

Annia Greif

Das Einzugsgebiet der Mulde oberhalb des Muldestausees im Spiegel des erzgebirgischen Bergbaus

The impact of mining activities in the Ore Mountains on the Mulde river catchment upstream of the Mulde reservoir lake

Freiberger und Zwickauer Mulde gelten aufgrund ihres Ursprungs im Erzgebirge auch heute noch als eine wesentliche überregionale Quelle für Schwermetalle und Arsen. Im Beitrag wird die Entwicklung der Schadstoffbelastung in Raum und Zeit dargestellt. Die Konzentration der Elemente Cd, Cu, Ni, Pb und Zn im Wasser kann seit 1990 als überwiegend rückläufig beschrieben werden, Arsen verändert sich kaum. Extremereignisse (Hochwässer) unterbrechen die sinkenden Trends lokal. Anhand einer Bilanzierung des Schadstoffpotenzials konnten wesentliche Quellen in zwei Belastungsgebieten identifiziert, quantifiziert und bewertet werden. Der Frachtzuwachs in den Mulden stammt zu einem hohen Anteil aus Punktquellen dieser Belastungsgebiete (ca. 1/3 des Cd und Zn in der Freiberger Mulde sowie des Arsens in der Zwickauer Mulde), zu einem weiteren Teil über Nebenflüsse aus dem Einzugsgebiet. Die Ergebnisse werden exemplarisch für die Elemente Arsen und Cadmium visualisiert.

Schlagwörter: Arsen, Belastung, Einflüsse des Bergbaus, Einzugsgebiet Mulde, Muldestausee, Schwermetalle

Due to their origin in the Ore Mountains, the rivers Freiberger and Zwickauer Mulde up today are considered as major nationwide sources of heavy metals and arsenic. The paper describes the pollution in time and space. The concentration of the elements Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in the water has been predominantly declining since 1990, while arsenic concentration has remained virtually unchanged. Based on a mass balance study of the pollutant potential, major sources have been identified, quantified and evaluated in two polluted areas. A major part of the load increase in the Mulde rivers originates from point sources of these polluted areas (about 1/3 of Cd and Zn in the Freiberger Mulde and the arsenic in the Zwickauer Mulde), another part enters via tributaries from the catchment area. The results are exemplarily visualised for the elements arsenic and cadmium.

Keywords: Arsenic, heavy metals, impact of mining, Mulde reservoir, Mulde river catchment, pollution

1 Einführung

Die Mulde ist ein flächen- und abflusseitig bedeutsamer linksseitiger Zufluss im Mittellauf der Elbe. Sie wurde bereits Anfang der 1990er Jahre als belastungsrelevanter Zufluss der Elbe identifiziert (BEUGE et al. 1994, 1999) und gilt auch heute noch als eine wesentliche überregionale Quelle für Schwermetalle und Arsen im Elbeeinzugsgebiet. Der eng mit den geogenen Gegebenheiten verbundene erzgebirgische Erzbergbau führte und führt beachtliche Emissionen über die beiden Nebenflüsse Freiberger und Zwickauer Mulde sowohl in die Vereinigte Mulde als auch über den Rothschnöberger Stolln in die Triebisch und somit direkt in die Elbe ab. Als Hauptproblemelemente der Schadstoffbelastung gelten der prioritär gefährliche Stoff Cadmium, weiterhin Arsen und Schwermetalle wie Kupfer, Nickel, Blei, Uran und Zink.

Der Schwerpunkt einer Studie (GREIF 2013) am Institut für Mineralogie der TU Bergakademie Freiberg im Rahmen des ELSA-Projektes (ELSA 2011) lag auf der Charakterisierung der Schadstoffeinträge aus den Erzbergbaurevieren der Mulde bis zum Muldestausee.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Das Einzugsgebiet der Mulde besitzt mit seinen 7.400 km² einen Anteil von ca. 5 % am Elbeeinzugsgebiet. Es erstreckt sich von der Tschechischen Republik über Sachsen bis Sachsen-Anhalt und entwässert mit den beiden Quellflüssen Freiberger und Zwickauer Mulde wesentliche Teile des Erzgebirges.

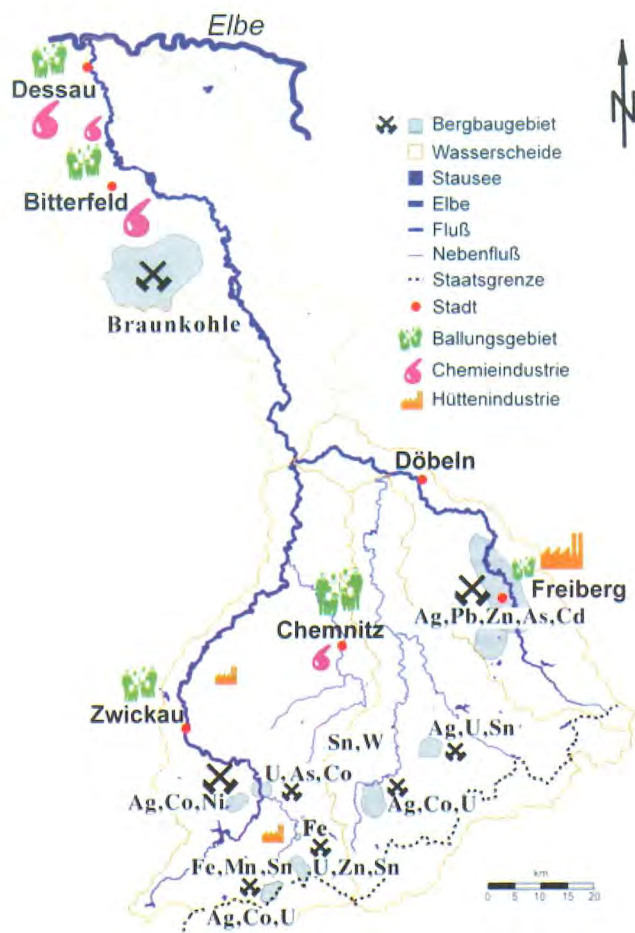
Der Vergleich morphologischer und hydrologischer Parameter verdeutlicht den Unterschied zwischen den erzgebirgsgeprägten Teileinzugsgebieten Freiberger und Zwickauer Mulde gegenüber der Vereinigten Mulde als typischer Flachlandfluss (HOPPE 1995) (Tab. 1).

Im Mulde-Einzugsgebiet sind geologische Formationen vom Präkambrium bis zum Quartär verbreitet, wobei sich die Teileinzugsgebiete Freiberger und Zwickauer von dem der Vereinigten Mulde sowohl in ihrem Gesteinsbestand (KARDEL et al. 1996) als auch hinsichtlich der auftretenden Mineralisationen und Lagerstätten (HÖSEL et al. 1997, WASTERNAK et al. 1995) unterscheiden.

Für die Hauptgesteinstypen konnten regionale Clarke-Werte abgeleitet werden (PÄLCHEN et al. 1987). Im Vergleich mit den krustalen Clarke-Werten zeigten diese eine Anreicherung von B, Li, W, Sn, Rb, Be, Pb, F, Zn, Si, Al, K und eine Verarmung von Ba, Ti, Co, Cu, Mn, Cr, V, Ni, Sr, Ca, Mg und Na. Das genannte Elementspektrum war bereits in den 1970/80er Jahren Gegenstand geochemischer Prospektionsarbeiten im Erzgebirge/Vogtland.

Besondere umweltgeochemische Bedeutung erlangen

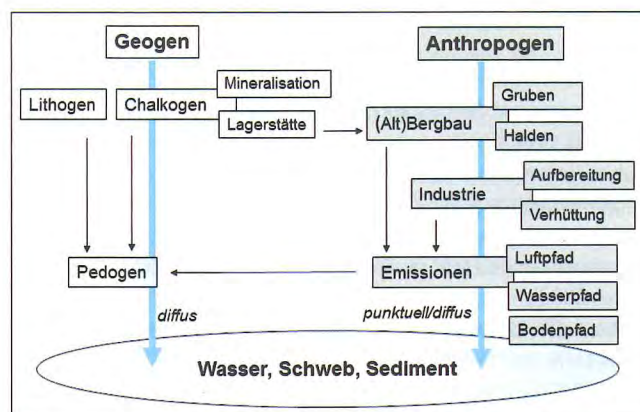
- die erzgebirgischen Lagerstättenreviere Freiberg (Pb, Zn, Ag), Annaberg, Marienberg (Ag, Co, U, Ni), Ehrenfriedersdorf, Geyer (Sn, W, As) im Einzugsgebiet der Freiberger Mulde
- sowie das Revier Schneeberg-Schlema (Bi-Co-Ni-U-Ag) und die Lagerstätten Johanngeorgenstadt und Pöhla (Ag, Co, Ni, U, Sn, Zn, W, Fe) im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde (Abb. 1).

**Abbildung 1**

Geogene und anthropogene Besonderheiten im Muldeeeinzugsgebiet (BEUGE et al. 1999)

Geogenic and anthropogenic specifics in the Mulde river system (BEUGE et al. 1999)

Darüber hinaus gibt es im Erzgebirge viele weitere kleine mineralische Vorkommen und Vererzungen. Insgesamt wird von bis zu 10.000 Gruben ausgegangen, die seit dem 12. Jahrhundert angelegt wurden. Die endgültige Einstellung des Erzbergbaus ist auf Anfang der 1990er Jahre im Zusammenhang mit dem politischen Umbruch zu datieren.

**Abbildung 2**

Quellen von Schwermetallbelastungen in erzgebirgischen Fließgewässern
Sources of heavy metal pollution of watercourses in the Ore Mountains

Im Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde fand Braunkohlenbergbau statt. Hinzu kommen Aktivitäten der metallurgischen und chemischen Industrie sowie kommunale und landwirtschaftliche Einflüsse im gesamten Einzugsgebiet (Abb. 1).

Sowohl der geogene Grundzustand als auch durch Bergbau, Verhüttung und metallverarbeitende Industrie in Gang gesetzte anthropogene Prozesse (Abb. 2) spiegeln sich im geochemischen Fingerprint der Böden (RANK et al. 1999) und Gewässersedimente in den Teileinzugsgebieten wieder (GREIF et al. 2004, GREIF & KLEMM 2007). Eine weitere wesentliche Quelle von Schwermetallen und Arsen sind die in die Vorfluter entlastenden Flutungswässer abgeworfener Grubenbaue (MARTIN et al. 1994).

Der Kontakt von Wasser, sei es Niederschlags-, Infiltrations-, Oberflächen- oder Grundwasser mit (Rest-)Erzen, deren Verwitterungs- oder Abprodukten führt zur Freisetzung von Schwermetallen und Arsen. Dabei sind Sulfide und Arsenide als besonders reaktionsfreudige Mineralgruppen zu beschreiben, die in allen Lagerstättentypen auftreten.

Tabelle 1

Morphologische und hydrologische Kennzahlen der Teileinzugsgebiete (IKSE 2005, LfULG 2012)
Morphological and hydrological parameters of catchment areas (IKSE 2005, LfULG 2012)

	Freiberger Mulde	Zwickauer Mulde	Vereinigte Mulde
Größe des Einzugsgebietes	2.985 km ²	2.360 km ²	2.055 km ²
Länge der Hauptläufe	123,9 km	166,7 km	147,0 km
Mittleres Gefälle der Hauptläufe	5,8 ‰	3,8 ‰	0,5 ‰
Talsperren >3 Mio m ³ im Einzugsgebiet	7	5	1
Wehre in den Hauptläufen	51	53	12
Mündungsnaher Abfluss (MQ)	35,6 m ³ /s	26,3 m ³ /s	64,6 m ³ /s
der Hauptläufe, Pegelbezeichnung,	Pegel Erlin	Pegel Wechselburg	Pegel Bad Dübén
Länge der Zeitreihe	(1961–2010)	(1910–2010)	(1961–2010)

3 Methodische Aspekte

Aufgrund langjähriger Untersuchungen,

- beginnend bei der Bestandsaufnahme Anfang der 1990er Jahre (BEUGE et al. 1999),
- über Untersuchungen während Sanierungsarbeiten (z.B. SAXONIA Altlastenprojekt, Wismut GmbH),
- projektbezogene Fragestellungen, z.B. geochemische Barrieren, Hochwasser (KLEMM et al. 2005, KNITTEL et al. 2005, KOLITSCH et al. 2003),
- bis zu den Untersuchungen der Landesbehörden (LfULG Sachsen, LHW Sachsen-Anhalt),

wurde für die Hauptläufe eine gewisse Systematik erreicht, indem Untersuchungen kontinuierlich bzw. zyklisch wiederholt werden. Nur Messstellen, die systematisch untersucht werden und für die parallel zur Qualität auch Angaben zur Quantität (Durchflussmenge) vorliegen, können Trendaussagen zur zeitlichen Entwicklung des Schadstoffpotenzials liefern.

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Konzentrationen bergbaubürtiger umweltrelevanter Schadstoffe im Wasser (gelöste Gehalte, Gesamtgehalte) und im Schwebstoff/Sediment (Fraktion $< 20 \mu\text{m}$, ab 2012 $< 63 \mu\text{m}$) wurde für die Mulden für den Zeitraum 1992–1993 (BEUGE et al. 1999) und 1993–2013 (Daten des sächsischen Oberflächenwassermessnetzes, LfULG 2014) zusammengefasst.

Für die Jahre 1992–1995 beschränkten sich die meisten Untersuchungen auf die gelöste Phase. Parallele Untersuchungen an den Schwebstoffen (Filterrückstand) setzten sich methodisch nicht durch. Aktuell werden Gesamtgehalte (nach Säureaufschluss) bzw. gelöste Gehalte ermittelt. Für Aussagen zum Transportverhalten der Elemente, ihrer Mobilität, Toxizität und ihren Verbleib wird ihre bevorzugte Bindungsform (gelöst oder partikulär) ermittelt. Dafür wurden sowohl die gelösten als auch die Gesamtgehalte betrachtet. Leider findet heute aus finanziellen Gründen nur noch die Analyse der Gesamtgehalte oder der gelösten Gehalte statt, abhängig von der Zielrichtung des jeweiligen Untersuchungsprogramms. Der Trend in den Oberflächengewässern geht zur Analyse der gelösten Elementanteile für die Bewertung nach ökotoxikologischen Gesichtspunkten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG 2000) bzw. Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2011). Für eine Abschätzung von Stofffrachten und die Lokalisierung/Wichtung von Emittenten aller Art sind jedoch Gesamtgehalte erforderlich. Eine zuverlässige Bewertung des Gesamtsystems insbesondere seiner Dynamik (bezogen auf den Schadstofftransport) ist nur mit den Ergebnissen beider Probenarten erfolgreich.

Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) gingen mit der Hälfte der BG in die Betrachtungen ein. Dabei ist zu beachten, dass sich die analytischen BG im Laufe der Jahrzehnte z.T. deutlich verbesserten. Ob ein Messergebnis im Sinne eines weiterverwendbaren Wertes (halbe BG) einbezogen wurde oder aufgrund der zu hohen BG entfiel, musste für die frühen Jahre im Einzelfall gegeneinander abgewogen werden.

Für die Fließgewässercharakterisierung ist noch eine dritte Probenart von Bedeutung: die Feststoffphase in Form von Schwebstoffen bzw. Sedimenten. Galten früher die Sedimente bevorzugt als Gedächtnis der Fließ- und Standgewässer, sind heute Schwebstoffe

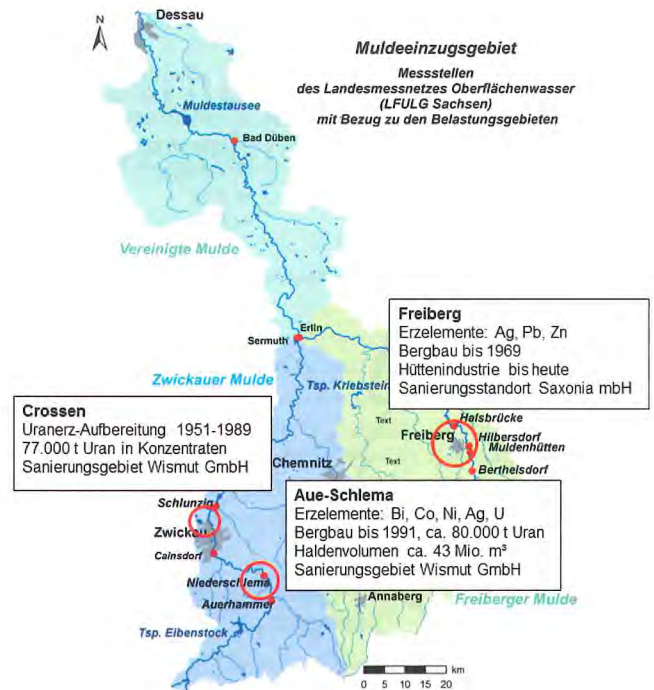


Abbildung 3

Übersicht über das Muldeeinzugsgebiet, Lage der ausgewählten Landesmessstellen zu den Belastungsgebieten
Overview of the Mulde catchment area, position of selected measuring points with regard to mainly polluted areas

als Anzeiger aktueller Belastungen und Veränderungen an ihre Stelle getreten. Sammelsysteme, die einen Querschnitt über die Dynamik des Systems in einem bestimmten Zeitraum abbilden, treten zunehmend an die Stelle von Sedimentuntersuchungen mit Greifern o.ä.

Bei den Untersuchungen Anfang der 1990er Jahre sind Hauptbelastungsabschnitte (Belastungsgebiete) identifiziert worden, die seit dem unter kontinuierlicher bzw. zyklischer Beobachtung stehen (Abb. 3):

- Freiburger Mulde zwischen Berthelsdorf und Halsbrücke (Bergbau- und Hüttenstandort Freiberg), im Folgenden als Belastungsgebiet Freiberg bezeichnet;
- Zwickauer Mulde zwischen Aue und Hartenstein (Bergbaugebiete Schlema und Schneeberg) sowie zwischen Zwickau und Schlunzig (Uranerzaufbereitungsstandort Crossen), im Folgenden als Belastungsgebiet Schlema bzw. Crossen bezeichnet.

Aus dem Vergleich mittlerer Elementkonzentrationen an regional bedeutsamen Messstellen lassen sich sowohl Aussagen zur regionalen Herkunft als auch zur Intensität der Schadstoffeinträge treffen. Unter Einbeziehung der abfließenden Wassermengen kann eine Bilanzierung der Stoffströme vorgenommen werden.

Die Bilanzierung der transportierten bzw. über verschiedene Quellen eingetragenen Jahresfrachten (F) erfolgt nach Formel 1.1a der IKSE (IKSE 2012) unter Berücksichtigung des mittleren Abflusses im Jahr (MQJahr), der einzelnen Konzentrationen (Ci) und Abflüsse (Qi).

$$F = \frac{MQ_{\text{Jahr}} \sum_{i=1}^n (C_i \cdot Q_i)}{\sum_{i=1}^n (Q_i)} \cdot 0,0864 \cdot 365,25$$

Für die meisten Punktquellen liegen nur Stichproben oder Schätzungen der Durchflussmengen vor, für die Konzentrationen Mittel- oder Einzelwerte.

$$F = Q_{\text{Stichprobe}} \cdot C_{\text{Einzelwert}} \quad \text{bzw.} \quad F = Q_{\text{Stichprobe}} \cdot C_{\text{Mittelwert}} \quad \text{bzw.} \\ F = Q_{\text{Mittelwert}} \cdot C_{\text{Mittelwert}}$$

Um diese Stofffrachten wiederum bewerten zu können, ist auf die Vergleichbarkeit der hydrologischen Bedingungen zu achten. Die Beschreibung des Ist-Zustandes und die Bilanzierungen basieren weitgehend auf dem Jahr 2011, da hier die mittleren Abflüsse (MQ) denen der langjährigen Reihe am nächsten kommen.

4 Räumliche Entwicklung entlang der Hauptläufe

Häufig werden Untersuchungen an einem Fließgewässersystem mit der systematischen Beprobung eines Längsprofils begonnen. Von der Quelle bis zur Mündung zeigt sich ein elementspezifischer Verlauf der ermittelten Konzentrationen. Am Beispiel der Mulde (Abb. 4 und 5) kann daraus der Schwerpunkt und die (saisonale) Schwankungsbreite für einzelne Elemente abgelesen werden. Bei guter Kenntnis des Gesamtsystems sind ggf. Aussagen zum geogenen Hintergrund und zur Dynamik des Schadstofftransports möglich. Für das Element Cadmium (Abb. 4) wird beispielhaft für den Untersuchungszeitraum 2011 die sprunghafte Zunahme der Konzentrationen mit Eintritt in den Bergbau- und Hüttenstandort Freiberg verdeutlicht, die über das Belastungsgebiet Freiberg hinaus anhält. Erst mit Zufluss der Zschopau tritt eine Verdünnung ein. Die Konzentrationen in der Zwickauer Mulde liegen dagegen auf geringerem Niveau und erhöhen sich kaum.

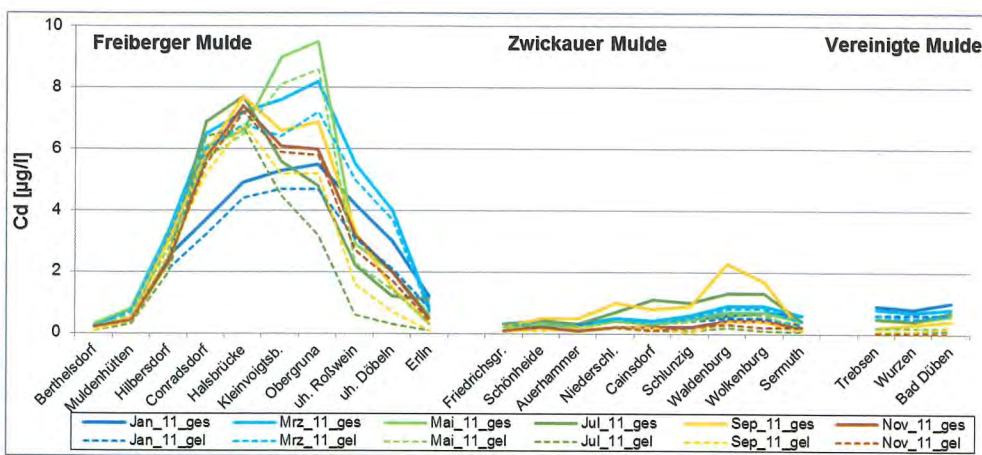


Abbildung 4

Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Cd-Konzentrationen im Wasser, 2011, ges: gesamt, gel: gelöst (Daten: LfULG 2014)

Regional origin and temporal development of cadmium concentrations in water, 2011, ges: total, gel: dissolved (data: LfULG 2014)

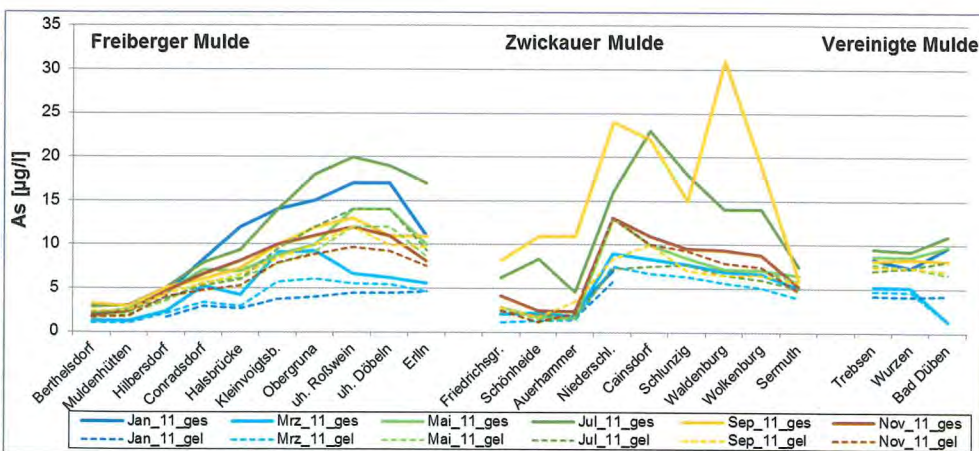


Abbildung 5

Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der As-Konzentrationen im Wasser, 2011, ges: gesamt, gel: gelöst (Daten: LfULG 2014)

Regional origin and temporal development of arsenic concentrations in water, 2011, ges: total, gel: dissolved (data: LfULG 2014)

Das Element Arsen (Abb. 5) ist im gesamten Flusssystem existent. Es zeigt sich ebenfalls ein kontinuierlicher Anstieg in der Freiberg Mulde, der mit Eintritt der Zschopau nur geringfügig abnimmt, d.h. im Einzugsgebiet der Zschopau gibt es weitere signifikante As-Quellen. In der Zwickauer Mulde steigen die As-Gehalte relativ sprunghaft mit dem Eintritt in das Belastungsgebiet Schlema an und nehmen anschließend wieder langsam ab.

5 Langzeitentwicklung und Tendaussagen entlang der Hauptläufe

Die Verknüpfung von Konzentrationszeitreihen im Längsprofil ermöglicht komplexe Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Belastungssituation. Exemplarisch wird die zeitliche Entwicklung der Cd-Konzentrationen in der Freiberg Mulde (Abb. 6) bzw. die As-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde (Abb. 7) in der Wasserphase (gelöst und gesamt) mit Bezug zu den Belastungsgebieten dargestellt. In den Diagrammen ist die teilweise unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

Tendaussagen (z.B. im einfachsten Fall mit linearen Trendlinien über den jeweiligen Betrachtungszeitraum) sind jedoch nur verlässlich für Mess-

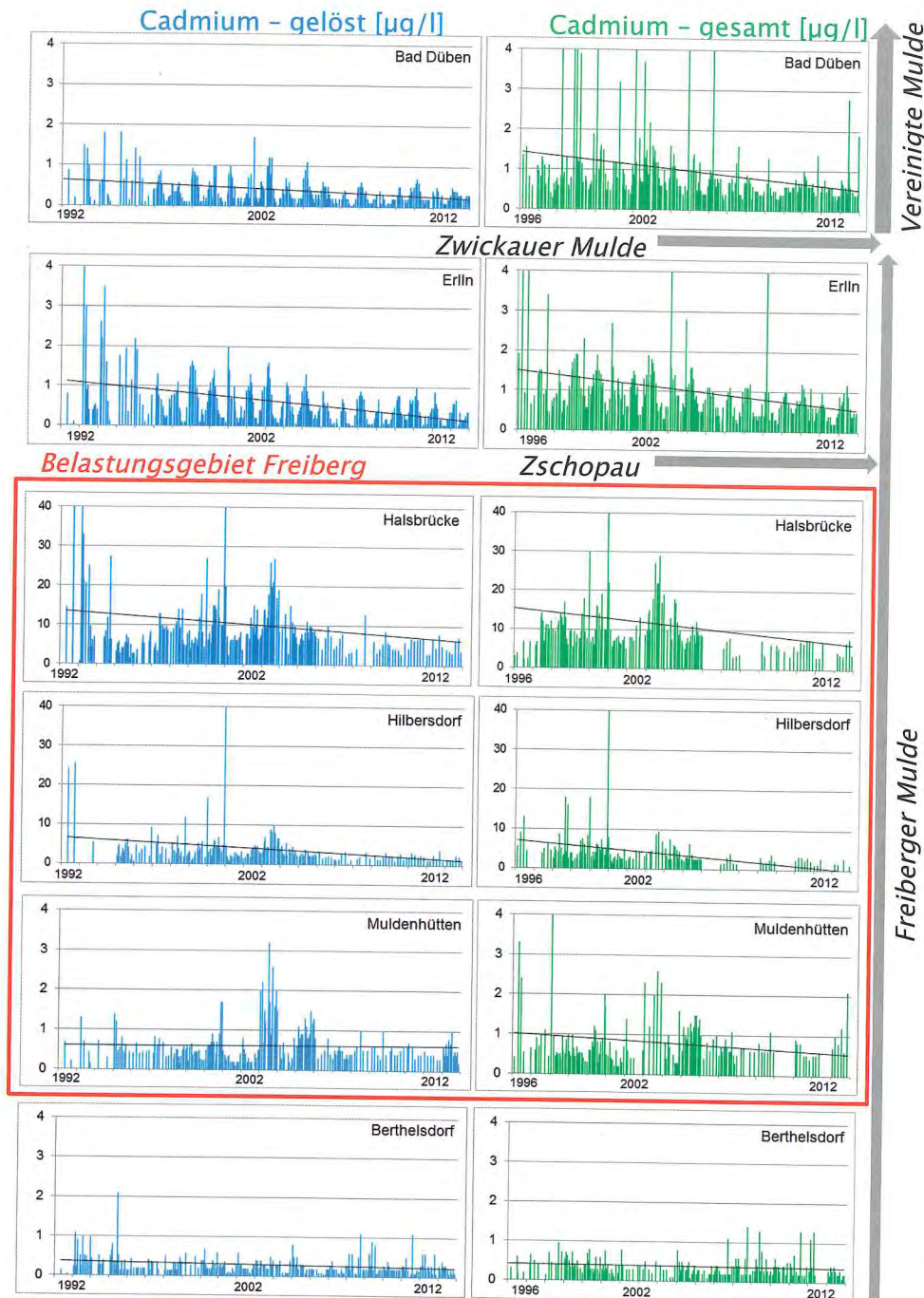


Abbildung 6

Zeitliche Entwicklung der Cadmium-Konzentrationen im Wasser (gelöst, gesamt) der Freiburger Mulde mit Fokus auf das Belastungsgebiet Freiberg (Daten: LFULG 2014, BEUGE et al. 1999)
Temporal development of cadmium concentrations in water (dissolved, total) of Freiburger Mulde river focused on the mainly polluted area Freiberg (data: LFULG 2014, BEUGE et al. 1999)

stellen, die regelmäßig beprobt wurden und somit keine wesentlichen Lücken in den Zeitreihen aufweisen. Im Wasser können die Konzentrationen der Elemente Cd, Cu, Ni, Pb und Zn als überwiegend rückläufig eingeschätzt werden (Tab. 2). Die U-Gehalte in der Freiburger Mulde verbleiben auf sehr niedrigem Niveau, gleichfalls ist für die geringen Pb-Gehalte in der Zwickauer Mulde kaum mehr eine Abnahme zu verzeichnen. Für das Element Arsen lässt sich kein signifikanter Trend beobachten.

Für die Schwebstoffe/Sedimente zeigt sich ein ähnliches Bild (Tab. 3). Die partikuläre Substanz besitzt ein hohes Adsorptionspotenzial für Schwermetalle und Arsen. Damit lassen sich gleichbleibende Gehalte in den Sedimenten bei gleichzeitigem Rückgang der Gehalte in der Wasserphase erklären.

6 Ist-Zustand

Für 2011 wurden die mittleren Elementkonzentrationen (Gesamtgehalte) am Ein- und Ausgang der Belastungsgebiete Freiberg und Schlema ins Verhältnis gesetzt (Tab. 4). In beiden Gewässerabschnitten kommt es weiterhin zu einer signifikanten Zunahme der Elementkonzentrationen, die bezogen auf die Auswertung 2003–2008 (mit Ausnahme von Nickel in der Zwickauer Mulde) geringer ausfällt. Die stärkste Erhöhung, mit Faktoren über 10, erfahren die Elemente Zn und Cd in der Freiburger Mulde. Am Punkt Auerhammer ist eine bereits vorhandene Belastung aus dem Oberlauf zu berücksichtigen.

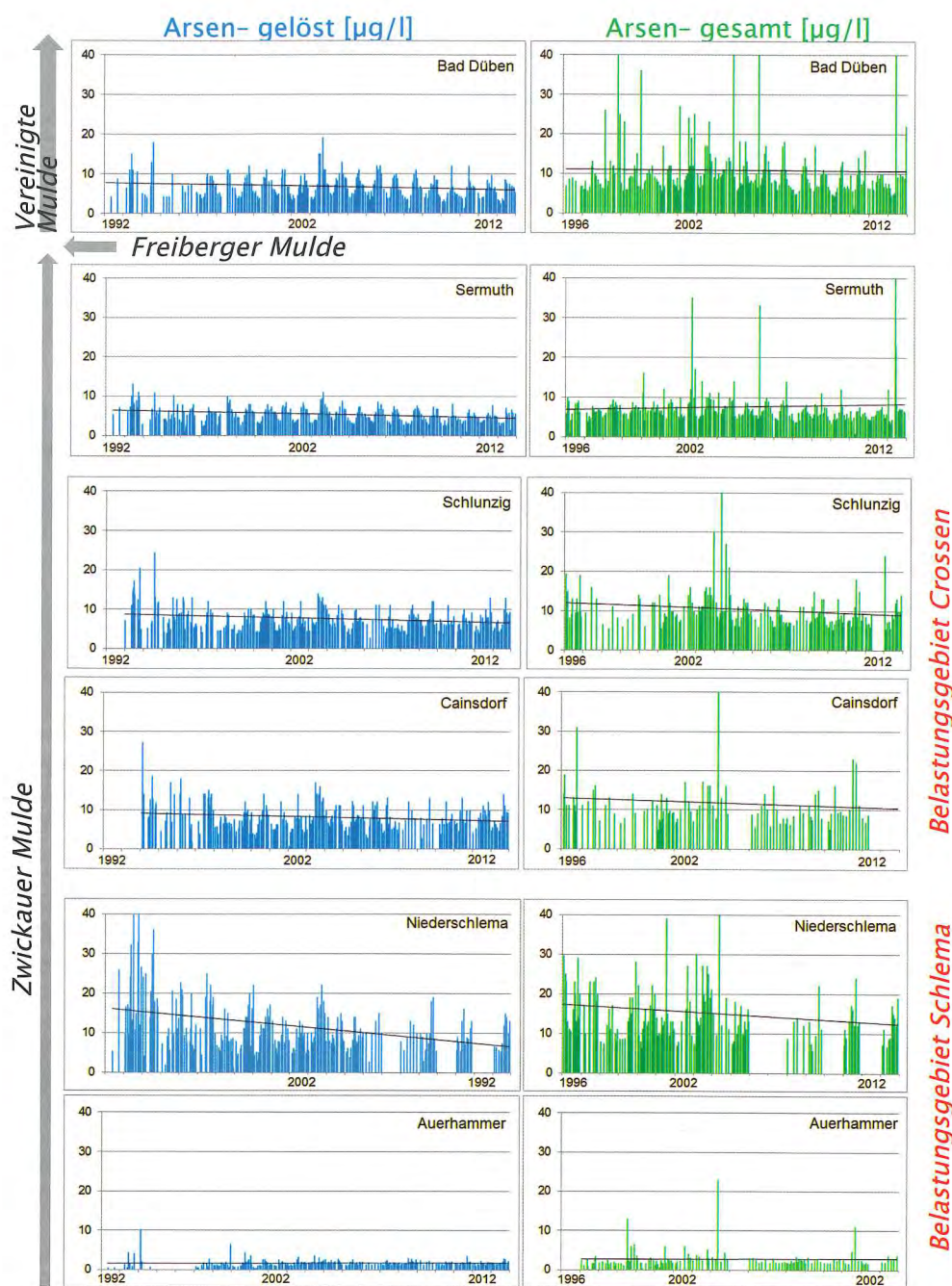
Die Zunahme der gebietspezifischen Elemente spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Sedimente wider (Tab. 5). Besonders hoch sind die Anreicherungsfaktoren nach wie vor im Belastungsgebiet Freiberg einzuschätzen: As, Pb (5fach), Cd, Cu, Zn (4fach).

Aus dem Vergleich der Konzentrationen an den Mündungen (Erlin bzw. Sermuth) lassen sich die Elemente As, Cd, Pb und Zn bevorzugt der Freiburger Mulde, die Elemente Ni, U der Zwickauer Mulde zuordnen. Kupfer ist in beiden Teilzuflüssen vertreten.

7 Bilanzierung und Quellenanalyse

7.1 Belastungsgebiet Freiberg

Die Freiburger Mulde wird in ihrem geochemischen Habitus maßgeblich vom Bergbau- und Hüttenstandort Freiberg beeinflusst. Prägend sind sowohl der untertägige Bergbau mit seinen ausgedehnten Grubenhohlräumen und Bergehalde als auch die Hüttenindustrie mit ihren Rückstandshalden (Schlacken, Aschen, Tailings). Daraus resultieren die Quellen der Schadstoffbelastung auf dem Wasserpfad: Grubenwässer aus dem Bergbau und Sicker-

**Abbildung 7**

Zeitliche Entwicklung der Arsen-Konzentrationen im Wasser (gelöst, gesamt) der Zwickauer Mulde mit Fokus auf die Belastungsgebiete Schlema und Crossen (Daten: LfULG 2014, BEUGE et al. 1999)

Temporal development of arsenic concentrations in water (dissolved, total) of Zwickauer Mulde river focused on the mainly polluted areas Schlema and Crossen (data: LfULG 2014, BEUGE et al. 1999)

wässer aus den Halden. Am Standort führte die SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH ein Altlasten-Großprojekt durch, das die Revitalisierung kontaminierter Standorte und Haldenflächen im Zeitraum von 1993 bis 2013 zum Ziel hatte (MOLLÉE 2013). Eingeschlossen waren die Hütte Muldenhütten, die Hütte Freiberg und die Hütte Halsbrücke, die einen direkten Bezug zur Freiburger Mulde besitzen. Die Sanierungsmaßnahmen hatten das Ziel, die Kontaminationspfade zu unterbrechen und den Eintrag von Schadstoffen in die Umweltkompartimente Wasser, Boden und Luft zu minimieren. Aktuell werden Maßnahmen am Komplex Davidschacht/Hammerberg durchgeführt.

Die ermittelten Quellen für die Schadstoffeinträge im Belastungsabschnitt sind nur grob bilanzierbar, da es selten belastbare Angaben zu den Wassermengen gibt bzw. einige Punktquellen nur diskontinuierlich Wasser schütten. Wesentlich für den Belastungsabschnitt sind haldenseitig der Stangenbergbach (Stang) und grubenseitig der Königliche Verträge Gesellschaft Stolln (VGS) und der Hauptstollnumbruch (HSU). Ein wesentlicher Frachtanteil wird über den Rothschnöberger Stolln (RS) in die Triebisch und somit direkt in die Elbe emittiert (Abb. 8).

Aus der Bilanzierung der Cd-Frachten entlang der Freiburger Mulde ist ersichtlich, dass einige Punktquellen wesentlich zur Kontamination der Mul-

Tabelle 2

Elementspezifische Trendaussagen für die Mündungen der Freiburger und Zwickauer Mulde (FM, ZM) bzw. an der Vereinigten Mulde (VM) in Bad Dübener, Gesamtgehalte im Wasser (1996–2013)

Element-specific trends for the mouths of Freiburger and Zwickauer Mulde rivers (FM, ZM), resp. of Vereinigte Mulde (VM) at Bad Dübener, total content in water (1996–2013)

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	U	Zn
FM-Erlin	→	↓	↓	↓	↓	→	↓
ZM-Sermuth	→	↓	↓	↓	→	↓	↓
VM-Dübener	→	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Trend: ↓ sinkend, → gleichbleibend

Tabelle 3

Elementspezifische Trendaussagen für die Mündungen der Freiburger und Zwickauer Mulde bzw. an der Vereinigten Mulde in Bad Dübén, Gehalte in den Sedimenten (Fraktion < 20 µm) (2001–2011)
Element-specific trends for the mouths of Freiburger and Zwickauer Mulde rivers, resp. of Vereinigte Mulde at Bad Dübén, total content in sediments (fraction < 20 µm) (2001–2011)

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	U	Zn
FM-ErlIn	↓	→	↓	→	↓	–	→
ZM-Sermuth	→	→	↓	→	↓	–	→
VM-Dübén	→	↓	↓	→	→	–	↓

Trend: ↓ sinkend, → gleichbleibend

*Schwebstoffe aus automatischer Messstation, Monatsmischproben (1997–2011)

Tabelle 4

Mittlere Konzentrationen bergbaubürtiger umweltrelevanter Elemente (2011) in der Mulde, Gesamtgehalte im Wasser, gerundet auf 2 signifikante Stellen, Angaben in µg/l
Mean concentrations of mining-borne, environmentally relevant elements (2011) in the Mulde river, total content in water, rounded to 2 significant decimal places, data in µg/l

	As	Cd	Cu	Ni	Pb	U	Zn
Freiburger Mulde							
Berthelsdorf	2,4	0,39	2,9	1,5	2,7	<0,4	23
Halsbrücke	8,0	6,9	13	4,7	15	<0,4	620
Faktor	3,3	18	4,5	3,1	5,5	–	27
ErlIn	9,0	0,71	4,7	2,7	4,0	0,53	61
Zwickauer Mulde							
Auerhammer	4,0	0,28	5,0	3,2	1,9	2,2	26
Niederschlema	13	0,46	8,7	13	2,5	7,0	47
Faktor	3,3	1,6	1,7	4,1	1,3	3,2	1,8
Sermuth	5,4	0,50	4,8	5,9	1,3	4,0	36
Vereinigte Mulde							
Bad Dübén	8,7	0,73	5,9	6,1	5,4	2,2	59

Tabelle 5

Mittlere Elementkonzentrationen bergbaubürtiger Elemente (2011) in der Mulde, Gehalte in schwebstoffbürtigen Sedimenten der Fraktion < 20 µm, gerundet auf 2 signifikante Stellen, Angaben in mg/kg
Mean concentrations of mining-borne environmentally relevant elements (2011) in the Mulde river, content in sediments (fraction < 20 µm), rounded to 2 significant decimal places, data in mg/kg

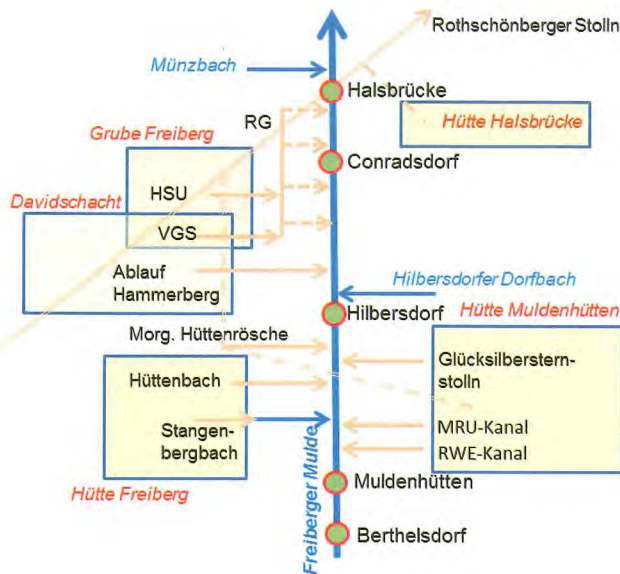
	As	Cd	Cu	Ni	Pb	U	Zn
Freiburger Mulde							
Berthelsdorf*	110	10	85	39	350	–	640
Halsbrücke	390	65	420	59	1.800	5,0	7.800
Faktor	3,5	6,5	4,9	1,5	5,1	–	12
ErlIn	130	26	110	53	410	4,6	2.100
Zwickauer Mulde							
Auerhammer**	94	9,0	140	67	100	52	810
Niederschlema***	160	7,8	190	220	120	62	850
Faktor	1,7	<1	1,4	3,3	1,2	1,2	1,0
Sermuth	52	11	97	90	97	19	1.200
Vereinigte Mulde							
Bad Dübén****	120	16	100	69	240	12	1.200

* Werte von 2003

**Werte von 2012 (Fraktion < 63 µm)

*** Werte von 2013 (Fraktion < 63 µm)

**** Schwebstoffe aus automatischer Messstation, Monatsmischproben

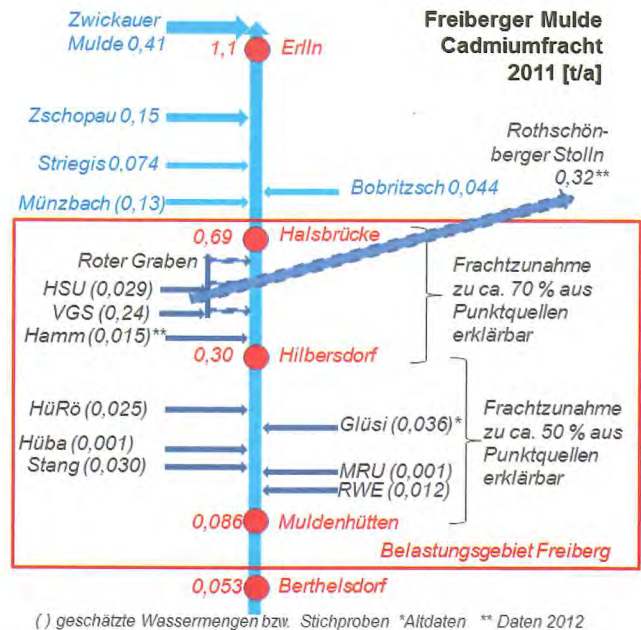
**Abbildung 8**

Schematische Darstellung der wesentlichen Wasserpfade im Belastungsgebiet Freiberg
Schematic figure of significant water paths in mainly polluted area Freiberg

de beitragen (Abb. 9). Der Stangenbergbach gilt weiterhin als bedeutende Cd-Quelle, nachdem er aus dem Bereich der Hütte Freiberg hochkontaminierte Sickerwässer (Cd im Mittel 5,8 mg/l, Daten: SAXONIA mbH) aufgenommen hat. Die Sanierung des Hüttenareals wurde 2009 mit umfangreichen Flächenversiegelungen durch den Bau großer Industriehallen abgeschlossen. Damit sollte sich der Sickerwasseranfall auf ein Minimum reduziert haben. Der Blick auf die zeitliche Entwicklung zeigt jedoch nach 2009 nur noch eine geringe Abnahme der Cd-Konzentrationen. Eine aktuelle Frachtermittlung steht noch aus.

Der Rote Graben (RG), der seinen Namen aufgrund der Färbung seiner eisenhydroxidreichen Schlämme führt, nimmt Grubenwässer (VGS, HSU) des Freiburger Reviers auf. Er wurde im 17. Jahrhundert als Kunstgraben angelegt. Entlang des heute ca. 3,6 km langen Fließweges werden die gesammelten Wässer über mehrere Abschlüsse in die Freiburger Mulde abgegeben. Die Grubenwässer beider Stollen sind stark mit Schwermetallen sowie Al und As angereichert. Die Elemente Cd, Cu und Zn liefern nahezu die Hälfte der Gesamtfracht der Mulde (bezogen auf den Abschnitt Hilbersdorf bis Halsbrücke), wobei der VGS ca. 90 % der Frachtanteile des Roten Grabens liefert und somit die Hauptschwermetallquelle für die Freiburger Mulde in diesem Abschnitt ist (JANNECK et al. 2008).

Bergbau, Aufbereitung und Verhüttung stehen hier in sehr engem Zusammenhang. Einige Elemente (Cd, Cu und Zn) stammen nicht nur aus dem untertägigen Abbau, sondern werden (bis zu 80–90 %) durch Sickerwasserzuflüsse im Bereich der Davidschacht-Halde in den VGS eingetragen (JANNECK et al. 2008). Hydraulisch wie stofflich problematisch ist die Verschlammung des Roten Grabens, hervorgerufen durch den permanenten Zustrom schwermetallhaltiger Wässer, der im Graben stattfindenden geochemischen Prozesse der Flockung und Sedimentation von Fe- und Al-Hydroxiden sowie einer fehlenden Unterhaltung über Jahrzehnte.



() geschätzte Wassermengen bzw. Stichproben *Altdaten ** Daten 2012

Abbildung 9

Bilanzierung der Cd-Frachten (2011) in der Freiburger Mulde (Daten: LfULG 2014)
Mass balance study of cadmium loads (2011) in the Freiburger Mulde (data: LfULG 2014)

Die bis zu 19 m mächtigen Haldenschüttungen im Mulde-Bogen bei Muldenhütten bilden eine große diffuse Quelle für ein breites Schadstoffspektrum. Beide Ufer der Freiburger Mulde bestehen in diesem Bereich aus den Abprodukten der Hüttenprozesse wie Hüttenschlacken, Abbrand, Schlackensand sowie Bauschutt und Ofenausbruch (MOLLÉE 2013).

Die vegetationsarmen Ablagerungen fallen steil zur Mulde ab. Der Böschungsfuß befindet sich im Hochwasserwechselbereich. Durch das Hochwasser 2002 wurden ca. 6.300 t Material aus Schlackenhalden und ca. 2.300 t aus dem Flussbett im Bereich Muldenhütten ausgetragen (RANK 2004). Es kam zum Anstieg der Gehalte vieler umweltrelevanter Elemente, insbesondere von Arsen und Blei in Wasser, Schwebstoff und Sediment, der bis in die Vereinigte Mulde nachweisbar war (KLEMM et al. 2004). Im Zuge der Sicherungsarbeiten wurde der Haldenfuß am rechten Ufer des Mulde-Bogens durch eine Zyklopenmauer, die Haldenböschung mit Böschungspflaster bis 0,5 m über HHW 2002 stabilisiert (SAXONIA 2012). Während der umfangreichen Baumaßnahmen kam es bis Ende 2004 zu weiteren Verfrachtungen von Schadstoffen, die in gehäuften Konzentrationsspitzen in der Wasserphase bis einschließlich 2005 zu beobachten waren (Abb. 10) und im Hochwasserfall wiederholt auftreten können. Die Arsengehalte in den schwebstoffbürtigen Sedimenten erreichten in Hilbersdorf bis zu 6.700 mg/kg und in Erlin immer noch 610 mg/kg (Abb. 10). Der Rückgang dieser Gehalte dauert bis heute an.

Die Schadstoffbilanz im System der Freiburger Mulde weist erwartungsgemäß ein Defizit auf, da einerseits von einem erheblichen Fehler hinsichtlich der geschätzten Wassermengen ausgegangen werden muss und andererseits insbesondere diffuse Quellen nicht erfasst wurden. Tabelle 6 verdeutlicht dennoch die Relevanz der betrachteten Punktquellen hinsichtlich der Elemente Cd und Zn für das Gesamtsystem.

Tabelle 6

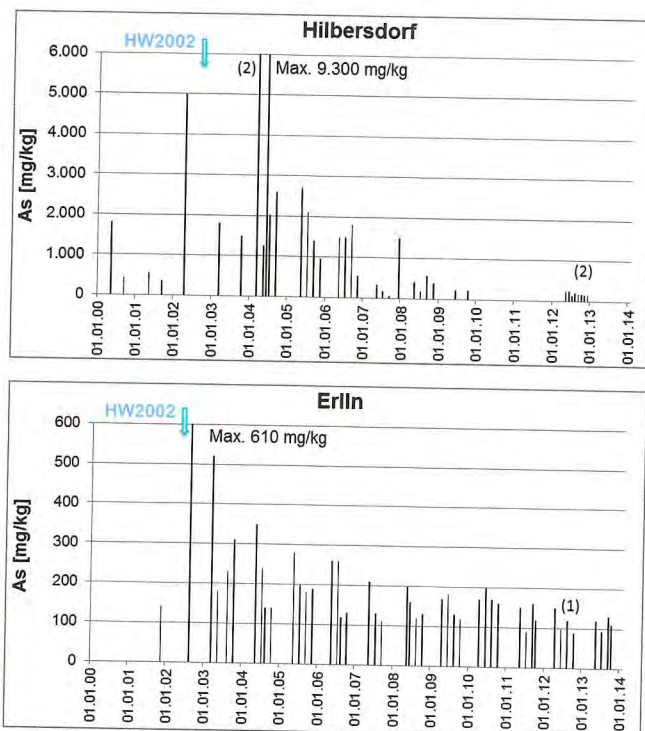
Frachtbilanz für die Freiburger Mulde (2011)

Balance of heavy metal and arsenic loads in the Freiburger Mulde (2011)

Freiburger Mulde (2011)	As		Cd		Cu		Ni		Pb		U		Zn	
	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]
Input Belastungsgebiet	0,23	2	0,053	5	0,33	4	0,16	4	0,29	3	0,020	4	2,9	3
Zunahme durch Punktquellen	0,15	1	0,39	35	0,73	9	0,16	4	0,27	3	0,004	1	34	34
Zunahme durch Zuflüsse	7,7	70	0,40	36	5,0	64	3,4	84	3,3	39	0,41	78	39	39
Mündung	11		1,1		7,8		4,1		8,3		0,52		100	
Bilanzdifferenz		27		24		23		9		54		17		25

7.2 Belastungsgebiete Schlema und Crossen

Das Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde ist ebenfalls durch einen jahrhundertelangen Bergbau geprägt. Als regionale Besonderheit ist die intensive Gewinnung und Verarbeitung von Uranerzen von 1946 bis 1990 hervorzuheben. Die Sanierung dieser Objekte wird seit 1991 von der Wismut GmbH durchgeführt. Die Flutung der Gruben, die im Freiburger Revier bereits seit mehr als 40 Jahren abgeschlossen ist, stellte hohe Anforderungen an die Sanierung, da das Flutungswasser aufgrund seiner immensen Schadstoffgehalte nicht direkt in die Vorflut abgegeben werden konnte. Es wurden Wasserbehandlungsanlagen errichtet, die neben Flutungswässern (Gruben Schlema und Pöhla) auch Frei-, Poren- und Sickerwässer von industriellen Absetzanlagen (IAA Helmsdorf) reinigen.


Abbildung 10

Zeitliche Entwicklung der Arsengehalte im Sediment (< 20 µm) der Freiburger Mulde unter besonderer Berücksichtigung des Hochwassers 2002, Daten: LfULG 2014 (1) ab 2012 Fraktion < 63 µm, (2) Schwebstoffsammler, eigene Untersuchungen 2004, 2012

Temporal development of arsenic contents in sediment (< 20 µm) in the Freiburger Mulde taking special account of floods in 2002 (data: LfULG 2014, (1) fraction < 63 µm since 2012, (2) sediment sampler, own investigations 2004, 2012

Seit 1998 arbeitet die Wasserbehandlungsanlage (WBA) Schlema-Alberoda mit einer Kapazität von maximal 1.150 m³/h zur Abtrennung der Schadstoffe U, Ra, As, Fe und Mn aus dem Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda. Im Jahr 2011 wurden ca. 6,5 Mio m³ gereinigt (WISMUT 2012).

An der Tagesoberfläche wurden am Standort Schlema-Alberoda 42 Halden (Aufstandsfläche ca. 311 ha, Volumen ca. 45 Mio m³) aufgeschüttet. Die größten Halden verbleiben an ihrem Standort und werden in-situ saniert (BWM 2011). Dabei wurden Sickerwasserströme gefasst und kontrolliert abgeleitet. Als Immissionsschwerpunkte für die Zwickauer Mulde gelten Sickerwässer von den Halden 371/I, 371/II, Borbachdamm, Halde 382West (KREYßIG et al. 2011, MEYER et al. 2012). Über diese Punktquellen wurden 2011 ca. 0,9 Mio. m³ unbehandeltes Sickerwasser in die Zwickauer Mulde abgeleitet (WISMUT 2012). Weitere Sickerwasserströme werden in das Grubengebäude verströmt und der WBA zugeführt.

Das Grubenrevier Schneeberg befindet sich nicht in der Zuständigkeit der Wismut GmbH, sondern ist ein Wismut-Altstandort (vor dem 31.12.1962 stillgelegt und per 30.6.1990 nicht mehr im Eigentum der SDAG Wismut), von denen es noch über 1.000 in Sachsen gibt. Ihre Sanierung erfolgt in Abhängigkeit ihres Gefährdungspotenzials schrittweise seit 2003. Wasserseitig bedeutsam ist der Markus-Semmler-Stolln, der seit Jahrhunderten zur Entwässerung der Schneeberg-Schlemaer Kupfer-, Silber- und Kobaltgruben diente. Er verbindet die Grubengebäude Schneeberg und Schlema-Alberoda und dient der Wasserableitung und Wetterführung (Radonminimierung) entlang des Schlematales (OBA 2005, WISMUT 2005). Im Jahr 2011 lag die abgeleitete Wassermenge bei ca. 5,5 Mio m³ (WISMUT 2012).

Am Standort Crossen wurden zwischen 1950 und 1989 ca. 77.000 t Uran aufbereitet. Rechts der Mulde befanden sich die Werksanlagen des Aufbereitungsbetriebes und die Bergehalde Crossen (22 ha, ca. 3,2 Mio. m³), links der Mulde die Erzladestelle, das Erzlager und die Absetzanlagen Helmsdorf (1958–1989), Dänkritz I und Dänkritz II (ca. 1950–1958) (insg. 227 ha), in die die Rückstände aus der nasschemischen Aufbereitung (insg. 57 Mio. m³) eingespült wurden (BWM 2001). Zur Sanierung der IAA Helmsdorf wurde die trockene in-situ-Verwahrung gewählt, verbunden mit der Umlagerung des Materials der Bergehalde Crossen zur Stabilisierung der eingelagerten Schlämme, Entwässerung, Abdeckung und Konturierung. Alle Werkstandorte an der Mulde wurden abgerissen. Die WBA Helmsdorf behandelt seit 1995 die anfallenden Frei-, Sicker- und Porenwässer der industriellen Absetzanlage mit einer Kapazität von max. 200 m³/h hinsichtlich der Elemente Uran, Arsen und Radium. Im Jahr 2011 betrug die gereinigte Wassermenge ca. 1,1 Mio m³ (WISMUT 2012).

Die Emissionen aus dem Belastungsgebiet Schlema sind hinsichtlich der Elemente Arsen und Uran für das System der Zwickauer Mulde bedeutsam (Tab. 7).

Den größten Anteil an den Arsenemissionen besitzen die abfließenden Grubenwässer, allen voran das Schneeberger Grubenrevier (Abb. 10, Abb. 11). Mit Bezug zur As-Fracht an der Mündung stammt ca. ¼ aus dieser Quelle. Das unbehandelte Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda wies im Jahr 2011 eine mittlere As-Konzentration von ca. 1 mg/l auf. Die Abreicherung während des Reinigungsprozesses beträgt ca. 90 %. Ohne diese WBA wäre die As-Fracht an der Mündung der Zwickauer Mulde (ohne Berücksichtigung von Prozessen auf dem Fließweg) mindestens doppelt so hoch wie aktuell.

Die Bilanzierung im Belastungsgebiet Schlema gelingt besser als im Freiburger Revier. Es können ca. 90 % der Arsenfracht Punktquellen oder Zuflüssen zugeordnet werden (Abb. 11). Während für Arsen der Schwerpunkt der Emissionen in der Grube Schneeberg liegt, stammen ca. 50 % der Uranfracht aus der WBA Schlema-Alberoda. Hinsichtlich des Urans erreicht die WBA Schlema einen Reinigungseffekt von ebenfalls ca. 90 % und vermindert damit die potenzielle U-Fracht der Zwickauer Mulde entscheidend. Weitere wichtige Quellen für Uran sind die bereits genannten Haldensickerwässer, vordergründig der Halde 371/I und des Borbachkomplexes (Abb. 12).

8 Ausblick

Mit der Einstellung der letzten Bergbauaktivitäten im Erzgebirge um 1990 begann die Phase der Sanierung der Grubengebäude, Halden, Absetzanlagen und Betriebsflächen des Bergbaus und der Hüttenindustrie, die bis heute fortgesetzt wird. In Summe der Maßnahmen konnte ein elementspezifischer Schadstoffrückgang festgestellt werden. In beiden betrachteten Flussabschnitten gelangen jedoch weiterhin bergbau- und bergbaufolgebedingte Schadstoffemissionen über lokalisierbare Punktquellen und diffuse Austritte in die Vorfluter. An einigen dieser identifizierten Schadstoffquellen und -senken besteht Potenzial zur weiteren Reduzierung dieser Emissionen.

Im Freiburger Belastungsgebiet gibt es bereits detaillierte Vorstellungen zur Beräumung des Roten Grabens als initiale Maßnahme (ROHDE 2013) im Rahmen der komplexen Sanierung Davidschacht/Hammerberg. Hier sind primär die hydraulischen Verhältnisse zu verbessern, die identifizierten (Schad-)Stoffströme zu entkoppeln und die Nachlieferung durch passive oder technische Maßnahmen zu minimieren. Unter Beachtung des Ursache-Wirkung-Prinzips muss ein gewonnener Sanierungserfolg erhalten bleiben, indem die Wiederverschlammung des

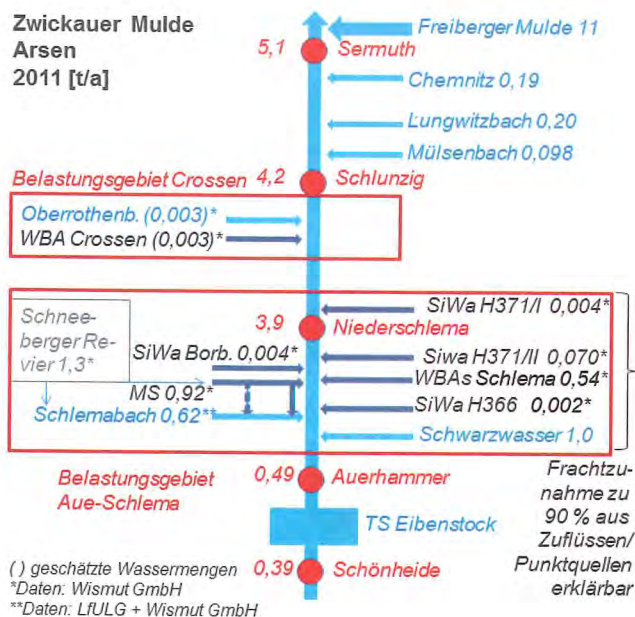


Abbildung 11

Bilanzierung der As-Frachten (2011) in der Zwickauer Mulde (Daten: LfULG 2014)

Mass balance study of arsenic loads (2011) in the Zwickauer Mulde (data: LfULG 2014)

Roten Grabens minimiert wird. Nicht zuletzt spielt auch der Verbleib der Grabensedimente eine Rolle, die aufgrund ihrer Konsistenz und hohen Schadstoffgehalte nicht primär einbau- oder deponierbar sind. Nach einer Schadstoffimmobilisierung und Stabilisierung wäre ein Einbau auf Flächen der SAXONIA mbH Freiberg während der noch durchzuführenden Sanierungsarbeiten denkbar (JANNECK et al. 2009). Auf dem Gelände Hammerberg ist eine Erdstoffmanagementfläche mit bis zu 400.000 m³ und einer Laufzeit bis 2022 geplant (FRITZ 2012).

Seitens der Wasserbehandlung zeigten Laborversuche mit hoch belasteten Sickerwässern aus dem VGS, dass mit pH-gesteuerten Fällungsverfahren selbst für die ungünstigen Fällungseigenschaften des Cadmiums eine weitgehende Schwermetallabtrennung erreichbar ist. Es wird empfohlen, sich auf die Wässer aus dem VGS zu konzentrieren, da hier mehr als 80 % der Cd- und Zn-Frachten des Roten Grabens erfasst werden können (JANNECK et al. 2008). Eine Ausschaltung aller bereits genannten Cd-Punktquellen zwischen Muldenhütten und Halsbrücke würde eine Reduzierung der Cd-Konzentration von ca. 5 auf 2,5 µg/l (Bezugsjahr 2008) in der Freiburger Mulde an der Messstelle Obergruna bewirken (MARTIN et al. 2010).

Tabelle 7

Frachtbilanz für die Zwickauer Mulde (2011)

Balance of heavy metal and arsenic loads in the Zwickauer Mulde (2011)

Freiburger Mulde (2011)	As		Cd		Cu		Ni		Pb		U		Zn	
	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]
Input Belastungsgebiet [t/a]	0,49	10	0,044	11	0,72	31	0,39	6	0,23	12	0,33	10	4,5	10
Zunahme durch Punktquellen	1,5	30	<0,01	<1	0,061	3	0,12	2	<0,03	<2	1,8	53	0,44	1
Zunahme durch Zuflüsse	2,1	41	0,18	43	1,3	58	5,6	87	0,26	13	0,71	21	27	60
Mündung [t/a]	5,1		0,41		2,3		6,5		2		3,4		45	
Bilanzdifferenz		19		46		8		5		76		17		29

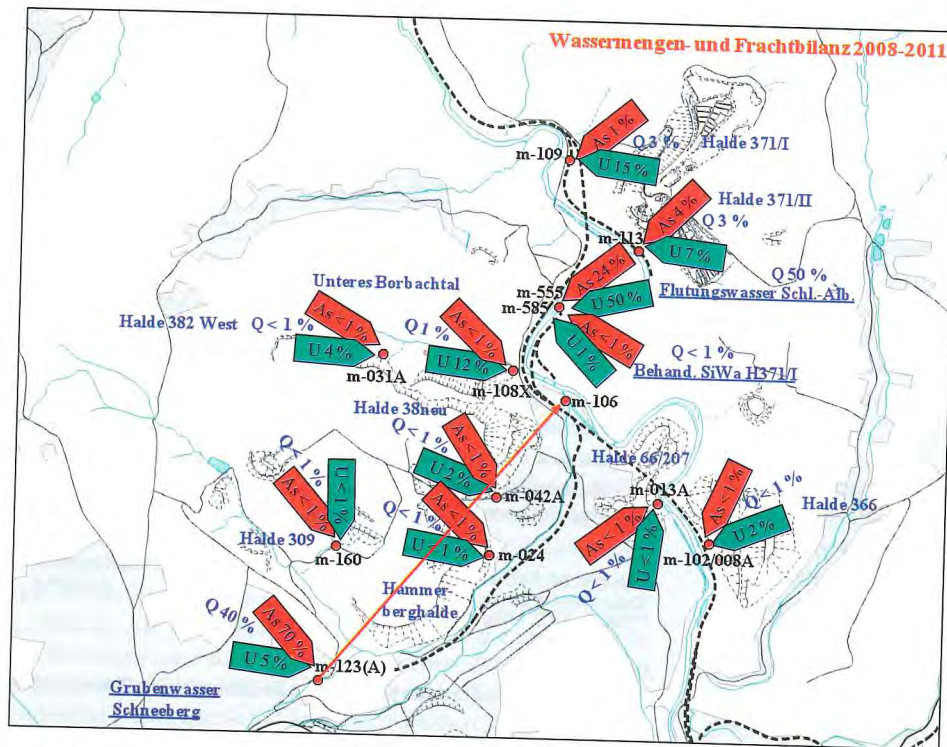


Abbildung 12

Bilanzierung der Wassermengen (Q) sowie der As- und U-Frachtanteile (2008–2011) am Standort Schlema (MEYER et al. 2012)

Balance of discharges (Q), relative arsenic and uranium loads (2008–2011) at site Schlema (MEYER et al. 2012)

Sowohl die Untersuchungen am Stangenbergbach als auch am Roten Graben zeigen die Bedeutung einer Gesamtschau möglicher Einzelmaßnahmen eines komplexen Systems Grube–Halde–Industriefläche in Raum und Zeit, da die Zusammenhänge zwischen den Einzelobjekten offensichtlich, jedoch (noch) nicht in jedem Fall belegbar sind. Da die Unterbrechung bzw. Reduzierung der Transportwege der wesentliche Part bei der Verminderung von diffusen (und punktuellen) Emissionen ist, ist die Identifizierung von Migrationspfaden, z.B. zwischen Muldenhütten und dem Rothschröner Stolln bzw. zwischen dem Revier Morgenstern und dem Verträgeichen Gesellschaft Stolln wichtig. Andererseits kann man die Verbindung von Transportwegen auch dafür nutzen, alle Schadstoffteilstrome an einen Punkt zu leiten und zentral zu reinigen. Der komplexeste Ansatz für eine Sanierung geht von einer untertägigen Bündelung der Quellen und einer zentralen Behandlung am Mundloch des Rothschröner Stollns aus. Sie würde einerseits eine nahezu vollständige Entfernung des Schadelements Cadmium aus den Punktquellen bringen, die zu behandelnde Wassermenge wäre mit ca. 2.200 m³/h im Mittel (MARTIN et al. 2010) jedoch ungefähr doppelt so groß wie die derzeitige Kapazität der WBA Schlema.

Bei den Sanierungstätigkeiten auf den Wismut-Liegenschaften sind die Arbeiten untertage am weitesten fortgeschritten. Aktuell werden noch Maßnahmen an Spülhalden und verbliebenen Berghalden durchgeführt. Die Wasserbehandlung wird die Sanierungsaufgabe mit der längsten Zeitdauer sein. Schwerpunkt der Belastung der Zwickauer Mulde bildet der Standort Schlema mit den Elementen Arsen und Uran. Arsen stammt überwiegend aus der Grube Schneeberg, hier wird weiterhin

mit Emissionen hinsichtlich Menge (ca. 5 Mio. m³/a) und Qualität auf derzeitigem Niveau gerechnet. Der Hauptbeitrag des Uran-Konzentrationsanstieges in der Zwickauer Mulde erfolgt durch die behandelten Wässer der Grube Schlema-Alberoda (ca. 7–8 Mio. m³/a). Die Stoffnachlieferung aus dem Grubenraum wird als rückläufig eingeschätzt, dennoch werden die Emissionen aus den Gruben mittelfristig gegenüber denen aus den Halden dominieren (MEYER et al. 2012).

Haldensickerwässer, die nach der Sanierung der Halden gefasst wurden, wurden bis 2005 generell direkt in die Zwickauer Mulde abgegeben. Sie besitzen im Vergleich zu den Grubenwässern geringe Mengen, aber vergleichbare oder höhere Konzentrationen. Aktuell werden Teile dieser Haldensickerwässer (Halden 371/I, 366, 66/207) in den Flutungsraum der Grube Schlema-Alberoda verströmt und (indirekt) in der WBA Schlema mitbehandelt. Eine Einbeziehung weiterer Sickerwässer (Halde 371/II bzw. Borbachtal) wird von deren zeitlicher Konzentrations- bzw. Frachtentwicklung, der Prognose der Reinigungskosten sowie der Gestaltung rechtlicher Regelungen abhängig sein (MEYER et al. 2012).

Für alle Maßnahmen wurde und wird immer die Frage nach der Wahrung der Verhältnismäßigkeit zwischen Umweltgefährdung und Bearbeitungsaufwand gestellt (werden). Es ist unstreitig, dass die von Grubengebäuden, Altablagerungen und sonstigen kontaminierten Flächen ausgehenden Umweltgefährdungen reduziert und minimiert werden müssen. Selbst mit großem Aufwand wird es jedoch nicht möglich sein, den vorbergbaulichen bzw. vorindustriellen Zustand wiederherzustellen, da die Dispersion der Elemente über die Jahrhunderte weit fortgeschritten ist. Die aktuellen Sanierungskonzeptionen zielen auf die Unterbrechung bzw. Reduzierung der Eintrags- und Transportpfade. Die verbleibende „duldbare“ Restkontamination ist fallspezifisch unter Beachtung der Exposition der Altlast und der bestehenden Belastung des Umfeldes zu definieren (MOLLÉE 2003).

9 Zusammenfassung

Die bergbaugeschafften Belastungen setzen bereits in den oberen Teileinzugsgebieten der Mulde ein und erreichen nach der Passage der zwei großen Bergbau- und Industriegebiete (Freiberg an der Freiburger Mulde, Schlema an der Zwickauer Mulde einschließlich des Aufbereitungsstandortes Crossen) ihr Maximum. Sowohl im Wasser als auch in den schwebstoffburtigen Sedimenten lässt sich die regionale Herkunft der einzelnen Elemente nachweisen. Die Elemente Zn, Cd und Pb haben ihren Belastungsschwerpunkt im

Einzugsgebiet der Freiburger Mulde, die Elemente U und Ni stammen überwiegend aus der Zwickauer Mulde. Die Elemente As und Cu sind beiden Flusssystemen zuzuordnen.

In zeitlicher Sicht ergeben sich sowohl langfristige, überregional sichtbare Trends in den Gesamtgehalten (z.B. die langsam absinkenden Cd-, Cu-, Ni-, Zn-Konzentrationen in beiden Teilsystemen), aber auch lokale Unterbrechungen von Trends durch besondere Ereignisse wie dem Extremhochwasser 2002 (z.B. Anstieg der As-Gesamtgehalte in der Wasserphase in der Freiburger Mulde ab Hilbersdorf).

In den Belastungsgebieten an der Freiburger und Zwickauer Mulde wurden die maßgeblichen Punktquellen ermittelt und quantifiziert. Dazu gehören Fließgewässerabschnitte mit erheblichen Sickerwasserzuflüssen aus Halden und Industrieflächen sowie der Einleitung behandelter und unbehandelter Grubenwässer.

Im Freiburger Gebiet liegt die Mehrzahl der Objekte im Sanierungsbereich des SAXONIA-Altlastenprojektes, im Gebiet Schlema-Crossen im Sanierungsbereich der Wismut GmbH. Die Sanierungstätigkeiten sind an beiden Standorten weit vorangeschritten. Entscheidende Unterschiede zwischen den beiden Sanierungsstandorten ergeben sich aus dem Zeitpunkt der Grubenschließung und dem Umgang mit dem Flutungs- und Sickerwasser (Nichtbehandlung versus Behandlung). Die Sanierungsansätze der Haldenverwahrung und der Verwahrung industrieller Absetzbecken mit dem bevorzugten In-situ-Konzept sind an beiden Standorten ähnlich.

Im Belastungsgebiet Freiberg tritt ein bedeutender Frachtanteil der Elemente Cd (35 %) und Zn (34 %) der Freiburger Mulde aus bilanzierbaren Punktquellen zu. Für die Frachtbilanz der Zwickauer Mulde sind die Frachtanteile der Elemente As (30 %) und U (53 %) aus Punktquellen des Belastungsgebietes Schlema bedeutsam (bezogen auf 2011). Nicht alle Einträge in die Fließgewässer können durch Punktquellen bzw. Nebenflüsse erklärt werden. Die Ursachen liegen einerseits in der ungenügenden Kenntnis zu den Wassermengen, andererseits am nicht erfassbaren diffusen Anteil der Belastung. Unbehandelte Grubenwässer, wie aus den Gruben Freiberg (VGS, HSU) und Schneeberg (MS) sowie der hier nicht besprochenen Grube Ehrenfriedersdorf, sind Schadstoffquellen mit hohem Emissionspotenzial, deren Sanierung (Reinigung) durch geeignete Maßnahmen eine Verbesserung im Schadstoffhaushalt des Flusssystems bewirken könnte.

Summary

Mining-induced pollutions already occur at the upper sub-basins of the river Mulde and reach their maximum after the passage of two large mining and industrial areas (Freiberg on the Freiburger Mulde, Schlema on the Zwickauer Mulde including the Crossen processing site). The regional origin of the individual elements can be verified both in the water and in the sediments. The main pollution load of the elements Zn, Cd and Pb can be found in the catchment of the Freiburger Mulde, while the elements U and Ni mostly originate in the Zwickauer Mulde. The elements As and Cu are to be assigned to both river systems.

From a temporal perspective, long-term, transregional trends are not only visible in the total contents (e.g. slowly decreasing Cd, Cu, Ni and Zn concentrations in both subsystems), but there are also local interruptions of trends due to special events such as the extreme floods in 2002 (e.g. increase of arsenic contents in the water phase of the Freiburger Mulde downstream of Hilbersdorf).

In the mainly polluted areas on the Freiburger and Zwickauer Mulde, the relevant point sources were identified and quantified. These include river sections with influxes of seepage water from dumps and industrial areas as well as the discharges of treated and untreated mine water.

In the Freiberg area, most of the objects are located in the rehabilitation field of the SAXONIA legacy project, in the area Schlema-Crossen in the rehabilitation field of Wismut GmbH. The rehabilitation activities are far advanced at both sites. Significant differences between the two remediation sites result from the time of the mine closure and the handling of the flooding and seepage water (non-treatment versus treatment). The rehabilitation approaches of dumps and tailings with the preferred in-situ concept are similar at both locations.

In the mainly polluted area Freiberg, significant loads of cadmium (35 %) and zinc (34 %) are added from point sources to the Freiburger Mulde. The proportions of arsenic (30 %) and uranium (53 %) from point sources of the mainly polluted area Schlema (related to 2011) are significant for the load balance of the Zwickauer Mulde. Not all inputs in the river can be explained by point sources and tributaries. This is due to insufficient knowledge of water quantities on the one hand, and the non-detectable diffuse pollution component on the other hand. Untreated mine waters, such as from the mines of Freiberg (VGS, HSU) and Schneeberg (MS) and the mine of Ehrenfriedersdorf (not discussed here), are sources of pollutants with high emission potential. Their remediation (purification) by suitable measures could lead to an improvement in the pollution balance of the river system.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich für die Unterstützung bedanken, die mir die Bearbeitung der ELSA-Studie ermöglichte, insbesondere bei Frau Sylvia Rohde (LfULG Sachsen) für die langjährige Zusammenarbeit und die Initiierung des Themas; Herrn Dr. René Schwarz und Frau Ilka Keller (ELSA-Projektgruppe) für die Bewilligung und Finanzierung der Studie; Herrn Prof. Werner Klemm und Herrn Prof. Gerhard Heide (TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie) für die wissenschaftliche Begleitung sowie allen Beteiligten der ELSA-Arbeitsgruppe und des Arbeitskreises „Kohäsive Sedimente“ für ihre Beiträge und ihr Interesse am Bergbau, denn „Bergbau ist nicht alles, aber alles ist nichts ohne Bergbau“ (GERHARDT 2000).

Anschrift der Verfasserin:

A. Greif
Wismut GmbH
Jagdschänkenstr. 29, 09117 Chemnitz
a.greif@wismut.de

Literaturverzeichnis

- BEUGE, P., A. GREIF, T. HOPPE, W. KLEMM, R. KLEEBERG, A. KLUGE, U. MOSLER, R. STARKE, J. ALFARO, M. HAURAND, A. KNÖCHEL & A. MEYER (1994): Erfassung und Beurteilung der Schadstoffbelastung des Muldesystems. – In: Furrer, R. (Hrsg.): Die Belastung der Elbe. Teil 1: Elbenebenflüsse. – Forschungszentrum Karlsruhe, 27–36
- BEUGE, P., A. GREIF, T. HOPPE, W. KLEMM, A. KLUGE, U. MOSLER, R. STARKE, J. ALFARO, M. HAURAND, A. KNÖCHEL & A. MEYER (1999): Die Schwermetallsituation im Muldesystem. – Schlussbericht zu den BMBF-Fördervorhaben 02 WT 9113, 02 WT 9114, TIB Hannover
- BMW (2011): 20 Jahre Wismut GmbH – Sanieren für die Zukunft. – Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin; 62 S.
- EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie)
- ELSA (2011): Schadstoff-Sanierung Elbesedimente; <http://elsa-elbe.de/>
- FRITZ, E. (2012): Revitalisierung von Altstandorten/ Flächenrecycling. – Vortrag, 18.1.2012, Freiberg
- GERHARDT, H. (2000): Bergbau ist nicht alles, aber alles ist nichts ohne Bergbau. – Bergbau 7, 308–317
- GREIF, A. (2013): Studie zur Charakterisierung der Schadstoffeinträge aus den Erzbergbaurevieren der Mulde in die Elbe. – Abschlussbericht im Auftrag der BSU Hamburg, TU Bergakademie Freiberg
- GREIF, A. & W. KLEMM (2007): Das Einzugsgebiet der Mulde/ Deutschland im Spiegel der EU-Wasserrahmenrichtlinie – Ableitung geogener Hintergrundwerte für Schwermetalle und Arsen. – Zeitschrift für geologische Wissenschaften 35 (6) 349–359
- GREIF, A., W. PÄLCHEN, G. RANK & H. WEIDENDSÖRFER (2004): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen, Teil 2: Spurenelementgehalte in Bachsedimenten. – Materialien zum Bodenschutz, Dresden; 65 S.
- HOPPE, T. (1995): Geochemische Untersuchungen an Gewässern und ihren Sedimenten im Einzugsgebiet der Mulde. – Dissertation, TU Bergakademie Freiberg
- HÖSEL, G., G. TISCHENDORF & J. WASTERNAK (1997): Erläuterungen zur Karte „Mineralische Rohstoffe Erzgebirge – Vogtland/Krušné hory“. Karte 2: Metalle, Fluorit/Baryt – Verbreitung und Auswirkungen auf die Umwelt 1: 00.000. – Bergbaumonographie, Freiberg
- IKSE (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet – ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. – Internationale Kommission zum Schutz der Elbe; www.ikse-mkol.org/
- IKSE-SM (2012): Methodik der Berechnung von Schadstoff-Jahresfrachten an den Bezugsmessstellen im Rahmen des IKSE-Sedimentmanagements. – Bearbeitungsstand: 19.7.2012, Programmversion 14
- JANNECK, E., M. MARTIN & M. ZIMMERMANN (2008): Erarbeitung einer Vorplanung mit Kostenabschätzung zur Sanierung und Unterhaltung des künstlichen Gewässers Roter Graben – Bericht G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke im Auftrag der Landesdirektion Chemnitz
- JANNECK, E., J. PINKA & M. MARTIN (2009): Gefährdungsabschätzung „Roter Graben“. – Bericht G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke im Auftrag der Landesdirektion Chemnitz
- KARDEL, K., G. RANK & W. PÄLCHEN (1996): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen, Teil 1: Spurenelementgehalte in Gesteinen. – Radebeul, 37 S.
- KLEMM, W., A. GREIF & U. KNITTEL (2004): Schwermetall- und Arsenverlagerungen in der Freiburger und Zwickauer Mulde. – In: Geller, W. (Hrsg.): Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002. Endbericht des Ad-hoc-Projekts Schadstoffuntersuchungen nach dem Hochwasser vom August 2002. Ermittlung der Gefährdungspotentiale an Elbe und Mulde. – Hrsg. UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, 159–172
- KLEMM, W., A. GREIF, J.A.C. BROEKAERT, V. SIEMENS, F. JUNGE, A. van der VEEN, M. SCHULTZE & A. DUFFEK (2005): A Study on Arsenic and the Heavy Metals in the Mulde River System. – Acta Hydrochimica et Hydrobiologica 33 (5), 475–491; DOI: 10.1002/aheh.200400592
- KNITTEL, U., W. KLEMM & A. GREIF (2005): Heavy Metal Pollution Downstream of Old Mining Camps as a Result of Flood Events: an Example from the Mulde River System. – Eastern Part of Germany. – Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences 16 (4), 919–931
- KOLITSCH, S., M. JUNGHANS & W. KLEMM (2003): Die Auswirkungen des Flutereignisses 2002 auf die Grubenwässer der Erzlagerstätte Freiberg. – Wasser & Boden 55 (7/8), 7–14
- KREYBIG, E., J. MEYER & A. SCHRAMM (2011): Stoffliche Einträge in die Zwickauer Mulde im Prozess der Uranbergbausanierung durch die Wismut GmbH. – Vortrag am 11.10.2011, Lichtenstein
- LfULG (2012): Hydrologisches Handbuch. Gewässerkundliche Hauptwerte. – Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
- LfULG (2014): Gewässergütedaten 1996–2013. – www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/7112.htm
- MARTIN, M., P. BEUGE, A. KLUGE & T. HOPPE (1994): Grubenwässer des Erzgebirges – Quellen von Schwermetallen in der Elbe. – Spektrum der Wissenschaft, 102–107
- MARTIN, M. & E. JANNECK (2010): Fortschreibung von Grundlagendaten und Untersuchung ausgewählter Sachverhalte der Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplanung zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen, Teil: Vorstudie – selektiver Rückhalt von Cadmium. – Abschlussbericht G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH Halsbrücke im Auftrag des LfULG, Dresden

- MEYER, J., A. SCHRAMM & E. KREYßIG (2012): Konzept Wassermanagement am Sanierungsstandort Aue (Datenstand 2011). – Wismut GmbH, Chemnitz
- MOLLÉE, R. (2003): Altlasten und Bodenmanagement unter Berücksichtigung der Bedingungen des Standortes Freiberg. – In: SAXONIA (Hrsg.): 10 Jahre Altlastenprojekt SAXONIA. – Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg, 73–94
- MOLLÉE, R. (2013): Altlastenprojekt SAXONIA 1993–2013 – eine Retrospektive. – SAXONIA Standort- und Entwicklungsgesellschaft, Freiberg, 404 S.
- OBA (2005): Der Bergbau in Sachsen; www.smwa.sachsen.de/set/431/jahresbericht_2004.pdf
- OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20.07.2011. – BGBl. I, S. 1429
- PÄLCHEN, W., G. RANK, P. LANGE & G. TISCHENDORF (1987): Regionale Clarks – Möglichkeiten und Grenzen ihrer Anwendung am Beispiel des Erzgebirges. – Chemie der Erde 47, 1–17
- RANK, G. (2004): Arsen- und Schwermetallbelastung im Mulde- und Elbe-Einzugsgebiet nach dem Augusthochwasser 2002 in Sachsen. – Wasser und Abfall 3, 34–40
- RANK, G., K. KARDEL, W. PÄLCHEN & H. WEIDENSDÖRFER (1999): Bodenatlas des Freistaates Sachsen. Teil 3: Bodenmessprogramm. Bodenmessnetz Raster 4x4 km. – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden
- ROHDE, S. (2013): Sedimentmanagement in der FGG Elbe. Projekte „Schadstoffsanierung Elbsedimente“ (ELSA). – www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/10_Forum_Mulden_TOP5_ROHDE.pdf, Stand: 27.2.2015
- SAXONIA (2012): Altlastenprojekt Saxonia. – www.saxonia-freiberg.de/cgi-bin/click.system?navid=Altlastenprojekt-SAXONIA_1301&sid=c, Stand: 27.2.2015
- WASTERACK, J., G. TISCHENDORF, G. HÖSEL, E. KUSCHKA, K. BREITER, J. CHRT, J. KOMINEK & M. ŠTEMPROK (1995): Mineralische Rohstoffe Erzgebirge-Vogtland/Krušné hory. – Karte 2: Metalle, Fluorit/Baryt – Verbreitung und Auswirkungen auf die Umwelt 1:100.000
- WISMUT (2005): Umweltbericht 2004. – Wismut GmbH, Chemnitz; www.wismut.de
- WISMUT (2012). Umweltbericht 2011. – Wismut GmbH, Chemnitz; www.wismut.de