	Differenz Analyt. berechn.
Al	96	42	-54
As	18	2	-16
Cd	28	30	2
Cu	36	16	-20
Fe	647	17	-630
Mn	2568	2015	-553
Ni	18	43	25
Pb	18	6	-12
Zn	4884	4735	-149

Tab. 10: Analytisch ermittelte gelöste Konzentration und theoretische Mischkonzentration im Wasser am Mundloch des Rothschnöberger Stolln sowie ihre Differenzen

Der geringe Anstieg der **Zn**- Konzentration kann durch die Verdünnung erklärt werden, trotz der hohen gelösten Konzentration im Wasser aus dem Freiburger Revier wird eine theoretische Mischkonzentration aus allen 4 Wässern von 4884 µg/l im Mittel errechnet, welche nur um ca. 150 µg/l über der analytisch ermittelten Konzentration liegt. Für die gelösten Elementkonzentrationen ist die Differenz zwischen der theoretischen Mischkonzentration und der analytischen gelösten Konzentration in Tabelle 10 dargestellt. Für die Gesamtkonzentration kann diese Rechnung leider nicht durchgeführt werden da von den Zuläufen Halsbrücke und Großschirma keine Werte dafür vorliegen.

Für die Elemente die vorrangig partikulär transportiert werden zeigen sich bedeutenden Differenzen zwischen den analytischen und den theoretischen Konzentrationen, da durch die bereits erwähnten Fixierungsprozesse sich die Konzentrationen im Wasser über die Verdünnung hinaus verändern. Der Anteil der gelösten Konzentration ändert sich mit dem Fließweg für das jeweilige Element in der in Tabelle 11 gezeigten Weise. Somit erfolgte im Stolln eine Reduzierung des gelösten Austrages in die Vorflut durch die Überführung von **Fe**, **Al**, **As** und **Cu** in die partikulär schwebende Phase und die Demobilisierung im Sediment bei Sedimentation.

Element	% gelöst König Johann Spat	% gelöst Reiche Zeche	% gelöst Mundloch
Al	51	36	15
As	78	26	9
Cd	92	94	96
Cu	78	67	42
Fe	25	12	2
Mn	91	93	93
Ni	100	100	97
Pb	36	18	36
Zn	94	96	98

Tab. 11: Mittlerer Anteil der gelösten Konzentration für die Schwermetalle, Aluminium und Arsen an der Gesamtkonzentration in den Wässern der 3 Meßpunkte im Beobachtungszeitraum

Somit erfolgte im Stolln eine Reduzierung des gelösten Austrages in die Vorflut durch die Überführung von **Fe**, **Al**, **As** und **Cu** in die partikulär schwebende Phase und die Demobilisierung im Sediment bei Sedimentation.

4.2.3 Veränderungen mit dem Durchfluß

Für die Prognose möglicher Veränderungen im Austrag aus dem Stolln muß nach einem Zusammenhang der Konzentration an Wasserinhaltsstoffen mit dem Abfluß gesucht werden. Dieser Zusammenhang wurde bereits unter 4.1.2 für die Leitfähigkeit nachgewiesen und soll für die ausgewählte repräsentative Elemente weiter aufgeschlüsselt werden.

Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen dem pH- Wert sowie ausgewählten Anionen und dem Durchfluß.

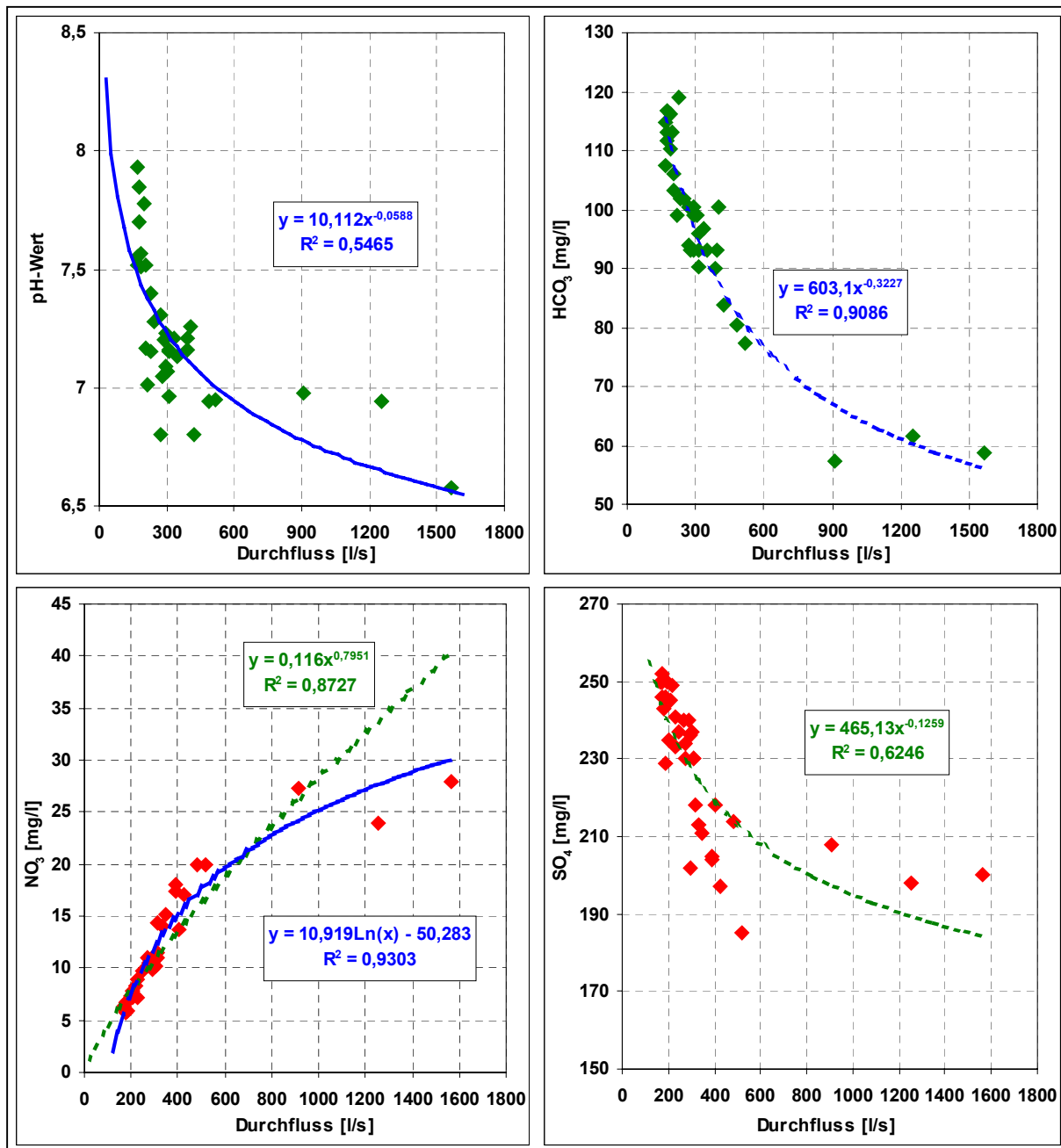


Abb. 16: Zusammenhang zwischen pH- Wert, HCO_3^- -, SO_4^{2-} -, und NO_3^- -Konzentration und dem Durchfluß am Meßpunkt „Reiche Zeche“

Zwischen der Konzentration an NO_3^- und dem Durchfluß sowie HCO_3^- und dem Durchfluß bestehen sehr gute Korrelationen, wie in Abbildung 15 gezeigt. NO_3^- nimmt mit dem Durchfluß

zu. Ursache ist wahrscheinlich eine stärkere Auswaschung von Nitrat aus den durchsickerten Böden bzw. erhöhte Einträge von größeren Mengen sauren Niederschlags in Form von Schmelzwasser. Durch die Verringerung des pH- Wertes bei höheren Abflüssen, wahrscheinlich durch die Aufnahme von sauren Grubenwässern aus sonst nicht am Strömungsgeschehen teilnehmenden Grubenbauen, wird auch die HCO_3^- -Konzentration verringert.

Die Abhängigkeit der SO_4^{2-} - Konzentration scheint sich in zwei Bereiche zu gliedern, die durch einen Qualitätssprung voneinander getrennt sind. Bis ca. 600 l/s kann eine fast lineare Abnahme der **Sulfat**konzentration mit höherem Durchfluß festgestellt werden. Bei höheren Abflüssen steigen die Konzentrationen wieder an. Ursache kann nur eine andere **Sulfat**quelle sein, welche bis 600 l/s Abfluß nicht wirksam wird. Da aufgrund der Anstiegskurve des Wasserstandes bei Hochwasser vermutet wird, das Grubenbaue geflutet werden, könnte hier eine mögliche Ursache für die Erhöhung der **Sulfat**konzentration durch die Lösung von Sekundärmineralen oder durch hochmineralisierte Standwässer liegen.

Ähnliche Aussagen müssen für die Abhängigkeit der Schwermetall- Gesamtkonzentration getroffen werden. Abbildung 17 (Seite 35) zeigt die ermittelten Zusammenhänge zwischen ausgewählten Schwermetallen, Aluminium und Arsen.

Während für **Al** und **Cu** relativ gute Korrelationen zwischen Gesamtkonzentration und Durchfluß gefunden werden können, scheint **Zn** nicht von Durchfluß abhängig zu sein. Es werden eine sehr starke Konzentrationsunterschiede bei gleichen Abflußmengen (Hysterese) festgestellt, die untergeordnet auch für **Cd** registriert wird. Bei Anstieg des Wassers wird eine deutlichen Konzentrationserhöhungen registriert, beim Absinken des Wasserstandes werden durch die Verdünnung oder die Erschöpfung der **Zn** und **Cd**- Quelle deutlich niedrigere Konzentrationen gemessen. Generell wird mit dem Durchfluß die Konzentration an Schwermetallen, Aluminium und Arsen erhöht, die Zusammenhänge können mit unterschiedlicher Aussagekraft über logarithmische Funktionen beschrieben werden.

Die starken Konzentrationserhöhungen für **Fe** und **As** bei hohen Abflußwerten sind auf den hohen partikulären Transport dieser Elemente zurückzuführen, wobei der Einfluß von frischgefälltem und von der Stollnsohle bzw. aus dem Stauraum resuspendierten Partikeln nicht getrennt werden kann. Die hohen Gesamtkonzentrationen am „König Johann Spat“ während des Hochwassers deuten allerdings auf einen Austrag von resuspendiertem Sediment aus dem Stauraum hin. Leider kann keine Aussage zum gelösten Eisengehalt in der Probe getroffen werden, da bei der Probenahme ein Fehler bei der Filtration auftrat.

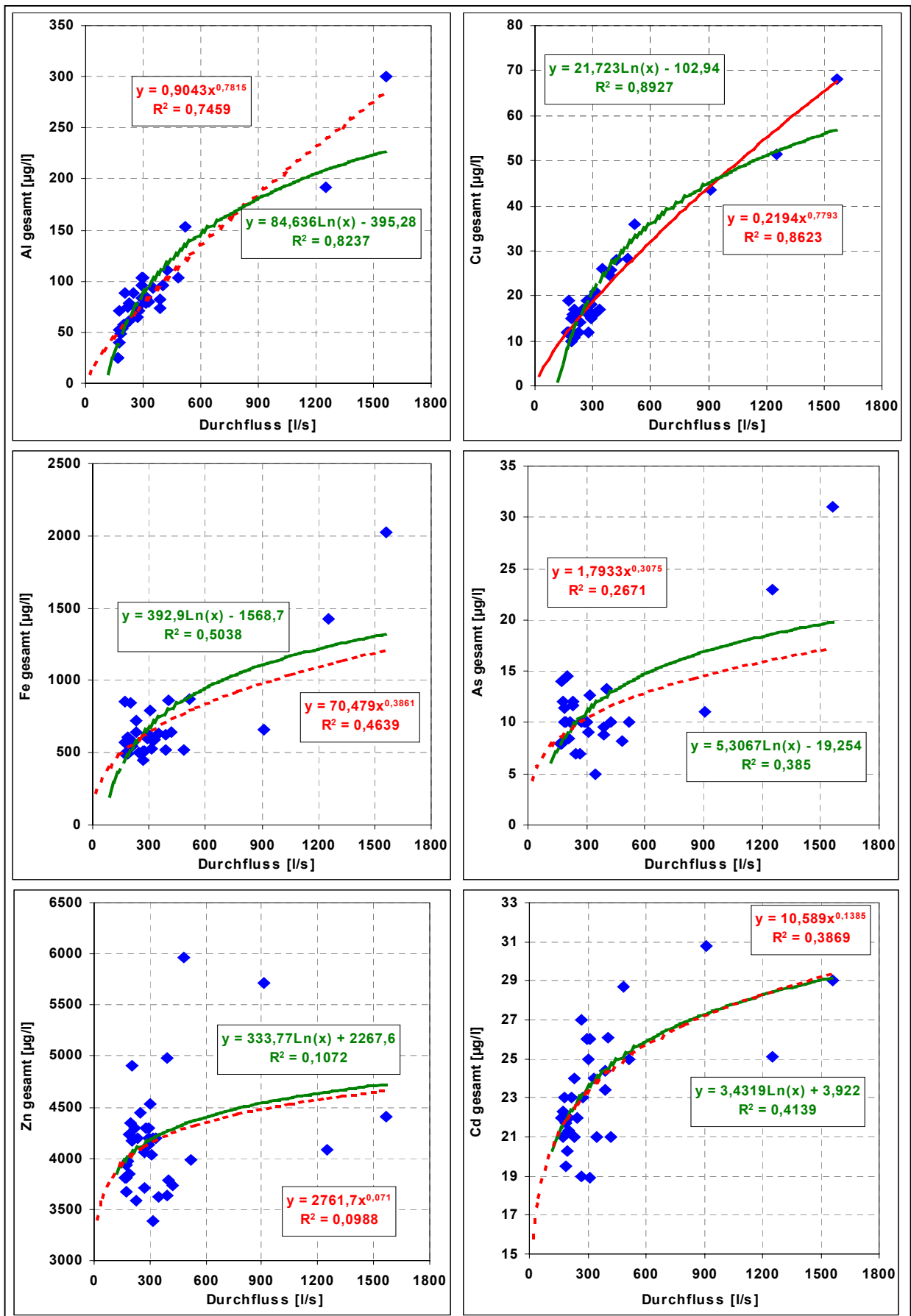


Abb 17: Zusammenhang zwischen den Gesamtkonzentrationen an Al, Cu, Fe, As, Zn und Cd und dem Wasserstand im Stollwasser am Meßpunkt „Reiche Zeche“

4.3 Ergebnisse des Stauversuchs

Der unterirdische Versuchsstau wurde mit Unterbrechungen insgesamt über 3 Monate betrieben, die geplante Versuchsdauer von 6 Monaten konnte nicht eingehalten werden, da sich die Installationsarbeiten umfangreicher als geplant waren. Als problematisch hat sich die schwankende Wasserqualität des in den Stau geleiteten Wassers herausgestellt, da die Veränderungen größer waren als die zu erwartenden Veränderungen im Stauraum. In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der 3 Probenahmen des zulaufenden Wassers dargestellt.

Tab. 12: Variation der Wasserqualität des dem Stauraum zulaufenden Wassers während des Versuches zur Ermittlung der Veränderungen der Wasserqualität in gefluteten Grubenbauen.

Parameter	Einheit	26.08.99	14.09.99	25.01.00
pH-Wert		3,31	3,37	3,39
EH-Wert		758	756	748
Leitfähigkeit	µS/cm	1199	1244	1632
O₂- Sättigung	%	98	87,6	94
O₂- Konzentration	mg/l	10,4	9,9	9,9
Temperatur	°C	11,6	11,6	12,2
Schwebmenge	mg/l	6,1	7,1	9,7
Ionen				
Cl⁻	mg/l	24,7	25,3	25,7
NO₃⁻	mg/l	6,25	4,47	7,37
SO₄²⁻	mg/l	900,9	935,6	874
Ca²⁺	mg/l	144	179	150
Mg²⁺	mg/l	63,2	71,1	67,9
Na⁺	mg/l	15,6	15,7	15,5
K⁺	mg/l	4,78	3,78	3,47
Schwermetalle, Aluminium und Arsen gelöst				
Al	µg/l	19.500	18.300	15.800
As	µg/l	196	182	103
Cd	µg/l	492	500	429
Cu	µg/l	841	803	777
Fe	µg/l	17.900	16.000	15.000
Mn	µg/l	25.300	24.300	24.800
Ni	µg/l	164	163	159
Pb	µg/l	138	117	102
Zn	µg/l	73.100	70.000	61.700
Schwermetalle, Aluminium und Arsen gesamt				
Al	µg/l	18.300	18.800	15.700
As	µg/l	266	262	203
Cd	µg/l	496	519	434
Cu	µg/l	857	807	767
Fe	µg/l	18.400	19.500	17.700
Mn	µg/l	24.100	25.300	23.800
Ni	µg/l	165	169	190
Pb	µg/l	132	130	110
Zn	µg/l	68.400	72.500	60.000

Durch die niedrigen pH- Werte enthält das Wasser kein HCO₃⁻ und die im Stauraum lagernden Sedimente und Sekundärminerale werden theoretisch einem starken Lösungsdruck ausgesetzt. In den Zuleitungen setzte sich schwertmannitisches Sediment ab, ebenso im Stauraum, was durch eine Befahrung festgestellt wurde.

Die Sedimente im Stolln bilden eine ca. 30 cm dicke Schicht an der Stauraumsohle, die sich wie folgt zusammensetzt:

- obere Schicht, weißlich, ca. 1 cm mächtig: Al- Phasen
- mittlere Schicht rötlich, ca. 3 cm mächtig: Ferrihydrit, Goethit, Quarz, und Gips
- untere Schicht schwarz ca. 25 cm mächtig: Quarz, Gips, nicht identifizierbare Fe- und Mn- Verbindungen

An der seitlichen Stauraumwand wurden ca. 1 cm starke feste rötliche Absätze als Goethit vermischt mit Gipsausblühungen identifiziert. Ein untergeordnet vorhandener schwarzer grusiger Absatz besteht aus einem Birnessit- artigen Phasengemenge.

Die chemische Zusammensetzung (Tabelle 13) spiegelt die Phasen wieder. Die oberste Schicht weist die höchsten *Al*, und *Cu*- Konzentrationen auf, sowie hohe *S*- Gehalte. In der untersten Schicht sind vor allem die *C*- Konzentrationen sowie die hohen *Cd*-, *Ni*-, *Pb*- und *Zn*- Gehalte auffällig. Das stützt die Theorie, das *Cd* und *Zn* vor allem mit *Mn* fixiert werden, das *Cu* hingegen mehr an *Al*- Phasen

Schicht	Oben	Mitte	Unten
Farbe	weiß	rötlich	braun schwarz
Al [mg/kg]	172.000	34.400	35.200
As [mg/kg]	516	13.600	3.360
Cd [mg/kg]	16	21	105
Cu [mg/kg]	3.150	953	1.000
Fe [mg/kg]	52.200	295.000	157.000
Mn [mg/kg]	3.050	10.000	48.400
Ni [mg/kg]	50	50	302
Pb [mg/kg]	1.320	4.530	5.350
Zn [mg/kg]	13.800	7.570	40.900
C [%]	0,596	1,56	4,11
N [%]	< 0,05	0,7	0,8
S [%]	2,36	2,08	1,67

Tab. 13: Chemische Zusammensetzung der Sedimentschichten im Stauraum, Konzentrationen in mg/kg bzw. in % Trockenmasse

gebunden wird. In der mittleren *Fe*- hydroxidisch betonten Schicht wird vor allem *As* und *Pb* fixiert. Die Art der Bindung kann nicht exakt beschrieben werden, möglich sind vor allem der Einbau in die hydroxidische Struktur oder eine adsorptive Bindung an der Oberfläche der Hydroxide. Beide Bindungsarten sind als stabil unter den Lagerungsbedingungen anzusehen und stellen nur bei Veränderungen der Milieubedingungen zu anoxischen Verhältnissen eine potentielle Schadstoffquelle dar.

Als potentiell lösungsgefährdet muß vor allem die oberste Schicht gelten, da *Al*- Verbindungen bei pH- Werten kleiner 4 verstärkt in Lösung gehen. Bei der Befahrung des Stauraumes nach Versuchsende wurde diese Schicht nicht mehr vorgefunden. Ein weiteres lösungsgefährdetes Mineral ist Gips, der z.T. in Kristallnadeln am Stoß angetroffen wird.

Der Anstau vollzog sich relativ langsam, da vermutlich über Klüfte und über die Stauwände Wasserverluste eintraten. Diese verringerten sich mit dem Zusetzen der Wasserwegsamkeiten durch die ausfallenden Eisenhydroxidflocken. Deutlich beobachtbar wurde dieser Mechanismus an der vorderen Stauwand, wie in Abbildung 18 gezeigt wird.



Abb. 18: Ansicht der vorderen Stauwand im Verlauf des Stauversuches vom 26.7.1999 bis zum 25.1.2000

Die ursprünglich rötlichen Absätze wurden in zunehmenden Maße durch weiße ersetzt. Diese sind wahrscheinlich karbonatischer Zusammensetzung, und bilden sich durch das Absetzen von aus dem Mörtel gelöstem Kalk. Undichtigkeiten in der Staumauer wurden nach ca. 1 Woche Anstau nicht mehr beobachtet. Auch die ermittelte Abflußmenge war nach einer Woche konstant.

Am 24.10 wurde nach einem Monat Staubetrieb die Zufuhr unterbrochen um mögliche Veränderungen des geochemischen Milieus in Stillstandszonen zu beobachten. Nach einer Woche war der Stau bereits halb entleert, so daß dazu keine Aussagen getroffen werden konnten. Der Stau

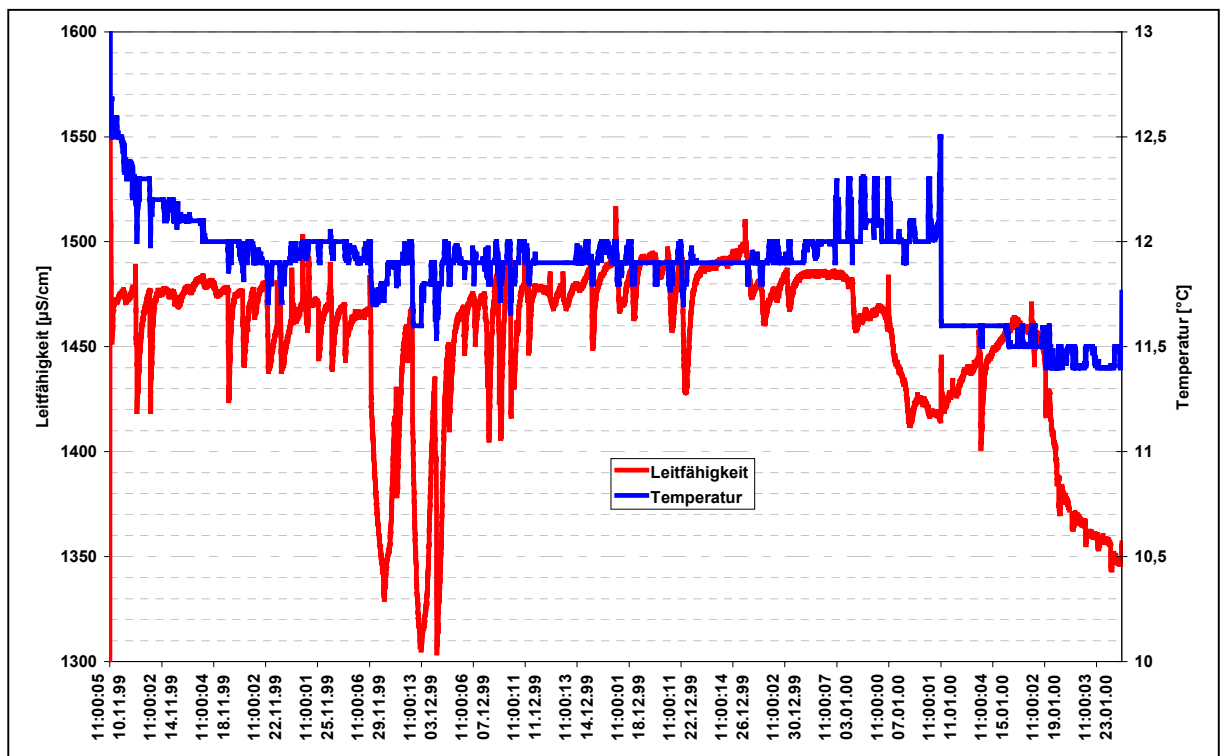


Abb. 19: Verlauf der Leitfähigkeit und der Temperaturmessung im Auslaufwasser der untertägigen Stauversuchs

wurde abgelassen und ca. einen Monat die Sedimente wieder der Grubenluft ausgesetzt. Am 12.11.1999 erfolgte erneut die Flutung. Diesmal erfolgte bereits nach 5 Stunden der Überlauf. Am 25.1.2000 wurde der Stau erneut abgelassen und die Entwicklung der Trübung des auslaufenden Wassers visuell registriert.

Im Ablauf des Staus wurden Leitfähigkeit und Temperatur automatisch aller 20 Minuten registriert. Dabei zeigten sich große Leitfähigkeitsschwankungen, deren Ursache nicht im Stau zu suchen ist, aber nicht weiter erklärt werden kann. Das zulaufende Wasser ist ein Mischwasser aus auf oberen Sohlen gefaßten Tropf und Fließwässern, deren Gehalte mit der durchsetzenden Wassermenge schwanken und deren Anteil an der Mischung nicht bekannt sind und sich ändern können. Abbildung 19 (Seite 38) zeigt die Ergebnisse der Leitfähigkeiten und Temperaturmessung während der 2. Anstauphase.

Im Verlauf des Stauversuches konnten keine Veränderungen des geochemischen Milieus zwischen einlaufenden und auslaufenden Wasser festgestellt werden. In Abbildung 20 sind die Entwicklung des pH- Wertes und des E_H - Wertes im ein- und auslaufenden Wasser dargestellt.

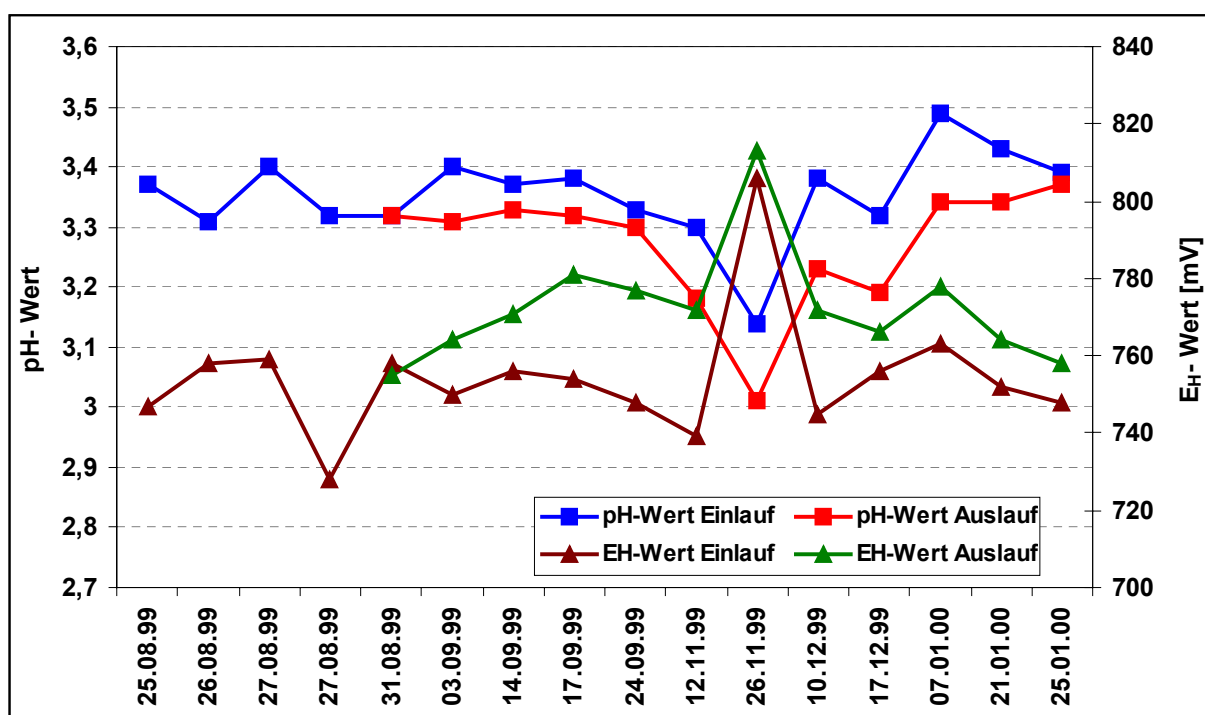


Abb. 20: Entwicklung des pH- Wertes und des E_H - Wertes in dem den Stauraum entströmenden Wasser während des Stauversuches.

Die Verweilzeiten im Stau betragen ca.14 Stunden bei einer zuströmenden Menge von 60 l/min. Innerhalb dieser Zeit wird eine Verringerung de pH- Wertes um 0,1 Einheiten gemessen, das Redoxpotential ist im auslaufenden Wasser höher als im zufließenden. Eine Sauerstoffzehrung konnte nicht festgestellt werden. Eine Temperaturerhöhung um ca. 0,5 °C wurde festgestellt, diese ist aber auf die Erwärmung durch das ca. 19 °C warme Wasser aus dem Schacht der Reichen Zeche, in welchem das Auslaufrohr liegt, zurückzuführen.

Während des Versuchs wurden die auslaufenden Wässer im Wochenabstand beprobt, um die vermutete Lösung vor allem der weißlichen obersten Schicht festzustellen. Durch die hohen

Konzentrationen im zulaufenden Wasser und dessen starke Schwankung in der Zusammensetzung wird die Bewertung erschwert.

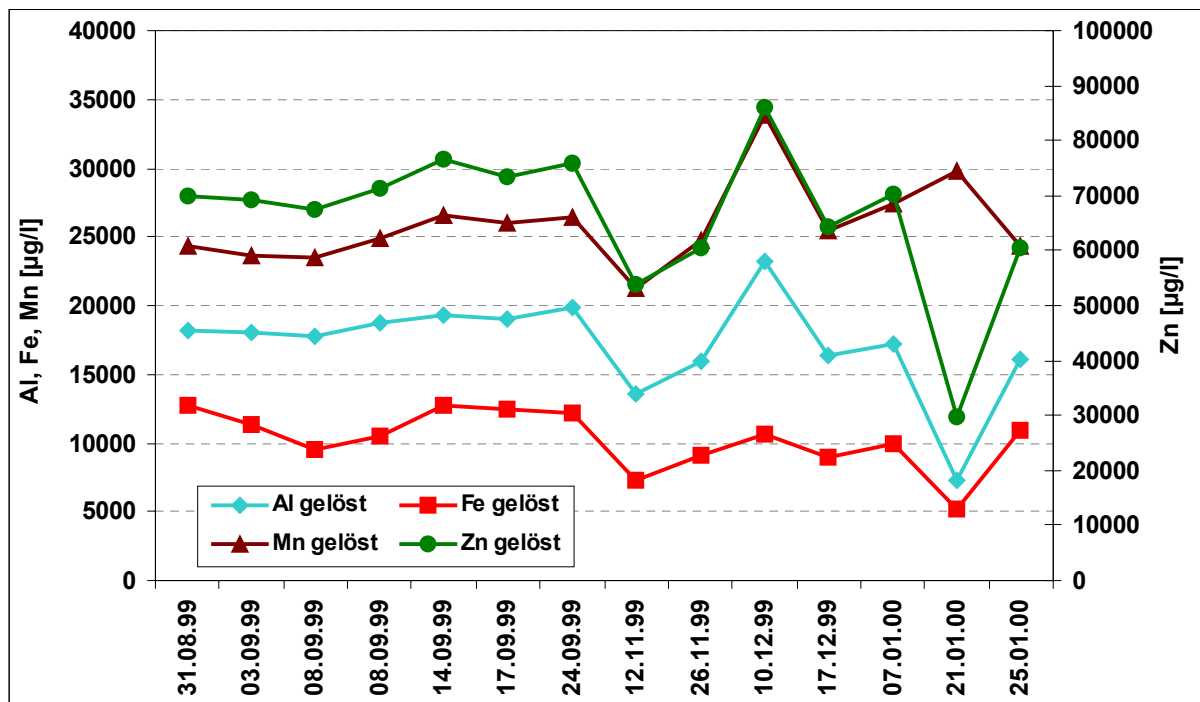


Abb. 21: Entwicklung der gelösten Konzentrationen an Al, Fe, Mn und Zn im auslaufenden Wasser des Stauversuches

Nach dem Versuchsende wurde visuell das Fehlen der weißlichen Schicht beobachtet, in den Konzentrationen konnte, wie in Abbildung 21 gezeigt, keine eindeutige Zunahme der gelösten *Al*-Konzentration festgestellt werden. In Tabelle 14 sind die geometrischen Mittelwerte der 3 Messungen des Einlaufwassers und der 14 Messungen des Auslaufwassers gegenübergestellt.

Parameter	Einheit	Einlauf	Auslauf	Parameter	Einheit	Einlauf	Auslauf
pH-Wert		3,4	3,3	Cl	mg/l	25,2	26,6
EH-Wert		754	772	NO ₃	mg/l	5,9	5,8
Leitfähigkeit	µS/cm	1345	1548	SO ₄	mg/l	903,1	936,5
O ₂ - Sättigung	%	96	85	Ca	mg/l	157,0	156,8
O ₂ - Konzentration	mg/l	10,1	8,9	Mg	mg/l	67,3	72,2
Temperatur	°C	11,8	12,3	Na	mg/l	15,6	15,9
Schwebmenge	mg/l	7,5	18,6	K	mg/l	4,0	4,0
Schwermetalle, Aluminium, Arsen gelöst				Schwermetalle, Aluminium, Arsen gesamt			
Al	µg/l	17.798	16.695	Al	µg/l	17.546	17.269
As	µg/l	154	35	As	µg/l	242	241
Cd	µg/l	473	484	Cd	µg/l	482	479
Cu	µg/l	807	767	Cu	µg/l	809	778
Fe	µg/l	16.256	9.977	Fe	µg/l	18.519	18.194
Mn	µg/l	24.797	25.730	Mn	µg/l	24.391	25.010
Ni	µg/l	162	178	Ni	µg/l	174	186
Pb	µg/l	118	129	Pb	µg/l	124	131
Zn	µg/l	68.093	64.793	Zn	µg/l	66.760	67.026

Tab. 14: Vergleich der geometrische Mittelwert des Einlauf- und Auslaufwassers des Stauversuchs

Die höheren gelösten Konzentrationen an Mn und Zn in der filtrierten Probe haben ihr Ursache zum einen in der Mittelung einer jeweils unterschiedlichen Probenanzahl und zum Anderen in analytischen Fehlern (ca. doppelte Standardabweichung), bzw. Fehlern bei der Probenahme. Eine Konzentrationserhöhung im auslaufenden Wasser wird nur für SO_4^{2-} und **Mn** festgestellt, alle anderen Elemente und Ionen werden im Stau nicht beeinflusst oder ihre Konzentration wird verringert. Auffällig ist vor allem der starke Rückgang an gelöstem As, welches an eisenhydroxidische Fällungsprodukte gebunden wird. Diese Fällungsprodukte wurde nach dem Versuchsende in Stauraum angetroffen, bzw. wurden zuvor in den Rohrleitungen des Ablaufes beobachtet. Die Gesamtkonzentrationen ändern sich bis auf **Mn** nur gering und zeigen keine Veränderungen in Größenordnungen. Da Mittelwerte verglichen werden, die aus einer unterschiedlichen Probenanzahl berechnet wurden, sind die Ergebnisse statistisch nicht als gesichert anzusehen. Betrachtet man z.B. die Einzelwerte der Beprobung am 14.9.1999, an welchem beide Wässer untersucht wurden ergibt sich das in Tabelle 15 dargestellte Bild.

Parameter	Einheit	Einlauf	Auslauf	Parameter	Einheit	Einlauf	Auslauf
pH-Wert		3,4	3,3	Cl	mg/l	25,3	25,6
EH-Wert		756	771	NO ₃	mg/l	4,5	5,3
Leitfähigkeit	µS/cm	1244	1269	SO ₄	mg/l	935,6	932,4
O ₂ - Sättigung	%	87,6	81	Ca	mg/l	179,0	164,0
O ₂ - Konzentration	mg/l	9,9	8,5	Mg	mg/l	71,1	70,2
Temperatur	°C	11,6	12,1	Na	mg/l	15,7	16,4
Schwebmenge	mg/l	7,1	19,7	K	mg/l	3,8	4,8
Schwermetalle, Aluminium, Arsen gelöst				Schwermetalle, Aluminium, Arsen gesamt			
Al	µg/l	18.300	19.300	Al	µg/l	18.800	18.900
As	µg/l	182	40	As	µg/l	262	261
Cd	µg/l	500	505	Cd	µg/l	519	491
Cu	µg/l	803	847	Cu	µg/l	807	805
Fe	µg/l	16.000	12.700	Fe	µg/l	19.500	20.000
Mn	µg/l	24.300	26.600	Mn	µg/l	25.300	25.600
Ni	µg/l	163	160	Ni	µg/l	169	157
Pb	µg/l	117	126	Pb	µg/l	130	128
Zn	µg/l	70.000	76.500	Zn	µg/l	72.500	74.300

Tab. 15: Vergleich der am 14.9.1999 gemessenen Konzentrationen und Parameter im Einlauf- und Auslaufwasser des Stauversuchs

Die hohen gelösten Konzentrationen an Aluminium im Auslaufwasser sind wahrscheinlich ein analytischer Fehler, da die Gesamtkonzentrationen um ca. 1 mg niedriger sind.

Ob eine Gipslösung stattgefunden hat, kann aus den Analysedaten nicht ersehen werden, die Konzentrationen an SO_4^{2-} und Ca^{2+} im Auslaufwasser stiegen allerdings bis Ende Jahres an, wie aus Abbildung 22 ersichtlich. Der nachfolgende Abfall ist auf die Konzentrationsverringernung des zulaufenden Wassers zurückzuführen, da auch das Freiburger Grubengebäude mit erhöhten Wassermengen auf die Schneeschmelze reagierte, wie auch das Wasser im Stolln.

Ein Vergleich der Milieubedingungen im Stau in unterschiedlichen Höhen erbrachte keine Unterschiede. Aufgrund der geringen Abmessungen des Stauraumes muß von einer Vollzirkulation ausgegangen werden. Auch die mittlere Verweilzeit von 14 Stunden ist zu kurz für die Ausbildung einer Schichtung, vor allem da keine Wärmeunterschiede auftreten können. Abbildung 23 zeigt die pH- Werte und E_H - Werte in den verschiedenen Stautiefen. Der Abstand zwischen den Probenahmeöffnungen betrug 50 cm.

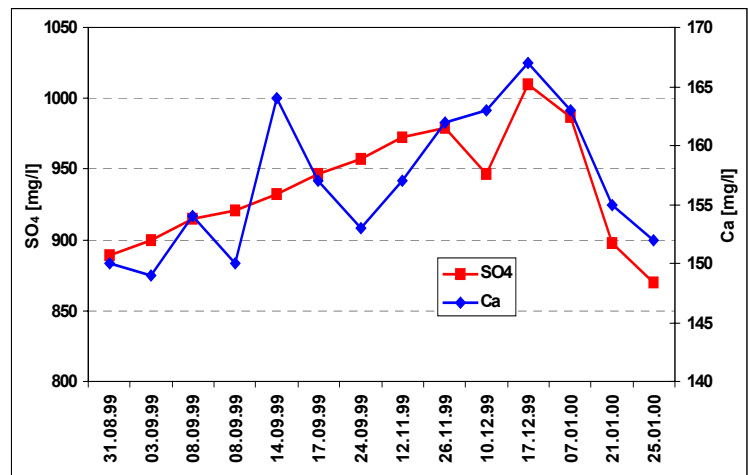


Abb. 22: Entwicklung der SO_4^{2-} und Ca^{2+} - Konzentration im Auslaufwasser des Stauversuches

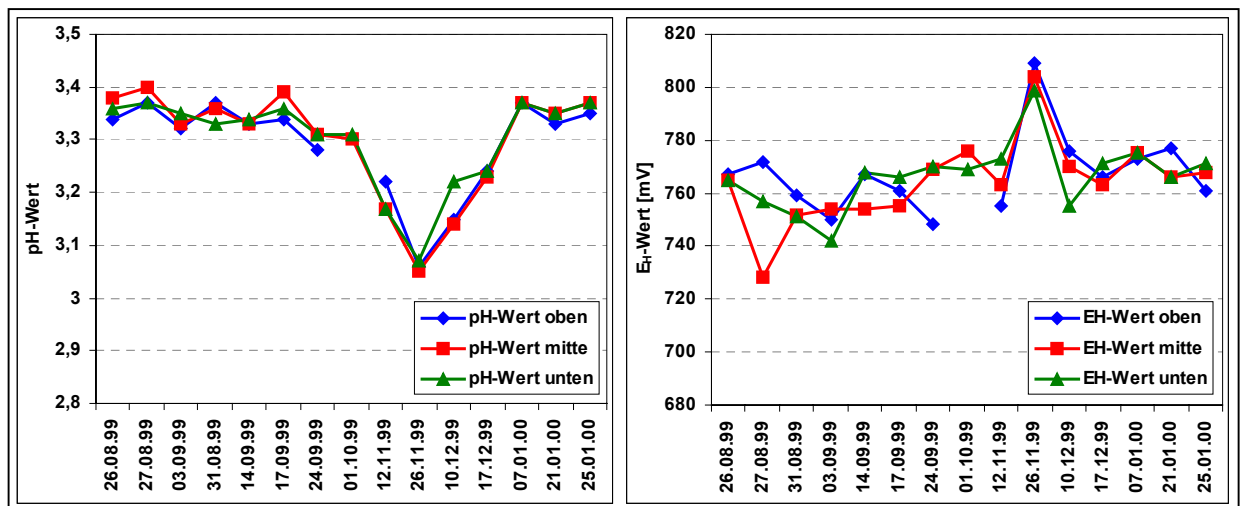


Abb. 23: pH- Wert- und E_H - Wertentwicklung in verschiedenen Höhen des Staubereiches

Die Parameter Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit und Temperatur schwankten in der gleichen Größenordnung wie die dargestellten Parameter und zeigen kein Muster, das einen Hinweis auf mögliche Schichtungsprozesse geben würde.

Während des Ablasses des Stauraumes wurde im Wasser der Beginn der Trübung festgestellt, als die unteren 20 cm über dem Sediment erreicht waren. Die Kontrolle erfolgte über die untere Probenahmeöffnung, welche ca. 25 cm über dem Sediment in den Stauraum mündet. Nach den Beobachtungen im Stauraum nach dem Versuch wurde nur das frisch gefällte Sediment, welches sich noch nicht verdichtet hatte, ausgespült. Eine mechanische Mobilisierung der Schlämme die bereits im Stauraum lagerten wurde nicht beobachtet.

4.4 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß des Stollnwassers auf die Vorflut

Im Januar und März 1999 wurden Wasserproben am Röschenmundloch entnommen. Dabei wurde die in Tabelle 16 dargestellte Entwicklung der Leitfähigkeit, der Schwebmenge und der Sulfatkonzentration festgestellt.

Am 4.3.1999 ist eine deutlich Zunahme der Schwebmenge festzustellen, während die Leitfähigkeit und die Sulfatkonzentration aufgrund der Verdünnung zurück gehen. In Abbildung 24 ist die Entwicklung der Wassertrübung von Triebisch und Stollnwasser nachvollziehbar. Die Trübung am 4.3.99 rührt von resuspendierten Partikeln des Stollnsedimentes her, da sich auf dem Filter auch Reste der schwarzen Krusten fanden, die nicht durch Fällungsprozesse im Wasser entstehen können.

Datum	Durchfluß l/s	Leitfähigkeit µS/cm	Schweb mg/l	Sulfat mg/l
06.01.99	488	947	4,79	313
28.01.99	530	943	6,34	316
02.03.99	711	919	6,18	301
03.03.99	864	902	8,42	283
04.03.99	1270	826	30,3	210

Tab. 16: Entwicklung von Wasserstand, Leitfähigkeit, Schweb und Sulfatkonzentration im Wasser des Rothschnberger

Abb. 24: Entwicklung der Wassertrübung am Mundloch des Rothschnberger Stolln während des Hochwassers 1999



Wie in Kapitel 4.1.1 gezeigt wurde am 5. März 1999 der höchste im der Projektlaufzeit gemessene Wasserstand registriert. Die Auswertung der Wasserstandsdaten vom Mundloch, die von der UBG zur Verfügung gestellt wurden zeigen, daß der gemessene Wasserstand etwa einem 10- Jahresereignis entspricht. Im Frühjahr 2000 wurden nach vorläufigen Messungen der UBG nur 54 cm Wasserstand registriert, was ca. 1150 l/s entspricht. Die für die Wassermenge an der

Reichen Zeche errechneten 1270 l/s sind wahrscheinlich zu hoch, aus den in 4.1.4 angegebenen Gründen. Eine Trübung des Stollnwassers konnte dabei nicht festgestellt werden. Ursache könnte sein, daß die kritische Erosionsfließgeschwindigkeit noch nicht erreicht war, oder daß das Hochwasser von 1999 alles erodierbare Sediment bereits aus dem Stolln gespült hat. Diese Hypothese wird durch die erstmalige Beobachtung der schwarzen Krusten gestützt, welche zuvor wahrscheinlich unter weicheren Sedimentschichten lagerten und bei Beprobungen nicht registriert wurden. Ein Hochwasser in der beobachteten Größenordnung wurde zuletzt am 28.3.1988 beobachtet, so daß ein Akkumulationszeitraum für die ausgespülten lockere Sedimente von 10 Jahren angenommen werden kann. Aus den Werten von 1999 ergibt sich eine für den Sedimentaustrag kritische Abflußmenge von ca. 800 l/s am Mundloch. Nach den Beobachtungen vom März 2000 entstammt diese Wassermenge zu etwa 70 bis 90 % aus dem Brand Erbsdorfer Revier. Die Zuflüsse aus den anderen Revieren werden verringert, da die Wasserstandserhöhung im Stolln einen Rückstau der Zuläufe bewirkt. Eine genaue Quantifizierung ist bisher nicht möglich gewesen, vor allem da der Stolln bei Hochwasser kaum befahrbar ist. Bei fortgesetzt hohen Abflüssen können sich neue Sedimentationsbedingungen einstellen, welche zu einer dichteren Lagerung der hydratisierten Eisenoxidflocken führen und damit zu einer höheren Erosionsfließgeschwindigkeit.

In Tabelle 18 (Seite 45) sind die Ergebnisse der eigenen Beprobungen des Stollnwassers sowie der Probenahmen der UBG des Wassers der Triebisch vor und nach dem Zulauf des Stollnwassers dargestellt. Die Werte stellen geometrische Mittelwerte aus den 3 parallelen Beprobungen (RSS) bzw. allen Beprobungen von 1999 der UBG dar. Es wurde der geometrische Mittelwert gewählt um den Einfluß von Hochwasserereignissen zu minimieren und dem Stichprobencharakter der Daten Rechnung zu tragen.

Für die Bewertung wurde ein Verfahren von MÜLLER, 1979 modifiziert, welches ursprünglich zur Bewertung von Gewässersedimenten entwickelt wurde. Danach berechnet sich der Igeo-Index nach der Formel:

$$I_{geo} = c_{gem} / 1,5 * c_{bg}$$

Die erhaltenen Werte werden aufgerundet auf ganze Einer und als Klassen bezeichnet, Werte < 0 entsprechen der Klasse 0. Die Bedeutung der Klassen ist in Tabelle 17 angegeben.

0	unbelastet
1	unbelastet bis mäßig belastet
2	mäßig belastet
3	mäßig bis stark belastet
4	stark belastet
5	stark bis übermäßig belastet
6	übermäßig belastet

Tab. 17: Bedeutung der Igeo-Klassen

Als Hintergrundwerte (c_{bg}) für die Berechnung wurden Gewässerbackground nach SALOMONS & FÖRSTNER, 1984 verwendet. Betrachtet werden vor allem die Gesamtgehalte an Schwermetallen.

PARAMETER	Einheit	Geometrischer Mittelwert			Igeo			
		V RSS	RSS	N RSS	VRSS	RSS	N RSS	Background
Wassertemperatur	°C	4,3	13,8	9,5				
Elektrische Leitfähigkeit(25°C)	µS/cm	545	800	861				
pH-Wert (Feld)		7,6	6,8	7,4				
pH-Wert (Labor)		7,4	7,3	7,4				
Sauerstoffgehalt	mg/l	11,6	9,7	10,7				
Sauerstoffsättigung	%	90	96	95				
Chlorid	mg/l	42	53	53				
Hydrogenkarbonat	mg/l	85,4	103	91,5				
Sulfat	mg/l	101	313	245				
Nitrat	mg/l	22	10	15				
Nitrit	mg/l	0,16	0,1	0,033				
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	1,4	1,7	1,5				
Basenkapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,049	0,1	0,053				
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	0,5	5,1	0,5				
Kalcium	mg/l	51	112	90				
Magnesium	mg/l	11	29	17				
Natrium	mg/l	17	39	28				
Kalium	mg/l	4,5	6	5				
Aluminium (gelöst)	µg/l	66	42	29	0	0	0	64
Arsen (gelöst)	µg/l	3	1,5	2	2	1	1	1
Cadmium (gelöst)	µg/l	0,6	30	15	4	6	6	0,02
Kupfer (gelöst)	µg/l	3,4	16	11	2	3	3	1
Eisen (gelöst)	µg/l	75	17	20	0	0	0	55
Mangan (gelöst)	µg/l	86	2015	1134	4	6	6	6
Nickel (gelöst)	µg/l	5	43	22	4	6	6	0,3
Blei (gelöst)	µg/l	1	6	0,4	2	5	1	0,2
Zink (gelöst)	µg/l	46	4735	2396	2	6	6	10
Aluminium (gesamt)	µg/l	484	291	350	3	2	2	64
Arsen (gesamt)	µg/l	5	17	7	2	4	3	1
Cadmium (gesamt)	µg/l	0,7	31	15	5	6	6	0,02
Kupfer (gesamt)	µg/l	4	40	16	2	5	4	1
Eisen (gesamt)	µg/l	264	1217	470	2	4	3	55
Mangan (gesamt)	µg/l	106	2180	1094	4	6	6	6
Nickel (gesamt)	µg/l	6	44	22	4	6	6	0,3
Blei (gesamt)	µg/l	3	40	13	4	6	6	0,2
Zink (gesamt)	µg/l	47	4852	2423	2	6	6	10

Tab. 18: Geometrische Mittelwerte der Wasserinhaltsstoffe von der Triebisch vor und nach dem Zulauf des Stollnwassers (V RSS und N RSS; Daten der UBG von 1999) sowie des Stollnwassers. Berechnung der Belastung der Wässer nach dem modifizierten Igeo- Klassen für Flußhintergrundwerte.

Dabei zeigt sich, daß die Triebisch bereits vor dem Zulauf des Stollnwassers nicht als unbelastet eingestuft werden kann, da sie bereits gelöst stark mit **Mn**, **Ni** und **Cd** belastet ist. Durch den Zufluß des Stollnwassers wird das Flußwasser übermäßig mit den gelösten Elementen **Cd**, **Mn**, **Ni**, **Pb** und **Zn** sowie etwas geringer mit **Cu** belastet. Da diese Elemente bis auf Blei vorrangig gelöst transportiert werden, greifen die, z.B. für **Arsen** gut funktionierenden, Fixierungsprozesse durch Adsorption an hydroxidische Eisenoxide nicht. Eine Verringerung der Konzentration kann nur durch Verdünnung oder eine technische Behandlung erreicht werden.

In Abbildung 25 ist der Faktor der Zunahme der Gesamtkonzentration (25 a) und der gelösten Konzentration (25 b) an Schwermetallen, Aluminium und Arsen im Wasser der Triebisch nach dem Zulauf den Stollnwassers dargestellt. Die Werte stellen geometrische Mittelwerte aus den Beprobungen der UBG von 1999 dar.

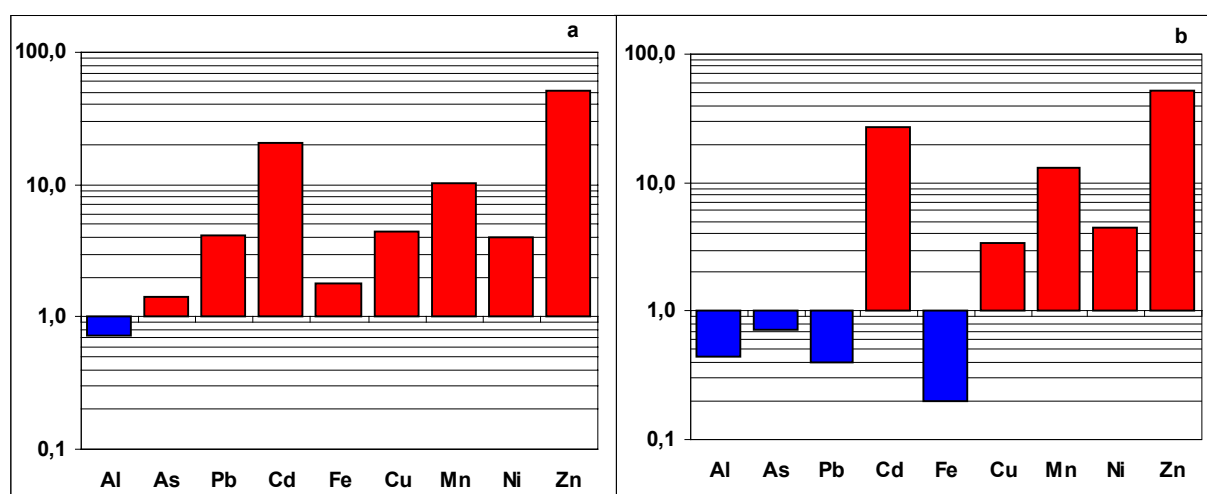


Abb. 25: Faktor der Zunahme der Gesamt- (a) und der gelösten Konzentration (b) an Schwermetallen, Aluminium und Arsen im Wasser der Triebisch nach dem Zufluß des Stollnwassers (Daten der UBG, 1999)

Die stärksten Konzentrationszunahmen erfahren die Elemente (gelöst) **Cd** (27-fach), **Mn** (13-fach) und **Zn** (50-fach). Für Aluminium und Barium kann eine Verringerung der Gesamtkonzentration festgestellt werden. Die vorrangig partikulär transportierten Elemente As, Pb und Fe zeigen eine Konzentrationsverringerng nach dem Zulauf des Stollnwassers, was bedeutet, daß das Wasser der Triebisch von diesen Elementen „gereinigt“ wird.

Für die Bewertung der Gewässerqualität werden nach den Vorgaben des StUFA Radebeul, Zielvorgaben des Bundes-/Länder Arbeitskreises „Gefährliche Stoffe – Qualitätsziele für oberirdische Gewässer“ für 2 Schutzgüter herangezogen, die in LAWA, 1998 fixiert sind. In Tabelle 19 sind die Faktoren für die gemessenen Konzentrationen im Wasser der Triebisch dargestellt.

Element	Zielvorgaben für Aquatische Lebensgemeinschaften (BLAK QZ)			Zielvorgaben für Trinkwasser (BLAK QZ)		
	ZV	Faktor vor RSS	Faktor nach RSS	ZV	Faktor vor RSS	Faktor nach RSS
Gelöst	µg/l	gem Konz. / ZV	gem Konz. / ZV	µg/l	gem Konz. / ZV	gem Konz. / ZV
Pb	3,4	0,3	0,1	50	0,02	0,01
Cd	0,072	7,7	209	1	0,6	15,1
Fe	k.A.			k.A.		
Cu	4	0,9	2,9	20	0,2	0,6
Ni	4,4	1,1	5,0	50	0,1	0,4
Zn	14	3,3	171,2	500	0,1	4,8
Element	ZV	Faktor vor RSS	Faktor nach RSS	ZV	Faktor vor RSS	Faktor nach RSS
Gesamt	µg/l	gem Konz. / ZV	gem Konz. / ZV	µg/l	gem Konz. / ZV	gem Konz. / ZV
Pb	3,4	0,9	3,9	50	0,1	0,3
Cd	0,072	9,9	209	1	0,7	15,1
Fe	k.A.			k.A.		
Cu	4	0,9	3,9	20	0,2	0,8
Ni	4,4	1,3	5,1	50	0,1	0,4
Zn	14	3,4	173,1	500	0,1	4,8

Tab. 19: Faktoren der mittleren Schwermetallkonzentrationen in der Triebisch gegenüber den Zielvorgaben für die Schutzgüter „Aquatische Lebensgemeinschaften“ und „Trinkwasser“ des Bundes/ Länderarbeitskreises „Gefährliche Stoffe – Qualitätsziele für oberirdische Gewässer“ aus LAWA, 1998

Die Werte für das Schutzgut „Aquatische Lebensgemeinschaften“ werden auch vor Zulauf des Stollnwassers nicht erreicht und verschlechtern sich sehr stark vor allem für **Zn** und **Cd** durch

den Zustrom des Stollnwassers. Für beide Schutzgüter geht die Hauptgefährdung von diesen beiden Elementen aus.

Für die Quantifizierung des Schadstoffeintrages aus dem Stolln in die Triebisch wurden mittlere Frachten aus dem mittleren Abfluß für das hydrologische Jahr 1999 (vorläufige Werte der UBG) von **524 l/s** und den geometrischen Mittelwerten der Gesamtkonzentration errechnet, welche in Tabelle 20 dargestellt sind. Die höchsten Einträge werden für die Elemente **Fe**, **Mn**, **Zn** und **Al** sowie für **Ca²⁺** und **SO₄²⁻** festgestellt. Eine Angabe in t/Jahr ist nur ein Schätzwert, da bei Hochwasser die Elementfracht mehr zunimmt, es soll jedoch die Größenordnung demonstriert werden.

Um den Einfluß einer Nutzung des Stollns durch den Betrieb des Kavernenkraftwerkes auf die Wasserqualität der Triebisch zu prognostizieren, muß der aktuelle Anteil des

Brand Erbsdorfer Revier an der Gesamtfracht ermittelt werden. Dabei werden deutliche Schwankungen des Frachtanteils je nach Abflußsituation festgestellt. Tabelle 21 zeigt die ermittelten Frachtanteile für 1999.

Der höchste mittlere Frachtanteil für die Schwermetalle wird bei Zink mit 50 % festgestellt. Die Anteile größer 100 % zu Hochwasserzeiten sind auf die ermittelten Wassermengen an der Meßstelle „Reiche Zeche“ zurückzuführen, welche um ca. 100 l/s höher als die am Mundloch registrierten liegen. Es wird deutlich, daß der Anteil des Wasser aus Brand Erbsdorf bei Hochwasser ansteigt, die Ursache dafür ist in der Verringerung des Zustroms der anderen 3 Reviere zu suchen. Der Auslauf des Schachtwassers der Reichen Zeche geht stark zu-

Element	Fracht	
	g/h	t/j
Chlorid	99.517	872
Hydrogenkarbonat	194.678	1.705
Sulfat	590.363	5.172
Nitrat	18.859	165
Nitrit	203	1,8
Abfiltrierbare Stoffe	9.674	85
Calcium	211.496	1.853
Magnesium	54.140	474
Natrium	72.923	639
Kalium	11.795	103
Aluminium	549	5
Arsen	31	0,273
Cadmium	58	0,510
Kupfer	76	0,663
Eisen	2.295	20
Mangan	4.113	36
Nickel	83	0,730
Blei	76	0,664
Zink	9.153	80

Tab. 20: Für 1999 errechnete mittlere Gesamtfrachten die der Rothschröberger Stolln in die Triebisch entläßt

Element	Mittlerer Abfluß	Hochwasser	Niedrigwasser
Cl ⁻	38%	110%	30%
HCO ₃ ⁻	54%	115%	49%
NO ₃ ⁻	63%	205%	47%
SO ₄ ²⁻	42%	127%	35%
Ca ²⁺	41%	121%	39%
Mg ²⁺	52%	135%	42%
Na ⁺	29%	85%	25%
K ⁺	42%	128%	38%
Al	16%	61%	11%
As	37%	47%	32%
Cd	45%	142%	46%
Cu	28%	79%	35%
Fe	31%	36%	35%
Mn	22%	72%	20%
Ni	21%	0%	17%
Pb	24%	60%	31%
Zn	50%	134%	43%

Tab. 21: Anteil [%] des Brander Reviers an der Gesamtfracht am Stollnmundloch 1999

rück, da es zu einem Rückstau aus dem Stolln kommt und vermutlich die umliegenden Grubenbau bis auf das ca. 0,5 m höhere Auslaufniveau geflutet werden müssen. Belegt wird dies durch Fließgeschwindigkeitsmessungen im ablaufenden Schachtwasser der Reichen Zeche durchgeführt vom Institut für Geophysik, welche einen Geschwindigkeitsrückgang auf ca. 1/4 der normalen Fließgeschwindigkeit registrieren.

In Kapitel 5 werden die Konsequenzen einer Wiederinbetriebnahme des Kavernenkraftwerkes diskutiert.

5 Diskussion & Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, daß mit der gewählten Strategie eine verlässliche Grundlage für eine Prognose möglicher Veränderungen bei einer Nutzung von Bergwerksstolln geschaffen werden kann.

Das Jahr 1999 sowie der Beginn des Jahres 2000 war aus hydrologischer Sicht sehr gut geeignet um abflußabhängige Aussagen zum Schadstoffaustrag aus dem Rothschnberger Stolln zu treffen werden sollten. Durch die beiden Hochwasser im März 1999 und 2000 in der Größenordnung eines 10-Jahresereignisses, sowie der niederschlagsarmen 2. Jahreshälfte 1999 konnten zwei Bereiche gemessen und beprobt werden, die sonst so nicht zu erfassen gewesen wären. Die somit gewonnen Ergebnisse stellen vor allem aufgrund dieser Streuung in den Abflußmengen einen sichere Ausgangsbasis für Prognosen über die Veränderungen bei einer Nutzung dar. Gleichzeitig geben sie die natürlichen Schwankungsbreiten in großem Rahmen an, so daß eine Kontrolle des Schadstofftransportes bei späterer Nutzung möglich ist. Auch die Bewertung von Veränderungen während einer zukünftigen Nutzung kann sich an diesen Werten orientieren.

Tabelle 22 zeigt die wichtigsten hydrologischen Veränderungen und Gegebenheiten und die damit verbundenen Prozesse, die eine negative bzw. positive Veränderung der Wasserqualität bewirken.

Erhöhung der Belastung	Verringerung der Belastung
<i>Erhöhung der Wassermenge</i> => Erosion von Sedimenten im Stauraum und im Stolln	<i>Langer Fließweg im Stolln</i> => ideale Sedimentationsbedingungen
<i>geplante Zufuhr von Kunstgrabenwasser</i> => Erhöhung des Sauerstoffeintrag => Förderung der Sulfidoxidation	<i>geplante Zufuhr von Kunstgrabenwasser</i> => Verdünnung
<i>Anstau der ungefluteten Grubengebäude</i> => Lösung von Sekundärmineralbildungen der letzten 30 Jahre	<i>Anstau der ungefluteten Grubengebäude</i> => Verringerung des Sauerstoffdargebotes => Hemmung der Sulfidoxidation
<i>Wechsel der Wassermenge zwischen Stau und Betriebsphasen</i> => Erosion von Sedimenten im Stolln	<i>Verweilzeit von ca. 70 Tagen im Stau</i> => Konzentrationserhöhung durch Sulfidoxidation braucht länger

Tab 22: Hydrologische Gegebenheiten und Veränderungen durch die Nutzung des Stollns und die gekoppelten Prozesse, die zu einer Änderung der Wasserqualität im Stolln führen

In Zusammenhang mit der Lösung von Sekundärmineralen kommt es auch zu einer Erhöhung der partikulären Fracht im Stollnwasser durch eine verstärkt Bildung von Hydroxidflocken. Wie weit diese ausgetragen werden hängt von ihrer Größe und den Strömungsbedingungen ab. Es kann jedoch von einer stärkeren Agglomeration durch die höhere Flockendichte ausgegangen werden. In der Anstauphase kommt es wahrscheinlich zu einer Frachterhöhung, da sich weniger Wasser mit wahrscheinlich höheren Konzentrationen durch den Stolln abfließt. Diese Prozesse

sind wahrscheinlich zeitlich stark auf die Anfangsphase des Anstaus begrenzt und können vor allem durch die Zufuhr von Frischwasser beeinflusst werden. Die Diskussion der Ergebnisse im folgenden soll versuchen die möglichen Entwicklungen und ihre Grenzen aufzuzeigen

Es konnte nachgewiesen werden, daß für einige Elemente gute Korrelationen zum Abfluß bestehen. Dabei wurde für die Schwermetalle, Aluminium und Arsen eine Zunahme der Konzentration mit steigendem Durchfluß festgestellt, für die Hauptwasserinhaltsstoffe (z.B. Sulfat, Hydrogencarbonat) bis auf Nitrat wurde ein Abnahme der Konzentrationen ermittelt. Die ermittelten logarithmischen oder potentiellen Abhängigkeiten sind in unterschiedlichem Grad vertrauenswürdig. Auffällig ist vor allem die Konzentrationsentwicklung bei Abflüssen > 600 l/s für **Sulfat**. Im Komplex mit der Entwicklung des Abflusses bei solchen „Hochwasser“- Ereignissen wird vermutet, daß durch die relative geringe Öffnung am Verspünden 12 am König Johann Spat es zu einem Rückstau des abströmenden Wassers kommt, der möglicherweise sogar ein neues Sohlenniveau erreicht. Dadurch werden Grubenfelder in das Abflußgeschehen einbezogen, die sonst kein Wasser führen. Abbildung 25 soll dies schematisch verdeutlichen.

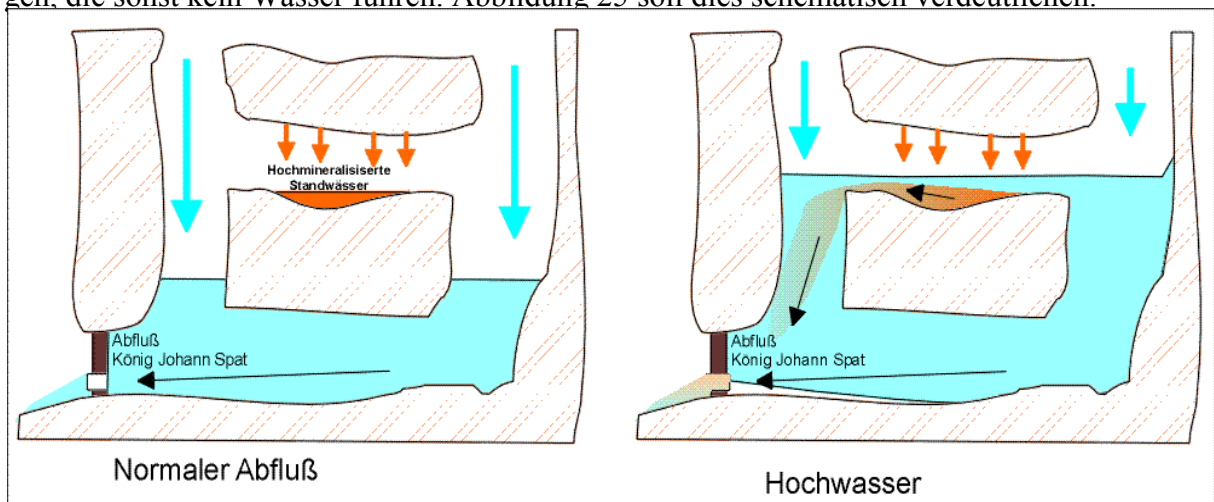


Abb. 25: Schematische, nicht maßstäbliche Darstellung der vermuteten Mobilisierung von hochmineralisierten Standwässern aus Grubenfeldern, die bei normalem Abfluß nicht am Abflußgeschehen teilnehmen

In diesen Grubenfeldern können sich hochmineralisierte Standwässer gebildet haben, die nun mobilisiert werden und damit zu einer Konzentrationserhöhung beitragen. Ein Indiz dafür ist auch die kurzzeitige Erhöhung der Leitfähigkeit zu Beginn der „Hochwasser“- Welle.

Diese Standwässer werden nach den Erfahrungen im zugänglichen Freiburger Grubenbereich durch den Zusammenfluß von sogenannten Lettenporenlösungen in Senken oder Saigen gebildet. Die Lettenporenlösungen entstehen bei der Oxidation der fein suspendierten Sulfide in den tonigen Verwitterungsprodukten der Gangarten und des Nebengesteins. In diesen Letten herrschen ideale Bedingungen für die wahrscheinlich nicht bakteriell katalysierte Oxidation vor allem des Pyrits, wobei die Verminderung der vertikalen Migrationsgeschwindigkeit des Wassers ein entscheidender Faktor ist. Es erfolgt ein langsames, kontinuierliches Durchströmen dieser Letten, und damit ein permanenter Sauerstoffein- und Oxidationsproduktaustrag. An der Luft-Lettengrenze verlassen die Wässer die tonige Matrix mit einem pH- Werte zwischen 2 und 3, elektrischen Leitfähigkeiten von bis zu 10 mS/cm sowie Sulfatkonzentrationen von bis zu mehreren 1000 mg/l. Typisch ist eine deutliche Rotfärbungen dieser Wassers, die vermutlich von

Eisen- Sulfat- Hydroxidkomplexen verursacht wird und auch nach der Filtration bestehen bleibt (Kluge, 1998). Selbst in geringen Mischungsanteilen können diese Wässer zu einer deutlichen Konzentrationserhöhung vor allem an Sulfat beitragen.

Anhand der Konzentrationsentwicklungen bei höherem Abfluß ist eine Lösung von Sekundärmineralen und damit verbunden Konzentrationserhöhung an den in den Sekundärmineralen fixierten Elementen bei einem Wiederanstau der abgedämmten Grubenbereiche hinter dem Kavernenkraftwerk wahrscheinlich. Potentiell für die Lösung zu Verfügung stehen die Sulfidoxida-tionsprodukte der letzten 30 Jahre, in denen sowohl Wasser als auch Sauerstoff ungehindert dem Grubengebäude zusitzen konnten. Da wahrscheinlich in regelmäßigen Abständen ein Rückstau in diese Grubenbereiche erfolgt, ist nicht mit einer Extrembelastung vor allem am Anfang des Anstaus zu rechnen. Eine Größenordnung des Austrages ist nicht abzuschätzen, da die Verhältnisse hinter dem Stau nicht bekannt sind. Durch die Zuführung von saubererem Wasser aus dem Kunstgrabensystem könnte dieser Konzentrationsanstieg zusätzlich durch die Verdünnung gemindert werden.

Mit einem Anstau wird auch der Sauerstoffeintrag in das geflutete Grubengebäude verringert, so daß auch die Sulfidoxidation gehemmt wird, was zu einer Verringerung des Schadstoffaustrages führen könnte. Eine Redox- oder Temperaturschichtung des Stauraumes wird nicht erwartet, da zum einen nicht genügend organische Substanz im Grubengebäude vorhanden ist und auch nicht eingetragen wird, und zum andern, wie Untersuchungen im Stauraum des Freiburger Reviers belegen, mit einem kontinuierlichen Durchströmen des Stauraumes gerechnet werden kann.

Eine Mobilisierung von Schadstoffen aus hydroxidischen Schlämmen bei einem Anstau konnte nicht nachgewiesen werden, das beobachtete Verschwinden einer aluminiumhaltigen Schlamm-schicht ist auf den pH- Wert um 3 des zufließenden Wassers zurückzuführen, welcher sich im späteren Anstau nicht einstellen wird. Auch eine mechanisch Mobilisierung der zuvor trockenen Schlämme im Stauraum kann weitestgehend ausgeschlossen werden.

Mit einem Anstau wird gleichzeitig die Möglichkeit gegeben, die abfließenden Wassermengen so zu regulieren, das keine Sedimenterosion bzw. -resuspension im Stolln erfolgen kann. Die Sedimente im Stolln sind mechanisch bis zu einer Abflußmenge von ca. 1000 l/s als stabil einzuschätzen. Da 1999 im Frühjahr eine natürliche „Stollnspülung“ erfolgte, kann der maximale Abfluß ca. 1000 l/s betragen, ohne das mit einer sichtbaren Trübung des Wassers gerechnet werden muß. Bei weiterhin kontinuierlich hohem Abfluß und dadurch veränderten Sedimentati-onsbedingungen in den nächsten Jahren ist kein weiterer Sedimentaustrag zu befürchten. Ungeklärt ist der Einfluß von kurzzeitig um Größenordnungen schwankenden Abflüssen. Durch die Stollngeometrie werden „Hochwasser“- wellen gebremst und bis zum Mundloch stark gedämpft. So betrug der Wasserspiegelanstieg im März 2000 am König Johann Spat während des Hochwassers 54 cm in 3 Tagen, am Mundloch wurden nur 9 cm registriert. Die Fließdauer bis zum Mundloch beträgt zwischen 14 und 18 Stunden, die Sedimentation von frisch gefällttem Eisenhydroxid findet dadurch vorrangig im Stolln statt. Ein Mindestabfluß sollte gewährleistet

sein, um ein Trockenfallen der Sedimente zu verhindern, welches dann seine kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften verlieren könnte.

Die hohen Wassermengen aus dem Brander Revier haben ihre Ursache vermutlich in der Entlastung des Grundwasseranstroms vom Erzgebirgskamm, was allerdings hydrogeologisch noch nicht belegt ist. Dieser Zustrom von sauberem Wasser ist die Ursache für die verhältnismäßig geringen Konzentrationen im aktuell ablaufenden Wasser aus dem Brander Revier und in der Endkonsequenz auch der für Grubenwässer moderaten Konzentrationen am Mundloch. Geht man von einem konstanten Austrag am Oxidationsprodukten aus dem Grubengebäude über die wässrige Phase aus und nimmt keinen Zustrom von Grundwasser zur Grube an, ergeben sich, berechnet auf die, das Freiburger Grubenrevier verlassenden Wassermengen (65 l/s), die in Tabelle 23 dargestellten Konzentrationen im Wasser aus Brand Erbsdorf.

Element	Brander Revier	Freiburger Revier	Element	Brander Revier	Freiburger Revier
Cl	186	211	Al	240	500
HCO ₃	481	101	As	15	3
NO ₃	91	8	Cd	137	70
SO ₄	1.217	1.178	Cu	122	41
Ca	434	290	Fe	459	1.200
Mg	141	58	Mn	4.534	11.100
Na	106	244	Ni	96	58
K	26	16	Pb	18	24
Vergleich mit dem Schachtwasser Reiche Zeche			Zn	22.843	14.400

Tab. 23: Vergleich der theoretischen gelösten Konzentration im Wasser des Brander Reviers bei gleicher Fracht und verringerter Wassermenge (65 l/s) mit den gelösten Konzentrationen im Wasser aus dem Freiburger Revier

Wenn möglich sollte also der positive Effekt des Zustrom von sauberem Grundwasser zusätzlich durch die Einleitung von sauberem Oberflächenwasser unterstützt werden. Um eine Verbesserung der Wasserqualität des Stollnwassers und damit der Wasserqualität der Triebisch zu erreichen, könnten auch ohne Nutzung des Kavernenkraftwerkes Überschußwasser der LTV im Konstantin Teich verfällt werden.

Durch den hohen aktuellen Abflußanteil des Brander Revieres von 63 % im Mittel an der Wassermenge im gesamten Stolln wirkt eine Veränderung der Wasserqualität des Brander Reviers bis zum Mundloch, da die Wasserqualität der anderen Revier nicht direkt beeinflussbar ist und deren Zustrom als relativ konstant in Menge und Konzentration anzusehen ist. Einer Konzentrationserhöhung wirken nur die Fällung und Sedimentation entgegen. Bei einer wirkungsvollen Stauhaltung und einer Begrenzung des Abflusses auf ca. 300 l/s in der Anfangsphase des Staubetriebs sollten aber Fließbedingungen herrschen, die eine Sedimentation im Stolln ermöglichen, so daß keine unmittelbare Gefahr für die Vorflut besteht. Gleichzeitig geht auch der Frachtanteil der anderen Revier zurück, da der natürliche hydrologische Rückgang der Abflussumengen für das Brander Revier kompensiert wird, der der anderen Reviere hingegen nicht.

Wertvolle Aussagen konnten zum Jahresgang des Abflusses gewonnen werden. Die minimal am „König Johann Spat“ registriert Wassermenge betrug ca. 150 l/s, als mittlerer Abfluß wurden 290 l/s für 1999 errechnet. Damit sind erstmalig die für einen Kraftwerksbetrieb zur Verfügung stehenden Wassermengen über das Jahr bekannt.

Die geplanten 250 l/s standen an 165 Tagen im Jahr 1999 nicht zur Verfügung. Tabelle 24 zeigt, das die Reserven im Stau durch den Überschuß im Frühjahr ausreichen um den geplanten Kraftwerksbetrieb zu gewährleisten.

Zusammenfassend können die folgenden Aussagen getroffen bzw. Empfehlungen gegeben werden:

1. Unabhängig vom Kraftwerksbetrieb könnte eine Zufuhr von überschüssigem Wasser der LTV über den erprobten Wasserweg im Konstantin- Schacht eine Verbesserung der Wasserqualität durch Verdünnung herbeiführen. Zusätzlich haben sie auch einen sedimentstabilisierenden Effekt im Haupttrakt des Stollns.
2. Die bei einem Kraftwerksbetrieb anfallenden Wassermengen sollten 1000 l/s nicht überschreiten.
3. Optimal wäre eine Vergleichmäßigung des Abflusses durch den Stau auf 250 bis 300 l/s, vor allem in der Anfangsphase des Anstaus um günstige Sedimentationsbedingungen zu schaffen.
4. Ein Konzentrationsanstieg in der Anfangsphase des Anstaus ist wahrscheinlich. Das größte Potential dabei bilden die Sekundärmineralbildungen der letzten 30 Jahre. Eine Größenordnung und Zeitdauer kann nicht abgeschätzt werden, da nicht bekannt ist inwieweit aktuell das Grubengebäude durch aktuelle Rückstauereignisse gespült wird.
5. Die ermittelten Schwankungsbreiten können aufgrund der hydrologischen Situation im Beobachtungszeitraum als repräsentativ für die natürlichen Schwankungen der Wasserqualität des Stollns angesehen werden.
6. Die Meßstellen im Rothschnberger Stolln sollten weiter betrieben werden, u.U. ist eine Übergabe von der Bergakademie an die UBG oder eine ähnliche Institution sinnvoll. Sie können auch als Monitoringstationen während des Kraftwerkbetriebes eingesetzt werden.

Szenario	Wassermenge m ³ /Jahr
benötigt für Staubetrieb mit 250 l/s	7.884.000
Verfügbar bei Jahresmittel von 300 l/s	9.460.800
Differenz (im Stau aufgefangen)	1.576.800
<i>Überschuß, da nur 1,5 Mio m³ Stauraum</i>	76.800
Benötigt für 165 Tage Betrieb mit 250 l/s	3.564.000
Reales Angebot für 165 Tage mit im Mittel 195 l/s	2.779.920
Defizit	784.080
Differenz Speicher - Defizit	715.920

Tab. 24: Vergleich der benötigten und real vorhandenen Wassermengen für einen kontinuierlichen Kraftwerksbetrieb mit 250 l/s ausgehend von den hydrologischen Bedingungen 1999

7. Eine geochemisches Monitoring im Monatsabstand, bzw. Ereignis bezogen, sollte im ersten Jahr den Kraftwerksbetrieb begleiten.

Nach Meinung der Autoren gibt es aus geochemischer Sicht keine grundsätzlichen Hindernisse für einen Kraftwerksbetrieb, ein angepaßtes Betriebsregime vorausgesetzt. Exaktere Prognosen können für die mögliche Betriebskonzepte erarbeitet werden, diese langen bei Projektende den Bearbeitern noch nicht vor und sollten dann in einer Expertenrunde diskutiert werden. Die gewonnenen Daten über die Fracht- und Konzentrationsentwicklung mit dem Wasserstand bilden hierfür eine belastbare Grundlage.

Die Forschungen des Instituts für Mineralogie bezüglich einer Schwermetallfixierung durch naturnahe Barrieren in der Freiburger Grube lassen zudem hoffen, das sich die Qualität des Wassers durch die Reinigung des Zuflusses aus dem Freiburger Revier weiter verbessert

Wie bereits aus der Einleitung zu ersehen war, ist kein Standort mit Sulfidmineralisationen vom Auftreten der hier charakterisierten Probleme ausgenommen. Dort wo eine Wasserzirkulation im Grubengebäude nicht verhindert werden kann, bzw. nicht existiert, werden zum Schutz der Umwelt jahrzehntelang Wasserreinigungsanlagen betrieben.

Aber auch die zunehmende Nutzung wasserfrei gebliebener Grubenfelder für die unterschiedlichsten Zwecke (Entnahme von Brauchwasser, Abfluß von Oberflächenwasser, Verlegen von Versorgungsleitungen, Deponierung von Materialien, Einrichtung von speziellen Laboratorien und Arbeitsräumen, Nutzung der staubfreien feuchten Luft für medizinische Zwecke und anderes) bleibt nicht ohne Auswirkungen auf die gesamten geochemischen unterirdischen Prozesse der Mobilisation und Fixierung der Elemente durch Bewetterung, Eintrag von Fremdwässern und Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten.

Aus diesem Grunde sind die hier gewählten und verfolgten Lösungsansätze zur prognostischen Beurteilung der Konsequenzen einer bestimmten beabsichtigten Nutzung neuartig und auf andere Fälle übertragbar. Das betrifft vor allem:

- die Einrichtung eines zeitlich und örtlich aufgeschlüsselten Monitorings zur substantiellen Charakterisierung der Hauptemittenten im System (Frachtberechnungen aus Wassermengen und Inhaltsstoffen) über mindestens ein hydrogeologisches Jahr,
- die zweckmäßige Auswahl der zu messenden Parameter unter Beachtung von Aussagesicherheit und Ökonomie,
- die Verteilung der Elemente zwischen der flüssigen und festen Phase,
- die meßtechnische Erfassung unterschiedlicher jahreszeitlicher und meteorologischer Zustände (Trockenzeiten, Hochwassersituationen),

- die Berücksichtigung meteorologischer Langzeittrends für die Abschätzung der Streubreite wichtiger normaler und maximaler Parameter.

Freiberg, den 11.01.2001

.....
Prof. P. Beuge

.....
Dr. rer. nat. Kluge

.....
Dipl. min. Th. Degner

6 Anlagen

6.1 Verwendete Literatur

6.2 Diagramme Jahresübersicht Wasserstand, Temperatur, Leitfähigkeit der Meßstellen „König Johann Spat“ und „Reiche Zeche“

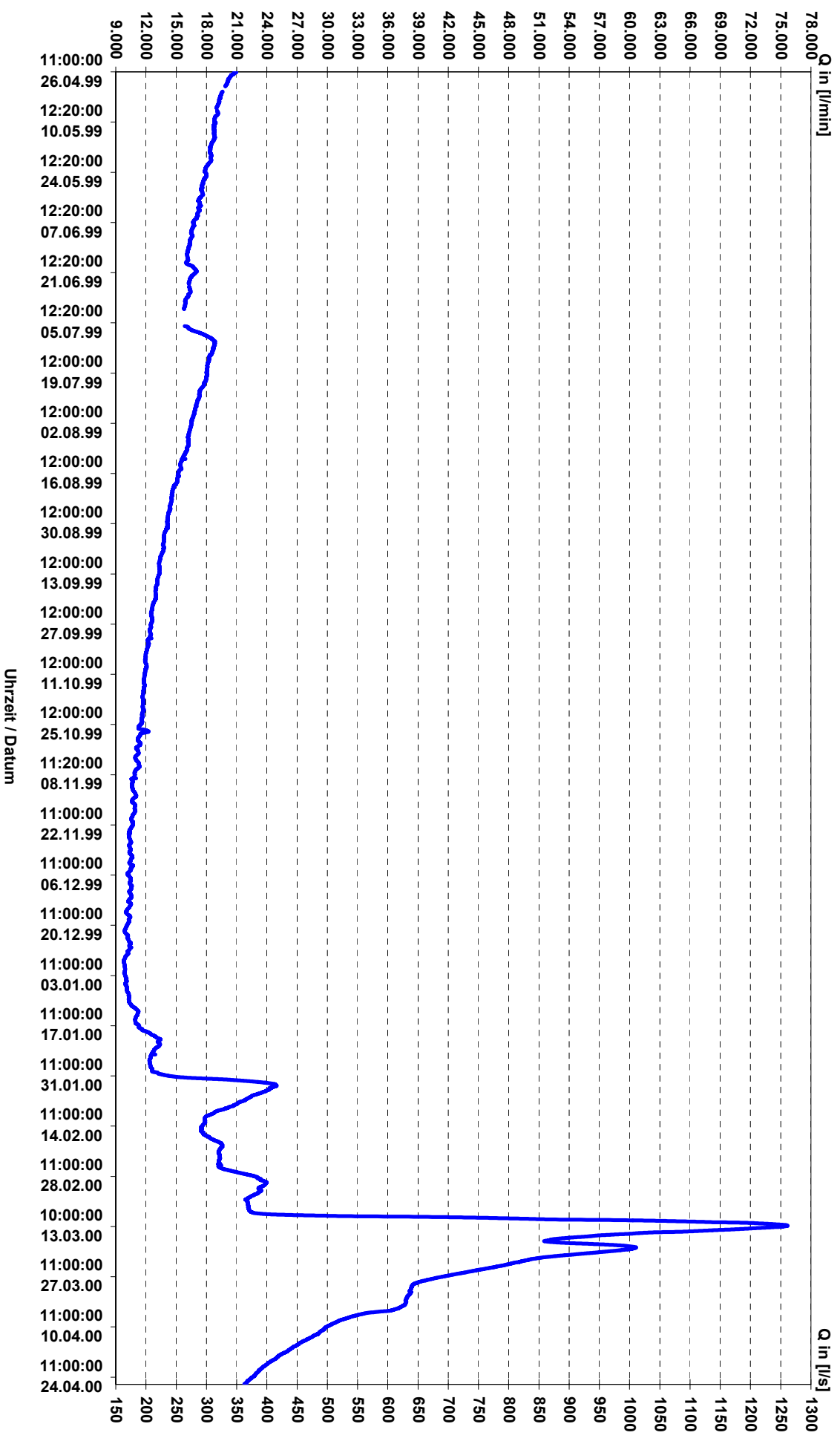
6.3 Datenübersicht geochemisches Monitoring

6.4 Datenübersicht Stauversuch

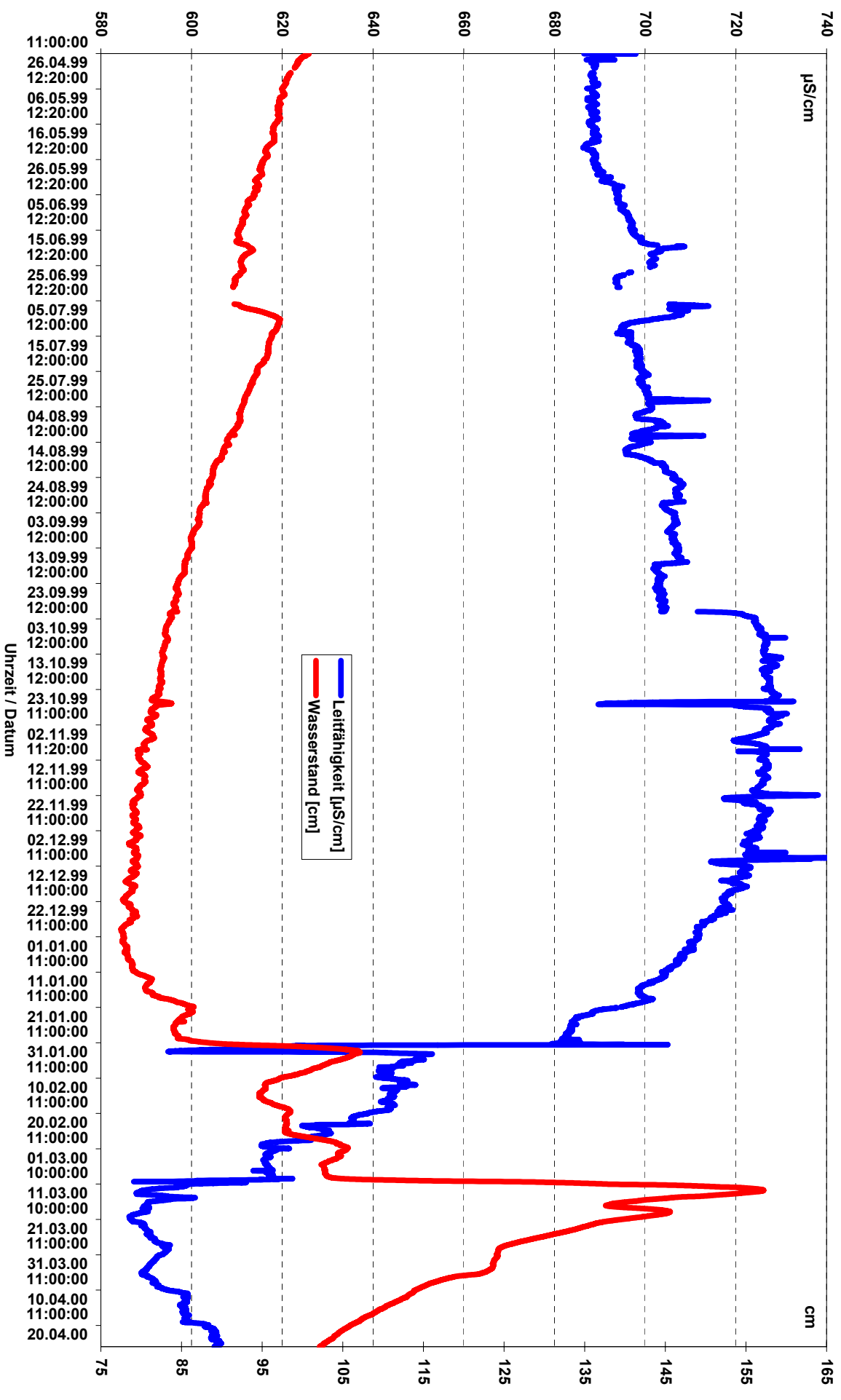
6.1. Verwendete Literatur

- DEGNER, TH. (1996): Der Schwermetalltransport im Rothschönberger Stolln in Abhängigkeit von gegenwärtigen und zukünftigen Abflußraten. Nat.-wiss. Dipl.-Arbeit, TU BA Freiberg, 1996
- EN ISO 9963-2, 1995: Wasserbestimmung, Bestimmung der Alkalinität, Teil 2. CO₃- Alkalinität. 1995
- KLUGE, A., BAACKE, D., DEGNER, TH., 1997: Geochemische Untersuchungen am Verträgliche Gesellschaft Stolln/ Roter Graben und Abschätzung der Veränderung geochemischer Prozesse im Stollnwasser infolge der beabsichtigten Einleitung von Kunstgrabenwasser. Unveröff. Gutachten, Inst. f. Min., TU BA Freiberg, 1997
- KLUGE, A., 1998: Schwermetalltransport, Mineralisation und Sorptionspotentiale im tektonischen Inventar und in bergmännischen Hohlräumen der sulfidischen Polymetall-Ganglagerstätte Freiberg/Sachsen. Bericht an die DFG im SFB „Geochemische Prozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sickerwasser und Grundwasser“, 1998
- MÜLLER G. (1979): Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veränderungen seit 1971. Umschau 79, 778-783.
- SALMONS, W., FÖRSTNER, U. (1984): Metals in Hydrocycle. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.

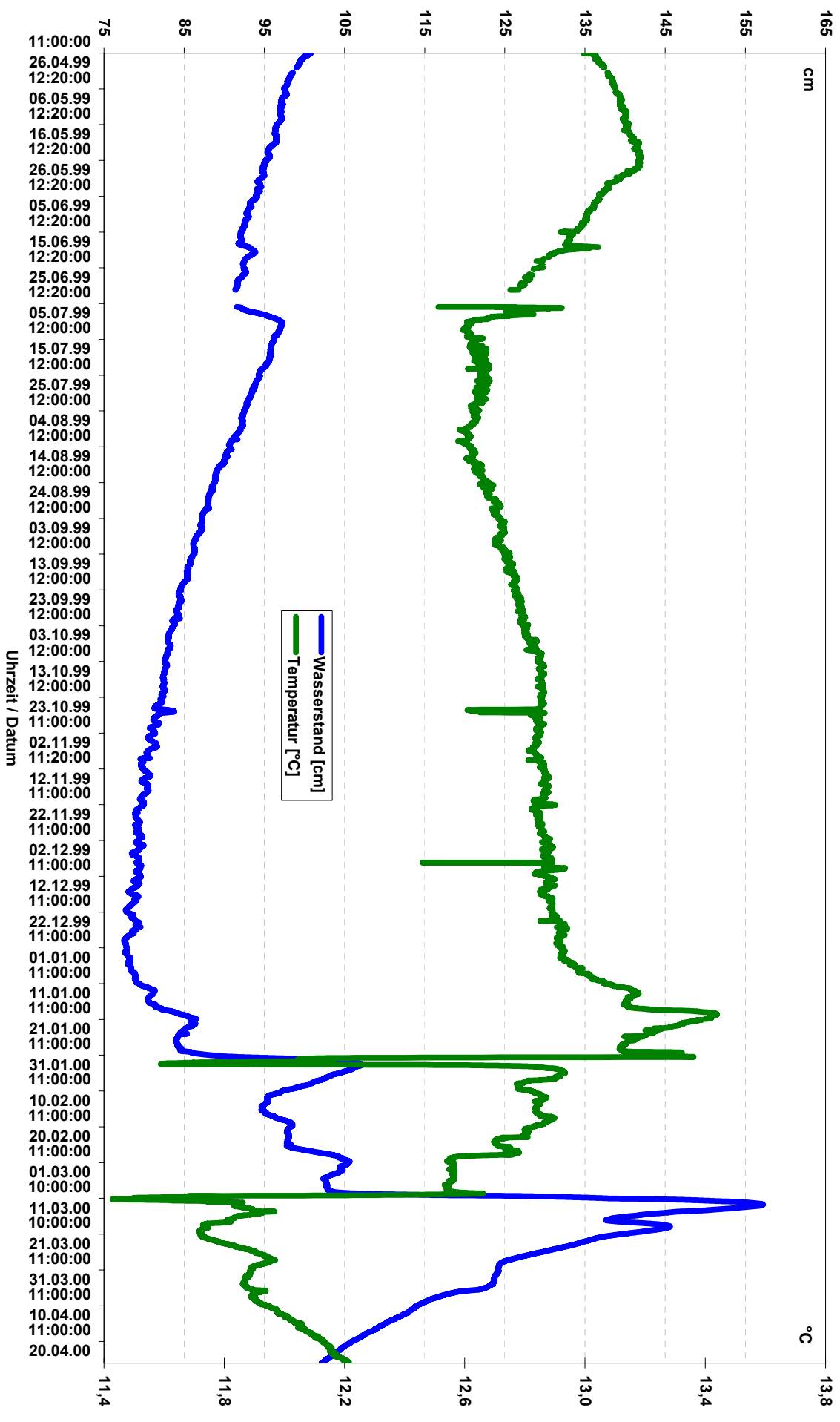
Anlage 6.2 Jahresübersicht der Meßstelle "Reiche Zeche" Wassermenge



Anlage 6.2 Jahresübersicht der Meßstelle "Reiche Zeche" Leitfähigkeit und Wasserstand



Anlage 6.2 Jahresübersicht der Meßstelle "Reiche Zeche" Temperatur und Wasserstand



Probe	Datum	Lokalität
RZ 03/1	05.03.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
TvM 03/2	04.03.99	Triebisch 50 m vor RSS
TnM 03/3	04.03.99	Triebisch ca 300 m nach RSS
R0 03/4	04.03.99	RSS Mundloch
RZ 03/5	19.03.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 04/6	01.04.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
R0 04/7	14.04.99	RSS Mundloch
RZ 04/8	16.04.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 04/9	30.04.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 05/10	14.05.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 05/11	28.05.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 06/12	11.06.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 06/13	25.06.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 07/14	08.07.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 07/15	09.07.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 07/16	12.07.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 07/17	14.07.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
KJS 07/18	14.07.99	RSS am König Johann Spat
R0 07/19	19.07.99	RSS Mundloch
RZ 07/20	23.07.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 08/21	06.08.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 08/22	20.08.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
KJS 08/23	31.08.99	RSS am König Johann Spat
RZ 08/24	31.08.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 09/25	03.09.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
R0 09/26	07.09.99	RSS Mundloch
RZ 09/27	17.09.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 10/28	01.10.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 10/29	15.10.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 10/30	27.10.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 10/31	29.10.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 11/32	12.11.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
KJS 11/33	24.11.99	RSS am König Johann Spat
RZ 11/34	24.11.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 11/35	26.11.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
R0 12/36	07.12.99	RSS Mundloch
RZ 12/37	10.12.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 12/38	17.12.99	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 01/39	07.01.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 01/40	14.01.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 01/41	21.01.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 02/42	04.02.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
KJS 02/43	02.02.00	RSS am König Johann Spat
KT 01/44	31.01.00	Konstantinteach
RZ 02/45	18.02.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 02/46	29.02.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 03/47	03.03.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 03/48	13.03.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 03/49	16.03.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche
RZ 04/50	12.04.00	RSS vor Zulauf Reiche Zeche

Probe	Bemerkungen
RZ 03/1	Absoluter Maximalwasserstand!
TvM 03/2	
TnM 03/3	
R0 03/4	Hochwasser im Stolln, Sehr braune Brühe (sieh Bilder!)
RZ 03/5	
RZ 04/6	Filtration < 100 nm !□Fliterauswaage nicht relevant!
R0 04/7	
RZ 04/8	Filtration < 100 nm□Fliterausswaage nicht relevant
RZ 04/9	Filtration < 100 nm□Filterauswaage nicht relevant
RZ 05/10	
RZ 05/11	
RZ 06/12	
RZ 06/13	
RZ 07/14	Ansteigende Hochwasserwelle
RZ 07/15	ansteigende Hochwasserwelle
RZ 07/16	Scheitel, bzw. Abfall der Hochwasserwelle
RZ 07/17	Messungen erfolgten in Flasche mit unabgespülten Elektroden, nach Befahrung
KJS 07/18	Probe direkt nach Grundablass
R0 07/19	
RZ 07/20	
RZ 08/21	
RZ 08/22	
KJS 08/23	Tiefwasser, Filter nicht mit Pinzette gehandelt
RZ 08/24	Nach Befahrung, Schwebmenge nicht interpretierbar
RZ 09/25	Sauerstoff ? (E7)
R0 09/26	
RZ 09/27	Niedrigwasser
RZ 10/28	
RZ 10/29	übertage filtriert
RZ 10/30	Hochwasserwelle
RZ 10/31	
RZ 11/32	
KJS 11/33	
RZ 11/34	Nach Befahrung KKW
RZ 11/35	
R0 12/36	
RZ 12/37	
RZ 12/38	
RZ 01/39	
RZ 01/40	
RZ 01/41	
RZ 02/42	
KJS 02/43	Während Befahrung und Teichablass
KT 01/44	Tageswasser das in den Stau verfällt
RZ 02/45	alte Meßgeräte; Eh fraglich
RZ 02/46	Hochwasseranstieg
RZ 03/47	Hochwasserwelle am Abklingen
RZ 03/48	Hochwasser
RZ 03/49	Hochwasser am Abnehmen
RZ 04/50	Befahrung mit MDR, Flügelmessung, Beeinflussung der Schwebmenge?!

Probe	Wasserstand cm	Durchfluß l/s	pH Wert Feld	pH Wert Labor	E _H Wert mV	Leitfähigkeit µS/cm
RZ 03/1	169,5	1564	6,39	6,58	419	658
TvM 03/2	n.a.	n.a.	7,31	7,19	515	420
TnM 03/3	n.a.	n.a.	6,84	6,84	452	545
R0 03/4	53	980	6,64	6,74	447	826
RZ 03/5	120	517	6,3	6,95	456	509
RZ 04/6	111	422	6,35	6,8	423	516
R0 04/7	43	540	6,35	7,08	475	720
RZ 04/8	105	349	6,29	7,13	422	520
RZ 04/9	102	332	6,48	7,21	396	529
RZ 05/10	100	313	6,46	7,15	412	531
RZ 05/11	98	293	6,5	7,09	405	534
RZ 06/12	96	277	6,6	7,05	395	536
RZ 06/13	95,5	271	6,49	6,8	409	539
RZ 07/14	98	291	6,57	7,2	429	546
RZ 07/15	99	303	6,55	7,07	447	545
RZ 07/16	100	312	6,46	6,96	425	534
RZ 07/17	100	312	6,86	6,99	526	557
KJS 07/18	n.a.	n.a.	6,64	6,79	401	524
R0 07/19	40	430	6,76	7,42	515	749
RZ 07/20	98,5	294	6,53	7,23	373	527
RZ 08/21	96	269	6,55	7,31	380	528
RZ 08/22	93	246	6,56	7,28	405	531
KJS 08/23	51	n.a.	6,61	6,85	475	528
RZ 08/24	n.a.	n.a.	6,78	7,25	534	540
RZ 09/25	91	230	6,58	7,15	432	539
R0 09/26	n.a.	n.a.	6,74	7,4	503	762
RZ 09/27	89,5	217	6,67	7,01	394	527
RZ 10/28	88	205	6,67	7,17	449	528
RZ 10/29	87	197	7,04	7,78	407	545
RZ 10/30	89	204	6,86	7,52	440	515
RZ 10/31	86	187	7,25	7,57	400	543
RZ 11/32	85	178	7,54	7,7	452	703
KJS 11/33	60	0	7,12	7,26	705	691
RZ 11/34	84,5	176	7,44	7,6	570	708
RZ 11/35	84	173	7,32	7,52	532	709
R0 12/36	38	360	7,5	7,8	524	965
RZ 12/37	84	175	7,74	7,85	511	719
RZ 12/38	83	169	7,15	7,93	475	707
RZ 01/39	84	169	7,36	7,55	465	713
RZ 01/40	86	186	7,26	7,51	471	706
RZ 01/41	91	228	7,26	7,4	480	704
RZ 02/42	111	402	7	7,26	448	671
KJS 02/43	n.a.	n.a.	6,69	7,57	454	605
KT 01/44	n.a.	n.a.	7,03	6,99	573	240
RZ 02/45	102	313	7,09	7,16	395	696
RZ 02/46	110	389	6,83	7,21	448	636
RZ 03/47	110	390	6,92	7,16	430	639
RZ 03/48	161	1253	6,7	6,94	432	609
RZ 03/49	145	911	6,74	6,98	436	615
RZ 04/50	118	484	6,74	6,94	441	643

Probe	O ₂ Sättigung %	O ₂ Konzentration mg/l	Temperatur °C	Schwebmenge mg/l
RZ 03/1	n.a.	9,7	13	6,6
TvM 03/2	101	11,9	6,4	21,4
TnM 03/3	97	11	8,3	17,5
R0 03/4	94	9,6	12,6	30,3
RZ 03/5	113	11,8	12,4	4,9
RZ 04/6	92	9,71	12,5	0
R0 04/7	98	9,83	13,6	2,8
RZ 04/8	91	9,45	12,6	0,3
RZ 04/9	90	9,45	12,7	n.n.
RZ 05/10	102	10,52	12,8	1,3
RZ 05/11	94	9,75	12,8	2
RZ 06/12	94	9,7	12,8	1,6
RZ 06/13	94	9,8	12,9	2,2
RZ 07/14	n.a.	n.a.	13,1	2,2
RZ 07/15	106	11,03	13	2,9
RZ 07/16	116	12,02	12,9	2,97
RZ 07/17	n.a.	n.a.	12,9	10,76
KJS 07/18	n.a.	n.a.	12,9	2
R0 07/19	n.a.	n.a.	14	4,13
RZ 07/20	92	9,54	12,9	2,47
RZ 08/21	94	9,66	13	1,69
RZ 08/22	94	9,61	13	1,94
KJS 08/23	88	9,05	13,1	1,58
RZ 08/24	94	9,65	13,2	47,06
RZ 09/25	105	10,88	13	2,4
R0 09/26	97	9,6	14,7	3,82
RZ 09/27	93	9,6	13,2	1,52
RZ 10/28	93	9,46	13,1	1,78
RZ 10/29	122	12,75	13,2	0,38
RZ 10/30	120	12,8	12,9	1,69
RZ 10/31	124	13,15	13,1	n.n.
RZ 11/32	124	12,88	13,2	0,87
KJS 11/33	n.a.	n.a.	13,2	0,58
RZ 11/34	n.a.	n.a.	13,1	71,89
RZ 11/35	n.a.	n.a.	13,2	1,86
R0 12/36	96	9,6	14,1	2,65
RZ 12/37	n.a.	n.a.	13,3	1,23
RZ 12/38	94	9,91	13,2	1,12
RZ 01/39	91	9,45	13,3	0,77
RZ 01/40	93,0	9,5	13,5	1,99
RZ 01/41	115,5	11,5	13,7	2,07
RZ 02/42	100	10,4	13,2	2,26
KJS 02/43	90	9,4	11,9	4,12
KT 01/44	76	9,8	2,1	2,96
RZ 02/45	96	9,77	13,2	1,85
RZ 02/46	89	9,17	12,9	1,88
RZ 03/47	87	9	12,9	0,77
RZ 03/48	85,5	9,4	12,1	4,67
RZ 03/49	n.a.	n.a.	12,1	1,69
RZ 04/50	n.a.	n.a.	12,3	1,99

Probe	KS 4,5 mmol/l	KB 8,2 mmol/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l	SO ₄ mg/l
RZ 03/1	0,95	-0,34	74	24	17,9	4,79	31,1	58,6	28	1,65	200
TvM 03/2	0,58	0	44	12	14,2	4,22	27,3	35,12	41,4	n.n.	93,4
TnM 03/3	0,75	-0,05	60	14	19,4	4,6	37,7	45,87	35,5	n.n.	139
R0 03/4	1,27	-0,24	93	27	31,9	5,67	42,8	77,41	20,7	n.n.	240
RZ 03/5	1,27	n.a.9	82,6	20,9	18,9	4,68	30,4	77,4	20	n.n.	185
RZ 04/6	1,37	-0,19	79,4	24,8	18,6	4,4	31,7	83,9	17	n.n.	197
R0 04/7	1,73	0,08	115,4	29,2	38,7	5,73	48,2	105,4	11,8	n.n.	280
RZ 04/8	1,53	0,08	72,1	30,2	18,9	4,48	33,3	93,2	15,2	n.n.	211
RZ 04/9	1,59	0,08	77	27,7	19	4,37	33	96,8	14	n.n.	213
RZ 05/10	1,57	0,1	80,2	25,8	18,7	4,51	31,6	96	11,5	n.n.	230
RZ 05/11	1,62	0,2	79,4	27,7	18,2	4,47	28,5	98,9	9,88	n.n.	202
RZ 06/12	1,53	0,12	82,2	24,3	19,1	4,56	32,3	93,2	10,5	n.n.	230
RZ 06/13	1,65	0,36	81,2	25,5	19,4	4,79	33,1	100,3	10,2	n.n.	234
RZ 07/14	1,65	0,26	84	26	19,6	4,66	32,6	100,3	10	n.n.	240
RZ 07/15	1,62	0,25	85	26	19,6	4,92	32,6	98,9	10,2	n.n.	237
RZ 07/16	1,53	0,29	80	26	19,9	5,2	32,9	93,2	11	n.n.	230
RZ 07/17	1,53	-0,48	81	26	19,4	5,74	33,7	94	11,2	n.n.	234
KJS 07/18	1,54	-0,54	81	24	18,3	4,68	30,9	95	11,4	n.n.	226
R0 07/19	1,73	0,14	119	26	38,9	6,37	52	105,4	8,62	0,5	342
RZ 07/20	1,53	0,54	81,8	26,3	19,6	4,94	32,8	93,2	11	n.n.	236
RZ 08/21	1,54	0,33	71,3	24,3	19,9	4,56	36,6	93,9	11	n.n.	240
RZ 08/22	1,67	0,36	76,2	26,3	19,9	4,63	35,8	101,8	9,73	n.n.	237
KJS 08/23	1,65	0,36	85	24,3	19,9	4,48	35,1	100,3	9,48	n.n.	238
RZ 08/24	1,62	0,25	84,2	25,8	20,4	4,45	35,4	98,9	9	0,2	234
RZ 09/25	1,67	0,36	64,1	28	20,4	4,51	36,2	101,8	8,97	n.n.	241
R0 09/26	1,81	0,28	120,2	28,7	42	7,8	57,8	110,4	7,47	n.n.	354
RZ 09/27	1,62	0,38	86,6	26,8	20,3	4,62	37,6	98,9	8,311	n.n.	249
RZ 10/28	1,74	0,4	85	27,2	20,7	4,44	37,5	106,1	7,75	n.n.	245
RZ 10/29	1,86	0	88,2	26,3	20,2	4,4	38,5	113,2	7,39	n.n.	250
RZ 10/30	1,69	0,22	78,6	27,2	19,4	4,59	36,6	103,2	7,14	n.n.	235
RZ 10/31	1,81	0,18	85,8	27,7	20,4	4,4	37,8	110,4	6,85	n.n.	246
RZ 11/32	1,83	0,02	85	24,3	20,2	4,42	37,8	111,8	6,72	n.n.	243
KJS 11/33	20,2	0,25	81,2	28	19,9	4,26	36,1	123,3	6,53	n.n.	241
RZ 11/34	1,83	0	76,2	30,6	20,2	4,36	37,9	111,8	6,29	n.n.	247
RZ 11/35	1,86	0,11	82,2	24,3	20,5	4,45	38,1	113,2	6,27	n.n.	246
R0 12/36	2,02	0,06	115,4	33,1	42,8	5,92	65,9	123,3	6,35	n.n.	369
RZ 12/37	1,92	0	88,2	26,8	20,7	4,35	37,9	116,8	5,8	n.n.	252
RZ 12/38	1,88	0	86,6	29,2	20,3	4,34	38,7	114,7	6,43	n.n.	250
RZ 01/39	1,76	0,06	84,2	26,8	20,6	4,4	38,4	107,5	6,06	n.n.	250
RZ 01/40	1,9	0,08	85	26,3	20	4,22	33,9	116,1	5,83	n.n.	229
RZ 01/41	1,95	1,2	87,4	23,8	19,4	4,18	34,4	119	7,26	n.n.	233
RZ 02/42	1,65	0,13	70,5	26,3	19	4,24	31,7	100,3	13,7	n.n.	218
KJS 02/43	1,5	n.a.	66,1	16,4	15,7	3,92	24,6	93,2	13,7	0,04	162
KT 01/44	0,53	n.a.	23	4,3	8,39	2,27	15,4	32,3	24,9	0,03	44,1
RZ 02/45	1,48	0,13	83,4	23,3	19,6	4,29	33,5	90,3	14,4	n.n.	218
RZ 02/46	1,48	0,13	83,4	23,3	18,7	4,5	32,5	90	18,1	n.n.	205
RZ 03/47	1,53	0,12	74,1	26,3	17,8	4,56	32,6	93,2	17,4	n.n.	204
RZ 03/48	1,01	0,15	68,9	24,3	17,8	4,69	31,9	61,6	24	0,051	198
RZ 03/49	0,94	0,15	71,3	23,8	19,1	4,47	34,8	57,3	27,3	n.n.	208
RZ 04/50	1,32	0,2	76,2	23,3	19,4	4,45	33,4	80,3	19,9	n.n.	214

Probe	Al < 0,45 µm µg/l	As < 0,45 µm µg/l	Cd < 0,45 µm µg/l	Cu < 0,45 µm µg/l	Fe < 0,45 µm µg/l
RZ 03/1	69	n.n.	30	49	76
TvM 03/2	52	n.n.	2	3	n.n.
TnM 03/3	59	n.n.	10	11	62
R0 03/4	53	2	31	27	9
RZ 03/5	54	n.n.	23	31	177
RZ 04/6	54	n.n.	19	25	180
R0 04/7	n.n.	1	30	25	11
RZ 04/8	88	n.n.	19	21	n.n.
RZ 04/9	n.n.	n.n.	25	14	147
RZ 05/10	77	n.n.	26	14	81
RZ 05/11	n.n.	n.n.	26	11	121
RZ 06/12	n.n.	n.n.	26	10	56
RZ 06/13	n.n.	n.n.	26	13	114
RZ 07/14	n.n.	n.n.	28	4	68
RZ 07/15	30	n.n.	25	14	98
RZ 07/16	20	n.n.	26	14	80
RZ 07/17	206	40	29	35	2780
KJS 07/18	34	n.n.	24	16	65
R0 07/19	39	n.n.	36	18	29
RZ 07/20	41	n.n.	26	14	70
RZ 08/21	21	2	23	12	55
RZ 08/22	31	4	23	11	54
KJS 08/23	77	8	21	15	163
RZ 08/24	50	7	21	9	163
RZ 09/25	17	n.n.	23	8	38
R0 09/26	56	2	33	11	13
RZ 09/27	25	n.n.	23	10	61
RZ 10/28	30,2	1,8	14	9,9	72
RZ 10/29	16,1	3,2	21,6	7,7	65
RZ 10/30	18,1	2,6	20,6	8,3	74
RZ 10/31	20,9	3,2	19,8	8,9	93
RZ 11/32	14,2	3,4	18,8	5,8	34
KJS 11/33	18,9	5,9	20,9	10	41
RZ 11/34	45	4,3	20,8	5,9	136
RZ 11/35	18,6	4,4	20,6	9,7	124
R0 12/36	26,4	1,3	20,6	7,1	39
RZ 12/37	15,1	2,8	17,4	4,4	65
RZ 12/38	n.n.	1,4	14,1	3,9	21
RZ 01/39	n.n.	1,4	14,1	3,9	21
RZ 01/40	16,3	3	20	9,2	37
RZ 01/41	20,5	2,47	19,1	9,8	45
RZ 02/42	23	3,43	25,7	9,2	62
KJS 02/43	180	21	32	33	1380
KT 01/44	70	2	0,6	3	59
RZ 02/45	24	1,8	19,6	14,6	99
RZ 02/46	29,5	0,9	24	20,1	58
RZ 03/47	25	2	20	18	44
RZ 03/48	37,8	3,5	27,8	35,2	70
RZ 03/49	39,9	3,3	27,2	30,8	89
RZ 04/50	27	3	29,7	25,6	83

Probe	Mn < 0,45 µm µg/l	Ni < 0,45 µm µg/l	Pb < 0,45 µm µg/l	Zn < 0,45 µm µg/l	U < 0,45 µm µg/l	Tl < 0,45 µm µg/l
RZ 03/1	929	22	3	4261	1	n.n.
TvM 03/2	314	19	2	79	n.n.	n.n.
TnM 03/3	753	20	1	1320	n.n.	n.n.
R0 03/4	1760	n.n.	n.n.	4660	n.a.9	n.a.
RZ 03/5	1009	17	4	4034	1	n.n.
RZ 04/6	980	20	1	3895	1	n.n.
R0 04/7	1950	n.n.	n.n.	4850	n.a.	n.a.
RZ 04/8	866	19	5	3598	2	n.n.
RZ 04/9	1040	28	10	4260	n.a.	n.a.
RZ 05/10	961	11	4	4220	n.a.	n.a.
RZ 05/11	916	16	4	4110	n.a.	n.a.
RZ 06/12	891	14	1	4260	n.a.	n.a.
RZ 06/13	852	14	3	4110	n.a.	n.a.
RZ 07/14	879	12	3	4280	n.a.	n.a.
RZ 07/15	895	17	2	4440	n.a.	n.a.
RZ 07/16	839	16	2	4100	n.a.	n.a.
RZ 07/17	1210	16	55	4380	n.a.	n.a.
KJS 07/18	805	16	5	3950	n.a.	n.a.
R0 07/19	2460	44	36	5180	n.a.	n.a.
RZ 07/20	891	15	3	4220	n.a.	n.a.
RZ 08/21	817	19	3	4440	n.a.	n.a.
RZ 08/22	791	16	2	4310	n.a.	n.a.
KJS 08/23	797	17	11	3350	n.a.	n.a.
RZ 08/24	728	17	4	4270	n.a.	n.a.
RZ 09/25	808	16	2	3160	n.a.	n.a.
R0 09/26	2125	45	3	4560	n.a.	n.a.
RZ 09/27	817	16	3	3750	n.a.	n.a.
RZ 10/28	638	12,2	1,7	2890	n.a.	n.a.
RZ 10/29	830	15,9	0,8	4470	n.a.	n.a.
RZ 10/30	731	15	1,2	3750	n.a.	n.a.
RZ 10/31	795	17	1,3	4150	n.a.	n.a.
RZ 11/32	696	14,9	0,5	3800	n.a.	n.a.
KJS 11/33	702	13,6	1,4	3910	n.a.	n.a.
RZ 11/34	621	16,5	131	3510	n.a.	n.a.
RZ 11/35	723	15,8	6,9	3910	n.a.	n.a.
R0 12/36	1851	39	2	4460	n.a.	n.a.
RZ 12/37	624	13,1	1,2	3570	n.a.	n.a.
RZ 12/38	400	21	n.n.	3730	n.a.	n.a.
RZ 01/39	400	11	n.n.	3730	n.a.	n.a.
RZ 01/40	605	16,8	5	3880	n.a.	n.a.
RZ 01/41	551	13,5	2,46	3310	n.a.	n.a.
RZ 02/42	607	15,5	1,62	3890	n.a.	n.a.
KJS 02/43	1,07	n.n.	n.n.	5360	n.a.	n.a.
KT 01/44	32	7	1	37	n.a.	n.a.
RZ 02/45	611	15,2	2,29	3310	n.a.	n.a.
RZ 02/46	650	14,4	1,99	3740	n.a.	n.a.
RZ 03/47	450	16	2	2240	n.a.	n.a.
RZ 03/48	759	16,8	3,2	4360	n.a.	n.a.
RZ 03/49	857	17,5	4,9	4590	n.a.	n.a.
RZ 04/50	1000	19,4	2,5	5940	n.a.	n.a.

Probe	Al gesamt µg/l	As gesamt µg/l	Cd gesamt µg/l	Cu gesamt µg/l	Fe gesamt µg/l
RZ 03/1	300	31	29	68	2029
TvM 03/2	1161	7	2	4	406
TnM 03/3	1007	32	11	40	2477
R0 03/4	747	101	31	131	8460
RZ 03/5	153	10	25	36	869
RZ 04/6	111	10	21	28	641
R0 04/7	240	6	33	37	613
RZ 04/8	93	5	21	26	635
RZ 04/9	80	n.n.	24	17	591
RZ 05/10	84	n.n.	26	16	605
RZ 05/11	83	n.n.	26	15	631
RZ 06/12	71	10	23	12	513
RZ 06/13	75	n.n.	27	16	509
RZ 07/14	104	902	54	16	601
RZ 07/15	103	10	25	20	796
RZ 07/16	85	9	26	21	590
RZ 07/17	585	61	34	52	2910
KJS 07/18	81	6	26	18	376
R0 07/19	262	13	37	42	766
RZ 07/20	96	10	26	18	629
RZ 08/21	65	7	19	19	449
RZ 08/22	89	7	22	17	504
KJS 08/23	155	10	27	20	351
RZ 08/24	1607	197	65	343	22700
RZ 09/25	78	12	24	14	640
R0 09/26	239	12	31	29	787
RZ 09/27	75	10	23	16	573
RZ 10/28	57,6	8,5	21,3	10,7	544
RZ 10/29	56,9	10	20,3	15,7	558
RZ 10/30	89	14,5	22	17	842
RZ 10/31	53	10	21,7	15	494
RZ 11/32	71,3	12	23	18,8	564
KJS 11/33	31	7,8	20	14	341
RZ 11/34	276	113	27,2	52,3	6930
RZ 11/35	52,3	14	22,3	11,8	854
R0 12/36	185,3	13	23,8	17,6	853
RZ 12/37	40	8	21	12	574
RZ 12/38	25	8	22	12	491
RZ 01/39	25	8	22	12	491
RZ 01/40	48,5	11,4	19,5	9,88	610
RZ 01/41	60,8	11,7	21	11,8	722
RZ 02/42	95,5	13,3	26,1	47	864
KJS 02/43	178	10,4	36	45,2	1740
KT 01/44	141	2,4	n.n.	2	155
RZ 02/45	79	12,7	18,9	20,6	532
RZ 02/46	82,4	9,58	23,4	24,7	626
RZ 03/47	73	8,8	24,4	25,8	521
RZ 03/48	192	23	25,1	51,4	1430
RZ 03/49	149	11	30,8	43,4	664
RZ 04/50	103	8,2	28,7	28,3	519

Probe	Mn gesamt µg/l	Ni gesamt µg/l	Pb gesamt µg/l	Zn gesamt µg/l	U gesamt µg/l	Tl gesamt µg/l
RZ 03/1	1106	17	37	4408	2	n.n.
TvM 03/2	366	11	8	91	n.n.	n.n.
TnM 03/3	1079	21	37	1435	n.n.	n.n.
R0 03/4	2340	n.n.	93	4990	n.a.	n.a.
RZ 03/5	1003	17	24	3988	1	n.n.
RZ 04/6	951	18	17	3729	2	n.n.
R0 04/7	2180	n.n.	n.n.	5160	n.a.	n.a.
RZ 04/8	907	15	15	3621	2	n.n.
RZ 04/9	1050	11	15	4190	2	n.n.
RZ 05/10	982	9	17	4200	n.a.	n.a.
RZ 05/11	943	15	19	4130	n.a.	n.a.
RZ 06/12	921	19	14	4300	n.a.	n.a.
RZ 06/13	889	13	18	4060	n.a.	n.a.
RZ 07/14	902	27	42	4300	n.a.	n.a.
RZ 07/15	931	16	28	4530	n.a.	n.a.
RZ 07/16	832	16	23	4030	n.a.	n.a.
RZ 07/17	1430	52	90	4780	n.a.	n.a.
KJS 07/18	814	14	22	3865	n.a.	n.a.
R0 07/19	2420	45	40	5170	n.a.	n.a.
RZ 07/20	899	18	24	4190	n.a.	n.a.
RZ 08/21	669	15	3	3710	n.a.	n.a.
RZ 08/22	824	17	15	4440	n.a.	n.a.
KJS 08/23	996	18	15	4270	n.a.	n.a.
RZ 08/24	1924	56	234	8150	n.a.	n.a.
RZ 09/25	853	17	17	4200	n.a.	n.a.
R0 09/26	2162	45	32	4560	n.a.	n.a.
RZ 09/27	868	18	17	4290	n.a.	n.a.
RZ 10/28	806	14,5	9,7	4170	n.a.	n.a.
RZ 10/29	778	17	9,9	4340	n.a.	n.a.
RZ 10/30	893	15	23	4910	n.a.	n.a.
RZ 10/31	809	16,6	8,6	4230	n.a.	n.a.
RZ 11/32	883	21,9	10,8	3970	n.a.	n.a.
KJS 11/33	749	13	10,7	3830	n.a.	n.a.
RZ 11/34	859	16,9	48,7	4600	n.a.	n.a.
RZ 11/35	762	17,3	10,4	3940	n.a.	n.a.
R0 12/36	1846	42,5	21,9	4430	n.a.	n.a.
RZ 12/37	726	14	13	3670	n.a.	n.a.
RZ 12/38	705	13	15	3810	n.a.	n.a.
RZ 01/39	705	13	10	3810	n.a.	n.a.
RZ 01/40	592	13,2	10,3	3850	n.a.	n.a.
RZ 01/41	563	14,6	11,3	3580	n.a.	n.a.
RZ 02/42	634	16	18,3	3790	n.a.	n.a.
KJS 02/43	895	15	32	7250	n.a.	n.a.
KT 01/44	39	2	2,3	83,9	n.a.	n.a.
RZ 02/45	623	13,3	14,4	3380	n.a.	n.a.
RZ 02/46	643	14,9	16,6	3640	n.a.	n.a.
RZ 03/47	709	16,4	15,4	4980	n.a.	n.a.
RZ 03/48	794	16,5	34,5	4080	n.a.	n.a.
RZ 03/49	938	15,1	26,9	5720	n.a.	n.a.
RZ 04/50	1040	17,1	16,8	5960	n.a.	n.a.

Probe	Datum	Lokalität	Durchfluß l/min	pH Wert Feld	EH Wert mV
TFE00	25.08.99	Einlauf	100	3,37	747
TFE01	26.08.99	Einlauf	n.a.	3,31	758
TFU01	26.08.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,36	765
TFM01	26.08.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,38	765
TFO01	26.08.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,34	767
TFE 02	27.08.99	Einlauf	n.a.	3,4	759
TFE 02	27.08.99	Einlauf	n.a.	3,32	728
TFA 02	27.08.99	Auslauf	n.a.	3,32	760
TFA 02/2	27.08.99	Auslauf	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	27.08.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	757
TFM 02	27.08.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,4	728
TFO 02	27.08.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	772
TFE 02	31.08.99	Einlauf	n.a.	3,32	758
TFA 031	31.08.99	Auslauf	6	3,32	755
TFU 03	31.08.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,33	742
TFM 03	31.08.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,33	752
TFO 03	31.08.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,32	759
TFE 04	03.09.99	Einlauf	n.a.	3,4	750
TFA 04	03.09.99	Auslauf	n.a.	3,31	764
TFU 04	03.09.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,35	751
TFM 04	03.09.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,36	754
TFO 04	03.09.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	750
TFA 05	08.09.99	Auslauf	12	3,32	770
TFA 05/2	08.09.99	Auslauf	40	3,35	771
TFE 06	14.09.99	Einlauf	n.a.	3,37	756
TFA 06	14.09.99	Auslauf	60	3,33	771
TFA 06/2	14.09.99	Auslauf	n.a.	3,33	772
TFU 06	14.09.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,34	768
TFM 06	14.09.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,33	754
TFO 06	14.09.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,33	767
TFE 07	17.09.99	Einlauf	n.a.	3,38	754
TFA 07	17.09.99	Auslauf	60	3,32	781
TFA 07/2	17.09.99	Auslauf	n.a.	3,33	772
TFU 07	17.09.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,36	766
TFM 07	17.09.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,39	755
TFO 07	17.09.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,34	761
TFE 08	24.09.99	Einlauf	n.a.	3,33	748
TFA 08	24.09.99	Auslauf	60	3,3	777
TFU 08	24.09.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,31	770
TFM 08	24.09.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,31	769
TFO 08	24.09.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,28	748
TFA 08/2	24.09.99	Auslauf	n.a.	3,28	748
TFA 09	01.10.99	Auslauf (Abläss)	n.a.	3,29	775
TFA 10	01.10.99	Auslauf (Abläss)	n.a.	3,33	778
TFU 10	01.10.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,31	769
TFM 10	01.10.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,3	776
TFA 11	12.11.99	Auslauf	60	3,18	772
TFE 11	12.11.99	Einlauf	n.a.	3,3	739
TFU 11	12.11.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,17	773
TFM 11	12.11.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,17	763
TFO 11	12.11.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,22	755
TFE 12	26.11.99	Einlauf	n.a.	3,14	806
TFA 12	26.11.99	Auslauf	75	3,01	813
TFU 12	26.11.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,07	799
TFM 12	26.11.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,05	804
TFO 12	26.11.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,06	809
TFE 13	10.12.99	Einlauf	n.a.	3,38	745

Probe	Datum	Lokalität	Durchfluß l/min	pH Wert Feld	EH Wert mV
TFA 13	10.12.99	Auslauf	n.a.	3,23	772
TFU 13	10.12.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,22	755
TFM 13	10.12.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,14	770
TFO 13	10.12.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,15	776
TFE 14	17.12.99	Einlauf	n.a.	3,32	756
TFA 14	17.12.99	Auslauf	39	3,19	766
TFU 14	17.12.99	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,24	771
TFM 14	17.12.99	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,23	763
TFO 14	17.12.99	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,24	766
TFE 15	07.01.00	Einlauf	n.a.	3,49	763
TFA 15	07.01.00	Auslauf	40	3,34	778
TFO 15	07.01.00	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	773
TFM 15	07.01.00	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	775
TFU 15	07.01.00	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	775
TFE 16	21.01.00	Einlauf	n.a.	3,43	752
TFA 16	21.01.00	Auslauf	n.a.	3,34	764
TFU 16	21.01.00	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,35	766
TFM 16	21.01.00	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,35	766
TFO 16	21.01.00	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,33	777
TFA 17	25.01.00	Auslauf	60	3,37	758
TFE 17	25.01.00	Einlauf	n.a.	3,39	748
TFU 17	25.01.00	unterer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	771
TFA 17/2	25.01.00	Abläss währenddessen	n.a.	3,29	788
TFM 17	25.01.00	mittlerer Probenahmestutzen	n.a.	3,37	768
TFO 17	25.01.00	oberer Probenahmestutzen	n.a.	3,35	761

Probe	Leitfähigkeit μS/cm	O2 Sättigung %	O2 Konzentration mg/l	Temperatur °C	Schwebmenge mg/l
TFE00	351	112	12,1	11,8	n.a.
TFE01	1199	98	10,4	11,6	6,06
TFU01	1215	97	10,2	11,9	23
TFM01	1212	98	10,4	11,9	17,12
TFO01	1231	97	10,3	12,1	13,14
TFE 02	1261	97,7	9,92	13,2	n.a.
TFE 02	1276	98	9,94	13,9	n.a.
TFA 02	1221	99,1	10,42	12	n.a.
TFA 02/2	1382	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	1192	98,2	10,4	11,8	n.a.
TFM 02	1193	92	9,7	11,8	n.a.
TFO 02	1204	96,7	10,2	12	n.a.
TFE 02	1219	79	8,4	110,6	n.a.
TFA 031	1652	100	10,4	12,9	18,18
TFU 03	1212	76	8,1	11,8	n.a.
TFM 03	1214	72	7,6	11,8	n.a.
TFO 03	1214	79	8,4	11,8	n.a.
TFE 04	1206	87,8	9,5	11,6	n.a.
TFA 04	1259	90,5	9,6	12,4	119,23
TFU 04	1221	80,7	8,67	11,6	n.a.
TFM 04	1227	78	8,33	11,8	n.a.
TFO 04	1225	85	9	11,9	n.a.
TFA 05	1783	99	10,3	12,3	70,05
TFA 05/2	1293	100	10,3	13,4	15,92
TFE 06	1244	87,6	9,92	11,6	7,14
TFA 06	1269	81	8,5	12,1	19,7
TFA 06/2	1292	82	8,52	12,6	n.a.
TFU 06	1257	88	9,31	11,6	n.a.
TFM 06	1255	83	8,83	11,6	n.a.
TFO 06	1254	86	9,25	11,6	n.a.
TFE 07	1214	75	7,9	11,5	n.a.
TFA 07	1239	75	7,9	11,9	9,97
TFA 07/2	1275	69	7	12,1	10,36
TFU 07	1221	99	10,4	11,6	n.a.
TFM 07	1229	86,5	9,1	11,6	n.a.
TFO 07	1230	91	9,6	11,6	n.a.
TFE 08	1235	79	8,4	11,9	n.a.
TFA 08	1237	79	8,3	11,8	11,33
TFU 08	1227	82	8,7	11,7	n.a.
TFM 08	1228	77	8,3	11,6	n.a.
TFO 08	1236	75	7,9	11,8	n.a.
TFA 08/2	1261	75	8,3	12,4	n.a.
TFA 09	1280	80	8,2	12,8	3,58
TFA 10	1281	70	7,2	12,7	133,78
TFU 10	1285	95	9,6	12,9	n.a.
TFM 10	1290	90	9,1	12,8	n.a.
TFA 11	1772	87,4	9,26	12,4	8,58
TFE 11	1738	78,4	8,45	11,8	n.a.
TFU 11	1786	77,6	8,27	11,9	n.a.
TFM 11	1788	96,2	9,31	11,9	n.a.
TFO 11	1777	80,8	6,83	12	n.a.
TFE 12	1759	n.a.	n.a.	11,8	n.a.
TFA 12	1794	n.a.	n.a.	12,7	7,39
TFU 12	1778	n.a.	n.a.	11,7	n.a.
TFM 12	1787	n.a.	n.a.	11,8	n.a.
TFO 12	1788	n.a.	n.a.	11,9	n.a.
TFE 13	1747	n.a.	n.a.	11,5	n.a.

Probe	Leitfähigkeit μS/cm	O2 Sättigung %	O2 Konzentration mg/l	Temperatur °C	Schwebmenge mg/l
TFA 13	1746	n.a.	n.a.	12,3	20,61
TFU 13	1851	n.a.	n.a.	11,9	n.a.
TFM 13	1824	n.a.	n.a.	11,7	n.a.
TFO 13	1819	n.a.	n.a.	11,8	n.a.
TFE 14	1771	79,6	8,53	11,5	n.a.
TFA 14	1805	77,9	8,12	12,9	8,12
TFU 14	1796	77,3	8,24	11,7	n.a.
TFM 14	1800	79,3	8,47	11,8	n.a.
TFO 14	1798	79,6	8,11	12,1	n.a.
TFE 15	1730	7,16	66,2	11,3	n.a.
TFA 15	1777	6,8	64,4	12,1	38,95
TFO 15	1769	7,61	71,3	11,5	n.a.
TFM 15	1771	6,85	63,6	11,5	n.a.
TFU 15	1771	7,49	69,2	11,6	n.a.
TFE 16	627	81,8	8,68	11,5	n.a.
TFA 16	1670	84,1	8,81	11,8	10,66
TFU 16	1673	80,6	8,55	11,5	n.a.
TFM 16	1678	80,0	8,49	11,6	n.a.
TFO 16	1678	80,6	8,53	11,4	n.a.
TFA 17	1633	n.n.	n.n.	12	24,79
TFE 17	1632	94	9,9	12,2	9,65
TFU 17	1648	70	7,4	11,5	n.a.
TFA 17/2	1690	63	6,7	11,6	300,58
TFM 17	1640	83	8,9	11,5	n.a.
TFO 17	1648	86	9	11,5	n.a.

Probe	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO3 mg/l	NO3 mg/l	NO2 mg/l	SO4 mg/l
TFE00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE01	144	63,2	15,6	4,78	24,7	0	6,25	n.n.	900,9
TFU01	154	66,4	16,6	4,71	24,1	0	5,52	n.n.	904,8
TFM01	156	67,7	15,7	4,71	24,5	0	5,73	n.n.	917,8
TFO01	160	67,9	16,1	4,31	24,4	0	5,82	n.n.	910,2
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 031	150	66,8	16,2	4,36	25,3	0	7,34	n.n.	888,9
TFU 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 04	149	66,9	16,7	3,8	23,7	0	6,08	n.n.	899,9
TFU 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 05	154	69,2	15,6	3,89	25,1	0	5,33	n.n.	914,7
TFA 05/2	150	68,4	16,5	4,85	25,3	0	5,23	n.n.	920,6
TFE 06	179	71,1	15,7	3,78	25,3	0	4,47	0,09	935,6
TFA 06	164	70,2	16,4	4,83	25,6	0	5,3	n.n.	932,4
TFA 06/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 07	157	69,8	16,2	4,07	28,7	0	18,3	n.n.	946,7
TFA 07/2	158	71,3	17	4,14	25,8	0	5,13	0,11	960,2
TFU 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08	153	71	16,1	7,72	29,3	0	4,71	n.n.	956,9
TFU 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 09	154	72,4	16	3,93	25,9	0	6,36	n.n.	910
TFA 10	154	73,9	17,1	6,5	28,2	0	6,15	n.n.	921
TFU 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 11	157	77,9	15,6	3,55	26,9	0	5,43	n.n.	972
TFE 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 12	162	77,8	15,4	3,45	26,9	0	5,58	n.n.	979
TFU 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO3 mg/l	NO3 mg/l	NO2 mg/l	SO4 mg/l
TFA 13	163	78,5	15,6	3,54	27,1	0	4,78	n.n.	947
TFU 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 14	167	78,8	15,8	3,34	27,8	0	4,18	n.n.	1010
TFU 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 15	163	76,9	15,8	3,29	27,6	0	3,93	n.n.	987
TFO 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 16	155	71,5	15,7	3,41	27,3	0	5,29	n.n.	898
TFU 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17	152	69,1	15,3	3,73	25,8	0	6,98	n.n.	870
TFE 17	150	67,9	15,5	3,47	25,7	0	7,37	n.n.	874
TFU 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17/2	155	69,8	15,2	3,2	25,5	0	8,44	n.n.	869
TFM 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Al < 0,45 µm µg/l	As < 0,45 µm µg/l	Cd < 0,45 µm µg/l	Cu < 0,45 µm µg/l	Fe < 0,45 µm µg/l
TFE00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE01	19500	196	492	841	17900
TFU01	17900	63	493	808	12800
TFM01	18500	59	482	798	13100
TFO01	17700	46	479	808	11800
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 031	18200	55	474	922	12700
TFU 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 04	18100	39	467	849	11300
TFU 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 05	17800	33	449	778	9510
TFA 05/2	18700	34	482	829	10500
TFE 06	18300	182	500	803	16000
TFA 06	19300	40	505	847	12700
TFA 06/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 07	19000	40	506	825	12400
TFA 07/2	19900	41	518	884	12700
TFU 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08	19800	38	517	839	12200
TFU 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 09	18700	10	487	891	6880
TFA 10	18100	7	488	866	4440
TFU 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 11	13600	30	500	610	7230
TFE 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 12	15900	28	506	738	9060
TFU 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Al < 0,45 µm µg/l	As < 0,45 µm µg/l	Cd < 0,45 µm µg/l	Cu < 0,45 µm µg/l	Fe < 0,45 µm µg/l
TFA 13	23200	27	485	1050	10600
TFU 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 14	16300	25	500	777	9020
TFU 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 15	17200	48	484	736	10000
TFO 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 16	7250	37	452	392	5150
TFU 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17	16100	30	450	775	10900
TFE 17	15800	103	429	777	15000
TFU 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17/2	16000	20	428	728	7260
TFM 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Mn < 0,45 µm µg/l	Ni < 0,45 µm µg/l	Pb < 0,45 µm µg/l	Zn < 0,45 µm µg/l
TFE00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE01	25300	164	138	73100
TFU01	23700	164	152	69100
TFM01	24500	160	143	74200
TFO01	23800	163	178	69600
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 031	24300	177	126	69800
TFU 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 04	23700	159	114	69400
TFU 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 05	23500	147	117	67600
TFA 05/2	24900	155	126	71500
TFE 06	24300	163	117	70000
TFA 06	26600	160	126	76500
TFA 06/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 07	26000	164	126	73500
TFA 07/2	26800	175	128	77300
TFU 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08	26500	172	131	75900
TFU 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 09	26100	188	124	67300
TFA 10	25000	194	144	64700
TFU 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 11	21300	194	115	53900
TFE 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 12	24700	190	129	60600
TFU 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Mn < 0,45 µm µg/l	Ni < 0,45 µm µg/l	Pb < 0,45 µm µg/l	Zn < 0,45 µm µg/l
TFA 13	33900	212	379	86000
TFU 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 14	25400	220	114	64400
TFU 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 15	27400	193	123	70400
TFO 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 16	29800	185	106	29800
TFU 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17	24400	181	97	60600
TFE 17	24800	159	102	61700
TFU 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17/2	23900	184	114	60100
TFM 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Al gesamt µg/l	As gesamt µg/l	Cd gesamt µg/l	Cu gesamt µg/l	Fe gesamt µg/l
TFE00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE01	18300	266	496	857	18400
TFU01	18800	364	489	881	20200
TFM01	18100	278	489	823	17400
TFO01	18100	209	479	804	16100
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 031	18400	243	381	718	11700
TFU 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 04	19100	1436	478	859	63500
TFU 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 05	19000	762	487	853	39500
TFA 05/2	18700	205	485	844	16300
TFE 06	18800	262	519	807	19500
TFA 06	18900	261	491	805	20000
TFA 06/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 07	19500	184	513	828	16800
TFA 07/2	19000	162	517	839	16000
TFU 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08	18900	168	512	806	16100
TFU 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 09	14200	32	459	721	6270
TFA 10	19100	2200	488	911	79600
TFU 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 11	18500	124	492	835	13300
TFE 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 12	18400	131	522	875	13500
TFU 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Al gesamt µg/l	As gesamt µg/l	Cd gesamt µg/l	Cu gesamt µg/l	Fe gesamt µg/l
TFA 13	19800	139	482	880	15600
TFU 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 14	16000	116	508	725	11900
TFU 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 15	17200	344	485	795	29300
TFO 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 16	8230	158	456	428	8050
TFU 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17	15800	357	433	786	21400
TFE 17	15700	203	434	767	17700
TFU 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17/2	16800	3280	433	804	142000
TFM 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Mn gesamt µg/l	Ni gesamt µg/l	Pb gesamt µg/l	Zn gesamt µg/l
TFE00	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE01	24100	165	132	68400
TFU01	24300	162	185	70500
TFM01	24000	163	159	72900
TFO01	24200	160	184	70400
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 02/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 031	24800	138	105	69300
TFU 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 04	25500	163	155	71500
TFU 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 05	24900	161	153	71200
TFA 05/2	24300	156	141	71900
TFE 06	25300	169	130	72500
TFA 06	25600	157	128	74300
TFA 06/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 07	26100	164	129	75100
TFA 07/2	25600	180	132	73500
TFU 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08	25500	171	136	73800
TFU 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 08/2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 09	21100	178	130	54200
TFA 10	27000	195	244	67100
TFU 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 11	28100	215	118	70800
TFE 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 12	28100	178	127	70700
TFU 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 12	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Probe	Mn gesamt µg/l	Ni gesamt µg/l	Pb gesamt µg/l	Zn gesamt µg/l
TFA 13	28700	447	198	73900
TFU 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 13	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 14	25400	213	122	63200
TFU 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 15	29400	202	143	72000
TFO 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFU 15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFE 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 16	13800	186	112	34100
TFU 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFM 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17	24600	174	101	61600
TFE 17	23800	190	110	60000
TFU 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFA 17/2	24400	163	240	59800
TFM 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TFO 17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.