



**Staatliches
Umweltfachamt**

Praktikumsarbeit



**Die Schwermetallbelastung der Freiburger Mulde im
Abschnitt Muldenhütten - Obergruna unter Bezug-
nahme auf das Altlastenprojekt SAXONIA**

Jan Kunau

Dank

Bei allen Mitarbeitern des Staatlichen Umweltfachamtes Chemnitz möchte ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung während meines Praktikums bedanken.

Insbesondere danke ich:

- Herrn Schubert für zahlreiche Ideen und Hinweise, die für eine umfassende Bearbeitung des Themas hilfreich waren, ebenso wie für sein stetiges Interesse an neuen Erkenntnissen.
- Frau Hübner und Herrn Kauk für ihre Beratung und Unterstützung bei der Erhebung und Auswertung biologischer Beschaffenheitsdaten sowie während der Biotabeprobung in der Freiburger Mulde. Außerdem danke ich Frau Hübner für die umfassende Erarbeitung des Kapitels 4.4.
- Herrn Eckstein für seine Anregungen und Kritiken aus Sicht des Geologen sowie für seine Detailkenntnis bezüglich des Freiburger Bergbaues.
- Herrn Weiß für die technische Unterstützung bei den Probenahmen am Gewässer.
- Herrn Volkmer für seine Ausdauer bei der statistischen Auswertung von Messwerten.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei:

- den Mitarbeitern der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft des Freistaates Sachsen in den Labors Chemnitz und Neusörnewitz für die Bereitstellung von Analysen- und Transportkapazität für Biotaprobieren ebenso wie für deren zügige Bearbeitung.
- Herrn Beger von der Revierwasserlaufanstalt für sein freundliches Entgegenkommen bei der Abflussregulierung im Roten Graben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank denen, die hier namentlich nicht genannt worden sind, die aber dennoch mit ihrer Erfahrung und ihrem Wissen einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Anlagenverzeichnis	7
1 Einleitung	10
2 Beschreibung des Untersuchungsgebietes	11
2.1 Naturraum und Geologie	11
2.2 Hydrogeologie im Einzugsgebiet der Freiburger Mulde und ihrer Zuflüsse	12
2.3 Siedlungs- und Industriestruktur	13
2.4 Sächsisches Landesmessnetz (UBG)	14
3 Altlastenprojekt SAXONIA	16
3.1 Altlastensituation vor Sanierungsbeginn	17
3.1.1 Allgemeine Erkenntnisse	17
3.1.2 Standort Muldenhütten	19
3.1.3 Hütte Freiberg	24
3.1.4 Standort Halsbrücke	27
3.1.5 Sonstige Liegenschaften	32
3.1.6 Schlussfolgerungen	33
3.2 Sanierungsziele und Maßnahmen zu deren Umsetzung	35
3.3 SAXONIA-Monitoring	42
4 Sanierungsphase 1994 bis 2003	44
4.1 Ausgangssituation der Freiburger Mulde 1994	44
4.2 Realisierte Sanierungsziele und Maßnahmen	45
4.3 Auswirkungen auf den Chemismus der Freiburger Mulde	46
4.3.1 Methodik der Datenauswertung	46
4.3.2 Ergebnisse der Analysenauswertung Wasser	48

4.3.3	Ergebnisse der Analysenauswertung Sediment	54
4.4	Auswirkungen auf den biologischen Zustand der Freiburger Mulde	57
4.4.1.	Makrozoobenthos	58
4.4.2	Untersuchungen zu Bestand und Schwermetallrückständen in Fischen	62
4.5	Eigene Untersuchungen	72
4.5.1	Moosuntersuchungen	72
4.5.2	Wasserbeprobungen	76
4.6	Schlussfolgerungen	79
5	Prognose der Entwicklung bis 2008	86
5.1	Verbleibende Sanierungsziele und sonstige Planungen	86
5.1.1	Altlastenprojekt SAXONIA	86
5.1.2	Münzbachentflechtung	88
5.2	Veränderungen im Chemismus der Freiburger Mulde	89
5.3	Veränderungen des biologischen Zustandes der Freiburger Mulde	91
6	Bewertung des Altlastenprojektes SAXONIA	91
6.1	Wirksamkeit der Sanierungsmaßnahmen	91
6.2	Zukünftiger Handlungsbedarf	91
7	Überregionale Auswirkungen des Zustandes der Freiburger Mulde	92
8	Zusammenfassung	96
	Literaturverzeichnis	99
	Linkliste	104
	Anlagen	

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1	15
Übersichtskarte UBG - Messstellen zwischen Muldenhütten und Siebenlehn	
Abbildung 2	19
Freiberger Mulde in Muldenhütten mit Schlackehalden und Hausmülldeponie Freiberg	
Abbildung 3	21
Betriebsgraben und Rauchgaskanal Muldenhütten	
Abbildung 4	22
Mundloch der Hüttenrösche Muldenhütten	
Abbildung 5	28
Blick von der Pochwerkshalde über den Hüttenkomplex Halsbrücke	
Abbildung 6	31
Betriebsgraben und Rauchgaskanal der Hütte Halsbrücke	
Abbildung 7	60
Makrozoobenthos in der Freiburger Mulde, Untersuchung 2001	
Abbildung 8	60
Makrozoobenthos in der Freiburger Mulde, Untersuchung 2002	
Abbildung 9	62
Individuen- und Artenzahlen in der Freiburger Mulde	
Abbildung 10	63
Fischbestand im Jahr 1999 in der Freiburger Mulde	
Abbildung 11	64
Fischbestand im Jahr 2000 in der Freiburger Mulde	
Abbildung 12	66
Cadmiumgehalte in der Leber gefangener Fische	
Abbildung 13	67
Cadmiumgehalte in der Leber gefangener Fische	
Abbildung 14	68
Zinkgehalte in der Leber gefangener Fische	
Abbildung 15	70
Bleigehalte in der Leber gefangener Fische	
Abbildung 16	71
Arsengehalte in der Leber gefangener Fische	
Abbildung 17	77
Probenahmegerät am Mundloch KVGS	
Abbildung 18	77
Apparatur für die Vor - Ort - Filtration	
Abbildung 19	78
Analysenergebnis Blei	
Abbildung 20	78
Analysenergebnis Cadmium	
Abbildung 21	78
Analysenergebnis Kupfer	
Abbildung 22	78
Analysenergebnis Zink	
Abbildung 23	78
Analysenergebnis Arsen	

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tabelle 1	Maßnahmenvorschläge SAXONIA - Liegenschaften	34
Tabelle 2	Zeitplanung Sanierungsvorhaben SAXONIA	39
Tabelle 3	Abgeschlossene Sanierungen SAXONIA - Altlastenprojekt	45
Tabelle 4	Mediane 1995 bis 2002 von Konzentrationen und Frachten	53
Tabelle 5	Maßnahme - Zeit - Plan 2004	86
Tabelle 6	Durchflusskenndaten	94
Tabelle 7	Konzentrationen und Frachten	95

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 - Konzentrationsentwicklung in der Freiburger Mulde

- Anlage 1.1: zeitlicher und räumlicher Verlauf der Gelöstkonzentrationen
- Anlage 1.2: zeitlicher und räumlicher Verlauf der Gesamtkonzentrationen
- Anlage 1.3: zeitliche Entwicklung der Gelöstkonzentrationen
- Anlage 1.4: zeitliche Entwicklung der Gesamtkonzentrationen
- Anlage 1.5: räumliche Entwicklung der Gelöstkonzentrationen
- Anlage 1.6: räumliche Entwicklung der Gesamtkonzentrationen

Anlage 2 - Konzentrationsentwicklung im Münzbach

Anlage 3 - Frachtentwicklung in der Freiburger Mulde

- Anlage 3.1: zeitlicher und räumlicher Verlauf der Frachten aus Gelöstkonzentrationen
- Anlage 3.2: zeitlicher und räumlicher Verlauf der Frachten aus Gesamtkonzentrationen
- Anlage 3.3: zeitliche Entwicklung der Frachten aus Gelöstkonzentrationen
- Anlage 3.4: zeitliche Entwicklung der Frachten aus Gesamtkonzentrationen
- Anlage 3.5: räumliche Entwicklung der Frachten aus Gelöstkonzentrationen
- Anlage 3.6: räumliche Entwicklung der Frachten aus Gesamtkonzentrationen

Anlage 4 - Frachtentwicklung im Münzbach

Anlage 5 - Sedimentgehalte in der Freiburger Mulde und in wesentlichen Zuflüssen

- Anlage 5.1: zeitliche Entwicklung der Sedimentgehalte in der Freiburger Mulde
- Anlage 5.2: zeitliche Entwicklung der Sedimentgehalte in den Zuflüssen der Freiburger Mulde
- Anlage 5.3: Sedimentgehalte der Freiburger Mulde und ihrer Nebenflüsse im Längsprofil

Anlage 6 - Kartendarstellung relevanter Elemente 1993 / 1996

Anlage 7 - Kartendarstellung relevanter Elemente 1995 bis 2002

Anlage 8 - Grafische Darstellung der Frachteinträge bezogen auf das Untersuchungsgebiet

Anlage 9 - Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes

Anlage 10 - Probenahmestellen Biotabeprobung

Anlage 11 - Analysenergebnisse Biotabeprobung

Anlage 11.1: Tabelle Analysenergebnisse

Anlage 11.2: Diagramm Analysenergebnisse autochtone Moose

Anlage 11.3: Diagramm Analysenergebnisse exponierte Moose

Anlage 11.4: Diagramm Analysenergebnisse autochtoner Hahnenfuß

Anlage 12 - Ergebnisprotokoll "Betriebsgraben Muldenhütten"

Anlage 13 - Ergebnisprotokolle "Roter Graben 2003"

Anlage 13.1: Analysenergebnisse der Beprobung am 27. November 2003

Anlage 13.2: Analysenergebnisse der Beprobung am 4. Dezember 2003

Anlage 13.3: Analysenergebnisse der Beprobung am 11. Dezember 2003

Anlage 13.4: Analysenergebnisse der Beprobung am 18. Dezember 2003

Anlage 14 - Erzgänge im Zentralteil des Freiburger Reviers

Anlage 15 - Die Stolln des Freiburger Erzbergbaus

Anlage 16 - Die Kunstgräben der Revierwasserlaufanstalt

Anlage 17 - Standorte historischer Freiburger Hütten

Anlage 18 - Bergbau im Gebiet um Zug

Anlage 19 - Bergmännische Wasserwirtschaftsanlagen im Freiburger Revier

Anlage 20 - Bergbau im Gebiet um Halsbrücke

Anlage 21 - Bergbau um Obergruna

Anlage 22 - Aufschlagwasserversorgung der Grube Churprinz

Anlage 23 - Grubenfeld und Erzgänge der Himmelfahrt Fundgrube

Anlage 24 - SAXONIA Freiberg

Anlage 25 - SAXONIA Muldenhütten

Anlage 26 - SAXONIA Halsbrücke und Münzbachtal

Anlage 27 - SAXONIA Freiberg, Haldenstandorte

1 Einleitung

Aufgrund seiner geologischen Struktur verfügte das Einzugsgebiet der Freiburger Mulde über eine große Anzahl abbauwürdiger Erzvorkommen. Bereits im 12. Jahrhundert wurde ausgehend von der Region um Freiberg mit dem Silbererzbergbau im Erzgebirge begonnen. In der Folge siedelten sich zahlreiche Hüttenbetriebe und weitere Industriezweige in der Nachbarschaft der Bergwerke an. Mit dem Niedergang des Silbererzbergbaus am Anfang des 20. Jahrhunderts gewann die Verhüttung von Zink- und Zinnerzen sowie von Recyclingmaterial zunehmend an Bedeutung. Nach der Stilllegung des Freiburger Bergbaus 1969 wurden die Hütten Freiberg, Halsbrücke und Muldenhütten als Standorte der metallurgischen Industrie auf Basis von Importerzen weiter ausgebaut [1].

Durch die intensive bergbauliche Nutzung und die große Palette der metallurgischen Produktion gelangte über die Jahrhunderte eine Vielzahl von Schadstoffen und Abprodukten in die Umwelt. Neben der produktionsbedingten Belastung der Bergwerks- und Hüttenstandorte wurden vor allem im Bereich der Haldenkomplexe verschiedene Kontaminanten angereichert. Heutzutage gelten diese Flächen als Hauptemittenten der anthropogenen Schwermetall- und Arsenbelastung im Einzugsgebiet der Freiburger Mulde.

Die Aufgabe der SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH besteht nunmehr darin, im Rahmen des Altlastenprojektes die Schadstoffemissionen von Altstandorten und Altablagerungen durch objektbezogene Sanierungsmaßnahmen zu reduzieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Belastungszustandes der Freiburger Mulde im Abschnitt zwischen Muldenhütten und Obergruna und den Einflüssen des Altbergbaues bzw. der Sanierungstätigkeiten im Altlastenprojekt SAXONIA gewonnen werden. Dazu wurden die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen im Zeitraum von 1994 bis 2002 gesichtet, zusammengestellt und ausgewertet. Außerdem wird ausgehend vom aktuellen Zustand der Freiburger Mulde die Beschaffenheitsentwicklung bis zum vorläufigen Ende des Altlastenprojektes SAXONIA in den Jahren 2007 bzw. 2008 abgeschätzt.

2 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

2.1 Naturraum und Geologie

Die Freiburger Mulde entspringt im Osterzgebirge, in den Hochmoor- und Waldgebieten der Kammregion des Erzgebirges. Von Moldava aus bildet sie zunächst im tschechisch-deutschen Grenzgebiet das Grenzgewässer zwischen der tschechischen Republik und dem Weisseritzkreis. Östlich von Holzhausen erreicht die Freiburger Mulde den Landkreis Freiberg, den sie von Süden nach Norden durchquert und in der Nähe von Siebenlehn wieder verlässt. Anschließend fließt sie westlich der Lommatzcher Pflege und passiert dabei die Städte Nossen, Roßwein und Döbeln. Bei Sermuth, am Rand des nordsächsischen Platten- und Hügellandes, vereinigt sich die Freiburger Mulde mit der Zwickauer Mulde zur Vereinigten Mulde [2].

Der untersuchte Gewässerabschnitt erstreckt sich von der Bahnbrücke in Muldenhütten, ca. 3 km südöstlich von Freiberg gelegen, bis zur Muldenbrücke in Obergruna, die sich ca. 4 km südöstlich von Siebenlehn befindet. Somit liegt das betrachtete Gebiet im unteren Osterzgebirge, einer Teileinheit der sächsischen Mittelgebirgszone. Das gesamte Osterzgebirge ist als schwach wellige, nach Südosten allmählich ansteigende Rumpffläche ausgebildet, in die sich die Freiburger Mulde und ihre Nebengewässer eingegraben haben [3]. Aus ihren Quellgebieten in den Hochmoor- und Waldgebieten der Kammregionen des Erzgebirges fließen die Gewässer in getrennten Tälern bis an den Rand des nordsächsischen Platten- und Hügellandes.

Nach den geologischen Gegebenheiten wird das Untersuchungsgebiet der Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Antiklinalzone zugeordnet. Im Untergrund bestimmen monotone graue Gneise der Freiburger Folge den Aufbau des Festgesteins. Dabei handelt es sich um wechselnd kalifeldspatblastische, schuppig-fließige bzw. mittel- bis grobkörnige Biotit- und Muskovit-Biotit-Gneise [4]. Tonig-schluffige bis grauwackeartige Sedimente, die nach mehreren Metamorphosestadien den heutigen Zustand erreichten, werden als Edukte angenommen [5].

Durch bruchtektonische Überprägungen nach dem Abschluss der variszischen Regionalmetamorphose entstand das Freiburger Gang- und Störungsnetz. Entstandene

Hohlräume wurden anschließend während zweier Hauptvererzungszyklen mit Erzformationen ausgefüllt. Nach dem Abklingen dieser hydrothermalen Bildungsphasen wurden die Vererzungsgesellschaften wechselnden Verwitterungs- und Erosionsprozessen unterworfen. Das führt zur natürlichen Emission mobilisierter Schwermetalle in die Umweltmedien und somit zur anhaltenden Erhöhung der natürlichen Hintergrundkonzentrationen [6].

2.2 Hydrogeologie im Einzugsgebiet der Freiburger Mulde und ihrer Zuflüsse

Sachsen liegt aus meteorologischer Sicht am Rand atlantisch bestimmter Wetterlagen im Übergangsbereich zu kontinentalen Wettereinflüssen. Langjährige Aufzeichnungen weisen für das Einzugsgebiet der Freiburger Mulde in Abhängigkeit von der Höhenlage mittlere Jahresniederschläge von 650 mm/m² im Erzgebirgsvorland bis 1230 mm/m² in den Kammlagen des Erzgebirges aus [7].

Das hydrogeologische System des Erzgebirges wird als Kluft-Grundwasserleiter beschrieben. Während sich in den vorwiegend anstehenden klüftungsfreundlichen Gneisen des Grundgebirges eine mäßige bis mittlere Grundwasserführung eingestellt hat, kann sich in den Lockergesteinen der Deckschichten kein zusammenhängender Grundwasserleiter ausbilden. In den Verwitterungsschichten dominiert also der reliefabhängige hypodermische Abfluss und bewirkt somit eine weitgehende Kongruenz der ober- und unterirdischen Einzugsgebiete [8].

Das gesamte Erzgebirge wird dem Stromgebiet der Elbe zugeordnet. Davon entwässert die Freiburger Mulde eine Fläche von 2981 km² auf einer Länge von 124,0 km [7]. Eine Besonderheit im Einzugsgebiet der Freiburger Mulde ist, dass die bergmännische Erschließung des Freiburger Raumes zur Veränderung des Wasserhaushaltes geführt hat. Bereits seit dem 16. Jahrhundert wurde über Kunstgräben Wasser aus dem Einzugsgebiet der Flöha in den Freiburger Raum geleitet, um Pochwerke und Fahrkünste zu betreiben. Außerdem mussten für die Entwässerung der Stollnsysteme Entwässerungsanlagen eingerichtet werden.

Seit der Stilllegung des Freiburger Bergbaus 1969 ist der Rothschnöberger Stolln der bedeutendste Wasserableitungsstolln für das gesamte Bergbaurevier zwischen Brand-Erbisdorf, Freiberg und Halsbrücke. Als am tiefsten gelegenes System bestimmt dieser Stolln

den Grundwasserspiegel in seinem Einzugsgebiet. Der Rothschönberger Stolln entwässert über die Triebisch in die Elbe.

Weitere Entwässerungssysteme des Freiburger Reviers sind der Königlich-verträgliche Gesellschaft-Stolln und der Hauptstollnumbruch, die über den Roten Graben in die Freiburger Mulde entwässern [9].

2.3 Siedlungs- und Industriestruktur

Der untersuchte Gewässerabschnitt liegt im Landkreis Freiberg. Nach Angaben des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen umfasst dieser eine Fläche von 913,55 km². Am 31. Dezember 2002 lag die Einwohnerzahl bei 149804, das entspricht einem Rückgang seit 1990 um 12252 Personen. Etwas mehr als die Hälfte des Bevölkerungsrückganges entfiel auf die Kreisstadt Freiberg, deren Einwohnerzahl am 31. Dezember 2002 bei 44533 Einwohnern lag. Daraus resultiert aktuell eine Einwohnerdichte von 164 Einwohnern pro km² im Landkreis und von 927 Einwohnern pro km² in Freiberg.

Außer Freiberg sind noch Brand-Erbisdorf, Oederan, Flöha und Eppendorf als Orte mit städtischem Charakter zu nennen. Daneben gibt es eine Vielzahl kleinerer Ortschaften, die sich zumeist in den Tälern der Freiburger Mulde oder ihrer Zuflüsse befinden.

Haupterwerbszweig des überwiegend ländlich geprägten Kreises ist die Landwirtschaft. Nennenswerte Industrieansiedlungen gibt es nur in den größeren Orten entlang der Freiburger Mulde. In der Vergangenheit besaßen der Bergbau und die Metallurgie besondere Bedeutung für die Region.

Der seit 1990 sinkende Arbeitskräftebedarf hat auch im Kreis Freiberg eine hohe Arbeitslosenzahl zur Folge.

2.4 Sächsisches Landesmessnetz (UBG)

Die Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft (UBG) betreibt im Auftrag des Freistaates Sachsen u. a. ein Messnetz zur Erfassung und statistischen Auswertung von Wasserständen und Durchflüssen. Zusätzlich wird auf Anforderungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und der Staatlichen Umweltfachämter ein jährlich aktualisiertes Probenahmeprogramm durchgeführt. Die dabei entnommenen Wasserproben werden in eigenen Labors hinsichtlich der für die Gewässerbeurteilung notwendigen physikalischen, chemischen und biologischen Parameter analysiert.

Im Einzugsgebiet des Untersuchungsgebietes betreibt die UBG in Berthelsdorf einen Pegel für die Freiburger Mulde. Anhand der bekannten Größen der Teileinzugsgebiete ist die Berechnung der maßgebenden Abflüsse der Freiburger Mulde ober- und unterhalb des Pegels möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Beschaffenheitsdaten von folgenden Messstellen ausgewertet:

- F3120 Freiburger Mulde, Holzgau
- F3125 Freiburger Mulde, Rechenberg-B.
- F3140 Freiburger Mulde, Berthelsdorf
- F3150 Freiburger Mulde, Muldenhütten
- F3151 Freiburger Mulde, Hilbersdorf
- F3152 Freiburger Mulde, Conradsdorf
- F3153 Stangenbergbach, vor Mündung
- F3154 Hüttenbach, vor Mündung
- F3160 Freiburger Mulde, Halsbrücke
- F3161 Freiburger Mulde, Kleinvoigtsberg
- F3170 Freiburger Mulde, Obergruna
- F3171 Freiburger Mulde, Siebenlehn
- F3290 Münzbach vor Mündung
- F3301 Roter Graben, Mundloch KVGS
- F3302 Roter Graben, Hauptstollnumbruch
- F3303 Roter Graben, Tuttendorf

Die Abbildung 1 zeigt die Lage der wesentlichen UBG-Messstellen im Untersuchungsgebiet zwischen Muldenhütten und Siebenlehn.

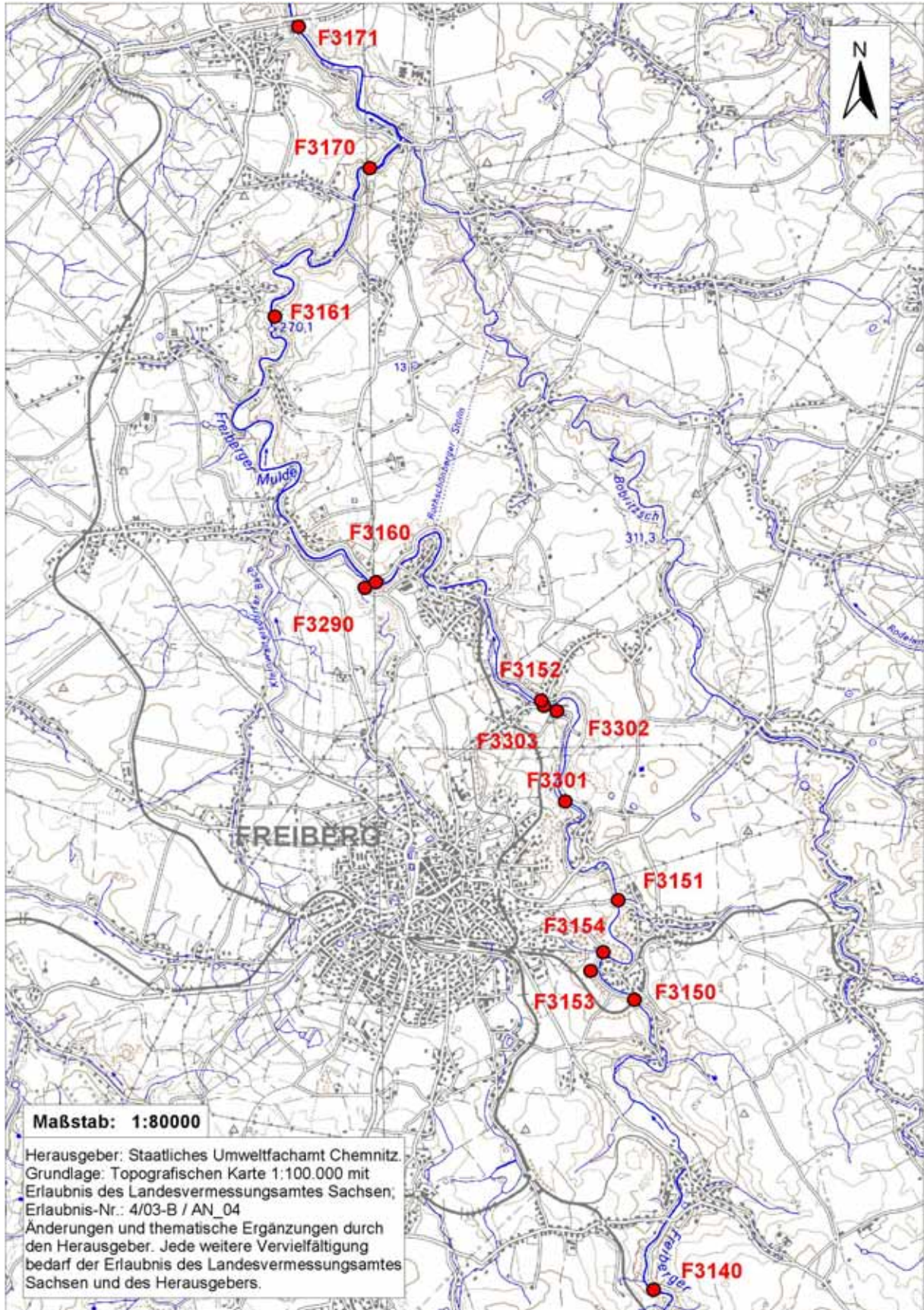


Abbildung 1: Übersichtskarte UBG-Messstellen zwischen Muldenhütten und Siebenlehn

3 Altlastenprojekt SAXONIA

Seit 1993 beschäftigt sich das Altlastenprojekt SAXONIA mit der Erkundung und Sanierung von Altlasten, die auf die intensive bergbauliche und industrielle Nutzung der SAXONIA-Grundstücke in der Vergangenheit zurückzuführen sind. Zuständig für die Durchführung des Projektes ist die aus dem VEB Bergbau- und Hüttenkombinat "Albert Funk" hervorgegangene SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH.

Im Zuge der wirtschaftlichen Neuorientierung nach 1989/90 wurde der Bergbau- und Hüttenkombinat zunächst per Verfügung zu einem Staatsbetrieb in Verantwortung der Treuhandanstalt. Die eigenständigen Betriebsteile Nickelhütte St. Egidien und Aue, sowie die Halbzeugwerke Auerhammer wurden ausgegliedert. Zum 1. Juni 1990 wurden die verbleibenden Kombinatbetriebe zur SAXONIA AG Metallhütten und Verarbeitungswerke Freiberg, Zinnerz Ehrenfriedersdorf GmbH und Harz-Bergbau Elbingerode GmbH umgewandelt.

Nach Rentabilitätsuntersuchungen blieben im Bereich der SAXONIA AG die Edelmetallstrecke Halsbrücke, die Feinhütte Halsbrücke, die neue Bleihütte Muldenhütten und die Rückständeanlage der Zinkproduktion in der Hütte Freiberg erhalten. Andere Betriebsteile wurden verkauft oder wie z. B. die Zink- und Zinnproduktion eingestellt.

Als Folge der Schließung mussten nicht mehr genutzte Industrieanlagen zurückgebaut werden. In der Hütte Freiberg betraf das u. a. die Schwefelsäurefabrik, die Zinnhütte, die Nasszinkgewinnung, das Heizkraftwerk sowie den Labor- und Sozialtrakt.

Am 29. Januar 1993 wurde das Liquidationsverfahren für die SAXONIA AG eingeleitet. In diesem Zusammenhang erfolgte die Umwandlung der SAXONIA AG i. L. in eine GmbH i. L.. Zwischen 1995 und 1997 erfolgten Verhandlungen zur Privatisierung der SAXONIA GmbH i. L. in deren Folge die Privatisierung als kommunale Gesellschaft der Stadt und des Landkreises Freiberg zum 1. Januar 1997 unter der Bezeichnung SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH vollzogen wurde [1].

3.1 Altlastensituation vor Sanierungsbeginn

3.1.1 Allgemeine Erkenntnisse

Der Freiburger Raum weist auf Grund seiner geologischen Gegebenheiten naturbedingt erhöhte Bodenbelastungen auf. Grund dafür sind die zahlreichen, z. T. bis an die Erdoberfläche reichenden Erzgänge. Durch Verwitterungsprozesse werden Schwermetalle und Arsen in den Boden eingetragen. Zusätzlich werden lösliche Verbindungen durch Sickerwasser ausgewaschen und können an anderen Stellen wieder abgelagert werden.

Den maßgeblichen Anteil an der Gesamtbelastung stellen die anthropogen bedingten Schwermetall- und Arsenemissionen aus Bergbau, Hüttenwesen und Buntmetallurgie dar. Somit gehört der Freiburger Raum zu den Standorten, die nach BbodSchV "Böden mit naturbedingt oder großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten" aufweisen [10].

Im Gutachten der G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH von 1993 [13] wurden stellvertretend für den Standort Muldenhütten folgende Schutzgüter definiert:

- das Auengrundwasser,
- das Grundwasser im hydrogeologischen Massiv,
- das Oberflächenwasser,
- der Boden,
- die Luft,
- die Tiere und Pflanzen sowie
- der Mensch.

Außerdem wurden die maßgeblichen Kontaminationspfade bestimmt:

- (1) Niederschlagswässer lösen Schadstoffe aus anthropogenen Ablagerungen und tragen diese entweder direkt oder im Hangsickerwasser in das Auengrundwasser ein. In den Auensedimenten können die Schadstoffe in geringem Umfang sorbiert werden, jedoch ist eine Remobilisation durch saure Sickerwässer möglich.

- (2) Eintrag gelöster Schadstoffe und abgespülter Partikel in Oberflächengewässer über die Beschleunigungs- und Drainagesysteme, durch Sickerwässer oder durch das Oberflächenwasser (Mulde) selbst. Die Partikel werden im Sediment abgelagert oder abtransportiert. Da im Festgestein keine bedeutende Sorptionskapazität vorhanden ist, werden die Schadstoffe entweder im Sediment fixiert oder im Oberflächenwasser gelöst. Diese können dann an anderer Stelle bei veränderten Bedingungen ausgefällt werden.
- (3) Die kontaminierten Auengrundwässer, Sickerwässer und z. T. aufbereitete Abwässer verstürzen in den Altbergbau bzw. in bruchtektonisch gestörte Zonen unterhalb des Muldeniveaus und gelangen über den Rothschnberger Stolln in das Oberflächengewässer (Triebisch).
- (4) Die unter (3) genannten Wässer gelangen in das Grundwasser unterhalb des Rothschnberger Stollns. Aufgrund des mengenmäßig geringen Anteils wird deren Bedeutung als gering eingeschätzt.
- (5) Emission von Stäuben durch Wind, Produktions-, Rückbau- und Transportarbeiten. Dadurch kommt es zur inhalativen Aufnahme der schadstoffbelasteten Stäube. Weiterhin können die Schadstoffe über Ablagerungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und den Eintrag in den Boden in die Nahrungskette des Menschen gelangen.

Aufgrund der ähnlichen örtlichen Gegebenheiten können sowohl die Erkenntnisse bezüglich der Schutzgüter als auch die nachfolgend genannten Kontaminationspfade auf alle betrachteten SAXONIA-Standorte übertragen werden.

Zur Problematik der Wasserhaltung im Freiburger Revier besagt das GFE-Gutachten [11] von 1993: "Auf Grund der seit 25 Jahren fehlenden Wartung der Wasserableitungssysteme ist davon auszugehen, dass sie teilweise ihre Funktion nicht mehr erfüllen und die zusetzenden Wässer in das tiefer gelegene Niveau des Rothschnberger Stollns verstürzen. Damit ist eine eindeutige Zuordnung der Entwässerungspfade nicht mehr ohne tiefer gehende Untersuchungen möglich."

3.1.2 Standort Muldenhütten

Am Standort Muldenhütten befanden sich seit Beginn des 14. Jahrhunderts Hüttenbetriebe, in denen zunächst nur Silber, Gold und Blei gewonnen wurde. Im 19. und 20. Jahrhundert erfolgte der weitere Ausbau des Standortes; [12]:

- Errichtung einer Schwefelsäurefabrik (1856),
- Errichtung und Betrieb der Zinkhütte (1857 bis 1910),
- Inbetriebnahme von Rauchgaskanal und Esse (1859),
- Errichtung und Betrieb der Arsenhütte (1862 bis 1991),
- Inbetriebnahme eines Bleischachtofens zur Verhüttung von Bleierzen (1926), danach Verhüttung von Akku-Schrott, Gekrätz und Altblei (ab 1970),
- Gewinnung von Spurenmetallen, Arsenverbindungen und Germanium sowie Züchtung von Einkristallen,
- Errichtung der neuen Bleihütte zur Verarbeitung von Akku-Schrott (1985).

Einhergehend mit der Jahrhunderte langen Nutzung des Hüttengeländes wurden großflächig Schlacken, Flugstäube und andere Abprodukte des Hüttenprozesses sowie Betriebsmüll, Abbruchmassen und Aschen abgelagert. Stellenweise erreichen diese Ablagerungen Mächtigkeiten von bis zu 21 m im Muldebogen. Die Ablagerungen dienten oftmals als Erweiterungsflächen für das Hüttengelände, so dass eine Vielzahl von Gebäuden und Anlagen darauf gegründet wurden.



Abbildung 2: Freiburger Mulde in Muldenhütten mit Schlackehalden (rechts) und Hausmülldeponie Freiberg (links); Foto in Fließrichtung

Im Bereich Muldenhütten wurden seit 1990 mehrere Produktionslinien stillgelegt und in Teilbereichen Abriss- und Sanierungsarbeiten begonnen. U. a. betrifft das Abriss- und Sanierungsarbeiten an der alten Arsenhütte sowie die Hangsicherung im Bereich der Firma ENVICHEM, heute RWE.

Das Industriegelände Muldenhütten verfügte über ein Kanalsystem, das die anfallenden Produktions- und Sozialabwässer sowie das Niederschlagswasser der betrieblichen Abwasserbehandlungsanlage zugeführt hat. Die behandelten Abwässer wurden in den Betriebsgraben eingeleitet. Da zum Zeitpunkt der Erstellung des Sanierungsrahmenkonzeptes für das Altlasten-Großprojekt SAXONIA (UTECON-Gutachten) kein Übertageaustritt dieser Wässer bekannt war, ging man davon aus, dass sie im Bereich der ehemaligen Münze auf das Niveau des Rothschnberger Stollns absinken und somit zur Triebisch entwässern [12, 28].

Über einen Teil des genannten Kanalsystems wird heute von der Firma Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH behandeltes Mischabwasser in die Freiburger Mulde eingeleitet. Die Abwässer der ebenfalls auf dem ehemaligen Hüttengelände ansässigen Niederlassung der RWE Umwelt Ost GmbH gelangen über eine neue Druckleitung zur Kläranlage Hohentanne. Lediglich die Niederschlagswässer aus dem Betriebsgelände bzw. von Flächen die höher als das Betriebsgelände liegen, werden über den sog. RWE-Kanal direkt in die Freiburger Mulde eingeleitet.

Neben dem genannten Abwassersystem existieren am Standort weitere Entwässerungssysteme mit separater Abwasserbehandlung und Altdrainagen, die direkt in die Mulde entwässern. Auf nicht versiegelten Flächen tritt hypodermischer Sickerwasserabfluss auf. Niederschläge können z. T. direkt in die Auengrundwässer absinken. Im Bereich des Muldebogens existieren keine bekannten Drainagesysteme, so dass eindringende Niederschlagswässer vermutlich direkt in die Mulde oder das Auengrundwasser gelangen. Bereichsweise können Entwässerungsmöglichkeiten durch den Altbergbau wirksam sein [12].

Durch das Hochwasser im August 2002 wurde am Fuß der Hausmülldeponie Freiberg ein Stolln-Mundloch freigespült. Den Ausführungen in der historischen Erkundung von LiGAR [28] zu Folge handelt es sich dabei um das Mundloch der Tiefen Abzugsrösche des Morgensterner Reviers, in die der Betriebsgraben Muldenhütten eingebunden worden ist. Im Zuge der Erweiterung des Hüttengeländes wurde der offene Grabenabschnitt im

Hüttengelände lagenweise verfüllt und das südöstliche Mundloch an der Muldenhüttener Bahnbrücke verplombt. Der Betriebsgraben setzt sich am Ende des offenen Grabenabschnittes als Rösche fort, die bis zum ehemaligen Zylindergebläsehaus ebenfalls verplombt ist.

Im Bereich der ehemaligen Münze zweigt eine Rösche vom Betriebsgraben in eine Radstube ab, deren Abzugsrösche vor der Muldenquerung wieder in den Betriebsgraben einmündet. Unterhalb der Hausmülldeponie kreuzt die Hüttenrösche den Neumorgenstern-Stolln und mündet schließlich in die Tiefe Abzugsrösche. Dieser Röschenabschnitt wurde vollständig von der Hausmülldeponie überkippt und ist verbrochen. Aufgrund der beschriebenen Lage des Mundloches der Tiefen Abzugsrösche am Muldenwehr in Höhe des Alten Pochwerkes ist davon auszugehen, dass es sich dabei um das freigespülte Mundloch handelt.

Bezüglich des Abflussverhaltens in der Hüttenrösche wurde festgestellt, dass sich die ankommenden Wässer vor der Verbruchsstelle zurück stauen und "vom Niveau Sohle untere Abrahamer Radstube gemeinsam mit dem Wasser der Abrahamer Aufschlagsrösche im westlichen Abrahamer Schacht" [28] verströmen. Vom Abrahamer Schacht gelangen die Wässer in das Niveau des Rothsönberger Stollns und somit über die Triebisch in die Elbe.

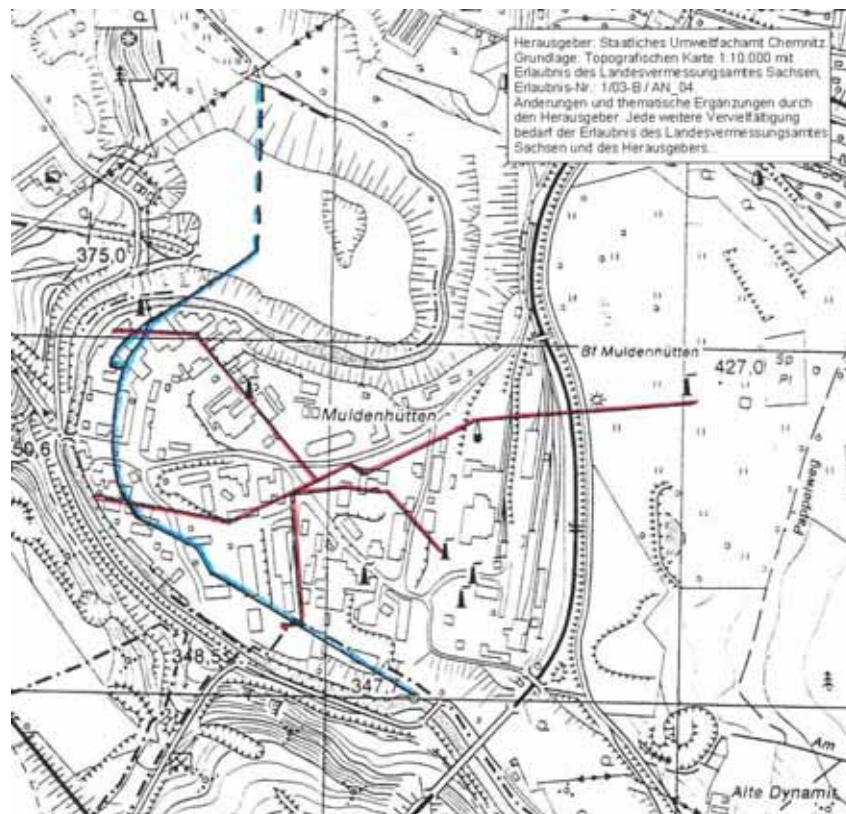


Abbildung 3: Betriebsgraben (blau) und Rauchgaskanal (rot) der Hütte Muldenhütten [28]

Einhergehend mit der historischen Erkundung wurde das Wasser in der Hüttenrösche beprobt. Dabei wurden permanent hohe Arsen-, Cadmium- und Kupfergehalte registriert. Zudem wurden teilweise hohe Sulfatgehalte bestimmt. Außerdem wurden starke Abflussschwankungen in der Hüttenrösche fest gestellt, die im Wesentlichen auf den niederschlagsbedingten Oberflächen- und Sickerwassereintrag zurück geführt wurden [28].

Bedingt durch den unterirdischen Verlauf und die schlechte Zugänglichkeit lagen für den Betriebsgraben nur wenig detaillierte Erkenntnisse vor. Als Ausgangssituation für weitere Untersuchungen wurde angenommen, dass sich im Betriebsgraben ca. 500 t schwermetall- und arsenhaltige Schlämme abgelagert haben. Damit zusammenhängende Auswaschungs- und Transportprozesse in Grund- und Oberflächenwasser wurden vermutet [12].



Abbildung 4: Mundloch der Hüttenrösche Muldenhütten (linksufrig unterhalb des Hüttenkomplexes Muldenhütten); überkippt von der Hausmülldeponie

Zum Komplex Muldenhütten gehören auch die sog. "Ottodeponie" und die sog. "Rauchblöße", die nach 1990 außer Betrieb genommen und erste Maßnahmen zur Beräumung und Abdeckung eingeleitet wurden. Im Bereich der Altablagerungen anfallende Niederschlagswässer sinken in die Tiefe ab und bilden einen hypodermischen Abfluss in Richtung Mulde. Der geringere Teil sammelt sich im Eisenbahneinschnitt und gelangt über eine Drainage direkt in die Mulde [12].

Weiterhin wurde festgestellt, dass der wesentliche Anteil der nicht exakt quantifizierbaren Arsenbelastungen in der Freiburger Mulde im Bereich Muldenhütten aus Sickerwässern der Schlackehalden im Muldebogen sowie Auswaschungen aus dem oberen Teil des

Rauchgaskanales stammt [12]. Die Bearbeiter des UTECON-Gutachtens weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass ebenfalls die Möglichkeit einer Schadstoffmobilisierung durch Sickerwässer aus der benachbarten Hausmülldeponie "Hüttenstraße" besteht.

Im Rauchgaskanal wurden ca. 1200 t kontaminierter Flügstäube festgestellt, als deren wesentliche Bestandteile gut wasserlösliche Arsen- und Schwermetallverbindungen sowie Dioxine und Furane ermittelt wurden. Außerdem befanden sich im Rauchgaskanal abschnittsweise Ablagerungen von Pestiziden. Sowohl die Staub- als auch die Pestizidablagerungen waren einer ständigen Auslaugung durch eintretende Sickerwässer ausgesetzt. Über verschiedene Transportpfade wurde eine entsprechende Schadstoffbelastung im Grund- und Oberflächenwasser bewirkt [12].

Als weiterer Schadstoffemittent wurde das Zwischenproduktfreilager genannt. Von den dafür genutzten Flächen wurde ein jährlicher Abtrag von 7 kg Arsen, 6 kg Cadmium, 480 kg Zink, 56 kg Nickel und 38 kg Kupfer geschätzt [12].

Das UTECON-Gutachten [12] fasst für den Standort Muldenhütten allgemein folgende Belastungen und Gefahren zusammen:

- Verfrachtung kontaminierter Schwermetallstäube,
- Austrag von Schadstoffen über Sickerwasserpfade,
- Standsicherheitsprobleme an den Haldenböschungen und
- radiologische Belastungen (von Abfallprodukten der Zinnherstellung).

3.1.3 Hütte Freiberg

Die Hütte Freiberg wurde ab 1952 auf einem Höhenrücken im Osten der Stadt Freiberg errichtet [11]. Zwischen der Inbetriebnahme 1959 und der Stilllegung 1990 befanden sich folgende Produktionsanlagen auf dem Gelände [12]:

- Schwefelsäureproduktion,
- Zinkproduktion,
- Cadmiumproduktion,
- Styrolphosphonsäureproduktion (SPS-Produktion) und
- Zinnproduktion.

Außerdem wurde zwischen 1963 und 1993 ein Braunkohlekraftwerk zur Fernwärme- und Stromerzeugung betrieben.

Zur Ablagerung der Rückstände des Hüttenprozesses wurden in dem zur Mulde abfallenden Gelände verschiedene Halden genutzt. So entstanden u. a. die Schutt- und Aschehalde, die Wälzschlackenhalde und die Abbrandhalde [12].

Die zink- und schwefelsäurehaltigen Abwässer wurden in einer Neutralisationsanlage mit Kalk behandelt. Anschließend wurde das behandelte Abwasser in den Vorfluter, den Hüttenbach, abgegeben und die Schlämme in das Absetzbecken geleitet [12].

Aufgrund der topografischen Gegebenheiten existieren für den hypodermischen und den Kluftwasserabfluss drei Entwässerungsrichtungen. Im GFE-Gutachten [11] werden die entsprechenden Flächen und Vorfluter angegeben:

- zur Mulde: 300 000 m²,
- zum Stangenbergbach: 18 800 m²,
- zum Münzbach: 48 000 m².

Daneben existierten folgende Wasserableitungssysteme [12]:

- Mischkanalisation in Richtung Frauensteiner Straße und
- Trennsystem mit Fäkalien- und Regenwasserkanal sowie einer sauren und einer zinkhaltigen Abwasserleitung nach Osten über den Hüttenbach in die Freiburger Mulde.

Beginnend mit der Produktionsaufnahme 1959 wurde das Abwassersystem starken produktionsbedingten thermischen, chemischen und statisch-dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dadurch kam es bereits nach kurzer Betriebszeit zu Zerstörungen einzelner Teilstücke, die die Funktionstüchtigkeit der Kanalsysteme beeinträchtigten. Durch Undichtheiten der Kanäle kam es bereits frühzeitig zum Schadstoffeintrag in den Boden. Nach dem Auslaufen der Produktion und den darauf folgenden Abrissarbeiten bewirkt die umfassende Flächenentsiegelung zunehmend Schadstoffmobilisierungen und Schadstoffbelastungen der Schutzgüter Luft, Grund- und Oberflächenwasser [12].

Dem GFE-Gutachten [11] zu Folge bestand jedoch keine Gefährdung für die Trinkwassergewinnung aus Grundwasser, da das Gelände der Hütte Freiberg außerhalb des Einzugsgebietes der Fassungsanlagen liegt. Indirekte Beeinträchtigungen des Uferfiltrates an weiter flußabwärts gelegenen Wasserwerken wurden jedoch nicht ausgeschlossen.

Aufgrund der ermittelten Belastungs- und Gefahrensituation wurde im UTECON-Gutachten [12] für folgende Objekte Handlungsbedarf zur Sicherung bzw. Sanierung abgeleitet:

- Haldenkomplex (Schutt- und Aschehalde, Wälzschlackenhalde, Halde am Neuschacht),
- Absetzbecken,
- Klinkerflugstaublagerfläche,
- Abbrandhalde,
- Aufbereitung kontaminierter Abwässer und
- Verwahrung des alten Kanalsystemes.

Die im Bereich der Altablagerungen bzw. Haldenkomplexe bestehenden Belastungen und Gefahren waren [12]:

- Verfrachtung kontaminierter Schwermetallstäube,
- Austrag von Schadstoffen über Sickerwasserpfade,
- Haldenbrände und Austrag toxischer Gase,
- Standsicherheitsprobleme an den Haldenböschungen,
- Setzungserscheinungen in Folge Schlammeinlagerungen und
- radiologische Belastungen.

Neben den genannten Belastungen und Gefahren wurden im Bereich der Abbrandhalde hohe Schwermetall- und Quecksilberkonzentrationen festgestellt.

Für das im UTECON-Gutachten als Objekt 1.6 bezeichnete Industriegebiet wurden aufgrund der hohen Schadstoffgehalte und der in diesem Zusammenhang durch Sickerwässer verursachten Belastung sofortige Sanierungsmaßnahmen für notwendig erachtet [12].

Aus dem Gelände der Hütte Freiberg gelangten jährlich 0,45 t Cadmium und 660 t Chlorid über den Hüttenbach der Hütte Freiberg in die Freiburger Mulde [12].

Im Ostteil des Geländes der Hütte Freiberg befindet sich ein ausgedehnter Altbergbau. Durch Verbrüche sind Schlämme aus dem Absetzbecken der Neutralisationsanlage in den darunter verlaufenden Werner-Stolln gelangt. Das in diesem Bereich zusetzende stark kontaminierte Sickerwasser gelangt über die Grubenbaue entweder, wie vielfach vermutet, bis auf das Niveau des Rothsönberger Stollns und somit über die Triebisch in die Elbe oder über den Königlich-verträglichen-Gesellschaft-Stolln und den Roten Graben in die Freiburger Mulde. Für den Entwässerungspfad über den Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln wurde im GFE-Gutachten [11] eine jährliche Cadmiumfracht von ca. 200 t/a angenommen.

Es wird vermutet, dass über Stolln im Bereich der Hausmülldeponie schwermetallhaltige Wässer in Richtung Mulde abgeführt werden. Da deren Mundlöcher von der Hausmülldeponie überkippt worden sind, ist der Abfluss des Wassers zur Freiburger Mulde stark behindert. Deshalb wird davon ausgegangen, dass der Großteil über das Grubensystem abfließt, wobei nicht quantifiziert werden kann, welche Mengen dem Königlich-verträglichen-

Gesellschaft-Stolln bzw. dem Rothschönberger Stolln zufließen. Analysen von Sickerwasserproben, die am Fuß des Muldenhanges entnommen wurden, haben ergeben, dass die dort austretenden Wässer in Beschaffenheit und Menge keinen wesentlichen Einfluss auf die Freiburger Mulde haben [11].

Zusammenfassend konnte für den Bereich der Hütte Freiberg eine nahezu flächendeckende Kontamination des Bodens mit Arsen, Blei sowie z. T. mit Cadmium und Kupfer festgestellt werden. Die Gutachter kamen zu dem Ergebnis, dass 65 bis 85 % der Cadmiumbelastung der Mulde aus dem Gelände der Hütte Freiberg stammen könnten. Andere Schwermetalle haben für die von diesem Standort ausgehende Gewässerbelastung nur untergeordnete Bedeutung [11].

3.1.4 Standort Halsbrücke [12]

Zum Standort Halsbrücke gehören drei räumlich voneinander getrennte Betriebsteile:

- Betriebsteil I und Feinhütte Muldenhütten (Hüttenkomplex),
- Betriebsteil II - Grube Beihilfe,
- Betriebsteil III - Edelmetallgewinnung (seit 1986).

Das Areal der Hütte Halsbrücke erstreckt sich insgesamt über ca. 44,5 ha. In der Nachbarschaft des Standortes befinden sich weitere SAXONIA-Objekte, die in die Betrachtungen mit einbezogen wurden:

- die alte Schwefelsäurefabrik (heute GB Apparatebau & Co. KG),
- die ehemalige Bleiwarenfabrik und Hüttenhäuser (heute Fa. Neubert),
- die Böschung der Grobbergehalde der ehemalige Grube Beihilfe sowie
- die Mülldeponie Halsbrücke am Betriebsteil III.

Im Jahre 1612 wurde die Hütte Halsbrücke zunächst zur Gewinnung von Gold und Silber gegründet. Ab 1663 wurde auch Blei gewonnen.

Um die im Hüttenprozess anfallenden schadstoffhaltigen Rauchgase effektiver als bisher abzuleiten und die Belastung der Anwohner im Muldental zu reduzieren, wurden 1889 der Rauchgaskanal und die "Hohe Esse" in Betrieb genommen.



Abbildung 5: Blick von der Pochwerkshalde über den Hüttenkomplex Halsbrücke auf die Schlackenhalde und die Hohe Esse (hinter den Dächern fließt die Freiburger Mulde von rechts nach links)

Nach dem Produktionsstillstand zum Ende des zweiten Weltkrieges wurde im Juni 1945 die Produktion erneut aufgenommen. Es wurden Blei, Wismut, Kupfervitriol, Nickelsulfat, Schwefelsäure, Silber, Gold und Platin aufgenommen. Neben der Hüttenindustrie siedelten sich nach 1945 auch Verarbeitungsbetriebe (z. B. Herstellung von Edelmetallhalbzeugen, Galvanik, Schaltstückproduktion) an.

Dem UTECON-Gutachten [12] zufolge wurden im Betriebsteil I folgende Verfahren durchgeführt:

- Edelmetallscheidung seit 1612,
- Bleiverarbeitung und Herstellung von Endprodukten ab der Mitte des 17. Jahrhunderts bis 1991,
- Amalgamation von 1790 bis 1857,
- Kupfersulfat- und granalienherstellung von 1859 bis 1990,
- Schwefelsäureproduktion von 1865 bis 1962,
- Verhüttung verschiedener Metalle aus Erzen von 1612 bis 1969,
- Bleielektrolyse von 1931 bis 1991,
- Schmelz-, Gieß- und Legierungsprozesse seit 1612,

- Drahtziehprozesse seit 1970,
- Aufarbeitung von Schrott, Gekrätz und Staub von 1889 bis 1991 sowie
- Aufarbeitung von Rückständen aus der Fotochemie.

Auf dem Gelände der Grube Beihilfe, dem Betriebsteil II, wurde von 1850 bis 1912 sowie von 1937 bis 1968 Bergbau betrieben. Nach der Wiederinbetriebnahme 1937 wurden blei- und zinkhaltige Erze gefördert und aufbereitet. Die Rückstände der Flotationsprozesse wurden auf der Spülhalde 7. Lichtloch (1937 bis 1955) verspült, Gesteine auf die Bergehalde verkippt. Zwischen 1970 und 1986 wurden auf dem Haldengelände Öl-, Farb- und Lösemittelager und zusätzlich von 1970 bis 1982 eine Schaltstückproduktion betrieben.

Dem Betriebsteil III sind folgende Produktionsbereiche zugeordnet:

- Werkzeugbau (ab 1978),
- Galvanik zur Gewinnung von Zink, Blei, Palladium, Nickel, Cadmium, Zinn, Gold und Silber (ab 1978) und
- Schaltstückfertigung, d. h. die Veredelung und Beschichtung von Kupfer und Messing mit Gold, Silber, Fetten und Ölen (ab 1986).

Anfallende Abwässer der Betriebsteile I und II wurden direkt in die Mulde abgeleitet. Die größtenteils im Betriebsteil III anfallenden sauren Abwässer wurden nach Neutralisation über ein Bohrloch in den Altbergbau verstürzt.

Nach 1991 wurden große Teile des Betriebsteiles I abgerissen, die Feinhütte privatisiert und Flächen im Zentralbereich des ehemaligen Betriebsteiles I durch die SAXONIA-Edelmetall GmbH gekauft. Ein Flächennutzungsplan sieht die industrielle Nachnutzung des Geländes durch Neuansiedlungen vor.

Eine Vielzahl von Teilbereichen des Betriebsteiles I stehen unter Denkmalschutz, einige davon in altlastenrelevantem Gelände. Dabei handelt es sich um folgende Objekte:

- Verwaltungsgebäude 1,
- Treibehütte,
- Alte Schmiede,
- Amalgamierwerk,

- Labor,
- Verwaltungsgebäude 2,
- Schornstein,
- Schlackehalde Hohe Esse,
- Mauer unter der ehemaligen Fahrzeughalle,
- Mauer an der Treibehütte und
- Hohe Esse, mit einer Höhe von 140 m einer der höchsten Ziegelschornsteine der Welt.

Gemäß dem UTECON-Gutachten [12] geht die hauptsächliche Gefährdung am Standort Halsbrücke von den oberflächennahen Hohlräumen des Altbergbaues aus.

Weiterhin belegen Analysenergebnisse, dass der Boden stark mit Schwermetallen (Pb, Zn, Cd, Cu) und Arsen belastet ist. Allerdings vertreten die UTECON-Gutachter die Ansicht, dass davon keine unmittelbare Gefahr ausgeht, da die Metallverbindungen relativ stabil und nachweislich schlecht eluierbar sind.

Eine Gefährdung für die menschliche Gesundheit durch Schadstoffe besteht hauptsächlich über den Luftpfad. Außerdem wurden nicht näher quantifizierte Schadstoffverfrachtungen aus Altablagerungen (Pochwerkshalde, Obere Schlackenhalde, Schlackehalde Hohe Esse und Spülhalde 7. Lichtloch) über den Wasserpfad in Grund- und Oberflächenwasser aufgezeigt.

Das System der Betriebsgräben wurde seit der Gründung des Hüttenstandortes betrieben und im Laufe der Zeit den veränderten Anforderungen angepasst. Neben der Wasserzuführung wurde der Betriebsgraben auch zur Abwasserableitung und zeitweise für den Erztransport genutzt und musste dafür in Abschnitten schiffbar gemacht werden.

Im Einzelnen besteht das System aus der Wasserzuführung über den als Oberen Graben bezeichneten Roten Graben, dem eigentlichen Betriebsgraben im Hüttengelände und dem offenen Ablaufgerinne, das als Niederer Graben bezeichnet wird. Daneben existiert noch eine als Fluter bezeichnete Stichstrecke, die unterhalb des Pochwerkes beginnt und einige Meter unterhalb der Brücke des Rauchgaskanals in die Freiburger Mulde mündet. Dieser Fluter konnte möglicherweise sowohl für die Wasserzu- als auch Ableitung genutzt werden.

Nach der Stilllegung der Hütte Halsbrücke und den damit zusammen hängenden Abrissmaßnahmen war die Wasserzuführung nicht mehr erforderlich. Deshalb wurden die Wehre des Fluters geöffnet, so dass das Wasser vom Roten Graben über den Fluter direkt in die Freiburger Mulde gelangt. Anfallende Oberflächenwässer vom Gelände der Feinhütte werden ebenfalls über den Fluter in die Freiburger Mulde abgeleitet.

In den Betriebsgraben werden somit keine Wässer mehr gezielt eingeleitet. Bedingt durch die Einstellung der Wasserdurchleitung bewirken diffus eintretende Sickerwässer, dass sich der Betriebsgraben sukzessive zusetzt. In den Niederen Graben erfolgten zeitweise noch Einleitungen von Sanitärklärgrubenabwässern, Regenwasser, Kühl- und Kreislaufwasser. Bis auf die naturbedingten Regenwasserzutritte wurden die anderen Einleitungen eingestellt.

Während des Betriebes setzten sich in den Gräben schwermetallhaltige Schlämme ab, die diskontinuierlich beräumt und an den Uferseiten des Niederen Grabens abgelagert worden sind. Daraus folgt eine starke Kontamination des Bodenbereiches in den Grabenrandzonen. Zusammenfassend wird "eine Gefährdung des Wassers [...] derzeit nur durch die in dieser Region seit Jahrhunderten industriell belasteten Böden der Umgebung und [durch] Ab- bzw. Auflösprozesse der Faulschlämme" gesehen [29].

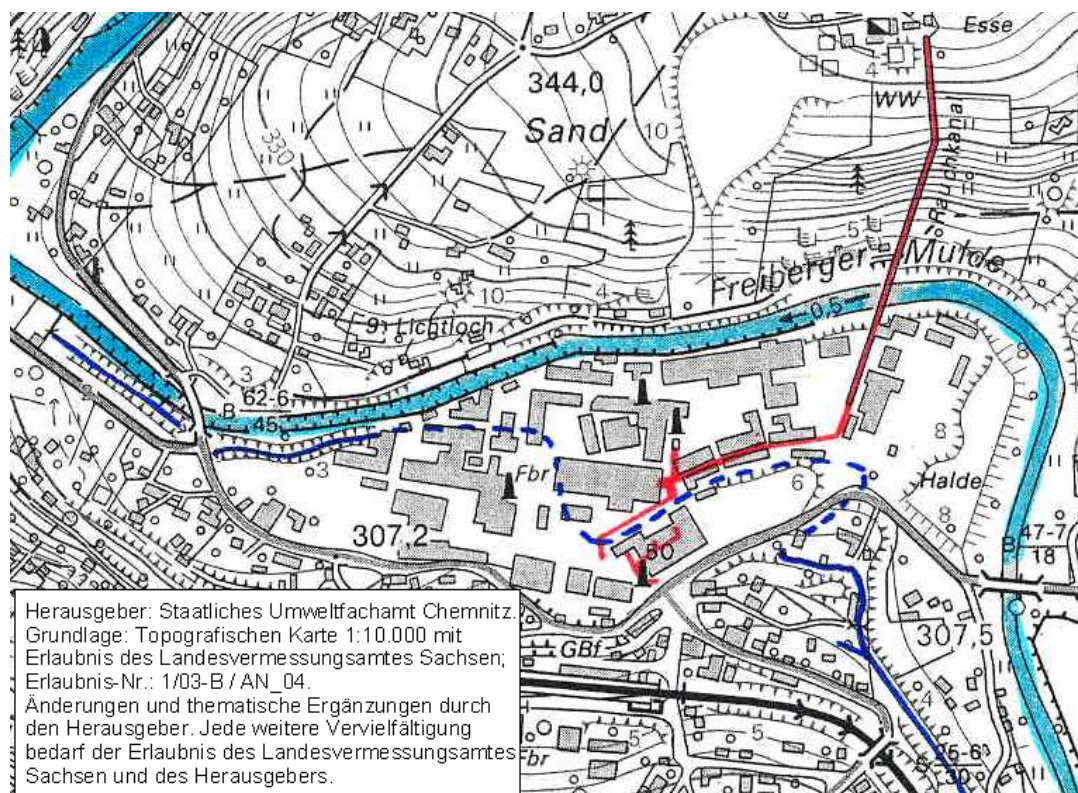


Abbildung 6: Betriebsgraben (blau) und Rauchgaskanal (rot) der Hütte Halsbrücke [29]

3.1.5 Sonstige Liegenschaften

Unter der Rubrik sonstige Liegenschaften wurden zusammengefasst:

- Komplex Davidschacht mit Grobbergehalde Davidschacht, Spülhalde Davidschacht und Spülhalde Hammerberg,
- Spülhalde Münzbachtal,
- Schlackenhalde Halsbach,
- Turmhof-Schacht,
- Abraham-Schacht,
- Glück-Auf-Schacht,
- Sächsisches Metallwerk (Freiberg),
- Kühlerbau (Freiberg).

Auf dem Gelände der Spülhalde Davidschacht wurde in den Jahren 1943 / 1944 ein Spülbecken angelegt. Von 1947 bis 1950 nutzte die Wismut AG diese Becken als Klärbecken. Ab 1951 erfolgte die Nutzung als Spülhalde. Dazu wurde ein Grobbergeabriegelungsdamm angeschüttet und ein Nachklärbecken errichtet. Nach Inbetriebnahme der Spülhalde Hammerberg 1964 wurde die Ablagerung eingestellt und die Spülhalde Davidschacht diente fortan nur noch als Reserve. Heute bedeckt die Spülhalde eine Fläche von 6,3 ha, die Ablagerungen besitzen eine mittlere Mächtigkeit von 22 m [12].

Die neue Absetzanlage am Hammerberg wurde von 1964 bis zur Einstellung des Freiburger Bergbaus 1969 betrieben. Nach ihrer Stilllegung hatte die Spülhalde Hammerberg ein Volumen von 3,125 Mio m³ auf einer Grundfläche von 15 ha. Die Mächtigkeiten der Ablagerungen reichten von 8 bis 65 m über der Geländeoberfläche.

Während der Haldenrückgewinnung in den 70er und 80er Jahren wurden 2,72 Mio t Bergmassen abgebaut und dadurch die überlagerte Fläche auf ca. 5 ha reduziert. Heute beträgt die größte Mächtigkeit im Bereich des Grobbergedammes ca. 30 m [12].

Gefährdungen im Bereich der Spülhalden gehen hauptsächlich von der Standsicherheit der Böschungen und der Schadstoffemission über den Sickerwasserpfad aus.

Über die weiteren genannten Liegenschaften lagen vor Sanierungsbeginn im Wesentlichen historische Erkundungen vor, die keinen oder nur geringen Handlungsbedarf ausweisen. Die Spülhalden wurden weitgehend renaturiert, die Schlackehalde Halsbach ist saniert und größtenteils mit einem Garagenkomplex überbaut worden. Alle weiteren Objekte wurden privatisiert (z. B. Metallwerk) oder gehen in kommunalen Besitz über (Kühlerbau, Turmhof- und Abrahamschacht) [12].

3.1.6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des GFE-Gutachtens [11] von 1994 ergeben bezüglich der Altlastensituation und des Handlungsbedarfes folgendes Bild:

- (1) "Das Gefährdungspotential weiterer Altlasten für die Beschaffenheit der Mulde ist gegenüber den Schwerpunkten oberhalb der Hilbersdorfer Brücke (Hütte Freiberg, Hütte Muldenhütten und eventuell Deponie Freiberg) nur gering ..."
- (2) Die Schadstoffeinträge durch Altlasten unterhalb der Hilbersdorfer Brücke können erst dann zielgerichtet ermittelt und vermindert werden, wenn die Einflüsse aus den o. g. Schwerpunkten eliminiert worden sind.
- (3) "Der Eintrag von Arsen in die Mulde erfolgt in hohem Maße vom Gebiet der Hütte Muldenhütten. Es ist entsprechend der vorhandenen Messwerte im Sickerwasser (bis 2,7 mg/l!) dringend nötig, die Abbrandhalde Muldenbogen vom Wasserkreislauf zu trennen (Versiegelung der Oberfläche und Unterbindung eventueller seitlicher Zuflüsse)."
- (4) "...im Gebiet der Hütte Freiberg [ist es] lediglich notwendig, durch geeignete Maßnahmen die Erosion der belasteten Flächen zu verhindern..."
- (5) "Mögliche Gefährdungen, insbesondere durch die ausgefällten Schlämme, werden an folgenden Orten gesehen: Roter Graben [und] Sickerwasser Münzbachhalde."

Ausgehend davon wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Maßnahmenvorschläge erarbeitet.

Tabelle 1: Maßnahmenvorschläge SAXONIA-Liegenschaften; aus [11]:

Objekt	Problem	Maßnahme	Bemerkung
Hütte Freiberg	Cadmiumbelastung	Sanierung von Klinkerflugstaubablagerungen	
Hütte Freiberg	Cadmiumbelastung	Sanierung Bereich nördlich der Laugerei	
Hütte Freiberg	Cadmiumbelastung	Sanierung der Kanalisation	
Hütte Freiberg	Cadmiumbelastung	Sanierung des Absetzbeckens	bereits begonnen
Hütte Muldenhütten	Arsen	Sanierung der Halde an der Arsenhütte (Abbrandhalde)	dringend
Hütte Muldenhütten einschließlich Ottodeponie	Arsen, Cadmium, AOX u.a.	Untersuchungen zur Belastungssituation und zu den Ausbreitungspfaden	
Deponie Freiberg	Arsen, Cadmium	Einbeziehung in die Untersuchungen zur Hütte Muldenhütten	
Rothschönberger Stolln	Cadmium u.a.	Untersuchungen zum Einfluss der SAXONIA-Altlasten	Einfluss Muldenhütten u.a.
Königlich-verträglicher-Gesellschaft-Stolln	Cadmium u.a.	Prüfung auf hüttenpezifische Wasserinhaltsstoffe	Hypothese: Einfluss der Hütte Freiberg
Gesamtgebiet		Monitoring der Wasserbeschaffenheit	bei Bedarf Ableitung weiterer Maßnahmen
Hütte Muldenhütten	Hüttenbach	Einrichtung einer Messstelle (Durchfluss und Wasserproben)	Voraussetzung für die vorherigen drei Maßnahmen

Fortsetzung von Tabelle 1:

Objekt	Problem	Maßnahme	Bemerkung
Spülhalde Münzbachtal	Arsen	Prüfung der Machbarkeit einer Sickerwasser- behandlung	
Roter Graben	ausgefällte Schlämme	Untersuchung und Gefahrenabschätzung, bei Bedarf Beseitigung	

3.2 Sanierungsziele und Maßnahmen zu deren Umsetzung [14]

Bereits seit 1990 wurden durch mehrere Ingenieurbüros Sanierungskonzepte für die drei Hüttenkomplexe erarbeitet. Da die Konzepte von Trischler & Partner (1990) und UTECON (1992) auf der Annahme basieren, dass die Gefährdung der Umwelt grundsätzlich über den Luft- und den Wasserpfad besteht, wurden umfangreiche und teure Sanierungsmaßnahmen geplant. In diesem Zusammenhang wurde z. B. durch Trischler & Partner eine Bodenbehandlung mit anschließender Umlagerung bzw. geordneter Deponierung vorgesehen.

Ausgehend von den im UTECON-Gutachten gewonnenen Erkenntnissen über das Gefährdungspotential der drei Altstandorte wird die vollständige Umlagerung der kontaminierten Massen als nicht notwendig erachtet. Statt dessen wird die Sicherung der einzelnen Objekte vorgeschlagen. Im Gegensatz zum Sanierungskonzept von Trischler & Partner können dadurch die notwendigen finanziellen Aufwendungen erheblich gesenkt werden.

Umfangreiche Untersuchungen von GEOS (1993) ermöglichten eine Neubewertung des Gefährdungspotentials der Standorte Freiberg, Muldenhütten und Halsbrücke. Deren Ergebnisse bildeten die Grundlage für das von GEOCONTROL unter den folgenden Vorgaben erarbeitete Rahmensanierungskonzept [14]:

- (1) Die von den einzelnen Objekten ausgehenden Gefährdungen über den Luft- und den Wasserpfad müssen durch weiterführende Untersuchungen näher definiert

werden. Es ist davon auszugehen, dass von den meisten Objekten eine Gefährdung für das Schutzgut Luft und in diesem Zusammenhang für die Böden der Umgebung ausgeht. Außerdem besteht an mehreren Objekten eine Gefährdung des Schutzgutes Oberflächenwasser.

- (2) Aufgrund der bestehenden Gefährdung für die menschliche Gesundheit beziehen sich die vorgeschlagenen Maßnahmen ausschließlich auf die Gefahrenabwehr. Möglichkeiten, Sanierungsmaßnahmen durch Bautätigkeiten im Zusammenhang mit der Nachnutzung zu ersetzen, werden hierbei vorerst nicht betrachtet.
- (3) Unter Berücksichtigung der behördlichen Vorgaben und finanziellen Spielräume soll den Erfordernissen des Denkmal- und Naturschutzes Rechnung getragen werden. Die Sanierung soll möglichst naturnah erfolgen.

Nach Maßgabe der Verfahrensprinzipien des sächsischen Altlastenprogrammes wurde objektweise folgendes Bearbeitungsschema angewandt:

- (1) Historische Erkundung,
- (2) Orientierende Erkundung,
- (3) Detailerkundung,
- (4) Sanierungsplanung und -untersuchung,
- (5) Sanierung.

Um die Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen zu überwachen und zu dokumentieren, wird ein Monitoringprogramm für die Pfade Wasser und Luft sowie über die Entwicklung von Flora und Fauna vorgesehen.

Aufgrund der ermittelten Gefährdungen über den Wasser- bzw. Luftpfad, die Berechnungen des maßgebenden Gefahrenrisikos und die Bestimmung des Beweisniveaus gemäß sächsischer Altlastenmethodik wurde eine Prioritätenliste erstellt. Abschließend wurde für die Maßnahmen ein Kosten- und Zeitplan erarbeitet. Dieser enthielt insgesamt 36 Objekte von denen sich während der Erarbeitung des Sanierungsrahmenkonzeptes bereits drei in der Ausführungsphase befanden:

- Absetzbecken der Hütte Freiberg,
- Arsenhütte Muldenhütten und
- Hangsicherung im ENVICHEM-Gelände (heute RWE) in Muldenhütten.

Weiterhin lagen Sicherungsplanungen für die folgenden Objekte vor:

- für die Schlackenhalde Muldenbogen,
- für Teilbereiche der Rauchgaskanäle und des Betriebsgrabens Muldenhütten,
- für das Fäkalienbecken ENVICHEM.

Gefährdungsabschätzungen gemäß Beweisniveau 3 waren für folgende Objekte vorhanden:

- Komplex Hütte Freiberg,
- Arsenhütte Muldenhütten,
- Schlackenhalde Muldenbogen,
- Zwischenproduktfreilager (Muldenhütten),
- Rauchgaskanäle und Betriebsgraben Muldenhütten,
- Fäkalienbecken ENVICHEM,
- Schlackenhalde Hohe Esse,
- Abbruchgebiet Halsbrücke.

Der von GEOCONTROL aufgestellte Zeitplan sah in Abhängigkeit vom Planungsvorlauf im Jahre 1994 den Abschluss der Sicherungsarbeiten im Jahr 1999 vor.

Die Gutachter weisen mehrfach darauf hin, dass aufgrund des oftmals niedrigen Beweisniveaus z. T. erhebliche Kenntnislücken bestehen, die stellenweise keine gesicherten Aussagen über die Maßnahmen zur Altlastensicherung zulassen. Insbesondere wurden weitere Erkundungen zu folgenden Sachverhalten für notwendig erachtet:

- Übersichtsuntersuchungen und Begutachtungen der Wasserpfade und des Luftpfades (Abschluss der Untersuchungen Ende 1994),
- Aussagen zur Emission und Immision von kontaminiertem Schwebstaub und Staubniederschlag und Nachweis von Beeinträchtigungen der Schutzgüter durch Sickerwässer,
- Standsicherheitsnachweise von Böschungen und Halden,
- Bestimmung von Art und Umfang der Verwahrungsarbeiten am Altbergbau,
- Präzisierung der den Sicherheitsbedarf bestimmenden Flächen-, Mengen- und Längenangaben,
- Verbesserung der Aussagen zu den erforderlichen Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen,

- Entscheidungshilfen zur Auswahl der endgültigen technologischen Lösungen für z. B. Rauchblöße, Brandbekämpfung Wälzschlackenhalde, Schutt- und Aschehalde, Rauchgaskanäle, Böschungsabdeckungen,
- Verbesserung des Kenntnisstandes zum Sanierungsbedarf auf ehemaligen SAXONIA-Liegenschaften, die nach dem 30. Juni 1990 veräußert wurden,
- Bestimmung der Gefährdungen über den Wasserpfad am Standort Muldenhütten und Aussagen zur Wasserwegsamkeit zum Rothschönberger Stolln.

Um die Sanierungsziele zu erreichen, werden technische Lösungen sowie Materialien verwendet, bei deren ordnungsgemäßen Einsatz keine schädigenden Wirkungen auf die Umwelt auftreten. Da die einzelnen Technologieschritte nicht bei allen Objekten zeitnah aufeinander erfolgen können, wird in solchen Fällen eine Zwischenabdeckung vorgesehen. Damit soll der Gefahr zwischenzeitlicher Belastungen über den Luft- bzw. Wasserpfad entgegen gewirkt werden.

Im Einzelnen sollen folgende Sicherungstechnologien eingesetzt werden:

- (1) Oberflächenabdichtung mit gezielter Oberflächenwasserableitung: In Verbindung mit einer Begrünung wird die Sickerwasserbildung erheblich reduziert und eine Schadstoffverfrachtung über die Luft unterbunden.
- (2) Abdeckung: Durch Abdeckung mit Mutterboden oder anderer geeigneter Böden und Begrünung wird die Staubverwehung verhindert.
- (3) Stabilisierung: Durch Entlastung des Böschungskopfes, Befestigung des Böschungsfußes oder Abdeckung in Verbindung mit Bewehrungen wird die Gefahr von Rutschungen oder Ausspülungen an Böschungen verhindert. Zum Einsatz kommen z. B.: Gabionen, Faschinen oder Geotextilien.
- (4) Brandbekämpfung: Abklingende Haldenbrände werden durch Abdeckung der Brandherde unterbunden. Bei aktiven Brandherden werden neben der Brandlöschung einzelne Haldenteile umgelagert und inertisiert.

Weiterhin werden bedarfsweise folgende Technologien und Verfahren angewendet:

- Reinigung der Rauchgaskanäle durch Ausräumen der Flugstäube,
- Einkapselung bzw. Versatz von Flugstäuben und unterirdischen Hohlräumen,
- falls erforderlich Bodenaustausch bei Ölschäden.

Tabelle 2 zeigt den Zeitplan für die geplanten Maßnahmen. Dargestellt ist jeweils der gesamte benötigte Zeitraum bis zur Fertigstellung des Sanierungsvorhabens.

Tabelle 2: Zeitplanung Sanierungsvorhaben SAXONIA [14]

Objekt	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Grundlagenuntersuchungen						
1. Gutachten Luft / Monitoring Luft						
2. Gutachten Wasser / Monitoring Wasser						
3. Biotopkartierung / Monitoring						
Hütte Freiberg						
1. Absetzbecken (inkl. Zwischenabdeckung)						
2. Wälzschlackenhalde						
3. Schutt- und Aschehalde						
4. Neuschacht						
5. Abbrandhalde						
6. Abbruchgebiet						
7. Kanalisation						
Hütte Muldenhütten						
1. Arsenhütte (inkl. Zwischenabdeckung)						
2. Otto-Deponie						
3. Schlackenhalde Muldenbogen						
4. Rauchblöße						
5. Böschung am Otto-Tor						
6. Zwischenproduktfreilager						
7. Mülldeponie Hilbersdorf						
8. Rauchgaskanäle und Betriebsgraben						
9. Hangsicherung ENVICHEM						
10. Fäkalienbecken ENVICHEM						
11. Rauchgaskanal ENVICHEM		(1)				

Fortsetzung von Tabelle 2:

Objekt	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Hütte Halsbrücke						
1. Obere Schlackenhalde Feinhütte						
2. Schlackenhalde Hohe Esse						
3. Hausmülldeponie Halsbrücke						
4. Halde am Pochwerk						
5. Abbruchgebiet Halsbrücke						
6. Oberflur-Rauchgaskanal						
7. Rauchgaskanäle und Betriebsgraben						
8. Treibehütte und Schwarzkupferanlage		(2)				
Weitere Liegenschaften						
Bereich Davidschacht						
Spülhalde 7. Lichtloch						
Spülhalde Münzbachtal						
Schlackenhalde Halsbach						
Turmhofschacht						
Abrahamschacht						
Glück-Auf-Schacht						
Sächsisches Metallwerk						
Kühlerbau						
Sonstige Liegenschaften						

(1) = nur Detailerkundung, weiter wie Rauchgaskanäle und Betriebsgraben Muldenhütten

(2) = nur historische Erkundung, weiter wie Abbruchgebiet Halsbrücke

In Weiterentwicklung des Sanierungsrahmenkonzeptes von GEOCONTROL [14] wurden im Sanierungsrahmenkonzept von UTECON [12] u. a. nachfolgend genannte Sanierungszielansätze erarbeitet [6]:

- die zusammenfassende Bestandsaufnahme und Kenntnisstandserhebung bezüglich der Einzelobjekte,
- die Feststellung der objektspezifischen Gefährdung für die Schutzgüter,
- die Aufstellung objekttypisierter Vorschläge zur Emissionsminderung sowie
- die Priorisierung einzelner Objekte.

Bezüglich des Umfanges der Sanierungsmaßnahmen wurde fest gelegt, dass "im Rahmen von Ermessensentscheidungen [...] objektbezogen geeignete Maßnahmen zur Reduzierung, nicht aber der restlosen Beseitigung vorhandener Belastungen / Schäden durchzuführen [sind]" [6].

D. h., dass bei der Bewertung der Sanierungsmaßnahmen beachtet werden muss, dass diese im Wesentlichen darauf ausgerichtet sind, die unmittelbar von den SAXONIA-Liegenschaften ausgehenden Emissionen dauerhaft zu unterbinden. Bereits verfrachtete Schadstoffe können und sollen durch diese Maßnahmen nur in begrenztem Umfang an ihrer weiteren Ausbreitung gehindert werden. Die Verbesserung des Gewässerzustandes ist aus diesem Grund kein primäres Ziel des Altlastenprojektes und wird deshalb in Folge der Sanierungsmaßnahmen auch nur langfristig eintreten können.

Durch das Staatliche Umweltfachamt Chemnitz wurden im Jahre 2000 die Abdeckenanforderungen für das Altlastenprojekt präzisiert [6]:

- (1) Als Maß für die Emissionsminderung gelten die Zielvorgaben im Sanierungsrahmenkonzept von UTECON,
- (2) Ausgehend von den Abdeckenanforderungen erfolgt die Typisierung der zu sanierenden Objekte in drei Abdeckgruppen:
 - Abdeckgruppe A: Emissionsminderung,
 - Abdeckgruppe B: Emissionsminderung und Standsicherheit,
 - Abdeckgruppe C: Emissionsminderung einschließlich Verwahrung.
- (3) Die eingebauten Abdeckschichten bewirken im Sinne der Emissionsminderung die Erreichung der objektbezogenen Sanierungsziele gemäß der zugeordneten Abdeckgruppe und gewährleisten die Einhaltung des Verschlechterungsverbotes und der Schadlosigkeit für die betroffenen Schutzgüter.
- (4) Folgende Systemfunktionen müssen durch die Abdeckmaßnahmen gewährleistet werden:
 - Schutz vor Oberflächenerosion, Abwehung, Ab- und Ausspülung sowie Fähigkeit zur Initialbegrünung,
 - Speicherkapazität für versickerndes Niederschlagswasser,
 - Schutz vor Frost und Frosthebung und Sicherung der Entwässerungs- und Dichtheitseigenschaften,
 - Schaffung eines geeigneten Baugrundes für Neuansiedlungen bzw. Gewährleistung der geplanten Nachnutzung sowie

- bei Abdeckgruppe B die Sicherung der Drainagefunktion und der Niederschlagswasserableitung.

3.3 SAXONIA-Monitoring [15]

Seit Oktober 1994 führt hauptsächlich das Ingenieurbüro HGC im Auftrag der SAXONIA AG i.L. das Monitoring der Wasserpfade durch. Ziel des Monitorings ist die qualitative und quantitative Ermittlung der Schadstoffeinträge und die Dokumentation der Ergebnisse für folgende Standorte:

- Hütte Muldenhütten,
- Grube Freiberg,
- Hütte Freiberg,
- Verarbeitungsbetrieb Halsbrücke,
- Grube Halsbrücke,
- Deponien und Altstandorte anderer Eigentümer sowie
- Rothschnberger Stolln.

Zunächst wurde unter Berücksichtigung bereits vorhandener Erkenntnisse aus dem Regionalprogramm der GFE GmbH [11] ein Messnetz entworfen und der Umfang der zu bestimmenden Parameter fest gelegt. Vorgesehen wurde der Einsatz von:

- Oberflächenwassermessstellen an der Freiburger Mulde und ihren Zuflüssen, die z. T. mit Möglichkeiten zur Durchflussmessung ausgestattet sind,
- Grundwassermessstellen zur Ermittlung der Zuflüsse aus Bergbauanlagen,
- Sickerwassermessstellen zur Erfassung von Drainagen- und Kluftwässern,
- Uferfiltratmessstellen mit Grundwasserbeobachtungsrohren im Uferbereich der Mulde zur Beprobung des Auengrundwassers,
- Monitoring-Messstellen mit automatischen Messsonden an der Freiburger Mulde,
- Durchflussmessstellen an Standorten, an denen der Einsatz von Messflügeln (Flowmetrie) und Messblenden möglich ist,
- sonstige Pegel zur Grundwasserbeprobung im Festgestein bzw. der Auflockerungszone.

Außerdem werden im Monitoringprogramm Messstellen aufgeführt die aktuell nicht mehr beprobt werden, aber ehemals im Beprobungsplan enthalten waren.

Für jede Messstelle wird ein spezifischer Beprobungsplan erstellt, der neben der Beprobungshäufigkeit auch den Umfang der zu bestimmenden Parameter enthält. In Abhängigkeit vom Ausbauzustand der Probenahmestelle können auch Durchflussbestimmungen durchgeführt werden.

Um den Einfluss systematischer Fehler bei der Wasseranalyse weitgehend zu minimieren wurde in mehreren Phase Kontrollanalytik zwischen dem HGC-Labor und weiteren auftragnehmenden Labors durchgeführt. Ziel der Vergleichsanalytik war die Feststellung verfahrenstechnischer Unterschiede und anschließend die gegenseitige Abstimmung und Vereinheitlichung des analytischen Vorgehens.

Das Messprogramm bildet die Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen im Monitoring-Programm:

- Bewertung der im Untersuchungsprogramm ermittelten Schadstoffeinträge,
- Erstellung von Wasserhaushaltsbilanzen für die einzelnen Standorte,
- Berechnung der Konzentrationen und Frachten von Wasserinhaltsstoffen,
- Ermittlung des anthropogenen Schadstoffeintrages und
- Abschätzung der Gefährdungssituation.

Weiterhin ist es Aufgabe des Monitorings, durch die Lokalisierung von Belastungsquellen, eine zielgerichtete Sanierung von Gefährdungsschwerpunkten zu ermöglichen. Außerdem soll durch das Monitoring die Wirkung der Sanierungsmaßnahmen auf den Belastungszustand der Freiburger Mulde dokumentiert werden.

4 Sanierungsphase 1994 bis 2003

4.1 Ausgangssituation der Freiburger Mulde 1994

Das GFE-Gutachten [11] untersucht die Schwermetallbelastung der Freiburger Mulde unterhalb der Münzbachmündung in Bezug zur sog. Hollandliste. Es wurde festgestellt, dass in der Mulde Cadmiumkonzentrationen auftreten, die über dem als Richtwert für Sanierungen geltenden C-Wert der Hollandliste liegen. Andere Schwermetalle liegen in kritischen Konzentrationen vor. Außerdem wird angenommen, dass die Belastung der Mulde mit Arsen und vermutlich auch Blei wesentlich höher als die ausgewiesene ist, da ein großer Anteil dieser Elemente in ungelöster Form transportiert wird.

Im Auftrag der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) wurde in Schnackenburg (Schleswig-Holstein, an der Elbe oberhalb von Hamburg) 1992 eine Fracht von ca. 5,3 t/a Cadmium ermittelt. Nach [11] stammen davon etwa 1,4 t/a, nach [15] sogar 2,1 t/a aus dem Freiburger Raum!

Neben der Elbe wurden durch die IKSE auch deren Nebenflüsse untersucht. Über die Freiburger Mulde wurde zusammenfassend ausgesagt [16]:

"Die Flusssedimente der Mulde weisen unterschiedliche Metallbelastungen auf. Es zeigt sich eine, auch durch die Schwebstoffe widergespiegelte, charakteristische Verteilung der Elemente auf die Teileinzugsgebiete und deren Nebenfließgewässer.

Die Freiburger Mulde ist besonders durch die Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink gekennzeichnet, die unterhalb des Freiburger Lagerstättenbezirks und der Hüttenwerke übermäßig stark angereichert sind. Dabei setzt sich der Einfluss von Zink, Blei und Cadmium nach dem Zusammenfluss mit der Zwickauer Mulde in der Vereinigten Mulde fort.

Die Auswertung der Arbeiten wurde durch Kartendarstellungen der Geo-Indizes nach Müller unterstützt. Dabei wurde aufgrund des großen Anteils extrem hoher Werte für die Elemente Cadmium und Arsen die I_{geo} -Klasse 7 "extrem belastet" eingeführt."

Biologische Untersuchungen der UBG weisen im Jahr 1994 für die Messstelle F3150 (Muldenhütten) die Gewässergüteklasse II-III, für die Messstelle F3160 (Halsbrücke) die Gewässergüteklasse II und für die Messstelle F3170 (Obergruna) die Gewässergüteklasse II-III aus.

Oberhalb Muldenhütten wurden stabile Lebensgemeinschaften mit hoher Diversität gefunden und der Besiedlungszustand als ökologisch wertvoll eingeschätzt. In Muldenhütten wurde aufgrund der Besiedlung mit wenigen dominanten Arten ein erhöhtes Selbstreinigungspotential festgestellt. Die Degradierung von Gewässergüteklasse II in Berthelsdorf auf Gewässergüteklasse II-III wird auf die Abwassereinleitungen über die Abwasserteiche der Papierfabrik Weißenborn zurück geführt.

In Halsbrücke konnte zwischen 1991 und 1994 eine Zunahme der Artendiversität und damit einhergehend eine Verbesserung der biologischen Besiedlungsstruktur nachgewiesen werden. Die anhaltende Artenarmut in Obergruna wird mit mehreren Ausleitungstrecken und Betriebsgräben unterhalb Halsbrücke begründet.

4.2 Realisierte Sanierungsziele und Maßnahmen

Tabelle 3: Abgeschlossene Sanierungen SAXONIA - Altlastenprojekt [Quelle: SAXONIA]

Bereich	UTECON-Objektnr.	Objekt	Sanierungsabschluss
Hütte Freiberg	1.6.11	Oberes Plateau	2000
	1.1	Absetzbecken	2002
	1.2	Haldenkomplex	2003
	1.2	500 m ³ - Becken	2003
	1.5	Abbrandhalde, z. T.	2000 - 2001
Hütte Muldenhütten	2.1	Alte Arsenhütte	1996
	2.2	Otto-Deponie	2001
Halsbrücke	3.4	Pochwerkshalde	2003
Sonstige	5.3	Schlackenhalde	2002
		Halsbach	

(Stand November 2003)

4.3 Auswirkungen auf den Chemismus der Freiburger Mulde

4.3.1 Methodik der Datenauswertung

Zur Beschreibung der Beschaffenheitsentwicklung in der Freiburger Mulde wurden die zwischen 1995 und 2002 im Rahmen des Sächsischen Landesmessnetzes durch die UBG gewonnenen Daten sowie die Beprobungsergebnisse aus dem SAXONIA-Monitoringprogramm seit 1995 herangezogen. Da die Beprobungen in keinem Fall fließzeitabhängig, oftmals nicht am selben Tag und zeitweise entgegen der Fließrichtung durchgeführt wurden, müssen alle Beprobungsergebnisse als voneinander unabhängige Stichproben angesehen werden.

Wesentlichen Einfluss auf die Beprobungsergebnisse besitzen die jeweiligen Durchflüsse. Dadurch bedingte Ergebnisstreuungen müssen durch einen möglichst großen Datenpool ausgeglichen werden. Beim Vergleich der Ergebnisse aus dem Landesmessnetz mit denen des SAXONIA-Monitorings müssen die Unterschiede in der Beprobungshäufigkeit und damit in der Größe des Datenpools berücksichtigt werden. Während bei der UBG i. d. R. monatliche Messungen vorliegen, schwanken die Beprobungshäufigkeiten im SAXONIA-Monitoring an den einzelnen Messstellen von zwei Mal wöchentlich bis halbjährlich.

Die Frachtberechnungen für die Freiburger Mulde basieren auf den Messdaten der UBG am Pegel Berthelsdorf, die in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße extrapoliert wurden. Für den Münzbach wurde anhand vorhandener Kennzahlen des Einzugsgebietes der mittlere Abfluss (MQ) bestimmt.

Bei den Frachtberechnungen für die Zuflüsse Stangenbergbach und Hüttenbach (Hütte Freiberg) wurde auf Messwerte von HGC zurück gegriffen. Diese werden bei Probenahmen am Messwehr o. ä. mit bestimmt.

Aufgrund der unterschiedlichen Messmethodik können Schwankungen bei der Messwertgenauigkeit sowohl bei den von der UBG als auch bei den von HGC bestimmten Durchflüssen auftreten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Genauigkeit der Messung am Messwehr bei den gegebenen geringen Durchflüssen ausreichend ist, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die auf dem mittleren Abfluss basierenden Frachten des Münzbaches sowie die auf geschätzten Durchflüssen basierenden Frachten im Roten Graben können nur als Frachtabeschätzungen betrachtet werden.

Für eine aussagekräftige Beschreibung der Beschaffenheitsentwicklung sind die mittleren Verhältnisse von vorrangiger Bedeutung. Im Vergleich zum Mittelwert, der für die Beschreibung mittlerer Verhältnisse im Gewässer nicht geeignet ist, muss die Wichtung der maximalen und minimalen Extremwerte reduziert werden. Am Wirkungsvollsten kann das durch die Ermittlung und den Vergleich der Zentralwerte des Datenkollektives, den Medianwerten erfolgen [23].

Die Entwicklung der Stoffkonzentrationen und -Frachten sowie der Sedimentbelastung wird für Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink in den Anlagen 1 bis 5 für die Freiburger Mulde und deren wesentliche Zuflüsse grafisch dargestellt. Eine Karte des Untersuchungsabschnittes mit Angaben zu den wichtigsten Elementen ist als Anlage 6 für die Jahre 1993 und 1996 sowie als Anlage 7 für die Jahre 1995 bis 2002 beigefügt.

Um die Eintragspfade der einzelnen Elemente näher zu definieren, wurde für den Abschnitt der Freiburger Mulde zwischen Muldenhütten und Kleinvoigtsberg eine Stoffbilanz für Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer und Zink erstellt. Wie bereits erwähnt, wurde hierbei sowohl auf die von der UBG ermittelten Analysenergebnisse und Durchflüsse als auch auf die im SAXONIA-Monitoring gewonnenen Daten zurück gegriffen.

Bei der Bilanzierung wurde die UBG-Messstelle F 3150 (Bahnbrücke Muldenhütten) als Input und die UBG-Messstelle F 3161 (Kleinvoigtsberg) als Output betrachtet. In Anlage 8 sind die täglichen Frachten und deren prozentualer Anteil an der Gesamtfracht in Kleinvoigtsberg grafisch dargestellt.

Um den Einfluss der Gewässer werten zu können, von denen keine Durchflussdaten vorliegen, wurde die Frachtberechnung mit folgenden Werten durchgeführt:

- Münzbach:

$$MQ = 0,44 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (an der Mündung)}$$

- Königlich-verträglicher Gesellschaft-Stolln (KVGS):

Der Abfluss im Roten Graben beträgt normalerweise ca. 25 l/s. Seit Juni 1998 wird dieser Abfluss zeitweise durch Kühlwassereinleitungen der Fa. WACKER erhöht. Bei mehreren Beprobungen im Jahr 2000 wurden durch das StUFA Chemnitz Abflüsse gemessen, die z. T. mehr als das dreifache des ursprünglichen Wertes betragen. Deshalb wurde für die Berechnung der Frachten am KVGS ein mittlerer Durchfluss von 50 l/s angesetzt.

- Hauptstolln-Umbruch (HSU):

Im Rahmen der Beprobungskampagne am KVGS wurde im Jahr 2000 auch der HSU beprobt und der Durchfluss gemessen. Ausgehend davon wurde für die Frachtberechnung ein mittlerer Abfluss von 10 l/s ermittelt.

Der Vergleich dieser statistischen Frachtberechnungen mit einer auf Durchflussmessdaten basierenden Frachtberechnung hat ergeben, dass auch diese Messwerte eine hinreichende Genauigkeit für eine Frachtabschätzung liefern.

4.3.2 Ergebnisse der Analysenauswertung Wasser

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt für keinen der betrachteten Parameter einen klar ausgeprägten Trend. Außerdem zeigt sich bei einigen Parametern und an einigen Messstellen ein vermutlich hochwasserbedingter Anstieg im Jahr 2002.

Für Arsen ist aus den Grafiken ein schwankungsarmer Verlauf über die Jahre fest zu stellen. Allerdings ergeben sich aus den Medianwerten der Gelöst- und Gesamtkonzentrationen sowie der Gelöstfrachten im Betrachtungszeitraum steigende Tendenzen. Lediglich die Medianwerte der Gesamfrachten weisen eine überwiegend sinkende Tendenz auf.

Die Arsenkonzentration steigt im Längsverlauf der Freiburger Mulde zwischen Muldenhütten und Halsbrücke sukzessive sowie unterhalb von Halsbrücke sprunghaft an. Im Gegensatz dazu nehmen die Frachten entlang der Freiburger Mulde eher gleichmäßig zu, wobei die Belastungszunahme unterhalb Halsbrücke weniger deutlich ausgeprägt ist.

Der Belastungssprung unterhalb von Halsbrücke wird im Wesentlichen auf die Arsenbelastung des Münzbaches zurück geführt. In Bezug auf die Arsenkonzentration der Freiburger Mulde oberhalb der Münzbachmündung weist der Münzbach eine ca. dreifach höhere Gesamtkonzentration und eine ca. sechsfach höhere Gelöstkonzentration auf. Da sich die Frachten beider Gewässer in etwa auf dem selben Niveau befinden, tritt unterhalb der Münzbachmündung eine Verdopplung sowohl der Gelöst- wie auch der Gesamtfrachten auf.

Nach dem sog. Auguthochwasser im Jahr 2002 wurden stichprobenweise Wasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben aus der Freiburger Mulde entnommen und mit den Ergebnissen von Stichproben aus dem Jahr 1993 an den selben Messstellen verglichen. Dabei wurden lediglich in der Wasserprobe geringere Arsenkonzentrationen als 1993 nachgewiesen. Sowohl die Konzentrationen im Schwebstoff als auch im Sediment nahm höhere Werte als 1993 an [17].

Abgesehen von den Medianwerten für die Gelöstfrachten von *Blei* ist für dieses Element eine über die Jahre überwiegend zunehmende Belastung fest zu stellen. Im Längsschnitt der Freiburger Mulde kann ein markanter Konzentrationsanstieg zwischen Muldenhütten und Hilbersdorf sowie eine vergleichsweise deutlich geringere Konzentrationszunahme zwischen Conradsdorf und Halsbrücke abgelesen werden.

Erhebliche Zunahmen der Gesamtfracht erfolgen im Gewässerabschnitt unterhalb von Muldenhütten, im Raum Halsbrücke sowie oberhalb von Obergruna. Bezüglich der Gelöstfracht fallen Belastungszunahmen unterhalb von Muldenhütten sowie oberhalb von Kleinvoigtsberg auf. Die Frachteinträge des Münzbaches spielen dabei ebenso eine entscheidende Rolle wie die über den Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln zugeführten Bleifrachten.

Bezüglich der Gewässerbelastung mit *Cadmium* zeigt sich an den Messstellen im Eintrittsbereich der Freiburger Mulde in den Hüttenbezirk eine über die Jahre sinkende Tendenz. Diese schlägt jedoch spätestens zwischen Hilbersdorf und Conradsdorf in eine steigende Tendenz um.

Die Konzentrationen steigen zwischen Muldenhütten und Halsbrücke stetig an und nehmen dann bis Obergruna wieder geringfügig ab. Zusätzlich zu dem, mit dem

Konzentrationsanstieg korrespondierenden Frachtanstieg zwischen Muldenhütten und Halsbrücke weist der Frachtverlauf in der Freiburger Mulde einen erneuten Anstieg der Cadmiumfracht unterhalb des eigentlichen Hüttenbezirkes auf. Dieser findet bei der Gelöstfracht bereits in Kleinvoigtsberg statt, während der Anstieg bei der Gesamtfracht erst in Obergruna einsetzt.

Abgesehen von dem vermutlich hochwasserverursachten Belastungsanstieg im Jahr 2002 zeigt der zeitliche Verlauf der Gesamtkonzentration bzw. -Fracht an der Messstelle Münzbachmündung, dass sich diese im Münzbach auf einen Wertebereich einpendelt. Eine derartige Konstanz besteht bereits bei den Gelöstkonzentrationen bzw. -Frachten. In Bezug auf die Gesamtbelastung der Freiburger Mulde besitzt der Cadmiumeintrag über den Münzbach nur eine vergleichsweise geringe Relevanz.

Aus der Bilanzierung der Gelöstfrachten geht hervor, dass für die Cadmiumbelastung der Freiburger Mulde unterhalb des Hüttenbezirkes insbesondere die Zuflüsse Stangenbergbach und Königlich-verträglicher Gesellschaft-Stolln von Bedeutung sind.

Die Belastung der Freiburger Mulde mit Kupfer zeigt einen zeitlichen Verlauf ähnlich der Cadmiumbelastung. Während sich an den Messstellen unmittelbar nach Eintritt der Freiburger Mulde in das Untersuchungsgebiet noch über die Jahre sinkende Tendenzen beobachten lassen, sind an den weiter flussabwärts gelegenen Messstellen steigende Tendenzen ersichtlich. Das trifft im Allgemeinen sowohl für die Konzentrations- als auch für die Frachtverläufe zu.

Im Verlauf der Freiburger Mulde steigen die Konzentrationswerte zwischen Muldenhütten und Halsbrücke an, wobei zwischen Hilbersdorf und Conradsdorf ein besonders deutlicher Belastungssprung auftritt. Während die Gelöstkonzentration unterhalb Halsbrücke kontinuierlich sinkt, tritt bei den Gesamtkonzentrationen ein lokaler Belastungsanstieg in Obergruna auf. Unterhalb von Obergruna setzt sich die Belastungsabnahme allerdings fort.

Beim Frachtverlauf im Längsschnitt der Freiburger Mulde weist ebenfalls einen stetigen Anstieg zwischen Muldenhütten und Halsbrücke auf. Allerdings tritt der Belastungssprung nur bei der Gelöstfracht deutlich hervor. Nach einer geringfügigen Belastungsabnahme zwischen Halsbrücke und Kleinvoigtsberg erhöht sich die Kupferbelastung bis zum Austritt

der Freiburger Mulde aus dem Untersuchungsgebiet. Bei der Gesamtfracht hingegen setzt sich der primäre belastungsanstieg über Halsbrücke hinaus bis Kleinvoigtsberg fort. Danach erfolgt die lokal begrenzte Belastungsabnahme bis Obergruna, wo erneut eine Belastungszunahme einsetzt.

Im Münzbach zeigt sich, wenn man die Messwerte des Jahres 2002 unberücksichtigt lässt, dass sich sowohl die Gelöst- wie auch die Gesamtkonzentrationen und -Frachten an ein konstantes Niveau annähern. Es zeigt sich jedoch auch, dass die ermittelten Medianwerte bei der Gelöstkonzentration bzw. -Fracht jedes Jahr geringfügig höher werden. Bezogen auf die Belastung der Freiburger Mulde oberhalb der Münzbachmündung besitzen die Kupferfrachten des Münzbaches keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbelastung der Freiburger Mulde.

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen von Zink zeigt größtenteils gleichbleibende oder abnehmende Tendenzen, wobei sich in Halsbrücke und Siebenlehn jedoch bei der Gesamtkonzentration eine steigende Tendenz zeigt. Erhebliche Unterschiede existieren auch bei den Frachtverläufen. Während bei den Werten der Gelöstfrachten überwiegend abnehmende Tendenzen vorhanden sind, sind diese bei den Gesamtfrachten nur in Muldenhütten und Hilbersdorf feststellbar. Ab Conradsdorf weisen die Gesamtfrachten ausschließlich tendenziell steigende Medianwerte auf.

Zwischen Muldenhütten und Halsbrücke steigen die Konzentrationen stufenweise an, wobei vor allem zwischen Hilbersdorf und Conradsdorf eine deutliche Konzentrationszunahme ausgewiesen werden kann. Unterhalb von Halsbrücke nehmen die Gelöstkonzentrationen bis zum Gebietsausgang kontinuierlich ab. Die Konzentrationsabnahme wird bei den Gesamtkonzentrationen durch einen örtlichen Konzentrationsanstieg in Obergruna unterbrochen, setzt sich jedoch danach bis Siebenlehn fort.

Die Gelöstfracht weist zwischen Muldenhütten und Halsbrücke eine ausgeprägte Belastungszunahme auf, die sich dann bis zum Erreichen des Maximalwertes in Obergruna abschwächt. Danach nimmt die Gelöstfracht bis zum Gebietsausgang in Siebenlehn wieder ab. Für die Gelöstfracht ergibt sich im Untersuchungsgebiet eine permanente Belastungszunahme, die sich asymptotisch an den Maximalwert in Siebenlehn annähert.

Im Münzbach ist seit dem Erreichen der minimalen Belastungswerte im Jahr 2000 eine Erhöhung des Belastungsniveaus im darauffolgenden Jahr zu beobachten. Aufgrund des dazwischen liegenden Hochwassers im Jahr 2002 kann keine Aussage darüber erfolgen, ob sich dieser Belastungsanstieg fort gesetzt hat. Aus dem Vergleich der Frachtanteile einzelner Zuflüsse an der Gesamtbelastung geht hervor, dass der Münzbach, nach dem Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln, der zweitgrößte bekannte Zinkemittent im Untersuchungsgebiet ist. Allerdings ist die Herkunft von fast 50 % der Zinkfracht in Kleinvoigtsberg keiner Quelle eindeutig zuzuordnen.

Aufgrund der eher untergeordneten Bedeutung der Elemente Nickel, Thallium und Silber wurde auf eine grafische Darstellung der Konzentrationen und Frachten verzichtet.

Die Abschätzung der Verhältnisse bei *Nickel* ergab einen über die Zeit abnehmenden Trend bezüglich der Konzentrationen und der Gelöstfracht, wobei vor allem bei den Frachten hochwasserbedingte Anstiege der Messwerte im Jahr 2002 zu verzeichnen sind. Aus den Werten für die Gesamtfrachten kann keine eindeutige Entwicklung abgelesen werden. Im Längsschnitt werden die Konzentrationsspitzen in Halsbrücke und Obergruna erreicht, während die Frachten im Untersuchungsgebiet nahezu konstant ansteigen.

Thallium spielt bezüglich der Belastung der Freiburger Mulde eine unwesentliche Rolle, da sämtliche verfügbaren Messwerte unterhalb oder nur knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen. Aus der verhältnismäßig geringen Anzahl verwertbarer Werte ergibt sich eine rückläufige Entwicklung für die Gesamtkonzentration, während sich die Gelöstkonzentration nicht einheitlich entwickelt. Die Konzentrationsspitzen liegen im Längsschnitt in Kleinvoigtsberg und Siebenlehn. Obwohl bei der Gelöstfracht der Hochwassereinfluss im Jahr 2002 erkennbar ist, ergibt sich ein abnehmender langjähriger Trend. Die Gesamtfrachten bewegen sich seit dem Jahr 2000 auf gleich bleibendem Niveau. Frachtspitzen werden ebenfalls in Kleinvoigtsberg und Siebenlehn erreicht.

Ebenfalls mehrheitlich unter der Nachweisgrenze liegen die Konzentrationen von *Silber*. Da die Gelöstkonzentrationen immer unter der Nachweisgrenze liegen, erfolgt der Silbertransport vermutlich im Wesentlichen über kolloidale Wasserinhaltsstoffe oder über das Sediment. Auffällig sind die hohen Silberkonzentrationen im Jahr 1997 in Conradsdorf und Obergruna.

Bei der Bilanzierung der Schadstoffeinträge zwischen Muldenhütten und Kleinvoigtsberg stellte sich heraus, dass die Vorbelastung der Freiburger Mulde beim Eintritt in den Hüttenbezirk bei einigen Elementen einen wesentlichen Anteil an der Gesamtbelastung am Ausgang des Untersuchungsgebietes trägt. Deshalb wurden zusätzlich für wesentliche Parameter die Messstellen Holzau (F3120) und Rechenberg-Bienenmühle (F3125) in die Betrachtung einbezogen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Mediane 1995 bis 2002 von Konzentrationen und Frachten (gelöst / gesamt)

		F3120 ⁽¹⁾⁽²⁾ Holzau	F3125 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ Rechenberg-B.	F3150 Muldenhütten	F3161 ⁽³⁾ Kleinvoigtsberg
Arsen gelöst	µg/l	1,400	1,300	1,450	5,600
	kg/d	0,017	0,036	0,310	1,660
Arsen gesamt	µg/l	3,000	1,400	2,250	9,800
	kg/d	0,027	0,027	0,398	2,171
Blei gelöst	µg/l	u. N.	u. N.	u. N.	2,300
	kg/d	k. A.	k. A.	k. A.	0,800
Blei gesamt	µg/l	1,800	0,600	3,350	12,000
	kg/l	0,013	0,012	0,759	3,622
Cadmium gelöst	µg/l	0,700	0,400	0,440	6,000
	kg/d	0,004	0,008	0,090	1,910
Cadmium gesamt	µg/l	0,760	0,500	0,600	7,100
	kg/d	0,006	0,010	0,125	2,577
Kupfer gelöst	µg/l	1,900	1,100	2,200	8,300
	kg/d	0,016	0,048	0,470	2,340
Kupfer gesamt	µg/l	2,600	2,300	4,000	12,000
	kg/d	0,025	0,041	0,848	4,284
Zink gelöst	µg/l	38,000	21,000	30,000	667,000
	kg/d	0,267	0,363	7,340	200,600
Zink gesamt	µg/l	38,000	23,000	41,000	689,330
	kg/d	0,267	0,371	8,546	207,315

Anmerkungen zur Tabelle 4:

- (1) = Analysenwerte Gelöstkonzentration Arsen nur 1999 - 2002 vorhanden
- (2) = Analysenwerte Gesamtkonzentrationen nur 1999 - 2002 vorhanden

- (3) = Analysenwerte Gelöstkonzentrationen nur 1999 - 2002 vorhanden
- (4) = Analysenwerte Gesamtkonzentrationen nur 2000 vorhanden
- (5) = einige Parameter wurden 1995 und 1999 nicht beprobt

Aus dem Vergleich der Gelöstkonzentrationen mit den jeweiligen Richtwerten für unbelastete Gewässer [19] geht hervor, dass die Konzentrationen von Arsen, Kupfer und Zink im Oberlauf der Freiburger Mulde diesen Richtwert nur knapp unterbieten. Die Cadmiumkonzentration liegt sogar deutlich darüber. Lediglich bei Blei lag die Gelöstkonzentration unter der Nachweisgrenze.

Diese verhältnismäßig hohe Belastung im Oberlauf kann vermutlich nur teilweise auf geogene Ursachen zurück geführt werden. Wahrscheinlich muss ein wesentlicher Anteil der Schadstoffbelastung in der Mulde auf den stillgelegten Bergbau um Holzau zurück geführt werden, wo im 17. und 18. Jahrhundert Erzbergbau betrieben wurde. Zwischen dem 17. und dem beginnenden 20. Jahrhundert wurden kleinere Bergwerke in Mulda und Zethau betrieben. Auf tschechischer Seite wurde in Moldava ein Grubenanlage bis 1994 betrieben [19].

Unter Berücksichtigung dieses bergbaulichen Hintergrundes lässt sich vor allem die deutliche Erhöhung der Gelöstkonzentrationen und -Frachten auf der kurzen Fließstrecke von Holzau bis Rechenberg-Bienenmühle sowie die Zunahme der Frachten zwischen Rechenberg-Bienenmühle und Muldenhütten um mindestens das Zehnfache erklären!

4.3.3 Ergebnisse der Analysenauswertung Sediment

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Sedimentgehalte in der Freiburger Mulde und ihren Zuflüssen ist in der Anlage 5 grafisch dargestellt. Da lediglich für den Zeitraum von 1999 bis 2002 auswertbare Daten zur Verfügung standen, ist es generell schwierig Aussagen zu Trendentwicklungen abzuleiten. Außerdem muss bei der Beurteilung der Ergebnisse, ebenso wie bei den Wasseranalysen, eine möglicherweise hochwasserbedingte Beeinflussung beachtet werden. Daten über die Sedimentbelastung des Münzbaches lagen nicht vor.

Auffällig bei den Sedimentgehalte von Arsen sind ausgeprägte Messwertschwankungen, vor allem in der Freiburger Mulde. Die sehr hohen Sedimentgehalte im Jahr 2002 sind vermutlich durch während des Hochwassers erodiertes Material hervor gerufen worden. Zwischen Muldenhütten und Conradsdorf ist der Anstieg des Arsengehaltes im Sediment besonders ausgeprägt. Verantwortlich dafür sind augenscheinlich Materialabträge von der Arsenhalde Muldenhütten sowie Sedimenteinträge über den Roten Graben. Eine relativ hohe Belastung des Sedimentes mit Arsen ist auch in Obergruna feststellbar, wobei hier keine Aussagen zu deren Ursache gemacht werden kann.

Im Ergebnisbericht zum Muldeprojekt [19] wurde eine erhebliche Vorbelastung der Freiburger Mulde vor Eintritt in den Freiburger Hüttenbezirk nachgewiesen. Außerdem wurde als Messpunkt mit der maximalen Sedimentbelastung Hilbersdorf benannt. Die Auswertung der Messwerte für den Zeitraum 1999 bis 2002 bestätigt diese Erkenntnis. Nennenswert ist jedoch, dass sowohl die Messwerte der Vorbelastung als auch die Spitzenwerte über den im Muldeprojekt gemessenen liegen.

Die Sedimentbelastung der Freiburger Mulde mit Blei wird hauptsächlich von den Zuflüssen Hüttenbach Freiberg und Stangenbergbach verursacht. Aus der langjährigen Betrachtung geht hervor, dass deren Sedimentgehalte wesentlich höher liegen als die Sedimentbelastung der Freiburger Mulde oberhalb von Muldenhütten. Bezüglich der Sedimentbelastung mit Blei spielt der Rote Graben eine eher untergeordnete Bedeutung, so dass die extreme Belastung lokal begrenzt im Flussabschnitt Muldenhütten - Hilbersdorf auftritt und sich dann etwa bei der doppelten der Fracht bezogen auf die Bahnbrücke Muldenhütten stabilisiert.

Sowohl im Muldeprojekt [19] als auch bei der Auswertung der UBG-Messdaten von 1999 bis 2002 weist der Messpunkt Hilbersdorf die höchste Sedimentbelastung auf. Während allerdings das Muldeprojekt im Oberlauf der Freiburger Mulde die Sedimentbelastung zwischen 166 und 410 mg/kg angibt, ergibt die Auswertung der UBG-Messdaten eine Vorbelastung der Freiburger Mulde in Muldenhütten von 2207 mg/kg.

Im Verlauf der Freiburger Mulde steigt die Belastung des Sedimentes mit Cadmium nahezu kontinuierlich an. Dabei steigt die Belastung vor allem zwischen Muldenhütten und Hilbersdorf und unterhalb der Münzbachmündung an. Hervorgerufen wird die Belastung hauptsächlich vom extrem belasteten Hüttenbach Freiberg. Außerdem besitzt offensichtlich

der Münzbach eine hohe Sedimentbelastung mit Cadmium. Besonders auffällig ist, dass im Jahr 2002 die höchste Belastung der Freiburger Mulde an der Bahnbrücke Muldenhütten, also oberhalb des SAXONIA-Einflussbereiches, ermittelt wurde.

Während sich die Sedimentbelastung mit Kupfer zwischen Muldenhütten und Hilbersdorf offensichtlich durch erodiertes Material verdoppelt, beruht der Anstieg zwischen Hilbersdorf und Conradsdorf im Wesentlichen auf Sedimenteinträgen über die Abschlüge des Roten Grabens in diesem Bereich. Die Sedimentbelastung im Roten Graben ist prinzipiell höher als in der Freiburger Mulde und ist auf die hohe Belastung des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln und vor allem des Hauptstolln-Umbruch zurück zu führen. Nach einem Rückgang der Sedimentgehalte zwischen Conradsdorf und Halsbrücke ist ein erneuter Belastungsanstieg unterhalb der Münzbachmündung zu verzeichnen, der vermutlich vom Münzbach sowie von Materialabträgen der Halden im Raum Halsbrücke verursacht wird.

Die Sedimentbelastung der Freiburger Mulde mit Zink steigt zwischen Muldenhütten und Conradsdorf sowie zwischen Halsbrücke und Kleinvoigtsberg deutlich an. Zurück zu führen ist die Belastungszunahme sowohl auf die Zuflüsse zur Freiburger Mulde, insbesondere auf Hüttenbach Freiberg und Roten Graben, als auch auf erodiertes Material von den ufernahen Hüttenstandorten und Ablagerungen. Außerdem wird dem Münzbach ein erheblicher Anteil an der Steigerung der Sedimentgehalte unterhalb Halsbrücke zugeordnet, der allerdings aufgrund nicht vorhandener Messwerte nicht nachgewiesen werden kann.

Abgesehen von einzelnen Ausnahmen bewegt sich die Belastung des Sedimentes mit Nickel im betrachteten Zeitraum auf einem gleichmäßigen Niveau. Die Belastung des Sedimentes schwankt zwischen Muldenhütten und Obergruna relativ stark. Dabei liegen die Belastungswerte an der Messstelle Kleinvoigtsberg wesentlich niedriger als die Werte der Sedimentbelastung in Muldenhütten. Wesentliche Belastungszunahmen sind zwischen Muldenhütten und Hilbersdorf sowie nach einer kurzen Regenerationsstrecke zwischen Conradsdorf und Halsbrücke zu verzeichnen. Auf der Fließstrecke von Halsbrücke nach Kleinvoigtsberg tritt eine deutliche Belastungsreduzierung ein. Der markanteste Belastungsanstieg ist dann zwischen Kleinvoigtsberg und Obergruna fest gestellt worden, also weit unterhalb des eigentlichen Untersuchungsgebietes. In Obergruna wird auch die maximale Sedimentbelastung im untersuchten Gewässerabschnitt erreicht.

Bei den Zuläufen zur Freiburger Mulde ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während die Belastung des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln und Stangenbergbaches geringer als die der Freiburger Mulde oberhalb von Muldenhütten ist, liegen die ermittelten Belastungen im Hüttenbach Freiberg und im Hauptstolln-Umbruch deutlich darüber.

Die Sedimentbelastung mit *Thallium* steigt zwischen Muldenhütten und Hilbersdorf sowie zwischen Halsbrücke und Kleinvoigtsberg an. In den dazwischen liegenden Flußabschnitten treten keine Veränderungen der Sedimentbelastung auf. Insgesamt bewegt sich die Belastung des Sedimentes mit Thallium auf einem niedrigem Niveau. Die Zunahme der Belastung unterhalb von Muldenhütten wird auf den Stangenbergbach zurück geführt, dessen Sedimentbelastung das Zwanzigfache der Sedimentbelastung in der Freiburger Mulde oberhalb von Muldenhütten beträgt. Verursacher für den Belastungsanstieg unterhalb Halsbrücke sind vermutlich erodierte Ablagerungen von den Hütten- und Haldenkomplexen bei Halsbrücke bzw. Einträge über den Münzbach.

4.4 Auswirkungen auf den biologischen Zustand der Freiburger Mulde

Als Mittelgebirgsfluss ist die Freiburger Mulde Lebensraum für eine typische Fließgewässerlebensgemeinschaft. Die untersuchten Gewässerabschnitte befinden sich im Übergangsbereich von der Forellen- zur Äschenregion. Es ist aber sowohl aus historischen als auch aus aktuellen Quellen bekannt, dass in der Freiburger Mulde im Abschnitt von Weißenborn bis zur Bobritzschmündung nur ein sehr geringer Fischbestand vorhanden ist.

Schon seit längerer Zeit besteht der Verdacht, dass als Ursache die bergbaubedingte Schwermetallbelastung des Flusses in Frage kommt. Um diesen Zusammenhang näher zu beleuchten und das Ausmaß der Belastungen abschätzen zu können, wurden in den vergangenen Jahren bereits mehrfache Untersuchungen hinsichtlich der einzelnen biologischen Komponenten unternommen, jedoch noch nie im Zusammenhang ausgewertet. Das soll an dieser Stelle versucht werden.

Gerade die Wasserorganismen, welche in ihrer Umgebung dauernd und über längere Zeit den Wasserinhaltsstoffen als Summe ausgesetzt sind, eignen sich gut als Indikatoren für den Belastungsgrad des Flusswassers. Gleichzeitig können sie Hinweise darauf geben, an welchen Flussabschnitten sich die Schadstoffgehalte, z.B. bedingt durch diffuse Einleitungen, erhöhen,

wie dies durch chemische Analysen nicht immer zu erkennen ist. Dabei sollen hier Ergebnisse sowohl der älteren Untersuchungen als auch aktueller Erhebungen zusammengeführt werden.

Sinnvoll ist eine solche Auswertung nur dann, wenn mehrere Stufen der Nahrungskette betrachtet werden. Als Vertreter der Produzenten wurden die Wassermoose und Wasserhahnenfuß auf Schwermetallrückstände untersucht. Ein Zwischenglied als Nahrungsgrundlage für die Fische stellt das Makrozoobenthos, also die mit bloßem Auge sichtbaren wirbellosen Wassertiere dar. Dieses wurde auf Artenzusammensetzung und Bestandsdichte hin ausgewertet. Die Fische als Endglied der Nahrungskette wurden sowohl in ihrem Bestand als auch auf Schwermetallrückstände im Gewebe untersucht. Die Ergebnisse dieser Auswertung sollen Notwendigkeit und Ansatzpunkte von Sanierungsmaßnahmen untersetzen und bereits bestehende Auswirkungen oder Handlungsbedarf aufzeigen.

4.4.1. Makrozoobenthos

Das Makrozoobenthos, also die makroskopisch sichtbaren, wirbellosen, den Gewässergrund besiedelnden Tiere, bilden als mittlere Stufe in der Nahrungskette des Ökosystems Fluss ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des biologischen Zustandes eines Gewässers. Sie bilden vor allem die Nahrungsgrundlage für die Fische. Ein verminderter Makrozoobenthosbestand wirkt sich auch auf den Fischbestand aus.

Zur Auswertung des Makrozoobenthosbestandes in der Freiburger Mulde wurde auf die Protokolle der UBG zur Ermittlung des Saprobienindex zurückgegriffen. Diese werden pro Messstelle zweimal im Jahr erhoben. Eigentlich werden bei dieser Untersuchung nur die Indikatorarten für organische Belastung festgehalten. Seit 2001 werden in der UBG aber alle festgestellten Arten mit der Häufigkeit ihres Vorkommens (Abundanz) notiert, so dass eine Auswertung über den reinen Saprobienindex hinaus möglich ist.

Dazu wurden die Artenzahlen von den je zwei Untersuchungen pro Jahr an einer Probenahmestelle zusammengefasst (Gesamtartenzahl) und die Abundanzen aufsummiert. Die Abundanzklassen machen eine halbquantitative Aussage über die Häufigkeit einer Art an einer Untersuchungsstelle möglich. Die Summe der Abundanzen spiegelt daher nicht ganz genau die Anzahl der Individuen wider, aber eine Abschätzung zum Bestand ist möglich.

Zur Beurteilung der Werte muss noch hinzugefügt werden, dass bei der Erhebung der Daten individuelle methodische Unterschiede eine Rolle spielen können. Die Daten der zwei herangezogenen Jahre stammen von zwei unterschiedlichen Probenehmern, sind also nicht absolut, nur in der Tendenz miteinander vergleichbar.

Die in den folgenden Diagrammen verwendeten Messstellenbezeichnungen entsprechen folgenden Orten an der Freiburger Mulde:

- F3125 uh. Rechenberg-Bienenmühle
- F3140 Berthelsdorf
- F3150 oh. Muldenhütten/ Bahnbrücke
- F3151 Straßenbrücke Hilbersdorf
- F3152 Conradsdorf Brücke
- F3160 Halsbrücke vor Münzbachmündung
- F3161 Kleinvoigtsberg
- F3170 Obergruna
- F3171 Siebenlehn Autobahnbrücke

Das Vorkommen einer arten- und individuenreichen Population ist natürlich nicht nur von der Wasserbeschaffenheit, sondern ganz besonders auch von der Struktur und Morphologie des Gewässers abhängig. So können z.B. auch Staue vor Wehren etc. die Artenzahl vermindern. Die untersuchten Abschnitte der Freiburger Mulde sind aber vergleichbar, da an allen etwa ähnliche Strömungsverhältnisse, gröbere Steine im Flussbett und teilweise Wassermoose und Hahnenfuß (allerdings in wechselnden Anteilen) vorhanden sind.

Die Artenzahl nimmt vom Oberlauf bis Muldenhütten geringfügig entsprechend den natürlichen Bedingungen ab. Im Jahr 2001 bleibt dieses Niveau ungefähr bis Conradsdorf erhalten und sinkt dann, nachdem der Rote Graben vollständig (über mehrere Abschlüge) in die Freiburger Mulde eingeflossen ist, drastisch ab. Nach der Einmündung des Münzbaches bzw. ab Kleinvoigtsberg ist wieder eine allmähliche Zunahme der Artenzahl sichtbar.

Im Jahr 2002 ist bereits nach der Passage von Muldenhütten, also an der Brücke Hilbersdorf, ein leichter Artenrückgang zu verzeichnen, welcher sich bis Kleinvoigtsberg, wo die geringste Artenzahl (nur 12 Arten im Vergleich zu ca. 50 oh. Muldenhütten!) festgestellt wurde,

fortsetzt. Danach steigt die Artenzahl relativ sprunghaft wieder an und erreicht nach der Einmündung der Bobritzsch etwa die gleichen Werte wie oberhalb Muldenhütten.

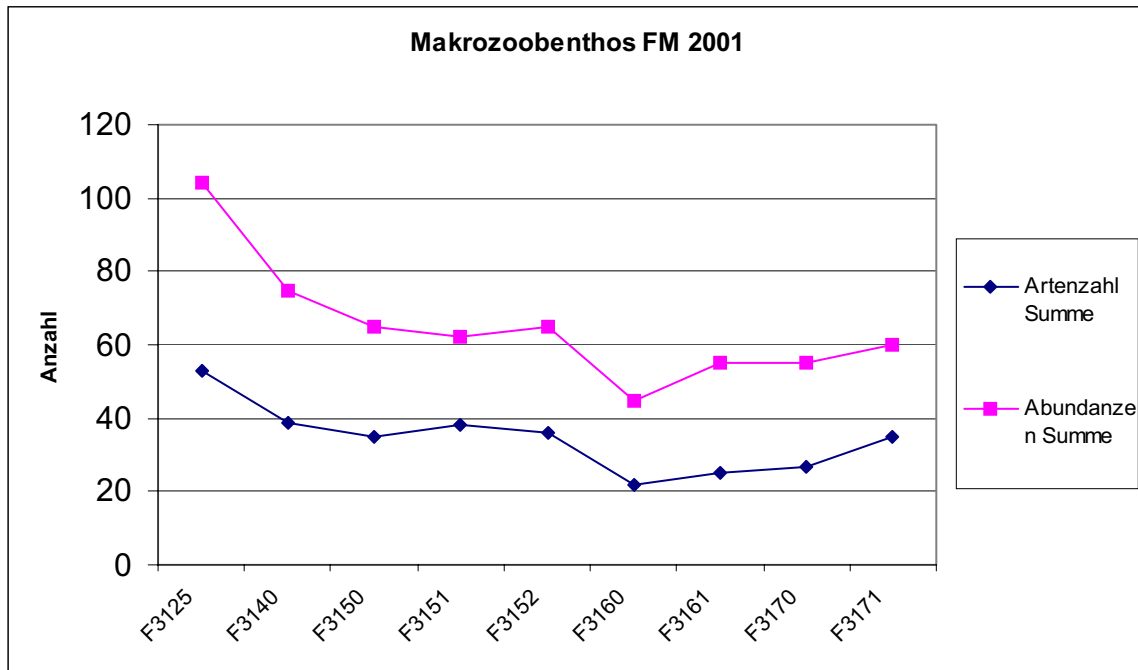


Abb. 7: Makrozoobenthos in der Freiburger Mulde, Untersuchung im Jahr 2001

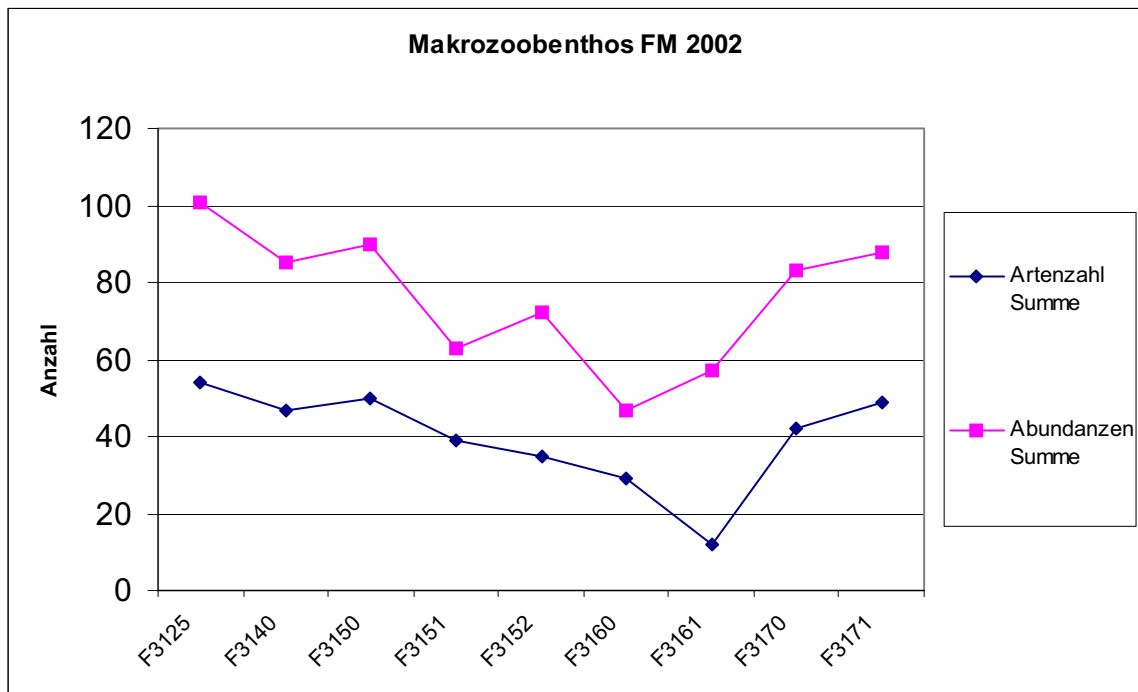


Abb. 8: Makrozoobenthos in der Freiburger Mulde, Untersuchung im Jahr 2002

Die Abundanzen, also die ungefähre Gesamtzahl an Einzeltieren aller Arten pro Untersuchungsstelle zeigt ähnliche Tendenzen wie die Artenzahl. In beiden Jahren zeigt sich jedoch schon eine Abnahme der Individuen an der Brücke Hilbersdorf, was auf einen nachteiligen Einfluss des Muldenhüttenbereiches schließen lässt. Von Hilbersdorf bis Halsbrücke, also auf der Strecke, in welcher der Rote Graben in die Freiburger Mulde einmündet, kommt es zu einem drastischen Einbruch der Besiedelungsdichte im Fluss.

In Halsbrücke sinkt die Anzahl der Individuen gegenüber Berthelsdorf um fast die Hälfte ab. Diese Individuen verteilen sich zudem auf ein sehr knappes Artenspektrum (siehe vorheriger Abschnitt), so dass man hier von einer verarmten Biozönose sprechen muss. Von der Messstelle Kleinvoigtsberg an ist in beiden Jahren ein leichter Anstieg der Abundanzen erkennbar, der sich im Bereich Obergruna fortsetzt und nach der Bobritzscheinmündung an der Messstelle Siebenlehn wieder zu „normalen“ Werten führt.

Eigene Erhebungen im Herbst / Winter 2003 (siehe Abbildung 9) bestätigen diese Ergebnisse. Auch wenn bei der einmaligen Beprobung zu einer eher ungünstigen Jahreszeit nicht alle Arten und Formen erfasst werden konnten, zeichnen sich die gleichen Tendenzen ab wie bei den Untersuchungen durch die UBG. Es ergibt sich wiederum ein starkes Absinken sowohl von Artenzahl als auch von Individuendichte unterhalb von Halsbach. Erst ab Rothenfurth steigen die Werte wieder leicht an, aber auch hier sind noch Störungen erkennbar.

Die Ursachen für die streckenweise Verarmung der Wirbellosenfauna sind eindeutig auf den Gehalt an Schadstoffen zurückzuführen, denn die untersuchten (nicht ausgebauten) Gewässerabschnitte bieten durch sauerstoffreiches, schnellströmendes Wasser, reichstrukturiertes Flussbett mit grobsteinigen und sandig-kiesigen Abschnitten sowie teilweise gut ausgebildeten Makrophytenbeständen (vor allem Wassermoose) eigentlich gute Bedingungen für die charakteristischen Wasserorganismen dieses Flusstypes.

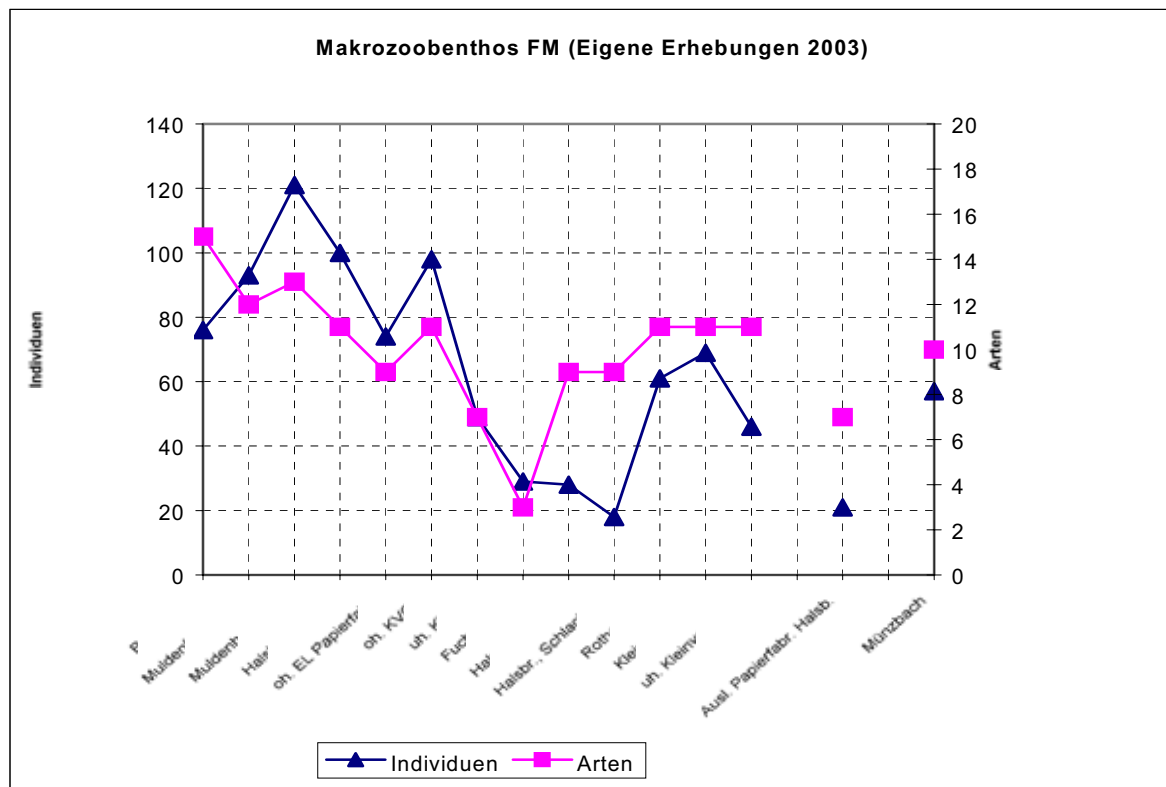


Abbildung 9: Individuen- und Artenzahlen in der Freiburger Mulde (eigene Stichproben)

4.4.2. Untersuchungen zu Bestand und Schwermetallrückständen in Fischen

In den Jahren 1999 und 2000 wurden jeweils von der Fischereibehörde der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) am gesamten Oberlauf der Freiburger Mulde an jeweils vergleichbaren Abschnitten Befischungen mit Elektrofishgeräten durchgeführt. Im Jahr 2000 wurde zusätzlich an einem Teil dieser Fische der Gehalt an Schwermetallen in Muskelfleisch und Leber untersucht.

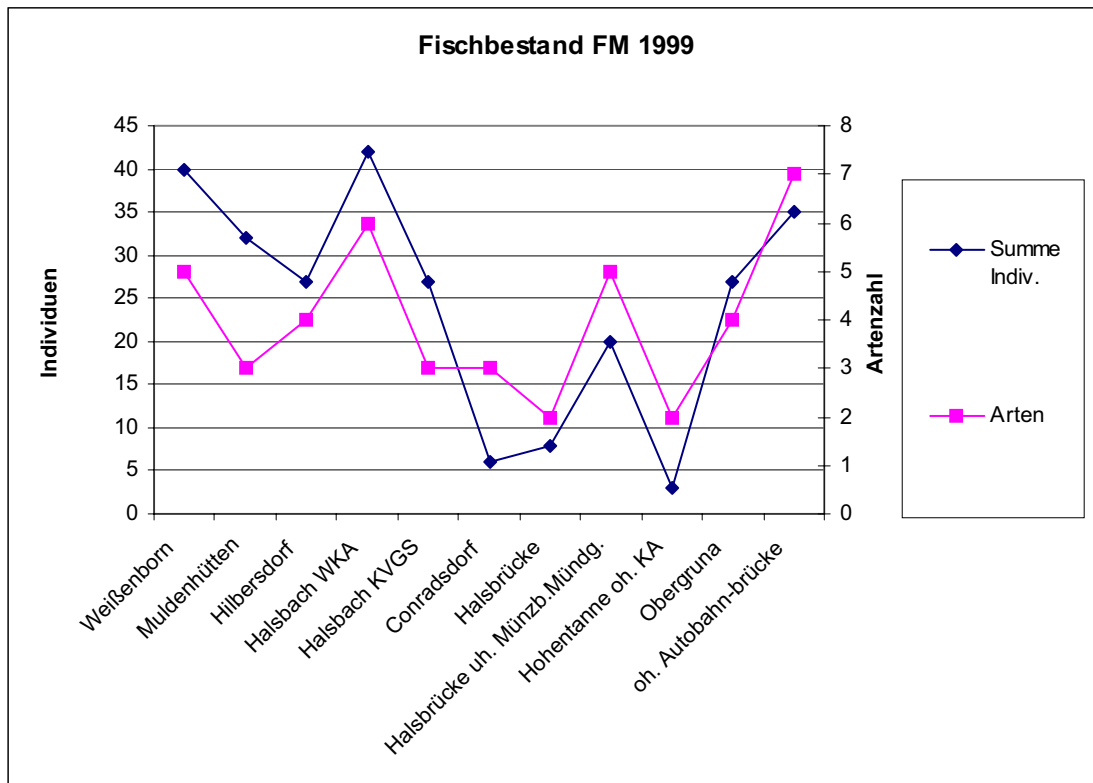
In der Freiburger Mulde im Abschnitt unmittelbar unterhalb Weißenborn hat sich erst in den letzten Jahren (etwa ab 1995) nach dem Bau der Kläranlage für die Papierfabrik und dem damit einhergehenden Nachlassen der organischen Belastung des Flusses wieder ein Fischbestand eingestellt.

In den beiden Jahren 1999 und 2000 ist die Tendenz bei Artenzahl und Individuen unterhalb Weißenborn stark vermindert, d. h. bereits auf der Fließstrecke von Weißenborn zur Bahnbrücke Muldenhütten, also noch vor dem Einflussbereich der Bergbaualtlast, nehmen Individuen- und Artenzahl ab. Dies könnte sowohl auf „Unschärfen“ zurückzuführen sein, die bedingt sind durch die kurze Abfolge der befisheten Abschnitte in Verbindung mit dem natürlichen Bewegungsradius der Fische, oder es könnte auch die von dem Gelände der Firma

Sachsenfeuerwerk ausgehende Belastung mit HCH widerspiegeln, was jedoch eher als spekulativ anzusehen ist.

Abb. 10: Fischbestand im Jahr 1999 in der Freiberger Mulde

Ein deutlicher Bestandseinbruch ist nach Beginn des Einflusses der Einmündung vom



Königlich-verträglichen-Gesellschaft-Stolln (KVGS), dem ersten Abschlag des Roten Grabens in die Freiberger Mulde, erkennbar. Dabei ist diese drastische Verringerung von Arten- und Individuenzahl im Jahr 2000 noch deutlicher sichtbar als 1999. Im Jahr 2000 verringerte sich auf dem Abschnitt zwischen der ehemaligen WKA Halsbach und der Brücke Fuchsmühle (ca. 1,5 km) die festgestellte Artenzahl von fünf auf eine und die Individuenzahl von 172 auf 21. Auf diesem extrem niedrigen Niveau bleibt der Fischbestand auf einer Fließstrecke von etwa 20 km bis Kleinvoigtsberg bzw. Obergruna nahezu konstant.

Ein kleinräumiger Anstieg von Arten- und Individuenzahl erfolgt nur im Mündungsbereich des vor allem organisch, aber auch mit Schwermetallen und Arsen belasteten Münzbaches. Da im Münzbach die Konzentrationen an Schwermetallen und Arsen aber im Mittel in etwa der gleichen Größenordnung liegen wie in der Freiburger Mulde selbst, kann ein Verdünnungseffekt nicht der Grund für das Fischvorkommen in diesem Bereich sein. Es ist eher anzunehmen, dass es einen Zusammenhang mit dem vermehrten Vorkommen von Nährtieren für die Fische im Bereich der nährstoffreichen Münzbachmündung gibt.

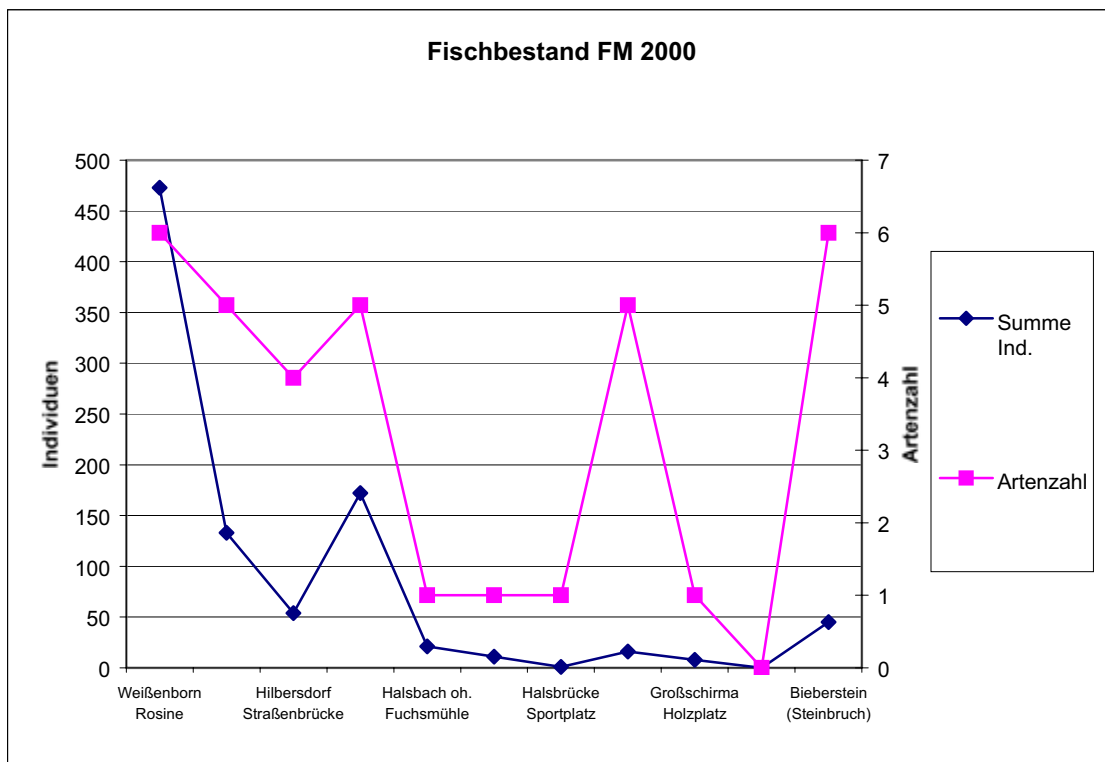


Abb. 11: Fischbestand im Jahr 2000 in der Freiburger Mulde

Erst ab der Einmündung der nicht mit Schwermetallen belasteten Bobritzsch ist ein deutlicher Anstieg des Fischbestandes hinsichtlich Artenzahl und Individuendichte erkennbar.

Im Jahr 1999 wurden im Rahmen der Bestandserfassung der Fische durch das LfL (Dr. Pfeifer) in der Freiburger Mulde an vier Abschnitten Fische verschiedener Arten zum Zweck der Untersuchung auf akkumulierte Schwermetalle in Muskulatur und Leber gefangen [26].

Da verschiedene Fischarten unterschiedlich empfindlich gegenüber Metallen sind bzw. diese nicht in gleichem Maße akkumulieren, wurde für die folgende Auswertung nur eine Art, die Bachforelle, herangezogen, um eine Vergleichbarkeit der Werte zu ermöglichen. Eine gewisse

Unschärfe der Ergebnisse durch die unterschiedliche Lebensgeschichte der Individuen (z.B. Aufsteigen der Forellen zur Laichzeit) muss dabei berücksichtigt werden. Die Fische haben sich mit Sicherheit nicht ihr ganzes Leben jeweils nur in dem befischten Abschnitt aufgehalten. Damit sind die z. T. erheblichen Schwankungsbereiche der Ergebnisse zu erklären.

Die jeweils mehrere hundert Meter umfassenden vier Abschnitte verteilen sich folgendermaßen:

- (1) Muldenhütten: oberhalb Muldenhütten als vermeintlich vom Bergbau unbeeinflusster Bereich (UBG-Messstelle F3150),
- (2) Hilbersdorf: nach Passage der Altlastenfläche Muldenhütten mit der Arsenkippe (UBG-Messstelle F3151),
- (3) Halsbrücke: Mündungsbereich des Münzbaches unterhalb des Wehres in Halsbrücke / Rothenfurth (unterhalb UBG-Messstelle F3160) und
- (4) Bieberstein: Kleinvoigtsberg / Bieberstein vor Einmündung der Bobritzsch (UBG-Messstelle F3161).

Ungünstig für die Auswertung der Daten nach der Fragestellung der Längsverteilung der Konzentrationen in der Freiburger Mulde ist die Lage des dritten Probenahmeabschnittes, welcher direkt unterhalb der Münzbachmündung liegt. Da der Rote Graben hier bereits über mehrere Abschlüge sukzessive in die Mulde eingemündet ist und die Münzbachmündung ebenfalls in diesem Bereich liegt, kann anhand der ermittelten Werte nicht zwischen dem Einfluss dieser beiden wichtigen Einleitungen in die Mulde unterschieden werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich der Einfluss des Münzbaches bei den Schwermetallrückständen in den Fischen erst weiter flussabwärts nach vollständiger Vermischung zeigt, also eigentlich erst bei den in Bieberstein gefangenen Fischen sichtbar wird.

Ausgewertet wurden im Folgenden die Schwermetallgehalte in der Leber der Fische, da hier die Akkumulationsraten höher und damit deutlichere Unterschiede sichtbar sind. Die ebenfalls 1999 ermittelten Gehalte in der Muskulatur wurden nicht mit betrachtet, weil sich dabei die gleiche Tendenz, jedoch etwas unschärfer, ergibt.

Bei *Cadmium* wurden die niedrigsten Konzentrationen oberhalb Muldenhütten gefunden. Ab Muldenhütten nehmen die Konzentrationen sprunghaft zu und bleiben im Mittel bis kurz vor der Bobritzschmündung, wo die höchsten Einzelwerte gemessen wurden, auf dem selben hohen Niveau von durchschnittlich etwa 10 mg/kg FM. Damit werden nach Dr. Pfeifer (1999) bereits fischtotoxische Konzentrationen erreicht [26].

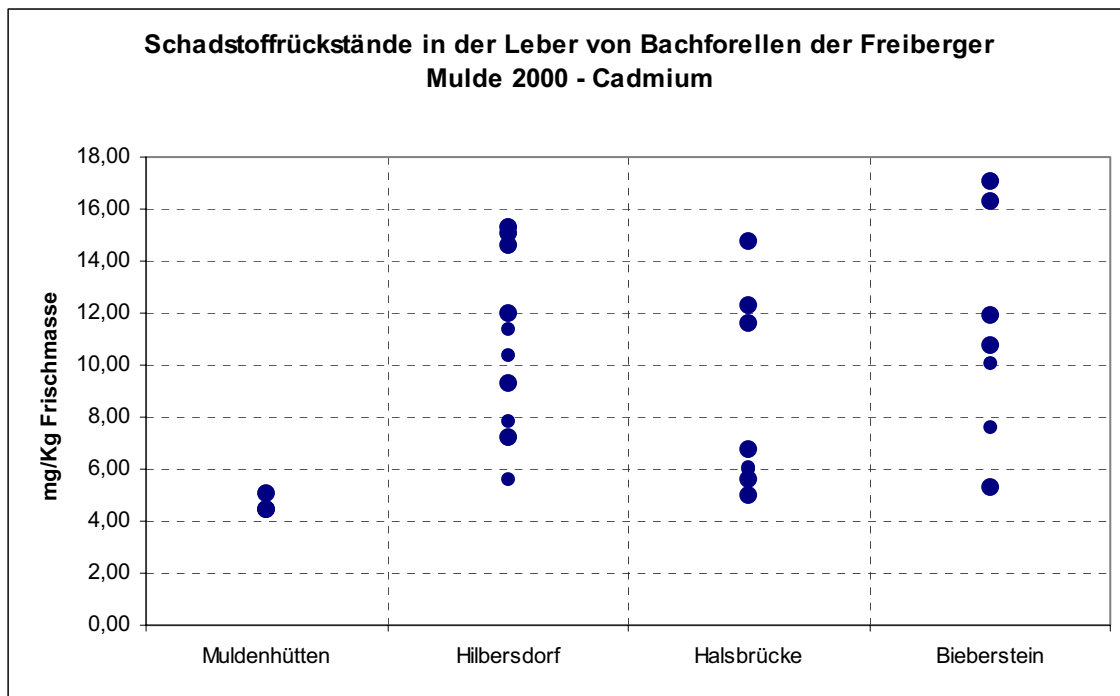


Abb. 12: Cadmiumgehalte in der Leber gefangener Fische

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass das Gelände von Muldenhütten mit den darin befindlichen Altlasten bzw. den hier der Mulde zusetzenden Wässern den hauptsächlichsten Anteil an der Cadmiumbelastung ausmacht und weiter flussabwärts nur noch verhältnismäßig wenig hinzukommt.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit wäre, dass mit den hier gefundenen Werten bereits eine Höchstgrenze der Cd-Akkumulation erreicht ist und die Tiere bei noch höherer Anreicherung nicht mehr überleben. Dies könnte z. B. in dem extrem fischarmen Abschnitt der Freiburger Mulde unterhalb des KVGS der Fall sein, wo über den Roten Graben eine nochmals erhebliche Cd-Fracht eingetragen wird.

Die Konzentration von Zink in der Leber der Bachforellen steigt von oberhalb Muldenhütten, wo die niedrigsten Werte gemessen wurden, relativ gleichmäßig sowohl im Mittel als auch in den Höchstwerten bis zur Bobritzschmündung an. Das deutet auf einen Zinkeintrag entlang der Freiburger Mulde an mehreren Stellen bzw. diffuse Zutritte zur Mulde hin, da die Konzentration nicht sprunghaft ansteigt. Es werden dabei im Vergleich zur (hier nicht ausgewerteten) Muskulatur der Fische, wo die Zinkgehalte vergleichbar mit denen in anderen Flüssen sind, extreme Anreicherungen mit Zink in der Leber von bis zu 972 mg/kg Frischmasse erreicht [26].

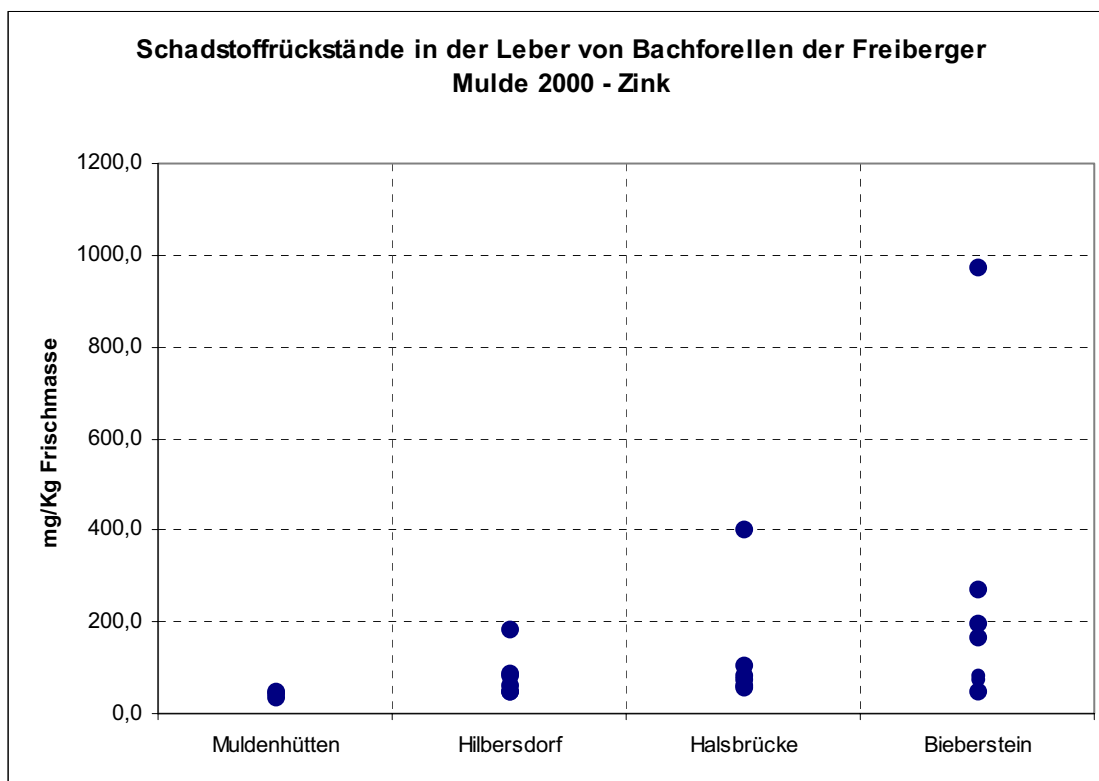


Abb. 13: Zinkgehalte in der Leber gefangener Fische

Blei weist im Lebergewebe der Bachforellen einen sprunghaften Anstieg der Konzentrationen nach Passage des Muldenhüttener Altlastkomplexes im Vergleich zur Mulde oberhalb auf. Das deutet auf einen starken Einfluß der dort der Mulde zuströmenden Wässer auf die Blei-Gesamtfracht des Flusses. Unterhalb der Hilbersdorfer Brücke liegen die Bleigehalte durchschnittlich im gleichen Niveau wie oberhalb Muldehütten. Erst an der Beprobungsstelle kurz vor der Bobritzschmündung ist eine geringfügige Erhöhung, welche eventuell noch mit dem Einfluss des Münzbaches zu erklären sein könnte, zu beobachten. Blei spielt aus fischtoxikologischer Sicht in der Mulde eher eine untergeordnete Rolle.

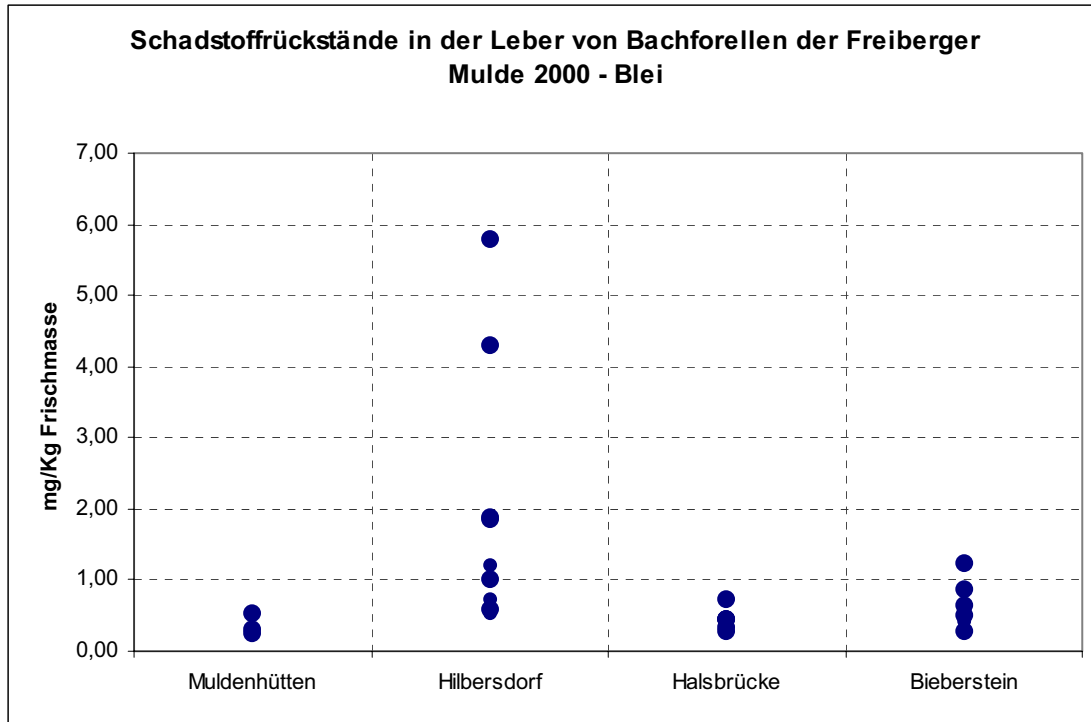


Abb. 14: Bleigehalte in der Leber gefangener Fische

Die gefundenen Gehalte von Kupfer in den Lebern sind an allen Probenahmestellen extrem hoch, mit 203 mg/kg Frischmasse um das etwa 100fache höher als z. B. in Elbfischen [26]. Damit lässt sich auf eine permanente hohe Kupferexposition schließen, welche bereits in chronisch bzw. akut fischtoxische Bereiche kommt, besonders, da sich die Toxizität von Kupfer bei gleichzeitiger Anwesenheit von Zink, welches ebenfalls in erheblichen Konzentrationen in der Freiburger Mulde vorkommt, durch synergistische Effekte erhöht. Erstaunlich ist, dass sich diese Akkumulation nicht oder kaum in der Muskulatur nachweisen lässt (ohne Darstellung), da hier nur mit anderen Flüssen vergleichbare Konzentrationen gefunden wurden.

Die Verhältnisse der festgestellten Konzentrationen in den Fischlebern sind eher unerwartet. Oberhalb von Muldenhütten gefangene Bachforellen wiesen die deutlich höchsten Konzentrationen an Kupfer auf. Es ist also zu vermuten, dass bereits dort eine Kupferbelastung aus unbekannter Quelle vorliegt. Zu vermuten wäre eine Beeinflussung durch flussaufwärts gelegenen Altbergbau im Raum Holzgau. Mit den vorliegenden UBG-Messdaten der Messstellen Holzgau, Rechenberg-Bienenmühle und Muldenhütten (siehe Tabelle 4, Seite 51) lässt sich diese These jedoch nicht bestätigen, da die Mediane der Konzentrationswerte nach Köck [27] in dem fischereibiologisch unbedenklichen Bereich für

Gelöstkonzentrationen zwischen 1 und 3 µg/l bzw. unter dem fischereibiologisch unbedenklichen Bereich von 5 bis 10 µg/l liegen.

Die Verhältnisse der festgestellten Konzentrationen in den Fischlebern sind eher unerwartet. Oberhalb von Muldenhütten gefangene Bachforellen wiesen die deutlich höchsten Konzentrationen an Kupfer auf. Es ist also zu vermuten, dass bereits dort eine Kupferbelastung aus unbekannter Quelle vorliegt. Zu vermuten wäre eine Beeinflussung durch flussaufwärts gelegenen Altbergbau im Raum Holzgau. Mit den vorliegenden UBG-Messdaten der Messstellen Holzgau, Rechenberg-Bienenmühle und Muldenhütten (siehe Tabelle 4, Seite 51) lässt sich diese These jedoch nicht bestätigen, da die Mediane der Konzentrationswerte nach Köck [27] in dem fischereibiologisch unbedenklichen Bereich für Gelöstkonzentrationen zwischen 1 und 3 µg/l bzw. unter dem fischereibiologisch unbedenklichen Bereich von 5 bis 10 µg/l liegen.

Ebenfalls keine Erklärung für die Kupferanreicherung kann durch die Sedimentanalysen gefunden werden. Während des Muldeprojektes wurden entlang der Freiburger Mulde Sedimentproben entnommen. Dabei wurden oberhalb von Holzgau Kupfergehalte von 135 bis 270 mg/kg (I_{geo} -Klasse 2) ermittelt, also Werte, die nahezu den langjährigen Medianwerten in Muldenhütten entsprechen. Zwischen Holzgau und Muldenhütten wurde ein Rückgang der Sedimentbelastung in den Proben auf 67,5 bis 135 mg/kg (I_{geo} -Klasse 1) gemessen. Nach dem Eintritt in den Hüttenbezirk steigt die Belastung auf 10200 bis 20400 mg/kg (I_{geo} -Klasse 4) [19].

Die Medianwerte der Analysenergebnisse von Sedimentproben der UBG ergeben, dass die Sedimentbelastung an der Bahnbrücke in Muldenhütten zwischen 1999 und 2002 kontinuierlich von knapp 200 mg/kg auf nahezu 700 mg/kg angestiegen ist.

Die an der Hilbersdorfer Brücke, also unterhalb Muldenhütten, untersuchten Fische wiesen alle geringere bzw. ein Fisch den gleichen Wert wie oberhalb auf. Deshalb trägt der Muldenhüttener Komplex anscheinend nicht wesentlich zur Kupferbelastung der Muldenfische bei.

Die unterhalb der Münzbachmündung gefangenen Forellen zeigen eine im Mittel leichte Erhöhung der Gehalte gegenüber Hilbersdorf, welche sich bis Bieberstein noch fortsetzt. Die

in Bieberstein, also kurz vor der Bobritzschmündung, festgestellten Höchstwerte liegen wiederum etwa in der gleichen Höhe wie oberhalb Muldenhütten. Dieser Anstieg der Kupfergehalte könnte auf den Einfluß von Rotem Graben und Münzbach zurückzuführen sein.

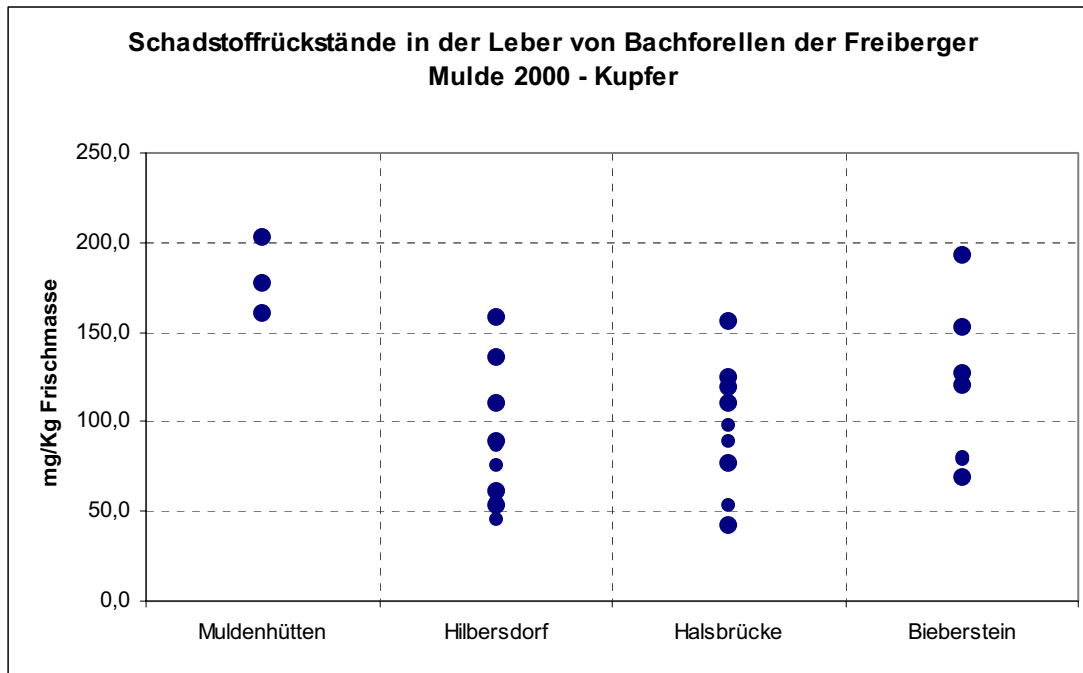


Abb. 15: Kupfergehalte in der Leber gefangener Fische

Die höchsten Konzentrationen an Arsen in der Leber wurden in den unterhalb der Münzbachmündung gefangenen Fischen gefunden. Dies lässt auf den Einfluss von Rotem Graben und / oder Münzbach schließen. An der Hilbersdorfer Brücke sind entgegen der Erwartung noch keine deutlichen Arsenanreicherungen gegenüber oberhalb Muldenhütten in der Leber feststellbar.

Die gefundenen Arsenkonzentrationen im Gewebe sind laut Pfeifer 1999 nach toxikologischen Kriterien als eher unkritisch zu sehen. Dies ist zu erklären durch die relativ geringe biologische Halbwertszeit von 7 Tagen, dass heißt, Arsen wird vergleichsweise schnell wieder ausgeschieden. Dass trotzdem Arsen in Leber und Muskulatur festgestellt wurde, deutet auf eine permanente Arsenexposition in der Freiberger Mulde.

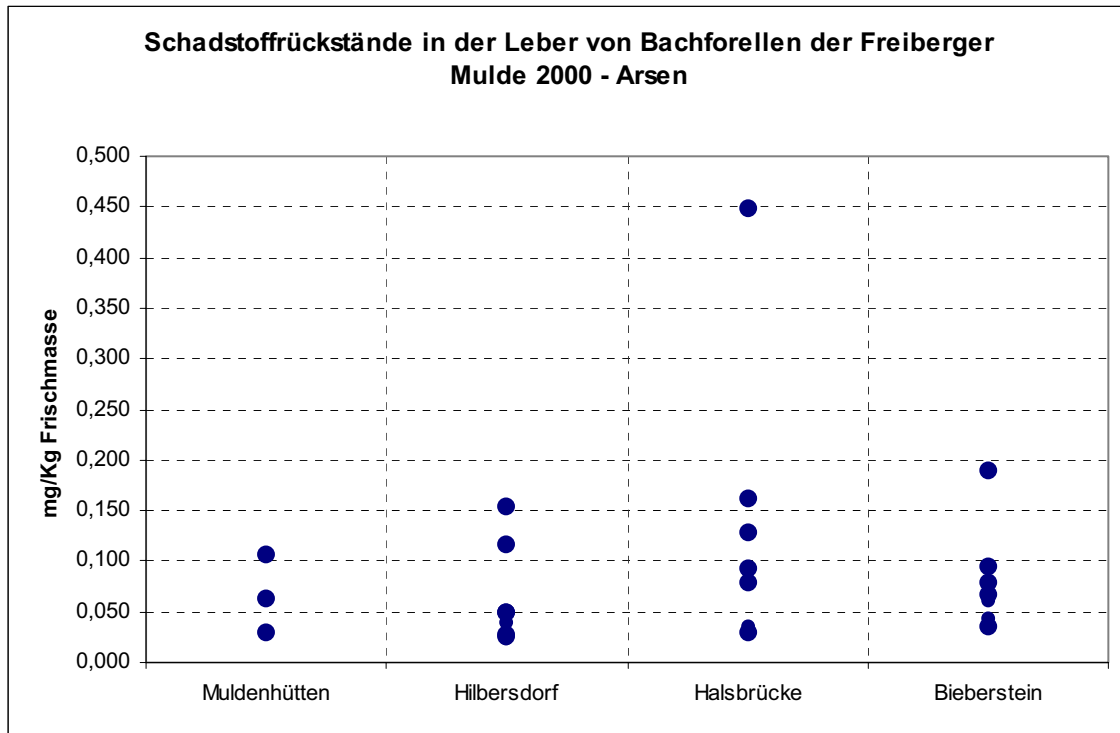


Abb. 16: Arsengehalte in der Leber gefangener Fische

Die extreme Armut im Fischbestand im Abschnitt von Halsbach bis zur Bobritzschmündung kann direkte toxikologische Ursachen haben, da Fischbrut im Allgemeinen noch empfindlicher gegenüber Schwermetallbelastungen ist, besonders, wenn eine komplexe Belastung durch mehrere Elemente sowie eine zusätzliche Grundbelastung mit organischen Schadstoffen wie HCH (Hexachlorcyclohexan) vorliegt (synergistische Wirkungen der Schadstoffe). Ein wichtiger Grund ist aber sicher auch die Armut an Nährtieren wie Insektenlarven etc. (Makrozoobenthos) in diesem Bereich (siehe Kap. 4.4.1), welche allerdings ihre Ursachen wiederum in der Schwermetallbelastung haben dürfte.

4.5 Eigene Untersuchungen

Um vorhandenes Datenmaterial zu verdichten und offene Fragestellungen zu klären, wurden zusätzliche Untersuchungen an der Freiburger Mulde und ihren Zuflüssen durch das StUFA Chemnitz durchgeführt. Diese umfassten:

- die biologische Zustandserfassung an mehreren Standorten entlang der Freiburger Mulde und einigen Zuflüssen;
- Expositionsversuche mit Moosen in ausgewählten Flussabschnitten der Freiburger Mulde zur Erfassung der Schwermetall- und Arsenakkumulation und Wertung hinsichtlich deren Auswirkungen auf die aquatische Lebewelt sowie
- Probenahmen in der Freiburger Mulde, an einzelnen Zuflüssen sowie Stolln-Mundlöchern zur Klärung der Herkunft, Zusammensetzung und Wirkung zufließender Wässer.

Die Anlage 9 enthält eine Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit den wichtigsten Mess- und Probenahmestellen.

4.5.1 Moosuntersuchungen

Für die Biotabeprobung wurden entlang der Freiburger Mulde zwischen Muldenhütten und Siebenlehn insgesamt 15 Probenahmestellen ausgewählt (siehe Anlage 10). An jeder Messstelle wurden, sofern vorhanden, zwei Proben vorhandener Moose und jeweils eine Probe vorhandenen Hahnenfußes entnommen.

Außerdem wurden für den Expositionsversuch unbelastete Moosproben aus der Zschopau in Tannenberg entnommen und am 22. und 23. Oktober 2003 in der Freiburger Mulde an den Probenahmestellen platziert. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Proben jeweils links, mittig und rechts im angeströmten Bereich befanden. Nach ca. fünf Wochen Expositionszeit wurden die Proben am 28. November 2003 entnommen.

Die Vorbelastung der Moose in der Zschopau wurde aus drei Proben von der Entnahmestelle bestimmt.

Alle Proben wurden nach der Entnahme gekühlt transportiert, bei Zimmertemperatur einige Tage getrocknet und anschließend von der UBG in das Zentrallabor Neusörnewitz zur Analyse gebracht und auf folgende Parameter untersucht:

- Blei (Pb);
- Cadmium (Cd);
- Kupfer (Cu);
- Zink (Zn);
- Arsen (As);
- Nickel (Ni);
- Silber (Ag);
- Thallium (Tl) und
- Glühverlust (GV).

Die Ergebnisse der Analysen sind in Anlage 11 aufgeführt und werden nachfolgend erläutert.

Die Ergebnisse der Rückstandsuntersuchung der Wassermoose von 2003 haben Belastungsmuster ergeben, welche mit den Ergebnissen der Fisch- und der Wirbellosenuntersuchung durchaus korrelieren. Dabei haben die aus der Zschopau in die Mulde verpflanzten und für vier Wochen exponierten Moose vergleichbare Ergebnisse wie die Originalproben aus der Freiburger Mulde erzielt. Die Absolutgehalte in den exponierten Proben lagen zwar in den meisten Fällen (Ausnahme: Mangan und Thallium) unter denen der Originalproben. Das ist aber leicht mit den methodischen Unterschieden zu erklären. Ebenso vergleichbar sind die Ergebnisse der Moosuntersuchung von 2000, wenngleich hier wesentlich weniger Probenahmestellen untersucht wurden.

Eine toxikologische Einschätzung der Absolutgehalte an Schwermetallen ist leider nicht möglich, da hierzu keine geeigneten Vergleichswerte vorliegen. Es ist aber bei Ergebnissen mit z.B. mehr als 20 Gramm Zink pro Kilogramm Trockensubstanz Moos davon auszugehen, dass hier für Wasserpflanzen extreme Akkumulationen vorliegen, besonders im Vergleich mit den Metallgehalten der Moose vor der Exposition (entspricht den im Diagramm mit „Zschopau“ bezeichneten Punkten).

Auch bei den Moosen zeigt sich der Einfluss der Bergbaualtlasten ab Straßenbrücke Muldenhütten. Hauptsächlich die Elemente Blei, Cadmium und Mangan nehmen von hier an zu. Besonders Blei und Cadmium spiegeln hier den Einfluss des Stangenbergbaches wider. Die höchsten Bleigehalte überhaupt wurden nach der Passage des gesamten Muldenbogens, etwa auf der Höhe des freigespülten Mundloches festgestellt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Fischrückstandsuntersuchungen überein. Ab diesem Messpunkt steigen auch die Konzentrationen von Zink, Arsen, Kupfer und Nickel an.

Auffällig ist der sprunghafte Anstieg von Thallium nach der Einmündung des Freiburger Hüttenbaches (Messpunkt 3: Muldenbogen).

Der nächste sprunghafte Anstieg mehrerer Elemente ist an der Messstelle oberhalb der Fußgängerbrücke vor dem 1. Abschlag des KVGS zu beobachten. Die Ergebnisse der Fisch- und Makrozoobenthosuntersuchungen ließen eigentlich den Schluss zu, dass erst mit der Einmündung des Roten Grabens die Belastung der Freiburger Mulde steigt. Die aber mit einer größeren Anzahl Probenahmestellen untersuchten Moose zeigen, dass bereits oberhalb des Roten Grabens ein Anstieg von Arsen, Cadmium, Kupfer und Zink erfolgt. Das deutet auf Einträge hin, welche im Bereich der Ausleitung der alten Pappfabrik ins Wasser gelangen. Eventuell handelt es sich dabei um diffus in die Entwässerung der Davidschachthalde zusetzende Sickerwässer, die dann entlang der sog. "Erzbahn" in Richtung Betriebsgraben der alten Papierfabrik gelangen und dort eingeleitet werden. Oberhalb der Ausleitungsstrecke der Papierfabrik (Wehr) sind die Werte noch deutlich niedriger.

Trotz dieser Feststellung bleibt der Konzentrationsanstieg in den Moosen durch den Roten Graben (enthält die Wässer aus KVGS und HSU) bei mehreren Elementen gravierend. Dies betrifft vor allem Arsen, Cadmium, Kupfer, Mangan, Thallium und Zink.

Der Einfluss des Münzbaches schlägt sich bei den Moosproben nicht erkennbar nieder. In Rothenfurth sind die Schwermetallgehalte außer bei Cadmium eher noch niedriger als vor der Münzbacheinmündung.

Bei den Originalproben aus der Freiburger Mulde wurden am Messpunkt Hohentanne bei mehreren Elementen stark erhöhte Werte bis zum Doppelten der anderen Messstellen festgestellt. Da an den Muldenabschnitten von da an flussabwärts keine Moose mehr

gefunden wurden, kann nicht überprüft werden, ob dies nur ein fehlerbehafteter Ausreißer oder ein realer Messwert ist. Bei den exponierten Proben deutet sich an diesem Messpunkt zwar auch bei einigen Elementen eine geringfügige Erhöhung gegenüber dem vorherigen (Rothenfurth) an, aber diese ist teilweise fast nicht erkennbar. Trotzdem ist dies ein Hinweis darauf, dass auch noch am Flussabschnitt unterhalb Rothenfurth Schwermetalle zur Mulde hinzutreten, denn auch bei den Fischrückstandsuntersuchungen wurde bei Cadmium, Kupfer und Zink bei Bieberstein nochmals ein leichter Anstieg beobachtet.

Ein deutliches Ergebnis hingegen liefert Chrom, welches sonst eher unauffällig ist. An der Messstelle oberhalb der Autobahnbrücke bei Siebenlehn liegen die Chromwerte bei den exponierten Moosen etwa um das Doppelte höher als noch in Obergruna. Hier besteht jedoch die Vermutung, dass dies nicht auf Bergbaufolgen zurückzuführen ist, sondern durch ortsansässige Industrie (z.B. Lederverarbeitung).

Die Auswertung der Proben von Wasserhahnenfuß als Vertreter der Gefäßpflanzen kann leider kein so detailliertes Bild der Belastung ergeben wie die Moose, denn es wurde nur in den oberen Abschnitten der Freiburger Mulde (Muldenhütten bis Halsbrücke) ausreichend Pflanzenmaterial gefunden, weiter flussabwärts jedoch nur noch sporadisch (z.B. Hohentanne). Außerdem wurde an jedem Probenpunkt nur eine Probe entnommen.

Die Absolutgehalte der Hahnenfuß-Proben liegen in den meisten Fällen deutlich unter denen der Moose. Das weist auf einen unterschiedlichen Mechanismus der Schadstoffakkumulation bei niederen und höheren Pflanzen hin, z.B. intra- oder extrazelluläre Speicherung. Trotzdem findet man die bei den Moosen erkennbaren Anstiegsmuster wieder. Auch hier ist Blei nach der Passage des Muldenbogens bei Muldenhütten am höchsten. Arsen, Cadmium, Kupfer, Mangan, Nickel, Thallium und Zink erreichen ihr Maximum nach dem Zutritt vom Rotem Graben zur Mulde.

Die These, dass der Wasserhahnenfuß unterhalb von Halsbrücke aufgrund der Schwermetallbelastung nur noch selten zu finden ist, kann durch diese Untersuchung nicht untermauert werden, da der Untersuchungsumfang (speziell für Hahnenfuß) viel zu gering war. Es wurde keine Bestandsuntersuchung im Längsschnitt der Mulde durchgeführt, sondern die Abwesenheit wurde nur punktuell festgestellt. Das Fehlen dieser Art flussabwärts kann durchaus auch andere Ursachen, z.B. die morphologische Flussbeschaffenheit wie

zunehmende Tiefe oder Strömung haben. Dazu ist eine Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg in Arbeit, welche nach Fertigstellung noch in die Auswertung einbezogen werden könnte.

4.5.2 Wasserbeprobungen

Unterhalb der Hausmülldeponie der Stadt Freiberg wurde durch das Hochwasser im Jahr 2002 ein Stollnmundloch frei gespült, das in einem Vortrag von Kugler (2002) zum Thema "Der Einfluss des Hochwasser am 12. - 14.08.2002 auf Anlagen des Montanwesens im Freiburger Revier" der Hüttenrösche bzw. der tiefen Abzugsrösche der Grube Morgenstern zugeordnet wurde. Ausgehend von der Bezeichnung Hüttenrösche wird vermutet, dass es sich dabei um das Mundloch des Betriebsgrabens der Hütte Muldenhütten handelt. Um die daraus eingeleiteten Wässer charakterisieren zu können, wurde am 13. November 2003 das am Mundloch austretende Wasser beprobt (siehe Anlage 12).

Die Analyse der Probe ergab, dass über den Stolln gering belastete Grund- und Sickerwässer in unbedeutenden Mengen in die Freiburger Mulde eingeleitet werden. Deutliche hüttenmännische Belastungen oder Deponieeinflüsse konnten nicht nachgewiesen werden.

Im Ergebnis der entlang der Freiburger Mulde durchgeführten biologischen Zustandserfassung wurde festgestellt, dass unterhalb des ersten Abschlags vom Roten Graben eine deutliche Verschlechterung des Zustandes der Freiburger Mulde hinsichtlich Artenvielfalt und Individuenzahl eintritt. Aus diesem Grunde wurde eine Probenahmekampagne am Roten Graben mit dem Ziel veranlasst, festzustellen welchen Einfluss die Einleitungen entlang des Roten Grabens auf die Freiburger Mulde besitzen.

In der Zeit vom 27. November bis 18. Dezember 2003 wurden folgende Probenahmestellen in wöchentlichem Abstand insgesamt vier Mal beprobt (siehe Anlage 13):

- Freiburger Mulde oberhalb erster Abschlag vom Roten Graben;
- Freiburger Mulde unterhalb erster Abschlag vom Roten Graben;
- Mundloch Königlich-verträglicher Gesellschaft-Stolln (KVGS);
- Mundloch Hauptstolln-Umbruch.



Abbildung 17: Probenahmegerät am Mundloch des KVGS



Abbildung 18: Apparatur für die Vor-Ort-Filtration

Da durch das Hochwasser im Jahr 2002 die Uferstützmauer des Roten Grabens zerstört wurde, war dieser zwischen dem Huthaus am Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln und der Fuchsmühlenbrücke nicht mehr nutzbar. Seit August 2002 wurde der Rote Graben deshalb am ersten Abschlag unterhalb der Fußgängerbrücke Halsbach in die Freiburger Mulde geleitet.

Um eine Beeinflussung der Probenahme am Mundloch des Hauptstolln-Umbruch durch das Wasser im Roten Graben zu vermeiden und die eingestellten stationären Verhältnisse in der Freiburger Mulde unterhalb Halsbach zu erhalten, wurde mit der Landestalsperrenverwaltung vereinbart, den Roten Graben vorerst nur am 3. Dezember 2003, dem Tag der Bauabnahme kurzzeitig wieder in Betrieb zu nehmen. Danach sollte bis zum Ende der Probenahmen der bisherige Zustand wiederhergestellt werden.

Im Allgemeinen bestätigen die Analysen die Ergebnisse der statistischen Auswertung der langjährigen Messreihen. Bei den Elementen Cadmium, Kupfer und Zink konnte die extreme Belastung des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln und des Hauptstolln-Umbruch klar heraus gestellt werden. Aufgrund geringerer Abflüsse dieser Stolln bleiben jedoch deren Auswirkungen auf die Freiburger Mulde eingeschränkt (Abbildungen 19 bis 23).

Andererseits spiegelt sich die Arsenbelastung des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln sehr deutlich in der Freiburger Mulde wider. Bereits wenige hundert Meter unterhalb des

Abschlages vom Roten Graben hat sich die Gesamtkonzentration nahezu verdoppelt, während die Gelöstkonzentration durch die Einleitung des Roten Grabens nicht beeinflusst wird (Abbildung 23). Das stützt die Erkenntnis, dass der Arseneintrag über den Roten Graben hauptsächlich an Sediment und Schwebstoffen erfolgt.

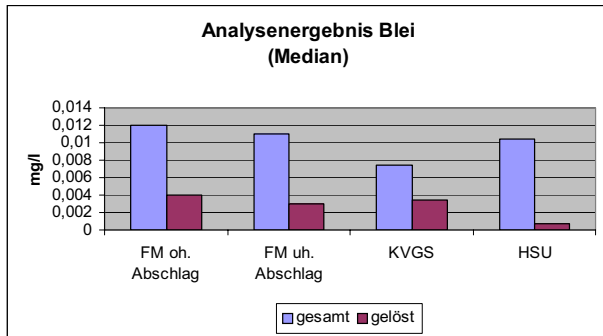


Abbildung 19: Analysenergebnis Blei

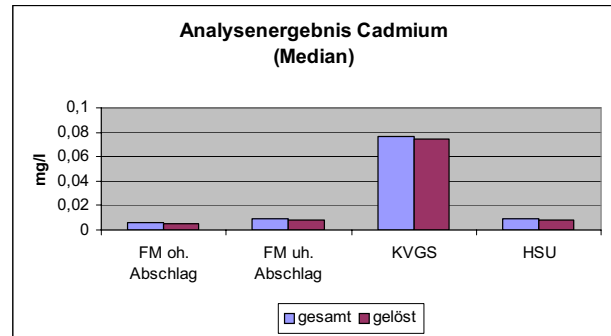


Abbildung 20: Analysenergebnis Cadmium

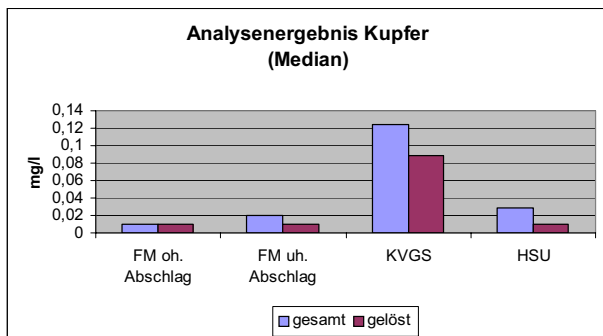


Abbildung 21: Analysenergebnis Kupfer

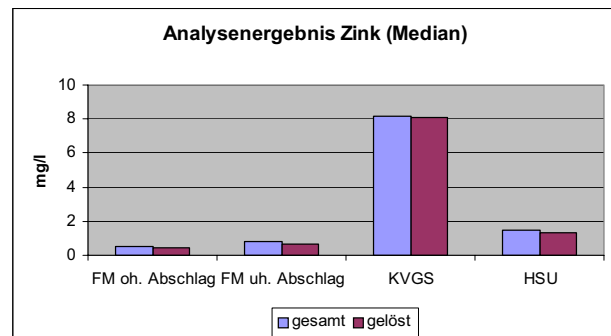


Abbildung 22: Analysenergebnis Zink

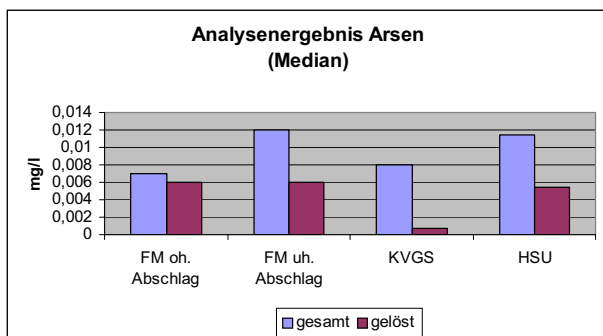


Abbildung 23: Analysenergebnis Arsen

4.6 Schlussfolgerungen

Zusammengefasst lassen sich aus den chemischen und biologischen Untersuchungen folgende Erkenntnisse für die Freiburger Mulde im Einflussbereich des Freiburger Bergbaureviers ableiten:

- (1) In der Freiburger Mulde ist bereits beim Eintritt in das Untersuchungsgebiet eine anthropogen bedingte Hintergrundbelastung durch den Altbergbau im tschechisch-deutschen Grenzgebiet um Holzgau sowie bei Mulda zu verzeichnen. Bei Holzgau wurden im 17. und 18. Jahrhundert Eisenerze abgebaut. Auf tschechischer Seite befindet sich bei Moldava eine Grube, in der zwischen 1954 und 1994 Fluorit und Baryt gefördert wurde. Unmittelbar neben der Freiburger Mulde liegen die Flotationsanlage und eine Halde [19].
- (2) Über eine Vielzahl von Stollen und Röschen gelangen mit Schadstoffen geogenen oder anthropogenen Ursprungs belastete Grund- und Sickerwässer in die Vorfluter, die letztendlich in die Freiburger Mulde entwässern.
- (3) Stillgelegte Gruben können als Schadstoffquelle und als spezifische Schadstoffsenke bezeichnet werden. Einerseits bewirken geochemische Prozesse den wirksamen Rückhalt von Schwermetallen, vor allem von Aluminium und Arsen, in der Grube. Andererseits werden einige Elemente wie Zink oder Cadmium nur wenig sorbiert [22]. Veränderungen der Milieubedingungen können jedoch langfristig zur Remobilisierung der zurück gehaltenen Schadstoffe führen.
- (4) Entlang der Sickerpfade und in den Grubenbauen selbst kommt es durch wechselnde Wasserstände zu einem ständigen Milieuwechsel zwischen aeroben und anaeroben Zuständen. Dabei bewirkt der Wechsel vom aeroben zum anaeroben Milieu geochemische Prozesse, die zur Mobilisierung von Schwermetallen führen.
- (5) Weitere wesentliche Eintragspfade für Schwermetalle und Arsen sind die Sickerwässer von Hütten- oder Haldenkomplexen, die entweder direkt, über das Grundwasser oder über weitere Vorfluter in die Freiburger Mulde gelangen.

(6) Das tiefste Entwässerungsniveau im Freiburger Revier stellt der Rothschönberger Stolln dar, der über die Triebisch direkt in die Elbe entwässert. Über diesen Stolln gelangen wesentliche Mengen unterirdisch abfließender Wässer und damit einhergehend auch wesentliche Schadstoffmengen aus dem Freiburger Raum in die Elbe (siehe auch Kapitel 7).

(7) Wesentliche Schadstoffemissionen konnten auf folgende Quellen zurückgeführt werden:

- Hütten- und Haldenkomplex Muldenhütten:

Hauptsächlich über den Sickerwasserpfad gelangen Arsen, Cadmium, Blei und Zink aus dem Hüttengelände und der in die Mulde hinein ragenden Arsenhalde in die Freiburger Mulde.

- Hütte Freiberg:

Vom Gelände der ehemaligen Hütte Freiberg abfließende Wässer gelangen zum einen über den Bahneinschnitt der Strecke Chemnitz - Dresden und den Stangenbergbach oder zum anderen über den Hüttenbach in die Freiburger Mulde. Beide Entwässerungspfade haben nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtbelastung der Freiburger Mulde mit Arsen und Blei, wobei der über den Hüttenbach zugeführte Frachtanteil bei beiden Elementen höher ist, als der über den Stangenbergbach eingebrachte. Im Gegensatz dazu werden durch den Stangenbergbach wesentlich größere Frachten an Cadmium und Zink in die Freiburger Mulde eingeleitet als über den Hüttenbach.

Außerdem wird vermutet, dass neben den genannten Entwässerungspfaden des Hüttengeländes Sickerwasserpfade in nordöstlicher Richtung, also in Richtung Straßenbrücke Hilbersdorf bzw. Hausmülldeponie, bestehen. Derartige Sickerwasserwege würden die stetige Belastungszunahme in der Freiburger Mulde zwischen Muldenhütten und der Straßenbrücke Hilbersdorf mit erklären.

- Davidschacht und Hammerberg:

Aufgrund der geringen oberirdischen Abflüsse bestehen kaum direkte Auswirkungen auf die Freiburger Mulde. Bezogen auf den Abfluss trägt jedoch

die Hammerbergentwässerung einen vergleichsweise hohen Anteil an der Zink-Gesamtbelastung in der Freiburger Mulde.

Allerdings wurde auch zwischen der Straßenbrücke Hilbersdorf bzw. Halsbach und Halsbrücke eine stetige Belastungszunahme in der Freiburger Mulde ermittelt, so dass auch hier zu vermuten ist, dass über den Sickerwasserpfad z. T. größere Wassermengen und Frachten in die Freiburger Mulde gelangen.

- Roter Graben:

Der Rote Graben dient als Vorfluter für die bergbaulichen Entwässerungsstolln Königlich-verträglicher Gesellschaft-Stolln (KVGS) und Hauptstolln-Umbruch (HSU). Beide Stollnwässer sind mit Schwermetallen und Arsen belastet, wobei der KVGS einen wesentlich höheren Anteil an der Gesamtfracht der Freiburger Mulde bewirkt als der HSU.

Aufgrund der hohen Schwermetall- und Arsengehalte, die oftmals in fischtoxischen Größenordnungen liegen, muss die biologische Verarmung der Freiburger Mulde zwischen Halsbach und Halsbrücke auf die Einleitungen vom Roten Graben zurück geführt werden (siehe Anlage 13). Nach der Menge und Beschaffenheit der eingeleiteten Wässer muss der Rote Graben als wesentlichste, die Freiburger Mulde beeinträchtigende Schadstoffquelle eingeordnet werden.

- Hütten- und Haldenkomplexe Halsbrücke:

In Halsbrücke erreicht die Schadstoffbelastung der Freiburger Mulde ihren vorläufigen Höhepunkt. Aufgrund fehlender volumenstarker Zuflüsse erfolgt der Schadstoffeintrag im Raum Halsbrücke offensichtlich hauptsächlich über den Sickerwasserpfad.

Größere Schadstoffemissionen sind von den Hüttenkomplexen und Rauchgaskanälen sowie von der Schlackenhalde Hohe Esse, der Oberen Schlackenhalde Halsbrücke und der Spülhalde 7. Lichtloch zu erwarten.

- Münzbach:

Der Münzbach spielt besonders in Bezug auf die Belastung der Freiburger Mulde mit Arsen und Blei eine entscheidende Rolle. Außerdem werden im Münzbach größere Frachten Cadmium transportiert. Insgesamt gesehen muss der Münzbach nach dem Roten Graben als entscheidender Einflussfaktor für den Zustand der Freiburger Mulde gewertet werden.

Als Ursachen für die Belastung müssen neben der geogenen Hintergrundbelastung im Einzugsgebiet des Münzbaches und im Stadtgebiet Freiberg auch die bergbaulich bedingten Emissionsquellen im Bergbaugebiet um Zug und Brand-Erbisdorf sowie die unmittelbar vor der Mündung in die Freiburger Mulde liegende Spülsandhalde Münzbachtal genannt werden.

Zusätzlich wird der Münzbach, der im Stadtgebiet Freiberg gleichzeitig als Mischwassersammler dient, durch Abwassereinleitungen von ehemaligen Bergbaustandorten und Industrieanlagen sowie durch Niederschlags- und Grundwässer belastet.

Die Belastung der Niederschlags- und Sickerwässer resultiert aus der weitreichenden Kontamination der Geländeoberflächen im Freiburger Raum durch belastete Flugstäube. Aus diesen werden durch Regen- oder Schmelzwässer die Schadstoffe heraus gelöst bzw. die Staubpartikel im Ganzen abtransportiert [25].

- Diffuse Quellen:

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass in der Gesamtbilanz der Schadstofffrachten in der Freiburger Mulde zwischen Muldenhütten und Kleinvoigtsberg neben den bekannten Frachteinträgen ein großer Teil der Frachten aus nicht eindeutige zu zuordnenden Quellen stammt. Besonders auffällig sind die hohen, offensichtlich diffus zutretenden Frachten von Cadmium und Arsen.

Außer den bereits genannten Quellen diffuser Zutritte aus dem Bereich der Hütten Muldenhütten und Freiberg, den Spülhalden Hammerberg und

Davidschacht sowie dem Hüttengelände Halsbrücke mit der Schlackenhalde Hohe Esse und der Spülhalde 7. Lichtloch existieren im Einzugsgebiet der Freiburger Mulde mehrere Deponien und Abraumhalden für Bauschutt, Aushub und Hausmüll. Darunter zählen z. B. die Hausmülldeponie Freiberg, den Gesamtkomplex Schlackenhalde Hilbersdorfer Tor einschließlich Hausmülldeponie Hilbersdorf sowie die Hausmülldeponie Halsbrücke, unmittelbar vor der Münzbachmündung.

- Grubenbaue:

Durch die Jahrhunderte andauernde bergbauliche Nutzung wird das Freiburger Revier von einer Vielzahl Stollen und Röschen durchzogen, die z. T. noch heute im Entwässerungssystem wirksam sind. Ein großer Teil davon ist heutzutage nicht mehr zugänglich und durch Verstürze oder Überschüttungen kaum mehr zu lokalisieren.

Grundwässer, Sickerwässer oder aus anderen Revieren übergeleitete Wässer können über diese Stollen in die Freiburger Mulde gelangen. Die unterirdischen Wasserwegsamkeiten führen auch dazu, dass belastete Wässer vom Ort ihrer Entstehung abgeleitet werden können und an Stellen zu Tage treten, an denen ihre Herkunft nicht mehr feststellbar ist.

- (8) Ursprünglich waren die Hüttenröschen nur als Energietransportsystem für die Aufschlagwasserzu- und Abführung konzipiert worden und standen nicht in direkter Verbindung zur hüttenmännischen Produktion. Umbauten und Nutzungsänderungen führten dazu, dass später auch Produktions- und Sanitärabwässer sowie Oberflächen- und Drainagesickerwässer von kontaminierten Flächen über die Röschen vom Hüttengelände abgeleitet wurden und darin gelöste bzw. partikuläre Schadstoffe in die Röschen eingetragen wurden.

Durch die geringen Abflüsse in weiten Teilen des Röschen setzen in Verbindung mit dem geringen Sohlgefälle Sedimentations- und Fällungsprozesse ein, die eine großräumige Verschlammung der Röschen zur Folge haben. Im Laufe der Zeit führt die Schadstoffanreicherung im Schlamm zum Aufbau eines enormen Schadstoffpotenziales im Inneren des Röschensystems.

"Beim Durchfließen der stark verschlammten Röschenabschnitte sind Sorptionsvorgänge an den Schlammpartikeln möglich, ebenso können durch Veränderung von pH- / Eh-Verhältnissen Desorptionen auftreten. Veränderungen der Fließgeschwindigkeit bewirken zusätzlich einen Partikelabtrag, der als graue Trübung schon mehrfach beobachtet wurde. Sorptionsmöglichkeiten im anstehenden Festgestein während des Transportes in den Auffahrungen sind zu vernachlässigen." [28]

- (9) Nach der Einstellung des Bergbaues verhalten sich die einzelnen Schadstoffe unterschiedlich. Während die Konzentrationen einiger Schadstoffe in den Grubenwässern bereits nach kurzer Zeit stark abnehmen, sinken die Konzentrationen anderer Stoffe nur geringfügig. Es wird muss davon ausgegangen werden, dass die Konzentrationen dieser Stoffe auch nach mehreren Jahrzehnten noch nicht auf die geogenen Hintergrundwerte zurückgegangen sind .

In voraus gegangenen Untersuchungen wurde bereits festgestellt, dass die Konzentrationen der Stoffe im Grundwasser nicht auf das Niveau vor Beginn der bergbaulichen Nutzung absinken werden, sondern sich auf einem deutlich höheren Niveau stabilisieren [24].

- (10) Aus der Literatur [21] ist zu entnehmen, dass die Nutzung als Umweltbelastungsquellen eingestufte Bergbauanlagen positive Auswirkungen hinsichtlich der Beschaffenheit der Grubenwässer haben kann. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Einleitung unbelasteter Abwässer, wie z. B. die Kühlwassereinleitung in den Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln, lediglich die Verdünnung der kontaminierten Grubenwässer bewirkt. Die transportierte Schadstofffracht wird dadurch nicht verändert.

Fraglich bleibt in diesem Zusammenhang auch, ob der durch die Einleitungen ansteigende Durchfluss nicht zur Freisetzung oder Remobilisierung von Schadstoffen aus den Stolln führt. Insbesondere bei nicht konstanten Einleitungsbedingungen kann sich im Stolln kein Gleichgewicht einstellen, so dass dann ein permanenter Milieuwechsel vorherrscht.

Bei hoch belasteten und volumenstarken Grubenwässern ist u. U. eine enorme Menge zusätzlicher unbelasteter Einleitungen nötig, um den gewünschten Effekt im Gewässer zu erzielen. Die Belastung der Freiburger Mulde durch die Wässer des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln konnte durch die Kühlwassereinleitung, die zeitweise doppelt so hoch ist wie der Abfluss im Stolln selbst, nicht wesentlich verändert werden.

5 Prognose der Entwicklung bis 2008

5.1 Verbleibende Sanierungsziele und sonstige Planungen

5.1.1 Altlastenprojekt SAXONIA

Die Tabelle 5 enthält den jährlich aktualisierten Maßnahme - Zeit - Plan (Stand Dezember 2003) mit den Maßnahmen, die seit 1997 realisiert wurden, sich in Ausführung befinden bzw. bis 2008 noch zu verwirklichen sind.

Tabelle 5: Maßnahme - Zeit - Plan 2004, Stand Dezember 2003 [Quelle: SAXONIA]

Objekt	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Hütte Freiberg												
Absetzbecken		■	■	■	M/N	M/N	M/N	M/N	M/N	M/N	M/N	M/N
Haldenkomplex			■	■	■	N	N	N	N	N	N	
Abbrandhalde			■	■				■	■			
Abwasserbehandlung	■	■	■	■	■	■						
Teilflächen Hütte FG		■	■	■				■	■	■	■	
ehem. Heizöllager						■	■	■				
Oberes Plateau			■	■								
Kanalisation					■							
Hütte Muldenhütten												
Industriegebiet Teilfl.									■	■	■	■
Zwischenproduktfreil.	im Vorhaben Nordwestgelände integriert											
Böschung Otto-Tor									■			
Metallgießerei								■	■			
Nordwestgelände				B		■		■				
westl. ENVICHEM								B				
Otto-Deponie			■	■	■	■						
Schl.-h. Mbg.+Hilb. T.						■	■	■				
Rauchblöbe	im Vorhaben Otto-Deponie integriert											
Betriebsgraben								■	■			

Fortsetzung von Tabelle 5:

Objekt	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Mülldeponie Hilbersd.			S									
Hütte Halsbrücke												
Obere Schlackenhalde			S									
Schlackeh. Hohe Esse												
Untere Schlackenhalde				E								
Pochwerkshalde												
Industriegebiet BT1												
Edelmetalle BT1												
ehem. Rauchgaskanal	keine Angaben											
Betriebsgraben												
Feinhütte	keine Angaben											
Apparatebau							E					
Fa. Neubert	E											
Mülldeponie Halsbr.												
Grobbergeh. Beihilfe							S					
Davidschacht												
Spül-/Grobbergehalde												
Spülhalde Hammerbg.												
Sonst. Liegenschaften												
Spülhalde 7. Lichtloch							S					
Spülhalde Münzb.-Tal			S									
Schlackenhalde Halsb.												
Turmhofschacht												
Abrahamschacht												
Ferdinandschacht				E								
Alte Zinnhütte			S									
Wassermonitoring												
Wassermonitoring	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Dichtheitskontrolle												
Alte Arsenhütte (HM)							D	D	D	D	D	

Legende zur Tabelle 5:

B	= Erfassung und Bewertung des IST-Zustandes
D	= Dichtheitskontrolle
E	= Erkundung
M	= Monitoring
N	= Nachsorge
S	= Standsicherheitsbetrachtung

Um die ordnungsgemäße Funktion der Sanierungsmaßnahmen dauerhaft zu erhalten, sind geeignete Nachsorgekonzepte zu erarbeiten. Da zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht exakt spezifiziert werden kann, ob und welche Maßnahmen an den einzelnen Objekten notwendig sein werden, sollen diese zu einem späteren Zeitpunkt fest gelegt werden.

5.1.2 Münzbachentflechtung

Der Münzbach entspringt im Landschaftsschutzgebiet Freiwald südöstlich von Brand-Erbisdorf und östlich der Bundesstraße B 101, durchfließt die Freiburger Hüttenteiche (Erzengler-, Rotbächer-, Mühl- und Großer Hüttenteich), passiert den oberen Ortsteil von Berthelsdorf, den Freiburger Stadtteil Langenrinne und die Stadt Freiberg selbst.

Im Wesentlichen erfolgt die Ortsentwässerung Freiberg über eine Mischwasserkanalisation und den Münzbach zur Kläranlage Münzbachtal. Dazu wurde der Münzbach zwischen Dammstraße / Bahndamm und Hornmühlenweg überdeckt und zum Mischwassersammler umfunktioniert. Als Regenüberlauf wurde am Ende des Münzbachgewölbes das sog. "Hornmühlenwehr" errichtet. Unterhalb des "Hornmühlenwehres" wurde das Mischwasser in einem separaten Mischwasserkanal zur Kläranlage Münzbachtal geleitet. Aufgrund mangelnder Stauräume im Kanalnetz wurde bei drei- bis vierfachem Trockenwetterabfluss Mischwasser in das am "Hornmühlenwehr" beginnende offene Gerinne des Unteren Münzbaches abgeschlagen.

Durch die Einbindung des Münzbaches in das Abwassersystem liegt der Fremdwasseranteil mit durchschnittlich 40 % sehr hoch. Der hohe Fremdwasseranteil führt dazu, dass die Abwasserbehandlungsanlage einen schlechteren Wirkungsgrad erreicht und bei

Regenereignissen verhältnismäßig große Abwasservolumina unbehandelt in das Oberflächenwasser abgeschlagen werden.

Die Trennung von Münzbach und Mischabwasser soll dadurch erfolgen, dass auf der Sohle des überdeckten Münzbachabschnittes eine Rohrleitung für den Münzbach installiert wird und der restliche Gewölbequerschnitt als Mischwassersammler zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang wird das alte "Hornmühlenwehr" durch eine neue Regentlastung mit höher liegender Überlaufschwelle ersetzt. Dadurch wird das Münzbachgewölbe oberhalb dieses Bauwerkes als Stauraumkanal nutzbar gemacht. Im Gegensatz zum Zustand vor der Entflechtung mündet die Münzbachleitung am Hornmühlenweg direkt in das offene Gerinne.

Zusätzlich zum Mischwasserabschlag am Hornmühlenweg wird an der Dammstraße, also am Beginn der zukünftigen Münzbachleitung, eine Hochwasserentlastung in den Mischwasserkanal errichtet.

5.2 Veränderungen im Chemismus der Freiburger Mulde

Bezüglich der Schadstoffbelastung der Freiburger Mulde ist davon auszugehen, dass sich diese zukünftig nicht wesentlich verringern wird. Im Wesentlichen sind dafür folgende Gründe anzuführen:

- (1) Die Einstellung des Freiburger Bergbaues, der Rückgang der hüttenmännischen Produktion sowie Rückbau und Sanierung von Altstandorten und -Ablagerungen führten zu einer Verringerung der direkten Schadstoffemissionen. Aufgrund der voraus gehenden intensiven bergbaulichen Nutzung und den Emissionen der Hüttenindustrie sind die Böden und Oberflächen in Freiberg und Umgebung stark schadstoffbelastet.

Abfließende Niederschlagswässer und Sickerwässer bewirken eine anhaltende Mobilisierung der Schadstoffe und führen somit zu diffusen Schadstoffeinträgen in die Oberflächengewässer. Da über den diffusen Emissionspfad ein wesentlicher Anteil an der Gesamtbelastung in die Freiburger Mulde gelangt und zudem die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen hauptsächlich die Elimination der

ursächlichen Emissionsquelle zum Ziel hatten, ist mit einem Rückgang der Schadstoffbelastung in diesem Zusammenhang vorerst nicht zu rechnen. [25]

- (2) Wie bereits erwähnt, stabilisieren sich die Schwermetallkonzentrationen im Grund- und Grubenwasser nach Einstellung der bergbaulichen Nutzung langfristig auf einem deutlich höheren Niveau als vor Beginn des Bergbaues. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass sich die Konzentrationsverhältnisse in den austretenden Grubenwässern in absehbarer Zeit nicht wesentlich ändern werden [24].

Um den Gewässerzustand der Freiburger Mulde perspektivisch zu verbessern, wäre eine separate Ableitung und Behandlung, zumindest der in den Roten Graben eingeleiteten, Grubenwässer nötig! Problematisch dabei ist jedoch, dass eine Behandlungsanlage nicht wirtschaftlich zu betreiben ist und außerdem Schwermetalle schlecht eliminierbar sind.

Die Auswirkungen der Münzbachentflechtung auf die Schadstoffbelastung der Freiburger Mulde sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig prognostizierbar. Bereits im Einzugsgebiet des Oberen Münzbaches befinden sich zahlreiche Gruben und Halden, so dass eine Vorbelastung des Münzbaches mit Schwermetallen und Arsen zu erwarten ist (siehe Anlagen 15, 17, 18). Bislang liegen hierzu noch keine Messwerte vor, allerdings wird ab 2004 an der Dammstraße eine zusätzliche Beschaffenheitsmessstelle in das UBG-Messnetz aufgenommen.

Bislang wurde der gesamte Münzbach bei Trockenwetter durch die Kläranlage geleitet, wo als eher ungewünschter Nebeneffekt der Abwasserbehandlung eine teilweise Elimination von Schwermetallen und Arsen erfolgt. Dennoch gelangen über den Münzbach erhebliche Arsen-, Blei- und Zinkfrachten in die Freiburger Mulde.

Nach Fertigstellung der Trennung zwischen Münzbach und Mischabwasser wird der Obere Münzbach im Regelfall direkt in die Freiburger Mulde gelangen. Es ist daher zu vermuten, dass die Münzbachentflechtung eher zu einem Anstieg der Schwermetallbelastung in der Freiburger Mulde führen wird!

5.3 Veränderungen des biologischen Zustandes der Freiburger Mulde

Aufgrund der ausbleibenden chemischen Zustandsverbesserung der Freiburger Mulde ist in absehbarer Zeit auch keine Verbesserung des biologischen Besiedlungszustandes zu erwarten. Die Zunahme des Fischbestandes in Muldenhütten ist vermutlich eher auf den Rückgang kommunaler und industrieller Abwassereinleitungen bzw. den Neubau von Kläranlagen zurück zu führen.

Sollten die o. g. Effekte der Münzbachentflechtung tatsächlich eintreten, würde es vielmehr zu einer weiteren Verschlechterung des biologischen Zustandes in der Freiburger Mulde unterhalb der Münzbachmündung kommen.

6 Bewertung des Altlastenprojektes SAXONIA

6.1 Wirksamkeit der Sanierungsmaßnahmen

Im Sinne ihrer Konzeption, also die Schadstoffemissionen von Altstandorten bzw. -Ab lagerungen zu unterbinden, sind die gewählten Sanierungsmaßnahmen als sinnvoll und funktionsfähig einzuschätzen. Durch das Aufbringen von Abdeck- und Dichtungsschichten sowie die Böschungssicherung wird die Auswaschung von Schadstoffen durch Sicker- und Grundwässer sowie die Erosion durch Wind und Wasser wirkungsvoll unterbunden. Eine Verbesserung des Zustandes der Oberflächengewässer war nicht Ziel, sondern ist möglicherweise eine langfristige Folge der Sanierungsmaßnahmen, da durch diese der "Schadstoffnachschieb" unterbrochen worden ist.

6.2 Zukünftiger Handlungsbedarf

Wesentlich für die dauerhafte Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Abdeckschichten sind geeignete Monitoring- und Nachsorgemaßnahmen. Derartige Maßnahmen sind zu spezifizieren und in sinnvollen Zeitintervallen durchzuführen. Bezüglich des Wassermonitorings ist zu prüfen, ob eine Ausdünnung des Messstellennetzes zu Gunsten

kürzerer Probenahmeintervalle sinnvoll ist. Außerdem wäre eine Koordinierung der Probenahmestellen und -Intervalle mit der UBG sinnvoll, da so Doppelbeprobungen im UBG- und Monitoringmessnetz vermieden werden könnten.

7 Überregionale Auswirkungen des Zustandes der Freiburger Mulde

In der gemeinsamen Fachstellungnahme des LfUG und der StUFÄ Chemnitz, Radebeul und Leipzig [9] wurden die vom Altbergbau im Freiburger Raum, hauptsächlich die von den SAXONIA - Altlastenverdachtsflächen, ausgehenden Gefährdungen untersucht. Aufgrund der Überlagerung dieser Gefährdungen mit denen des Altbergbaues kann eine Gefährdungsabschätzung nur für das Freiburger Revier allgemein vorgenommen werden.

Zusammengefasst wurde fest gestellt, dass:

- die Cadmium - Zink - Belastung der Freiburger Mulde, die sich auch in der Vereinigten Mulde fort setzt, ist als schwerwiegend zu bewerten,
- vom Untersuchungsgebiet aufgrund der hohen Belastung mit toxikologisch relevanten und verhältnismäßig mobilen Schadstoffen eine hohe Gefährdung ausgeht und
- wegen der erheblichen Schadstofffrachten in der Freiburger Mulde und der Vereinigten Mulde eine Gefährdung für die menschliche Gesundheit besteht [9].

Bezüglich der Gesundheitsgefährdung für den Menschen sind vor allem Wasserentnahmen für die Trink- und Brauchwassergewinnung relevant. Jedoch liegen dazu noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor, so dass noch Untersuchungsbedarf besteht. Beeinflussungen durch den Freiburger Bergbau sind dabei in vier Gebieten möglich [9]:

(1) Quellwasserfassungen und Stollnwasserentnahmen entlang der Freiburger Mulde:

- Quellgebiet und Brunnen "Siedlerweg" in Großvoigtsberg,
- Quellgebiet "Schmiedewiese" in Hohentanne,
- "Friedrich Tiefer Stolln" in Bieberstein,
- Quellgebiet "Zellwald" in Siebenlehn.

Eine Wertung der möglichen Gefährdung wurde lediglich für das Quellgebiet Zellwald durchgeführt, da dieses längerfristig genutzt werden soll. Hier wurde eine hydraulische Verbindung zu den Altlastenverdachtsflächen für unwahrscheinlich erachtet.

(2) Uferfiltratfassungen entlang der Freiburger Mulde / Vereinigte Mulde:

- Töpelwinkel,
- Paudritzsch,
- Colditz - Podelwitzer Aue,
- Nimbschen - Höfgen,
- Wurz II in Dehnitz,
- Canitz - Thallwitz,
- Wedelwitz,
- Grimma Muldenaue (geplant).

Die genannten Uferfiltratfassungen sind für eine längerfristige Nutzung und teilweise sehr hohe Fördermengen vorgesehen. "Da trotz eines Verdünnungseffektes aufgrund der räumlichen Distanz eine negative Beeinflussung dieser Trinkwasserfassungen, insbesondere durch Verfrachtung der Sedimente aus dem Freiburger Raum und Remobilisierung von Schadstoffen bei Hochwasserereignissen möglich ist, besteht hier ein hohes Gefährdungspotenzial für die Trinkwasserversorgung [...] über die Freiburger Mulde."

(3) Uferfiltratfassungen entlang der Bobritzsch:

- Schachtbrunnen "Alte und Neue Schule" in Naundorf,
- Quellgebiet "Bobritzscher Wiesen" in Conradsdorf / Falkenberg,
- Brunnenanlage in der Bobritzschau und "Jugendherberge" in Bieberstein,
- Brunnen des ehemaligen VEB Hirschfeld (kein Uferfiltrat) und Fassung des ehemaigen ZBE in Hirschfeld.

Die Bobritzsch weist nur eine sehr geringe Belastung auf. Außerdem befindet sich zwischen der Bobritzsch und der Freiburger Mulde eine Wasserscheide, so dass eine Beeinflussung der Wasserfassungen im Bobritzschtal ausgeschlossen werden kann.

(4) Uferfiltratfassungen entlang der Elbe unterhalb der Einmündung der Triebisch.

- Trinkwasserfassung Riesa - Gohlis,
- Veränderungssperre "Planungsgebiet Paußnitzer Elbbogen",
- Niederlommatszsch (außer Betrieb),
- Chemiewerk Nünchritz (Brauchwasser),
- PAC Pflanzen GmbH (Brauchwasser),
- Beregnung Grödel,
- Moitz - Grödel / Rohrwerk Zeithain (Brauchwasser),
- Beregnung Kreinitz.

Eine Beeinflussung dieser Wasserfassungen ist vom Freiburger Raum aus über den Rothschnberger Stolln, die Triebisch und die Elbe ins Uferfiltrat möglich. Hauptsächlich über die Trinkwasserfassung Riesa - Gohlis besteht eine Gefährdung für die menschliche Gesundheit.

Um den Schadstofftransport über den Rothschnberger Stolln näher zu spezifizieren, werden in Tabelle 6 die Durchflusskenndaten und in Tabelle 7 die Konzentrationen und Frachten wesentlicher Elemente am Mundloch des Rothschnberger Stollns und in Kleinvoigtsberg gegenüber gestellt. Dazu wurden die Messwerte am Pegel Berthelsdorf auf die Messstelle Kleinvoigtsberg hoch gerechnet.

Tabelle 6: Durchflusskenndaten [Quelle: UBG]

	Rothschönberger Stolln F 1278 Mundloch	Freiberger Mulde F 3161 Kleinvoigtsberg
NNQ in m ³ /s	0,08	0,16
MNQ in m ³ /s	0,32	0,44
MQ in m ³ /s	0,69	5,07
MHQ in m ³ /s	1,71	43,2
HHQ in m ³ /s	14,0	176* / 521*

* vor / nach dem Hochwasser im August 2002

Tabelle 7: Konzentrationen und Frachten [Quelle: UBG]

	Rothschönberger Stolln F 1278 Mundloch Median 2000	Freiburger Mulde F 3161 Kleinvoigtsberg Median 1995 bis 2002
Arsen gelöst (µg/l)	1,80	5,66
Arsen gelöst (kg/d)	0,06	1,66
Arsen gesamt (µg/l)	13,00	9,80
Arsen gesamt (kg/d)	0,46	2,17
Blei gelöst (µg/l)	0,90	2,30
Blei gelöst (kg/d)	0,02	0,80
Blei gesamt (µg/l)	23,00	12,00
Blei gesamt (kg/d)	0,74	3,62
Cadmium gelöst (µg/l)	27,00	6,00
Cadmium gelöst (kg/d)	0,94	1,90
Cadmium gesamt (µg/l)	28,00	7,10
Cadmium gesamt (kg/d)	0,94	2,58
Kupfer gelöst (µg/l)	9,10	8,30
Kupfer gelöst (kg/d)	0,29	2,34
Kupfer gesamt (µg/l)	23,00	12,00
Kupfer gesamt (kg/d)	0,74	4,28
Zink gelöst (µg/l)	4700,00	667,00
Zink gelöst (kg/d)	164,80	200,00
Zink gesamt (µg/l)	4800,00	689,00
Zink gesamt (kg/d)	164,80	207,00

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Konzentrationen der Schwermetalle im Rothschönberger Stolln z. T. wesentlich höher sind als in der Freiburger Mulde. Im Zusammenhang mit dem geringen Abfluss der Triebisch in Rothschönberg ist daher nur ein geringer Verdünnungseffekt zu erwarten. Die Auswirkungen auf das Gewässer können deshalb gravierender sein als in der Freiburger Mulde. Weiterführende Untersuchungen

sollten hier klären, in welchem Maße sich die Einmündung des Rothschnberger Stollns in die Triebisch auswirkt und wie sich diese Beeinflussung dann ggf. auch in der Elbe fort setzt.

Aus der Frachtberechnung geht hervor, dass die über den Rothschnberger Stolln transportierten Schadstofffrachten z. T. wesentlich geringer sind, als die in der Freiburger Mulde bei Kleinvoigtsberg ermittelten Frachten. Die Frachten der Elemente Cadmium und Zink sind gegenüber denen in der Freiburger Mulde relativ hoch.

8 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Praktikumsarbeit war, die Einflüsse des Altbergbaues auf die aktuelle Belastung der Freiburger Mulde bzw. deren zukünftige Entwicklung zu untersuchen. Dazu wurde vorhandenes Datenmaterial ausgewertet und durch zusätzliche Untersuchungen verdichtet. Im Wesentlichen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Von den Anlagen des Altbergbaues im Freiburger Raum geht eine latente, anthropogen bedingte Gefährdung durch Schwermetalle und Arsen aus. Diese resultiert hauptsächlich aus der Akkumulation von Schadstoffen im Boden, die während der Betriebszeit bzw. nach deren Stilllegung von Bergwerken und Verarbeitungsbetrieben emittiert wurden.
2. In den Gruben- und Stollnsystemen finden spezifische geochemische Reaktionen statt, die zur Akkumulation bzw. Remobilisierung von Schadstoffen in den Stolln führen. Über die Grubenwässer gelangen z. T. erhebliche Schadstofffrachten in die Vorfluter. Die Auswirkungen dieser Einleitungen auf die chemische und biologische Beschaffenheit der Oberflächengewässer sind stellenweise noch nach längeren Fließstrecken nachweisbar. Somit können die Grubenbaue als spezifische Schadstoffsenke bzw. -quelle bezeichnet werden.
3. Durch die Sanierung von Altstandorten und Altablagerungen werden die Emissionspfade von diesen Schadstoffquellen unterbrochen. Eine Gefährdungsreduzierung für die Schutzgüter wird dadurch allerdings nur langfristig erreicht, da bereits vor der Sanierung

emittierte Schadstoffe nur sukzessive verfrachtet werden. Aus technischer Sicht können diese Prozesse wirtschaftlich weder beschleunigt noch unterbunden werden.

4. Nach Stilllegung des Bergbaues stabilisieren sich die Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser in einem höheren Wertebereich als vor Aufnahme des Bergbaues. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass auch in Zukunft hoch belastete Grubenwässer in die Vorfluter gelangen. Vor allem bei abflussstarken Stolln mit hoch belasteten Wässern sollten Maßnahmen geprüft werden, deren Auswirkungen auf den Vorfluter zu reduzieren.
5. Der Rote Graben besitzt aufgrund der Einmündungen hoch belasteter Stollnwässer des Königlich-verträglichen Gesellschaft-Stolln und des Hauptstolln-Umbruch nachhaltige Auswirkungen auf die Wasserqualität und den biologischen Besiedlungszustand der Freiburger Mulde. Um die Auswirkungen für die Freiburger Mulde zukünftig zu minimieren, muss zunächst die Zuständigkeit für die Instandhaltung und Bewirtschaftung des Roten Grabens geklärt werden.

Weiterhin sollten Bewirtschaftungsmaßnahmen geprüft werden, bei denen der Rote Graben z.B. sukzessive über die Abschlüge zwischen Halsbach und Halsbrücke in die Freiburger Mulde geleitet wird. Eine weitere Möglichkeit wäre, alle Abschlüge entlang der Fließstrecke zu schließen und so dass Sedimentationsvermögen voll auszunutzen. Die Einleitung in die Freiburger Mulde würde dann ausschließlich in Halsbrücke erfolgen.

Die technische Lösung des Problems scheint aus verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Gründen unwahrscheinlich. Zum einen können aus heutiger Sicht einige Schwermetalle in Wasserbehandlungsanlagen nicht eliminiert werden und zum anderen wäre die Errichtung von Kläranlagen am Roten Graben bzw. an den Mundlöchern derzeit vermutlich ebenso wenig finanzierbar wie die Überleitung zu den Kläranlagen Hohentanne oder Freiberg.

6. Durch die Entflechtung des Münzbaches im Freiburger Stadtgebiet werden auf der Kläranlage Münzbachtal nur noch die Mischabwässer der Stadt Freiberg behandelt. Im Sinne der Belastungsreduzierung für die Freiburger Mulde ist diese Maßnahme m. E. eher kontraproduktiv.

Ebenso wie bei der Freiburger Mulde besteht vermutlich im Oberlauf des Münzbaches eine anhaltende Schadstoffbelastung durch den Altbergbau. Dieses vorbelastete Wasser wurde bei Trockenwetter gemeinsam mit dem Freiburger Mischabwasser in der Kläranlage behandelt und ein Teil des Arsens bzw. der Schwermetalle durch Mitfällung entfernt. Nach dem Wegfall dieser Behandlungsmöglichkeit wird der vom Münzbach verursachte Schadstoffanteil in der Freiburger Mulde vermutlich ansteigen.

Dem Bedarf zur Ermittlung der Vorbelastung im Münzbach oberhalb von Freiberg wird ab 2004 mit der Einrichtung einer Beschaffenheitsmessstelle durch die UBG Rechnung getragen.

7. Über bergmännisch aufgefarene Wasserwege ist das Einzugsgebiet der Flöha mit der Freiburger Mulde und der Elbe verbunden. Die Schadstoffbelastung in der Umgebung des Freiburger Bergbaureviers kann demzufolge sowohl über die Freiburger Mulde als auch über die Elbe abtransportiert werden. Bezüglich einiger Wasserfassungen an der Freiburger / Vereinigten Mulde und der Elbe wurden Gefährdungen für den Menschen nicht ausgeschlossen. Hierzu wären vertiefende Untersuchungen nötig.

Literaturverzeichnis

- [1] Fritz, E.:
SAXONIA GmbH - ein Unternehmen in der Verantwortung für Tradition, Aufbruch und Entwicklung,
in: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH:
10 Jahre Altlastenprojekt Saxonia
Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen, 1. Auflage 2003
- [2] Autorenkollektiv:
Erfassung und Beurteilung der Schadstoffbelastung des Muldesystems
in: Leitprojekt Elbe 2000:
Die Belastung der Elbe Teil 1 - Elbenebenflüsse
Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
- [3] Neef, E.:
Die naturräumliche Gliederung Sachsens
in: Sächsische Heimatblätter 6-9/1960
- [4] Berger, H.-J.; u. a.:
Exkursionsführer zur Vortrags- und Exkursionstagung "Proterozoikum am Nordwestrand des böhmischen Massivs
Berlin, 1990
- [5] Hoth, K.; u. a.:
Metallogenetisches Kartenwerk Erzgebirge Vogtland, Geologische Karte 1:100 000
GFE Freiberg, ZGI, Berlin, 1980

- [6] Eckstein, L.:
Festlegung von Sanierungszielen unter Beachtung einer großräumigen geogenen und anthropogenen Belastung
in: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH:
10 Jahre Altlastenprojekt Saxonia
Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen, 1. Auflage 2003
- [7] Kirchbach von, H.-P.; u. a.:
Bericht der unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung zur Flutkatastrophe 2002
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, 2. Auflage 2003
- [8] Jordan, H.; Weder, H.-J.:
Hydrogeologie - Grundlagen und Methoden
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1995
- [9] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, StUFA Chemnitz:
Gemeinsame Stellungnahme zur Gefährdungsabschätzung bezüglich der Wasserpfade von Altlastenverdachtsflächen der Saxonia AG i.L. unter besonderer Berücksichtigung des Schutzgutes Gewässer
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, 1995
- [10] Mollè, R.:
Altlasten und Bodenmanagement unter Berücksichtigung der Bedingungen des Standortes Freiberg
in: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH:
10 Jahre Altlastenprojekt Saxonia
Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen, 1. Auflage 2003
- [11] Borkert, M.; u. a.:

- Gefährdungsabschätzung bezüglich der Wasserpfade von SAXONIA-Altlastenverdachtsflächen
GFE GmbH, Halle, 1994
- [12] Autorenkollektiv:
Sanierungsrahmenkonzept für das Altlasten-Großprojekt SAXONIA
UTECON Umweltschutz & Technologie Service GmbH, Berlin, 1996
- [13] Hertwig, T.; Reißmann, R.:
Kontaminationssituation und Gefährdungsabschätzung Muldenhütten
G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg, 1993
- [14] Autorenkollektiv:
Rahmensanierungskonzept für das Großprojekt "Ökologische Altlasten" Saxonía AG
i.L. Freiberg / Sachsen
GEOCONTROL Umwelttechnische Beratung Lausitz GmbH, Schwarze Pumpe, 1994
- [15] Autorenkollektiv:
Bericht zum "Untersuchungsprogramm zur Gefährdungsabschätzung bezüglich der Wasserpfade von SAXONIA-Altlastenverdachtsflächen - Muldenhütten bis Rothenfurth einschließlich Rothschnnberger Stolln"
HGC HYDRO-GEO-CONSULT GmbH, Freiberg, 1996
- [16] Kluge, A.; u. a.:
Bestandsaufnahme und Interpretation der Schwermetallbelastung in Wasser und Sediment der Mulde in den Jahren 1991 - 1993
in: 6. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Internationale Fachtagung Cuxhafen,
BG Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, 1994
- [17] Klemm; Knittel; Greif; Broekaert; Siemens:
Schwermetalle und Arsen in der Mulde
in: Schadstoffbelastung im Mulde- und Elbe - Einzugsgebiet nach dem Augusthochwasser 2002 (Tagungsband)

- [18] Grimm, R.:
Ergebnisbericht zum "Wassermonitoring 2001 SAXONIA"
HGC HYDRO-GEO-CONSULT GmbH, Freiberg, 2002
- [19] Autorenkollektiv:
Die Schwermetallsituation im Muldesystem
Schlussbericht zu den Fördervorhaben
Eigenverlag der Universität Hamburg, Freiberg, Hamburg, Juli 1999
- [20] Wagenbreth, D.; Wächtler, E.; u. a.:
Der Freiburger Bergbau: Technische Denkmale und Geschichte
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
- [21] Degner, T.:
Prognose von geochemischen Auswirkungen der Nachnutzung stillgelegter Bergbau -
Stollen - Systeme am Beispiel des Freiburger Grubenreviers
TU Bergakademie Freiberg, Dissertation 2003
- [22] Baacke, D.:
Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten
Polysulfidierzgruben am Beispiel der Grube "Himmelfahrt" in Freiberg / Sachsen
TU Bergakademie Freiberg, Dissertation 2000
- [23] Merkel, B. J.; Planer-Friedrich, B.:
Integrierte Datenauswertung Hydrogeologie
TU Bergakademie Freiberg, Überarbeitung 2003
- [24] Merkel, B. J.; Hartsch, J.; Pinka, F.; Peters, H.:
Chemische Veränderungen nach Auflassen von Uranbergwerken unter besonderer
Berücksichtigung von Radionukliden
TU Bergakademie Freiberg und GEOS Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, 1997
- [25] Mühle, K.:

Gewässerbelastung durch kommunale Regenabflüsse - Schadstoffeintrag aus Kanalnetzen alter Bergbauregionen am Beispiel von Freiberg
Manuskript für Veröffentlichung in Wasserwirtschaft Wassertechnik (WWt)
Verlag für Bauwesen, Berlin, 1995

- [26] Pfeifer, M.:
Beurteilung der Rückstandskonzentrationen von Schwermetallen in Fischen aus der Freiburger Mulde
Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 1999 / 2000
- [27] Köck, G.:
Die toxische Wirkung von Schwermetallen auf Fische
in: Steinberg, Calmano, Klapper, Wilken:
Handbuch Angewandte Limnologie
ecomed, 1996
- [28] Buchheim, C.:
Gutachten zur Historischen Erkundung des Hüttenröschchen- und Rauchgaskanalsystems im Bereich Hütte Muldenhütten
LiGAR Labor- und Ingenieurgesellschaft, Dresden, 1994
- [29] Blaudszun; Pollmer:
Historische Erkundung der Altlast "Rauchgaskanal und Betriebsgraben Halsbrücke"
Claytex Consulting GmbH, Gera, 1994

Linkliste

- **Bergarchiv Freiberg:**
http://www.sachsen.de/de/bf/verwaltung/archivverwaltung/archiv_freiberg/inhalt.html
- **Brand-Erbisdorf:**
<http://www.brand-erbisdorf.de/ifs1.html>
- **Drei-Brüder-Schacht / Kavernenkraftwerk:**
<http://www.drei-brueder-schacht.de/homepage.htm>
- **Freiberg:**
<http://www.freiberg.de/acaws/portal.nsf/framesets/freiberg>
- **Holzhau:**
<http://www.holzhau.de>
- **Mulda:**
<http://www.mulda.de>
- **Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft:**
<http://www.smul.sachsen.de/de/wu/index.html>
- **SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH:**
<http://www.saxonia-freiberg.de/>
- **TU Bergakademie Freiberg; Archiv Freiburger Dissertationen Online:**
<http://fridolin.tu-freiberg.de/>
- **Wasserzweckverband Freiberg:**
<http://www.wasser-freiberg.de/>
- **Zug:**
<http://www.zugiges.de/frameset.html>