„Studie zur Charakterisierung der Schadstoffeinträge aus den Erzbergbaurevieren der Mulde in die Elbe“

Annia Greif, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie

Auftraggeber:	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU), Amt für Umweltschutz Hamburg, Abteilung Wasserwirtschaft, Projekt ELSA der Freien und Hansestadt Hamburg, Projektleiter: Herr Dr. R. Schwartz Projektbearbeiterin: Frau I. Keller
Auftragnehmer:	TU Bergakademie Freiberg (TU BAF), Institut für Mineralogie, Brennhausgasse 14, 09599 Freiberg Projektleiter: Herr Prof. Dr. G. Heide, Projektbearbeiterin: Frau Dipl.-Min. A. Greif
Projektbegleitung:	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Ansprechpartnerin: Frau S. Rohde
Bearbeitungszeitraum:	01.07.2012 bis 31.07.2013
Abschlussbericht:	Stand zum 04.07.2013

Relevanz der Studie

Trotz der Verbesserung der Belastungssituation der Elbe mit anorganischen und organischen Schadstoffen nach 1990 stellt die verbliebene Schadstoffbelastung der Elbesedimente immer noch eine Belastung von Biota, Auenböden und der Nordsee dar. Maßnahmen zur Beräumung von schadstoffbelasteten Sedimenten haben für den Hamburger Hafen ökologische und finanzielle Konsequenzen.

Die Mulde wurde bereits Anfang der 1990er Jahre als belastungsrelevanter Zufluss der Elbe erkannt und stellt auch heute noch eine wesentliche überregionale Quelle für Schwermetalle und Arsen in der Elbe dar. Ursächlich für die Belastungen sind die geogenen Besonderheiten im Einzugsgebiet. Insbesondere die Emissionen aus dem erzgebirgischen Erzbergbau gelangen sowohl über die beiden Nebenflüsse Freiberger und Zwickauer Mulde in die Vereinigte Mulde als auch über den Rothschönberger Stolln in die Triebisch und somit direkt in die Elbe. Als Hauptproblemelemente gelten der prioritär gefährliche Stoff Cadmium, weiterhin Arsen und Schwermetalle wie Blei, Kupfer, Nickel, Uran und Zink.

Zur Klärung dieses bergbaugeprägten Einflusses der Mulde auf die Elbe wurde die TU Bergakademie Freiberg durch die BSU Hamburg mit einer „Studie zur Charakterisierung der Schadstoffeinträge aus den Erzbergbaurevieren der Mulde in die Elbe“ beauftragt, die die Mulde bis zum Muldestausee untersucht.

Fragen der Studie

(1) Wie entwickeln sich die Konzentrationen der o.g. Elemente in der Freiberger und Zwickauer Mulde in zeitlicher und räumlicher Sicht?

(2) Welche Frachtanteile gelangen aus den jeweiligen Einzugsgebieten in die Vereinigte Mulde?

(3) Welche Quellen können in den Hauptbelastungsgebieten identifiziert werden? Welche Maßnahmen wurden in den Hauptbelastungsgebieten bisher gegen den Schadstoffaustrag getätigt? Können Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Einzelquellen getroffen werden?

(4) Welchen Anteil haben die identifizierten Quellen an der Belastungssituation?

(5) Welche weiteren Möglichkeiten zur Schadstoffreduzierung in den Belastungsgebieten gibt es?

(6) Gibt es weitere Möglichkeiten des Schadstoffrückhalts im Einzugsgebiet?

(7) Wie hoch ist das Nachlieferungspotential an Schwermetallen und Arsen im Belastungsabschnitt Freiberg?

(8) Welche Auswirkungen haben Hochwasserwellen auf den Schadstoffaustrag aus dem Belastungsgebiet Freiberg?

(9) Wie groß ist die Anreicherung organischer Schadstoffe in den Sedimenten?

(10) Welche Defizite ergeben sich aus der Bearbeitung der Studie?

Ergebnisse der Studie

(1) Wie entwickeln sich die Konzentrationen der o.g. Elemente in der Freiberger und Zwickauer Mulde in zeitlicher und räumlicher Sicht?

Das Gebiet der Mulde wurde bereits im Rahmen des Muldeprojekts ausführlich charakterisiert (Hoppe 1995, Beuge et al. 1999). Ihr Einzugsgebiet breitet sich über ca. 7.400 km^2 von der Tschechischen Republik über Sachsen bis Sachsen-Anhalt aus, bevor die Mulde bei Dessau in die Elbe mündet. Damit hat sie einen Anteil von 5 % am Elbeeinzugsgebiet (Anlage 1). Im Mulde-Einzugsgebiet sind geologische Formationen vom Präkambrium bis zum Quartär verbreitet (Kardel et al. 1996), wobei sich die Teileinzugsgebiete Freiberger und Zwickauer von dem der Vereinigten Mulde sowohl in ihrem Gesteinsbestand (Anlage 2) als auch hinsichtlich der auftretenden Mineralisationen und Erzlagerstätten (Anlage 3) (Wasternack et al. 1995, Hösel et al. 1997) unterscheiden. Besondere umweltgeochemische Bedeutung erlangen die 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.

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Konzentrationen der bergbaubürtigen umweltrelevanten Schadstoffe im Wasser (Gesamtgehalte) und im Sediment (Fraktion <20 µm) wurde für die Freiberger und Zwickauer Mulde unter dem Blickpunkt der Hauptbelastungsgebiete (Anlage 4) für den Zeitraum 1996 bis 2011 aus den Daten des sächsischen Oberflächenwassermessnetzes zusammengestellt (LfULG 2012a, 2012c). Für die Darstellung der einzelnen Elemente wurde für alle Diagramme die gleiche Einteilung gewählt (Anlage 5 bis Anlage 18). Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) gingen mit der Hälfte der BG in die Diagrammdarstellungen ein.

Aus dem regionalen Vergleich der Konzentrationsentwicklungen lassen sich Aussagen zur regionalen Herkunft der einzelnen Elemente treffen. Für die Gesamtaussage ist der Vergleich der Punkte Berthelsdorf – Halsbrücke für die Freiberger Mulde und Auerhammer – Schlunzig für die Zwickauer Mulde heranzuziehen (Anlage 5 bis Anlage 11). In diesen Hauptbelastungsabschnitten kommt es zu einer signifikanten Zunahme der Elementkonzentrationen von Zn (44fach), Cd (29fach), Pb (20fach), As (7,9fach), Cu (6,6fach) in der Freiberger Mulde und U (5,8fach), As (3,5fach), Ni (1,8fach) in der Zwickauer Mulde bezogen auf den Zeitraum 2003 bis 2008 (Tab. 1).

Tab. 1: Mittlere Elementkonzentrationen bergbaubürtiger Elemente (Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008) in der Mulde, Gesamtgehalte im Wasser, gerundet auf 2 signifikante Stellen, Angaben in µg/l

	As	**Cd**	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**U**	**Zn**
Freiberger Mulde							
Berthelsdorf	2,4	0,34	3,0	5,6	2,1	0,29	20
Halsbrücke	19	10	20	8,4	43	0,20	890
Faktor	*7,9*	*29*	*6,6*	*1,5*	*20*	*<1*	*44*
Erlln	14	1,0	7,9	4,3	12	0,69	82
Zwickauer Mulde							
Auerhammer	3,1	0,29	5,4	6,5	1,3	1,7	28
Schlunzig	11	0,49	7,4	12	2,8	9,9	75
Faktor	*3,5*	*1,7*	*1,4*	*1,8*	*2,2*	*5,8*	*2,7*
Sermuth	7,4	0,44	8,1	8,3	3,2	6,3	49
Vereinigte Mulde							
Bad Düben	11	0,85	7,5	6,7	8,6	3,3	69

In zeitlicher Sicht ergeben sich sowohl langfristige über die Jahre ermittelbare Trends in den Gesamtgehalten (z.B. die langsam absinkenden Cadmiumgehalte in beiden Teilsystemen), aber auch lokale Unterbrechungen von Trends durch besondere Ereignisse wie dem Extremhochwasser 2002. Durch das Hochwasser wurden ca. 6.300 t Material aus Schlackenhalden und ca. 2.300 t aus dem Flussbett des Bereiches Muldenhütten bis Hilbersdorf ausgetragen (Rank 2004). Die impulsive und nachfolgend vermutlich schubweise Verlagerung dieser hochkontaminierten Massen führte zum Anstieg der Gesamtgehalte in der Wasserphase, die bis 2005 in den Gesamtgehalten in und unterhalb von Hilbersdorf sichtbar war (Anlage 5). Ebenso schnellten 2002 die Arsengehalte in den schwebstoffbürtigen Sedimenten nach oben und erreichten in Hilbersdorf bis zu 6.700 mg/kg und in Erlln immer noch 610 mg/kg (Anlage 12). Untersuchungen frischer Hochflutsedimente im September 2002 zeigten Maximalgehalte bis zu 8.360 mg/kg As und 14.400 mg/kg Pb (Klemm et al. 2004b). Der Rückgang dieser Gehalte dauert bis heute an, wobei „Ausreißer" weiterhin für das Vorkommen und die Verlagerung schlackenreicher Sedimente im Fließgewässerbett sprechen. Offenbar ist noch nicht alles abgetragene hochkontaminierte Material aus dem System der Freiberger Mulde ausgespült worden.

Die Anreicherung der spezifischen Elemente spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Sedimente wider (Tab. 2). Besonders hoch sind die Anreicherungsfaktoren im Belastungsgebiet Freiberg einzuschätzen: As (12fach), Cd (12fach), Pb (11fach), Zn (10fach) und Cu (7fach).

Tab. 2: Mittlere Elementkonzentrationen bergbaubürtiger Elemente (2003 bis 2008, so vorhanden) in der Mulde, Gehalte in schwebstoffbürtigen Sedimenten der Fraktion <20 µm, gerundet auf 2 signifikante Stellen, Angaben in mg/kg

	As	**Cd**	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**U**	**Zn**
Freiberger Mulde							
Berthelsdorf	110	10	84	38	350	-	640
Halsbrücke	1.300	124	590	58	3.900	6,8	6.700
Faktor	12	12	7,0	1,5	11	-	10
Erlln	210	24	130	58	560	5,6	1.500
Zwickauer Mulde							
Auerhammer	146	12	220	73	160	-	950
Schlunzig	190	14	200	150	190	-	1.400
Faktor	1,3	1,2	1,1	2,1	1,2	-	1,5
Sermuth	80	12	140	100	130	26	1.100
Vereinigte Mulde							
Bad Düben	170	23	140	90	380	-	1.600

Trendaussagen (aus Trendlinien) können lediglich für Messstellen getroffen werden, die regelmäßig und häufig beprobt wurden und somit keine wesentlichen Lücken in den Zeitreihen aufweisen. Das ist nur für die Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie die Vereinigte Mulde in Bad Düben der Fall (Anlage 19 bis Anlage 25). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für den Zeitraum 1994 bis 2011 die Konzentrationen der Elemente Cd, Cu, Ni, Pb und Zn generell rückläufig sind (Tab. 3). Die U-Gehalte in der Freiberger 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 As ist in der Zwickauer und Vereinigten Mulde ebenfalls nur ein sehr geringer rückläufiger Trend zu beobachten. In der Freiberger Mulde hebt sich dieser Trend durch die oben beschriebenen Prozesse durch das Hochwasser 2002 wieder auf.

Für die schwebstoffbürtigen Sedimente können nur Trendaussagen für den Zeitraum 2001 bis 2011 getroffen werden, da keine längeren Datenreihen vorliegen (Tab. 4). In der Freiber-

ger Mulde klingen die nach dem Hochwasser 2002 vorgefundenen As-, Pb- Gehalte langsam ab. Die Beeinflussung der Sedimente der Zwickauer Mulde durch das Hochwasserwasser 2002 fiel deutlich geringer aus. Hier ist auch generell die Schwankungsbreite der Sedimente als weniger hoch einzuschätzen, was für eine gleichmäßige Nachlieferung aus den verschiedenen Quellen spricht.

Tab. 3: Trendaussagen für die Elemente As, Cd, Cu, Ni, Pb, U und Zn an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde bzw. an der Vereinigten Mulde in Bad Düben, Zeitraum 1994-2011, Gesamtgehalte im Wasser

Trend	**As**	**Cd**	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**U**	**Zn**
FM-Erlln	→	↓	↓	↓	↓	→	↓
ZM-Sermuth	(↓)	↓	↓	↓	(↓)	↓	↓
VM-Düben	(↓)	↓	↓	↓	↓	↓	↓

↓ sinkend, (↓) geringfügig sinkend, → etwa gleichbleibend

Tab. 4: Trendaussagen für die Elemente As, Cd, Cu, Ni, Pb, U und Zn an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde bzw. an der Vereinigten Mulde in Bad Düben, Zeitraum 2001-2011, Gehalte im Sediment (Fraktion <20 µm)

Trend	**As**	**Cd**	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**U**	**Zn**
FM-Erlln	↓	→	↓	→	↓	-	(↑)
ZM-Sermuth	↓	↓	↓	→	↓	-	(↑)
VM-Düben	-	-	-	-	-	-	-

↓ sinkend, (↓) geringfügig sinkend, → etwa gleichbleibend, (↑) geringfügig steigend

(2) Welche Frachtanteile gelangen aus den jeweiligen Einzugsgebieten in die Vereinigte Mulde?

Um eine Bilanzierung der Einträge im Flussabschnitt vornehmen zu können und um die Quellen aber auch den Verbleib der bekanntermaßen eingetragenen Elemente abzuschätzen, ist für die Messstellen in der Mulde und der wichtigsten Nebenflüsse eine Verknüpfung der Konzentrationen mit der Wassermenge herzustellen. Die Durchflussmengen von Messstellen abseits der Pegel werden über Faktoren ermittelt. Die Berechnung erfolgt nach Formel 1.1a (IKSE-SM 2012).

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

Für die meisten Punktquellen im Bereich des Freiberger Gebietes liegen nur Stichproben oder Schätzungen der Durchflussmengen vor, für die Konzentrationen Mittel- oder Einzelwerte. Für die Punktquellen aus dem Sanierungsbereich der Wismut GmbH an der Zwickauer Mulde wurde zur Berechnung der Frachten i.d.R. auf Jahresmengen und mittlere Konzentrationen zurückgegriffen.

$F = Q_{Stichprobe} * C_{Einzelwert}$ bzw. $F = Q_{Stichprobe} * C_{Mittelwert}$ bzw. $F = Q_{Mittelwert} * C_{Mittelwert}$

Für den Bezugszeitraum 2003 bis 2008 bestätigt sich das durch die Konzentrationen vorgezeichnete Bild. Mengenmäßig stammen die Elemente As, Cd, Pb und Zn bevorzugt aus dem Einzugsgebiet der Freiberger Mulde, Ni und U aus dem der Zwickauer Mulde. Das Element Cu ist etwa gleich verteilt (Tab. 5).

Tab. 5: Mittlere Jahresfrachten an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer sowie in der Vereinigten Mulde für den Bezugszeitraum 2003-2008, berechnet aus den Gesamtgehalten im Wasser, Angaben in t/a

	Erlln Freiberger Mulde	Sermuth Zwickauer Mulde	Bad Düben Vereinigte Mulde
MQ [m³/s]	*35,0*	*29,5*	*64,1*
As	**19,1**	7,53	29,5
Cd	**1,86**	0,586	2,56
Cu	11,8	10,2	22,2
Ni	6,32	**9,56**	17,5
Pb	**31,5**	6,38	41,9
U	0,737	**4,93**	5,60
Zn	**142**	66,4	209

Es ist demnach im Folgenden der Herkunft der identifizierten Elemente innerhalb der Freiberger und der Zwickauer Mulde nachzugehen. In den Anlagen 26 bis 32 ist die regionale Herkunft der Jahresfrachten anhand der Gesamtfrachten in den Zeitschnitten 1996-2001, 2002 und 2003-2001 dargestellt, ergänzt durch den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen im Jahr 2011. Aus den zeitlichen Verläufen ist insbesondere bei den jeweils relevanten Elementen eine enorme Schwankungsbreite der Konzentrationen ersichtlich. In der Freiberger Mulde zieht sich der Anstieg der Gehalte bei einigen Elementen teilweise bis Obergruna hin.

Aus den Frachtverläufen ist abzulesen, dass in der Zwickauer Mulde der bedeutendste Frachtanstieg bei Arsen, Nickel und Uran zwischen Auerhammer und Niederschlema erfolgt. In der Freiberger Mulde ist der größte Frachtzuwachs beim Element Blei im Abschnitt Muldenhütten bis Hilbersdorf und bei den Elementen Cadmium und Zink zwischen Hilbersdorf und Halsbrücke zu beobachten.

Aus den ermittelten Jahresfrachten zeitliche Trendaussagen abzuleiten, kann nicht empfohlen werden, da die Probenahme immer über einen längeren Zeitraum erfolgte und somit Niederschlagsereignisse bzw. Abflüsse während der Schneeschmelze unterschiedlich häufig in die Berechnung eingingen. Abflussspitzen in der Freiberger Mulde (1996, 2004, 2005, 2009) wurden in der Zwickauer Mulde nicht beprobt und umgekehrt (2006) (Anlage 33).

(3) Welche Quellen können in den Hauptbelastungsgebieten identifiziert werden? Welche Maßnahmen wurden in den Hauptbelastungsgebieten bisher gegen den Schadstoffaustrag getätigt? Können Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Einzelquellen getroffen werden?

Die Auswertung wird getrennt nach Freiberger Mulde (3a) und Zwickauer Mulde (3b) vorgenommen. Eine Übersicht der Belastungsgebiete Freiberg und Schlema mit den jeweils signifikanten Punktquellen ist in der Anlage 34 sowie 43 dargestellt.

(3a) Hauptbelastungsgebiet Freiberg / Freiberger Mulde

Einführung
In den einzelnen Bergbauperioden entwickelte sich parallel zum Fortschritt in den Abbaumethoden, der Wasserhaltung in den Gruben und schlussendlich im Ausbringen der Erze die Hüttenindustrie, wobei die Ablagerung der Reststoffe stets hüttennah erfolgte. Auch nach Einstellung des Bergbaus im Freiberger Revier Ende der 1960er Jahre wurden die buntmetallurgischen Verhüttungsprozesse (z.B. aus einheimischen Zinnerzen von Altenberg und Ehrenfriedersdorf) an den drei Hüttenstandorten des damaligen VEB Bergbau- und Hüttenkombinats "Albert Funk" bis Anfang der 1990er Jahre fortgesetzt. Die Produktpalette reichte von Zinn, Zink, Blei, Schwefelsäure, Edelmetallen, Arsenikalien bis zur Herstellung von Legierungen, Schaltstücken und Halbzeugen. Nachdem die volkseigenen Betriebe zunächst Staatsbetriebe in der Verantwortung der Treuhandanstalt wurden, erfolgte danach die schrittweise Umwandlung in Kapitalgesellschaften (Fritz 2003).

Die aus dem VEB Bergbau- und Hüttenkombinat "Albert Funk" hervorgegangene SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH beschäftigt sich seit 1993 mit der Erkundung und Sanierung von Altlasten, die auf die intensive bergbauliche und industrielle Nutzung der SAXONIA-Grundstücke in der Vergangenheit zurückzuführen sind (Kunau 2004). Ziel des SAXONIA-Altlastenprojektes, welches auch als „Ökologisches Großprojekt SAXONIA“ bezeichnet wird (Eckstein 2003), ist die Revitalisierung kontaminierter Standorte und Haldenflächen im Zeitraum von 1993 bis 2013 mit einem Finanzvolumen von 18,4 Mio. Euro. Im Mittelpunkt standen Gefahrenabwehrmaßnahmen an Altstandorten und Deponien (einschließlich Reststoffbeseitigung) neben dem Flächenrecycling auf Industriebrachen mit dem Ziel der Neuansiedlung und Infrastrukturentwicklung. Hauptstandorte des Hüttenwesens (und des Bergbaus) im SAXONIA-Altlastenprojekt mit direktem Bezug zur Freiberger Mulde sind die Hütte Muldenhütten, die Hütte Freiberg, der Komplex Davidschacht und die Hütte Halsbrücke entlang ihres Fließweges (Anlage 34).

Aus den meisten Objekten der o.g. Standorte gehen Gefährdungen für Mensch und Umwelt aus, wobei folgende Kontaminationspfade maßgebend sind (Gefährdung der Schutzgüter Wasser, Boden, Luft, Mensch):
(1) Eintrag gelöster Schadstoffe und abgespülter Partikel in Oberflächengewässer und Böden über die Entwässerungssysteme oder durch Erosionsprozesse
(2) Mobilisierung von Schadstoffen bei der Passage von Niederschlagswasser durch den kontaminierten Boden, Eintrag gelöster Schadstoffe über das Sickerwässer in das Oberflächen- oder Grundwasser
(3) Eintrag gelöster Schadstoffe über den Altbergbau auf das Niveau des Roten Grabens bzw. auf das Niveau des Rothschönberger Stollns aufgrund zerstörter Wasserableitungssysteme
(4) Fällung gelöster Bestandteile und Sedimentation der gebildeten bzw. eingespülten Partikel im Sediment des jeweiligen Vorfluters
(5) Emissionen schadstoffbeladener Stäube von offenen Flächen durch Wind, Eintrag in den Boden, hier Auswaschung oder Aufnahme in die Nahrungskette.

Die Sanierungsmaßnahmen im SAXONIA-Altlastenprojekt hatten das Ziel, die Kontaminationspfade zu unterbrechen und den Eintrag von Schadstoffen in die Umweltkompartimente Wasser, Boden und Luft zu minimieren. Die Durchführung einiger dazu notwendiger Maßnahmen mit dem Ziel der Emissionsminderung bedurften der Festlegung von Sanierungszielen und entsprechender Grundsatzentscheidungen durch die zuständigen (Landes-)Behörden.

Vor der Abdeckung der Altablagerungen ist eine Profilierung erforderlich, die die langzeitige Standsicherheit des jeweiligen Objektes gewährleistet. Die dabei entstehenden Massendefizite bzw. –überschüsse sind innerhalb der Altablagerung selbst oder durch Fremdmaterial auszugleichen. Die interne Umlagerung ist aus bodenschutz- und abfallrechtlicher Sicht nicht genehmigungsbedürftig. Umlagerungen zwischen Altablagerungen innerhalb (selbst eines Hüttenstandortes) und die Zufuhr externen Materials erforderten Ausnahmeregelungen, die wiederum bestimmte Maßnahmen erst realisierbar machten (Mollée 2003).

Zur Abdeckung wurden „Regelungen zu den Abdeckanforderungen im Altlastenprojekt SAXONIA“ erarbeitet. Für den Normalfall ist eine Restdurchsickerung der auftreffenden Niederschläge von 40 bis 60 % anzustreben. Dafür ist eine ca. 0,5 m mächtige Abdeckschicht (Abdeckschicht I) und eine ca. 0,2 m mächtige durchwurzelbare Bodenschicht (Abdeckschicht II) aufzubringen. Bei Emissionsschwerpunkten wurden höhere Anforderungen gestellt (Abdichtung), die Restversickerung musste deutlich geringer als 50 % sein. In Teilflächen, auf denen sich bautechnisch bedingt diese Anforderungen nicht mit vertretbaren Mitteln erreichen lassen, sind Oberflächenabdeckungen mit geringerer Abdeckgüte zulässig. Für die Abdeckungen galten die Bodeneinbauschwellenwerte der Belastungszone I gemäß der „Regelungen zum Umgang mit belastetem Bodenmaterial im Freiberger Raum“ von 1998 (As ≤300 mg/kg, Pb ≤1.300 mg/kg; Cd ≤10 mg/kg) (Eckstein 2003).

Die Anlage 35 gibt einen Überblick über die wesentlichen Sanierungsobjekte und die dort vorgenommenen Maßnahmen an den o.g. Standorten des SAXONIA-Altlastenprojekts. Insgesamt zeigt die Entwicklung an den SAXONIA-Standorten eine hohe Quote der Flächensanierung und Nachnutzung dieser Flächen (Tab. 6).

Tab. 6: Übersicht über die Flächenentwicklung an den SAXONIA-Standorten (Fritz 2012)

Standort	**Freiberg**	**Muldenhütten**	**Davidschacht**	**Halsbrücke**
Fläche	49,5 ha	37,5 ha	37,6 ha	12,3 ha
Kosten Sanierung [€]	18,43 Mio.	14,04 Mio.	32,7 Mio.	8,0 Mio.
Kosten Investition [€]	410 Mio.	42,7 Mio.	7,75 Mio.	67,45 Mio.
Arbeitsplätze	890	431	144	573
Vermarktung [%]	100 %	69 %	79 %	100 %

Die Arbeiten an den Standorten Hütte Freiberg, Hütte Muldenhüten und Hütte Halsbrücke gelten als weitgehend abgeschlossen. Die im Bereich der Hütte Muldenhütten offen liegenden nicht bewachsenen Haldenzüge entlang der Mulde bis Hilbersdorf stehen unter Schutz, daher sind dort keine weiteren Maßnahmen geplant. Hier sind auch noch nicht alle brach liegenden Areale genutzt, für den Hüttenhof mit dem Schachtofen wäre auch eine nichtindustrielle sondern museale Nutzung zum Erhalt des Wissens über die historisch gewachsene Hüttenlandschaft denkbar. Die Sanierung des Standortes Davidschacht/ Hammerberg dauert an.

Im folgenden soll auf die Auswirkungen der Standorte auf das Fließgewässersystem, speziell die Freiberger Mulde eingegangen werden. Die Messtellen, die zeitlich und frachtmäßig ausgewertet wurden, wurden so gewählt, dass die Änderungen nach Passage der einzelnen Standorte beobachtet werden können.

Der Punkt Berthelsdorf gilt als Eingangspunkt in das Freiberger Belastungsgebiet ohne nennenswerte anthropogene Belastung. Zwischen den Punkten Muldenhütten und Hilbersdorf liegen die Einflussbereiche der Hütten Freiberg und Muldenhütten, zwischen Hilbersdorf und Halsbrücke die des Komplexes Davidschacht/Hammerberg, der Grube Freiberg und der Hütte Halsbrücke. Aus ersten detaillierten Untersuchungen im Jahr 1993 (Murglat 1994) lagen bereits gute Kenntnisse über die punktuellen und Bereiche der diffusen Quellen von Arsen- und Schwermetalleinleitungen in diesem Abschnitt vor. Der Stangenbergbach als natürliches Gewässer wird aufgrund des hohen Schadstoffzustroms aus Sickerwässern einer Punktquelle gleichgesetzt. Ein Teil der diffusen Schadstoffquellen, wie z.B. untertägige Sickerwasseraustritte aus Halden (Komplex Davidschacht), werden Punktquellen (hier dem VGS) zugeschlagen. Daneben gibt es insbesondere im Kontaktbereich von Haldenfüßen im Fließgewässer große Bereiche nicht quantifizierbarer diffuser Schadstoffquellen. Auch im Einzugsgebiet des Münzbaches als linkem Zufluss der Mulde unterhalb von Halsbrücke gibt es diffus zusitzende Schadstoffquellen, die die Wasser- und Sedimentqualität negativ beeinflussen.

Beeinflussungen der Freiberger Mulde aus dem Gebiet der Hütte Freiberg
Für das Areal der Hütte Freiberg gilt der Stangenbergbach heute als wichtigste Punktquelle des Zustroms von Schwermetallen aus Sickerwässern des Hüttenstandorts in die Freiberger Mulde, insbesondere von Cadmium und Zink. Der im südlichen Bereich des Hüttengeländes verlaufende Einschnitt der Eisenbahnlinie Chemnitz – Dresden wirkt als Drainage für den lokalen, im Wasserspiegel stark schwankenden, Kluftgrundwasserleiter. Die an der steilen Felswand austretenden Sickerwässer sind die Ursache der erhöhten Schwermetallgehalte im Stangenbergbach, der sich aus unbelasteten Wässern aus dem Bereich des Lerchenhübels speist. Die Sickerwässer weisen an der mittlerweile nicht mehr beprobten Monitoringstelle an der Felswand Cd-Konzentrationen von im Mittel 5,8 mg/l auf, die in der Bahndrainage auf 1,4 mg/l und im weiteren Verlauf auf durchschnittlich 0,2 mg/l verdünnt werden. Zwischen den Probenahmestellen unterhalb des Auslaufs der Bahndrainage Nord (MP 2504) und am Messwehr oberhalb der Mündung (MP 2604) durchfließt der Stangenbergbach ein Feuchtgebiet. Ein aus den Monitoringdaten errechneter Rückhalt Cadmium und Zink in diesem Gebiet konnte nicht durchgängig bestätigt werden (Janneck et al. 2009a).

Der Blick auf die zeitliche Entwicklung der Cd-Konzentrationen im Stangenbergbach zeigt eine starke Schwankungsbreite in den ersten Jahren der Sanierung (1993 bis 1995). Seit 1998 sanken sie langsam auf ein Niveau von 0,2 mg/l ab (Anlage 36). Bis 2008 wurden auf dem SAXONIA-Areal umfangreiche Flächenversiegelungen vorgenommen, die letzte große mit dem Bau der Hallen der Deutschen Solar AG im Jahr 2009. Damit sollte sich der Sickerwasseranfall auf ein Minimum reduziert haben. Die erhoffte Verringerung der Cd- und Zn-Konzentrationen im Grundwasser der Hütte Freiberg tritt jedoch erst 2010 bei Cadmium und 2011 bei Zink ein (HGC GmbH 2012).

Zur Reduzierung der Schwerpunktelemente Cadmium und Zink wurden 9 Sanierungsansätze ausgearbeitet, die von naturnahen passiven über technische Behandlungsverfahren bis zu verschiedenen Ableitungsvarianten reichten. Für alle Varianten bedeutsam sind die noch zu leistende Ermittlung der Schwankungsbreite der Abflüsse der Teilströme einschließlich chemischer Analysen mit erweitertem Elementspektrum, Experimente zur Abtrennung der Schadstoffe und die Klärung der Genehmigungsfähigkeit (Janneck et al. 2009a).

Nördlich des Stangenbergbaches leitet der Hüttenbach diskontinuierlich Wässer aus dem Hüttengelände Freiberg ab. Während in den 1990er Jahren die Abwässer einer Neutralisationsanlage über den Hüttenbach in die Mulde abgeleitet wurden, sind es seit 2004 nur noch Oberflächenwässer, die bei Regen bzw. Schneeschmelze anfallen. Trotzdem sind bei Wasserführung des Hüttenbaches weiterhin erhebliche Schadstoff- und Salzausträge zu verzeichnen (Anlage 37). Eigene Untersuchungen während der Hochwassersituation zum Jahreswechsel 2012/2013 ergaben Cd-Gehalte bis 5,6 µg/l, Pb-Gehalte bis 230 µg/l und Zn-Gehalte bis 2.200 µg/l. Die Frachtschätzung ist als sehr grob einzustufen.

Beeinflussungen der Freiberger Mulde aus dem Gebiet der Hütte Muldenhütten einschließlich Muldenbogen

Seitens der Hütte Muldenhütten sind heute noch drei wesentliche Punktquellen aufzuführen: der RWE-Kanal (diskontinuierlich), der MRU-Kanal (kontinuierlich) und der Glücksilbersternstolln. Den beiden Kanälen wird eine Entwässerungsfunktion des Hüttengeländes zugeschrieben, die ermittelten Elementkonzentrationen sind jedoch sehr hoch (Anlage 38). Im RWE-Kanal spielen die Elemente Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, im MRU-Kanal Pb, Cd und Zn eine wichtige Rolle. Frachtermittlungen sind sehr unsicher.

Die Haldenschüttungen im Muldenbogen wirken als große diffuse Quelle auf die Wasserqualität der Freiberger Mulde ein. Beide Ufer der Freiberger Mulde bestehen in diesem Bereich aus den Abprodukten der Hüttenprozesse wie Hüttenschlacken, Abbrand, Schlackensand sowie Bauschutt und Ofenausbruch. Die vegetationsarmen Ablagerungen erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 21 m und fallen mit einem Böschungswinkel von 34 bis 38° steil zur Mulde ab. Der Böschungsfuß befindet sich im Hochwasserwechselbereich. Das Extremhochwasser von 2002 führte zu dem bereits erwähnten Materialabtrag von den Halden in das Flussbett. Im Zuge der Sicherungsarbeiten blieb der Haldenzug am rechten Ufer in seiner Kontur erhalten, der Haldenfuß wurde durch eine Zyklopenmauer, die Haldenböschung mit Böschungspflaster bis 0,5 m über HHW 2002 stabilisiert (SAXONIA 2012).

Wenige Meter unterhalb der gesicherten Zone befindet sich das Mundloch des Glücksilbersternstollns auf der rechten Talseite. Noch etwas weiter flussabwärts auf der linken Talseite wurde durch das Hochwasser im August 2002 unterhalb der Hausmülldeponie der Stadt Freiberg das Mundloch der Tiefen Abzugsrösche des Morgensterner Reviers freigespült (Hüttenrösche) (Anlage 39). Beide Punktquellen sind bei geringer Wassermenge durch extreme Schwermetall- und Arsengehalte gekennzeichnet. Die Hauptwassermenge der Hüttenrösche, in die auch der Betriebsgraben des Hüttengeländes eingebunden ist, verstürzt im westlichen Abrahamer Schacht auf das Niveau des Rothschönberger Stollns und gelangt somit in die Triebisch (Kunau 2004).

Beeinflussungen der Freiberger Mulde aus dem Gebiet des Davidschacht-Komplexes und des Roten Grabens

Ab Halsbach tritt die Mulde in den Einflussbereich des Davidschacht-Komplexes mit Grobbergehalde Davidschacht, Spülhalde Davidschacht und Spülhalde Hammerberg ein. Über den Sickerwasserpfad kommt es zu Schadstoffemissionen, die teilweise über die Grube Freiberg in den Roten Graben abgeführt werden. Der Rote Graben (RG) ist als Kunstgraben zur Heranführung von Aufschlagwasser für die Halsbrücker Gruben im 17. Jahrhundert zwischen Halsbach und Halsbrücke angelegt worden. In seinem heute ca. 3,6 km langen Verlauf parallel zur Freiberger Mulde nimmt er die Stollenwässer des Verträgliche Gesellschaft Stolln (VGS), des Thurmhof Hilfsstolln und des Hauptstolln Umbruch (HSU) auf und führt bis zur ehemaligen Wäsche der Grube Oberes Neues Geschrei in Halsbrücke (Schräber 2006). Über den VGS werden zusätzliche Wassermengen durch den Versturz von Kühlwasser der Siltronic AG Freiberg (bis zu 500 m^3/h), von Überleitungswasser aus dem Berthelsdorfer Hüttenteich (bis zu 5 m^3/h), von Filterrückspülwässern des WZV Freiberg (bis zu 17 l/s) und aus dem Betrieb des Wasserrades im Thurmhofschacht (ca. 11.100 m^3/a) in den Roten Graben eingeleitet (Janneck et al. 2008).

Die Grubenwässer des VGS und des HSU sind stark mit Schwermetallen sowie Aluminium und Arsen kontaminiert (Anlage 40). Das dem Graben zufließende, schwermetallbelastete Wasser wird über mehrere Abschläge der Freiberger Mulde zugeführt, wodurch diese so stark verunreinigt wird, dass die Ziele des guten ökologischen und guten chemischen Zustandes verfehlt werden. Für die mittleren Durchflussmengen liegen nur Schätzungen vor, für den VGS wurden 50 l/s und für den HSU 20 l/s angenommen. Die Elemente Cd, Cu und Zn liefern aus den beiden Stollen nahezu die Hälfte der Gesamtfracht der Mulde (bezogen auf den Abschnitt Hilbersdorf bis Halsbrücke), wobei der VGS 88-91 % der Frachtanteile des

Roten Grabens besitzt und somit die Hauptschwermetallquelle für den Roten Graben und die Freiberger Mulde im Abschnitt zwischen Halsbach und Halsbrücke darstellt.

Untersuchungen zur Aufklärung der Herkunft der Schwermetallgehalte im VGS zeigten, dass Cd, Cu und Zn zu 80-90 % durch Sickerwasserzuflüsse im Bereich unterhalb der Davidschacht-Halde eingetragen werden, was den Austrag dieser Schwermetalle aus dieser Halde nahe legt. Durch den permanenten Zustrom schwermetallhaltiger Wässer, der im Graben stattfindenden geochemischen Prozesse der Flockung und Sedimentation von Fe- und Al-Hydroxiden sowie einer fehlende Unterhaltung ist der Rote Graben über Jahrzehnte stark verschlammt. Das Volumen der sehr stark mit Schwermetallen und Arsen belasteten Schlämme wurde mit ca. 10.500 m³ abgeschätzt (Janneck et al. 2008).

Das derzeit noch verbliebende Abflussprofil ist sehr gering, so dass es nach intensiven Regenereignissen bzw. der Schneeschmelze zur hydraulischen Überlastung und damit zum unkontrollierten Überlaufen des Grabens, verbunden mit einer Ausschwemmung schadstoffbelasteter Sedimente in die Freiberger Mulde, kommt. Weiterhin besteht die Gefahr des Verbruchs der Stützmauern, wie nach dem Hochwasser 2002 im Bereich des Thurmhof Hilfsstolln geschehen. Im Roten Graben besteht eine enge Verflechtung von hydraulischen und stofflichen Problemen (Anlage 41), die nur in Verbindung miteinander und in Bezug auf das Gesamtsystem nachhaltig gelöst werden können. Das stoffliche Potential des RG birgt in Kombination mit einem möglichen hydraulischen Versagen des Grabens Gefährdungen der Schutzgüter Grund- und Oberflächenwasser sowie Boden. Diese Gefahr wird besonders bei Starkregenereignissen und Schneeschmelze gesehen, aber auch das Befahren des Weges am Graben entlang mit schwerem Gerät ist nicht unkritisch. Lösungsansätze dieser Problematik werden unter Punkt (5a) diskutiert.

Im Rahmen einer Gefährdungseinschätzung konnten zwischenzeitlich weitere Untersuchungen zum stofflichen Inhalt der Sedimente innerhalb und außerhalb des Grabens durchgeführt werden. Die Grabensedimente bestehen aus Al- und Fe-Hydroxiden (5-13 % Al, 4-12 % Fe) mit wechselnden Mengen von Schwermetallen (Zn bis 0,6 %) und Arsen. Die Elemente Cd, Zn und Ni lassen sich leicht aus den Sedimenten mobilisieren. Die eluierbaren Anteile können in den mittleren Grabenabschnitten für Cd bis zu 11 % erreichen (Janneck et al. 2009b). Es zeigt sich (übereinstimmend mit Schreckenbach 2010), dass insbesondere Cd und Zn aber auch Ni und Cu unterhalb des HSU stärker ausgefällt und damit im Sediment angereichert werden. Die verstärkten Fällungs- und Sedimentationsprozesse werden auch durch eine Anreicherung des Feinanteils (<0,063 mm) im mittleren Grabenabschnitt belegt, der durch den Zufluss des Stollenwassers des HSU indiziert wird. Altsedimente, die bei früheren Unterhaltungsmaßnahmen auf der Luftseite des Grabendammes abgelagert wurden, besitzen aufgrund der langen Lagerung geringere Gesamtgehalte (mit Ausnahme von As, Pb), bedeutend geringere mobilisierbare Schadstoffgehalte und stellen in Verbindung mit einer weiträumigen Überdeckung durch Bewuchs ein stark herabgesetztes Gefährdungspotential bezüglich der Schutzgüter Mensch und Grundwasser dar.

(3b) Hauptbelastungsgebiete Schlema-Alberoda und Crossen / Zwickauer Mulde

Einführung
Das Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde (untergeordnet auch der Freiberger Mulde) wurde durch eine jahrzehntelange intensive Gewinnung und Verarbeitung von Uranerzen bis 1990 stark beeinflusst. Nach Einstellung des Uranbergbaus blieben 1.500 km offene Grubenbaue, 311 Mio. m³ Haldenmaterial und 160 Mio. m³ radioaktive Schlämme (bezogen auf alle Wismut-Liegenschaften) zurück, die zu Umweltbeeinflussungen in oftmals dicht besiedelten Gebieten führten. Die Sanierung dieser Objekte war und ist seit 1991 Aufgabe der bundeseigenen Wismut GmbH. Das Sanierungsprojekt Wismut ist, auch im internationalen Vergleich, ein einmaliges Großprojekt im Bergbau und Umweltschutz (Wismut GmbH 2013a). Die Problematik im Sanierungsgebiet der Wismut GmbH umfasste im Vergleich zum Freiberger Raum wesentlich größere Flächen, größere Volumina und zusätzlich zu den Kontaminationen der Umwelt mit Schwermetallen und Arsen tritt hier die Verbreitung radioaktiver Stoffe (erhöhte Ortsdosisleitung) hinzu. Der Radonaustritt aus Halden und Tagesöffnungen und dessen Verbreitung über den Luftpfad stellt besonders in Siedlungsgebieten zusätzliche Sanierungsanforderungen. Die Flutung der Gruben, die im Freiberger Revier bereits seit mehr als 40 Jahren abgeschlossen ist, stellte weitere neue 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 Flutungs- auch Frei-, Poren- und Sickerwässer von industriellen Absetzanlagen und Halden reinigen. Eine Nachnutzung sanierter Flächen ist festgeschrieben. Der endgültige Sanierungsbedarf einer Fläche ergibt sich aus dem Ausmaß der festgestellten Kontaminationen und der Art ihrer vorgesehenen Nachnutzung. Die wichtigsten Standorte, die einen Einfluss auf die Qualität der Zwickauer Mulde ausüben, sind Schlema-Alberoda, Crossen und Pöhla (indirekt einleitend über das Schwarzwasser). Einen Überblick über das Gebiet und die Sanierungsziele der Wismut GmbH geben die Anlagen 43 und 44.

Am **Standort Schlema-Alberoda** wurden in den Produktionszeiten von 1946 bis 1991 ca. 80.000 Tonnen Uran aus bis zu 1.800 m Teufe gewonnen. Mit dem Fortschreiten der Verwahrarbeiten untertage wurde die gesteuerte Flutung der Grube eingeleitet, die 2008 den überwiegenden Teil der Hohlräume (ca. 36 Mio m^3) bis 25 m unter dem Niveau des mittelalterlichen Markus-Semmler-Stollns erreichte. Aus dem aufsteigenden Wasser der Grube Schlema-Alberoda müssen die Schadstoffe Uran, Radium, Arsen, Eisen und Mangan soweit entfernt werden, dass das Wasser schließlich in den Vorfluter Zwickauer Mulde eingeleitet werden darf. Diese Grubenwässer werden seit 1998 über ein Pumpensystem der Grube entnommen und bis zu einer Gesamtkapazität von ca. 1.150 m³/h in der Wasserbehandlungsanlage (WBA) Schlema-Alberoda gereinigt, wobei die Gesamtbetriebszeit der WBA Schlema-Alberoda etwa 30 Jahre betragen wird (Wismut 2013a). Die Rückstände der Wasserbehandlung werden immobilisiert und auf der Halde 371 eingebaut. Ein Teil des verbleibenden Niveaus bis zum Überlaufniveau in die Zwickauer Mulde wird als Pufferspeicher für die Wasserbehandlung vorgehalten (0,5 Mio. m³, ca. 15 m) (Kreyβig et al. 2011).

Der Markus-Semmler-Stolln diente seit Jahrhunderten zur Entwässerung der Schneeberg-Schlemaer Kupfer-, Silber- und Kobaltgruben. Er verbindet die Grubengebäude Schneeberg und Schlema-Alberoda und muss für eine nachhaltige Wasserableitung und Wetterführung (Radonminimierung) im Schlematal befahrbar gehalten werden. Dazu werden seit 1991 Aufwältigungsarbeiten durchgeführt, die mit dem sogenannten Südumbruch 2013 abgeschlossen werden sollen. Seit 2004 können die Wässer aus dem Schneeberger Revier wieder kontrolliert, ohne Fremdenergie, über den Markus-Semmler-Stolln abfließen (OBA 2005, Wismut GmbH 2005a).

Bis zum Ende der bergbaulichen Arbeiten 1991 war ein ca. 22 km^2 großes Grubengebäude der Grube Schlema-Alberoda mit 4.200 km horizontalen Auffahrungen entstanden, das über 54 Tagesschächte, zahlreiche Blindschächte und einige Stollen aufgeschlossen worden war. An der Tagesoberfläche waren 42 Halden (Aufstandsfläche ca. 311 ha, Volumen ca. 45 Mio

m^3) aufgeschüttet worden, von denen 19 Halden in der Sanierungsverantwortung der Wismut GmbH verblieben. Die Betriebsflächen des Bergbaubetriebes Aue nahmen 111 ha in Anspruch, wozu neben den Schachtanlagen Werkstätten, Lager- und Versorgungskomplexe, die radiometrische Aufbereitungsfabrik, Erzverladungen und das Absetzbecken im Borbachtal zählten (BMWi 2011). Die Sanierung der Halden am Standort Schlema-Alberoda, die das Bild der dichtbesiedelten Gemeinde Schlema prägten, erfolgte und erfolgt unter den Aspekten Lage zur Siedlung, Standsicherheit, Staubabwehung, Radonaustritt und Wasserwegsamkeit. Eine Halde (Halde 250) wurde zum Auffüllen des Deformgebietes Oberschlema, jetzt Kurpark, umgelagert. Die größten Halden werden jedoch an ihrem Standort belassen und in-situ saniert (Wismut GmbH 2013a).

Der **Standort Pöhla** mit seinen Teillagerstätten Pöhla-Globenstein, Hämmerlein sowie Tellerhäuser liegt im oberen Westerzgebirge, im Einzugsgebiet des Johanngeorgenstädter Schwarzwassers. Von 1967 bis 1990 erfolgte in dem Gebiet um Pöhla Uranerzbergbau mit einer Gewinnung von ca. 1.200 t Uran. Insgesamt umfasste das Grubenfeld eine Fläche von ca. 5,5 km^2. Übertägige Betriebe mit den dazu gehörenden Tagesöffnungen, Gebäuden, Anlagen und Halden (Aufstandsfläche ca. 34 ha, Volumen ca. 2 Mio. m^3) nahmen eine Fläche von 60 ha ein (BMWi 2011). Nach Verwahrung des Bergwerks mit einem Hohlraum von ca. 1,2 Mio. m^3 erfolgte die Flutung in den Jahren von 1992 bis 1995 und endete mit Erreichen der Stolln-Sohle. 1995 wurde die WBA Pöhla zur Abtrennung der Schadstoffe Uran, Radium, Arsen, Eisen und Mangan in Betrieb genommen. Bereits 1997 konnte die Uranabtrennung eingestellt werden. Im Jahr 2004 erfolgte die Inbetriebnahme einer passiv/biologischen Wasserbehandlungsanlage. Mit der Anlage werden ca. 15 bis 20 m^3/h Grubenwasser behandelt und anschließend über den Schildbach in den Luchsbach abgegeben. Derzeit wird am Aufbau einer konventionellen ferngesteuerten WBA gearbeitet (Wismut GmbH 2013a). Der Standort Pöhla besitzt im Vergleich zu beiden anderen Standorten nur einen geringen Frachtanteil und wird nicht im Detail betrachtet.

Am **Standort Crossen** befand sich die ehemals zweitgrößte Uranerzaufbereitungsfabrik in Europa, in der zwischen 1950 und 1989 77.000 t Uran aufbereitet wurden. Das Werksgelände (21 ha) war durch die Zwickauer Mulde in zwei Teile geteilt: rechts der Mulde befanden sich die Werksanlagen des Aufbereitungsbetriebes, links der Mulde die Erzentladestelle und das Erzlager. Links der Mulde befanden sich auch die Absetzanlagen Helmsdorf (1958-1989), Dänkritz I (ca. 1950-1958) und Dänkritz II (ca. 1950-1958, 1990 nicht mehr zu Wismut gehörend) (insg. 227 ha), in die die Rückstände aus der nasschemischen Aufbereitung (insg. 57 Mio. m^3) eingespült wurden. Das Haufwerk aus der Erzaufbereitung wurde auf die Bergehalde Crossen verkippt (22 ha, ca. 3,2 Mio. m^3) (BMWi 2001). Mit Blick auf die komplexe Kontaminationssituation, die Lage direkt an der Zwickauer Mulde und die schwierigen hydrologischen Bedingungen wurde der Abriss der Anlagen, der Haldenabtrag, der Erdaushub (ohne die vollständige Entfernung der Kontamination), die anschließende Verfüllung, Abdeckung und Begrünung entschieden (Kreyβig et al. 2011). Zur Sanierung der (IAA) Helmsdorf wurde die trockene in-situ-Verwahrung gewählt, verbunden mit der Umlagerung von Bergematerial der Bergehalde Crossen auf die IAA Helmsdorf zur Stabilisierung der eingelagerten Schlämme, Entwässerung, Abdeckung und Konturierung. Die WBA Helmsdorf behandelt seit 1995 die anfallenden Frei-, Sicker- und Porenwässer der gleichnamigen industriellen Absetzanlage vor ihrer Einleitung in die Zwickauer Mulde. Uran, Arsen und Radium sind die abzutrennenden Elemente im derzeitigen Volumenstrom von ca. 200 m^3/h. Die Rückstände der Wasserbehandlung werden immobilisiert und im Bereich der Absetzanlage Helmsdorf eingelagert. Die Wasserbehandlung wird an diesem Standort noch über mehrere Jahre erforderlich sein (Wismut GmbH 2013a).

Als **Wismut-Altstandorte** werden alle Objekte bezeichnet, die vor dem 31.12.1962 stillgelegt und per 30.06.1990 nicht mehr im Eigentum/der Nutzung der SDAG Wismut waren. Die Mehrheit dieser noch bestehenden Anlagen und Einrichtungen (Schächte, Schürfe, tagesnahe Grubenbaue, Aufbereitungsanlagen, Halden, Gebäudekomplexe, Stollen) wurde seinerzeit nicht (genügend) gesichert, rückgebaut bzw. saniert. Es ergab sich Handlungsbedarf aus

radiologischer und standsicherheitstechnischer Sicht, ein erhebliches Risiko für Mensch und Umwelt. Am 05.09.2003 wurde das Verwaltungsabkommen zur Sanierung sächsischer Wismut-Altstandorte zwischen Bund und Freistaat Sachsen abgeschlossen, in dem bis 2012 insgesamt 259 Einzelmaßnahmen mit einem finanziellen Aufwand von 77,2 Mio. Euro bearbeitet wurden (Wismut GmbH 2013b). Am 24.04.2013 wurde ein ergänzendes Verwaltungsabkommen zwischen Bund und Freistaat Sachsen unterzeichnet, in dem weitere 138 Mio. Euro für die Sanierung sächsischer Wismut-Altstandorte in den nächsten zehn Jahren zur Verfügung gestellt werden (Wismut GmbH 2013a).

Die Auswirkungen des Uranerzbergbaus auf die Umwelt werden durch die Sanierungsvorhaben beseitigt bzw. auf ein zulässiges Maß reduziert. Die Kontrolle der Einwirkungen der einzelnen Objekte sowie der Sanierungsmaßnahmen selbst auf die Schutzgüter Boden, Luft und Wasser vor, während und nach der Sanierung ist die Aufgabe der Umweltüberwachung, die seitens der Wismut GmbH seit 1991 durchgeführt wird. Neben dem Auffinden von Kontaminationen und dem Nachweis der Einhaltung gesetzlicher und behördlicher Vorgaben (Kreyβig et al. 2008) dienen die Monitoringergebnisse der Einschätzung des Sanierungserfolgs, dokumentiert in den jährlich erscheinenden Umweltberichten (Wismut GmbH 2013a).

Im Folgenden wird auf die Entwicklung der relevanten Einzelquellen im Untersuchungsgebiet eingegangen.

Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda, WBA Schlema-Alberoda
Die Prognosen für die Wasserbeschaffenheit des aufsteigenden Flutungswassers gingen von einer zeitweisen Intensivierung der Freisetzung umweltrelevanter Metalle sowie von Mineralsalzen infolge der Mobilisierung akkumulierter wasserlöslicher Produkte der jahrzehntelangen Verwitterung mit Gesamtkonzentrationen an gelösten Stoffen von bis zu 10 g/l sowie Uran- und Arsenkonzentrationen von 5 bis 10 mg/l aus (Wismut GmbH 2010c).

Das tatsächliche Flutungsregime zeigt eine parameterspezifische, zeitlich differierende Abfuhr der Elemente. Das Elemente Arsen zeigte 1993/94 die früheste Konzentrationsspitze (ca. 7 mg/l), verbunden mit der Flutung des Grubentiefsten bis zur -1305m-Sohle, in der sehr arsenreiche Erze anstanden. Die oberen arsenärmeren Grubenbereiche lieferten trotz der längeren Verwitterungszeit weniger Arsen, so dass ab 1995 ein stetiger Rückgang der Arsenkonzentration im Flutungswasser einsetzte. Für das Element Uran lagen die Konzentrationen 1993/94 bei ca. 3 mg/l und stiegen bis 1999 auf ca. 8 mg/l an. Zeitnah mit Beginn der regulären Abförderung von Flutungswasser und der Inbetriebnahme der WBA sanken die Konzentrationen kontinuierlich ab. Bilanzierungen zeigten, dass der Rückgang der mobilisierten Uranstoffmengen bislang vordergründig durch die stetige Flutungswasserentnahme zur WBA bedingt ist und sich durch Stoffnachlieferungen aus der gefluteten Grube und deren Umfeld tendenziell verzögert. Im Jahr 2011 lag die As-Konzentration im Flutungswasser im Mittel bei 1,04 mg/l, die U-Konzentration bei 1,75 mg/l (Anlage 45). Anhand bisherigen Kenntnisstandes (Wismut GmbH 2010c) wird davon ausgegangen, „dass die bisherige Abnahme umweltrelevanter Stoffkonzentrationen unter weiterer Abschwächung grundsätzlich anhält“. Es bleibt allerdings offen, „inwieweit in der Grube mittel- bis langfristig ein hydrochemischer Milieuwechsel zu stark reduzierenden Verhältnissen eintritt.“

In der Emissionsbilanz werden die enormen As- und U-Frachten von bis zu 10 t/Jahr Uran und 2,5 t/Jahr Arsen verdeutlicht, die während der Betriebszeit der Grube und vor dem Beginn der Wasserbehandlung ausgestoßen wurden (Anlage 45). Ab 1999 wurden die Austräge durch die WBA deutlich reduziert, die jährlichen Restemissionen betrugen ca. 1 bis 2 t/Jahr Uran und 0,2 bis 0,5 t/Jahr Arsen. Die behandelte Wassermenge lag 2011 bei ca. 6,5 Mio. m^3. Die WBA Schlema reduziert die Schadstofffrachten aus dem Flutungswasser um mehr als 90 % (Anlage 46). Durch die rückläufigen Emissionen sanken ab 1998 auch die Schadstoffkonzentrationen in der Zwickauer Mulde unterhalb des Sanierungsgebietes von ca. 5 bis 35 µg/l Uran und ca. 10 bis 80 µg/l Arsen auf ca. 5 bis 15 µg/l Uran und ca. 5 bis 20 µg/l Arsen. Die Restemissionen aus der Grube Schlema-Alberoda machen 2010 noch etwa

30 % der Gesamtbelastung beim Uran und max. 10 % beim Arsen aus, wobei mittel- bis langfristig eine weitere Reduzierung erwartet wird (Wismut GmbH 2010c). Damit sind die Emissionen aus der Grube sind aufgrund der Wasserbehandlung prozentual rückläufiger als die summarischen Emissionen aus den Halden.

Grubenwasser aus dem Markus Semmler Stolln
Die bereits erwähnte Sanierung der Markus-Semmler-Stollnsohle mit dem Ziel eines geregelten Grubenwasserablaufs der Grubenwässer der Grube Schneeberg wird seit Beginn der Sanierungsarbeiten vorangetrieben. Der kontrollierte Abfluss seit 2004 spiegelt sich sowohl in den abgeleiteten Wassermengen als auch in den Elementgehalten wider (Anlage 47). Die mittleren As-Konzentrationen bewegen sich 2011 bei einer Schüttung von ca. 4 Mio. m^3 bei 230 µg/l Arsen und 45 µg/l Uran.

Schlemabach
Der Schlemabach dient der Entwässerung der Gemeinde Schlema. Mit der Wiederherstellung der Wasserableitung der Schneeberger Grubenwässer über den Markus Semmler Stolln ab 2004 und den damit verbundenen geringeren Grubenwasserübertritten in das Fließgewässer sinken die durch den Schlemabach abfließenden Wassermengen. Parallel liegen auch die Arsen- und Urankonzentrationen auf einem geringeren Niveau (Anlage 48).

Punktquellen im Revier Schlema-Alberoda
Bezugnehmend auf (Kreyβig et al. 2011) und (Meyer et al. 2012) gelten einige Punktquellen als Immissionsschwerpunkte für die Zwickauer Mulde, wobei ein Teil der Sickerwasserströme erst durch die Sanierungsmaßnahmen an den jeweiligen Objekten gefasst und somit kontrollierbar wurden. Dazu zählen:
- behandeltes Sickerwasser von der Halde 371/I (m-585) seit 2009
- Sickerwasser von der Halde 371/II (m-113) seit (vor) 1992
- Sickerwasser von der Halde 371/I (m-109) seit (vor) 1992
- Sickerwasser von der Halde Borbachdamm (m-108X) seit 1998
- Sickerwasser von der Halde 382W (m-031A) seit 2007.

Über diese Punktquellen wurden 2011 ca. 0,9 Mio. m^3 Sickerwasser in die Zwickauer Mulde abgeleitet (Wismut GmbH 2012a). Dabei sind die Sickerwässer von der Halde 371/I und 371/II am abflussstärksten. Stofflich gesehen, weisen die Sickerwässer der Halde 371/II die höchsten Arsengehalte (2011 im Mittel 250 µg/l) auf. Seitens des Uran-Pfades sind die Sickerwässer aus dem Bereich des Borbachtals am höchsten kontaminiert (2011 im Mittel bis 0,99 mg/l). Die 2009 errichte WBA zur Sickerwasserbehandlung ist auf die Abtrennung von Uran ausgerichtet. Im Sickerwasser der Halde 371/I nehmen seit 2009 die U-Konzentrationen ab, es sind jedoch noch immer Konzentrationsspitzen zu verzeichnen. Verglichen mit dem Ausgangszustand, sank die emittierte Fracht aufgrund der partiellen Sickerwasserbehandlung an der Halde 371/I auf ca. 50 %. Die Erwartungen gehen von einer weiteren Reduzierung (bis auf 30 %) aus.

WBA Helmsdorf am Standort Crossen
Die Konzentrationen der toxischen Elemente Arsen und Uran variieren im zu behandelnden Wasser der WBA Helmsdorf je nach den Mischungsanteilen der gefassten Sicker- und Oberflächenwässer aus Untergrund und Umgebung der IAA Helmsdorf. Im Prozess der Wasserbehandlung wird diese um mehr als eine Größenordnung verringert. Die Reinigungsleistung ist dabei auf die Einhaltung der behördlich festgelegten Überwachungswerte im Ablaufwasser ausgerichtet (Anlage 49). Die behandelte Wassermenge betrug 2011 ca. 130 m^3/h, der mittlere As-Gehalt <30 µg/l und der mittlere U-Gehalt bei 0,17 mg/l. Die Notwendigkeit einer Wasserbehandlung entfällt perspektivisch, wenn nach Abschluss der Sanierung die Absetzbecken leergezogen/abgedeckt bzw. die austretenden Sickerwässer hinsichtlich Menge und Konzentration unbedeutend sind (Wismut GmbH 2013a).

Helmsdorfer (Oberrothenbacher) Bach

Eine gewisse Uran-Fracht sitzt dem Helmsdorfer (bezeichnet auch als Oberrothenbacher) Bach aus diffusen Quellen zu und wird über diesen in die Zwickauer Mulde eingeleitet. Die Wassermenge ist gering, der Arsen-Gehalt beträgt 3,6 µg/l, der Uran-Gehalt 0,18 mg/l im Mittel (2011). Es ist nur ein geringer abnehmender Trend in den U-Konzentrationen zu beobachten, währenddessen die As-Konzentrationen seit 2000 im Mittel unter 5 µg/l liegen.

(4) Welchen Anteil haben die identifizierten Quellen an der Belastungssituation?

Durchfluss- bzw. Frachtübersichten für die Freiberger Mulde sind in den Anlagen 50 bis 56 und für die Zwickauer Mulde in den Anlagen 57 bis 64 für die bereits behandelten Elemente im Zeitraum 2003-2008 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Hauptteil der As-, Cd-, Pb- und Zn-Belastung aus dem Einzugsgebiet der Freiberger Mulde und der Hauptteil der Ni-, und U-Belastung aus dem Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde stammen. Im Belastungsgebiet Freiberg tritt ein bedeutender Frachtanteil der Elemente Cd (21 %) und Zn (25 %) der Freiberger Mulde aus bilanzierbaren Punktquellen zu. Für die Frachtbilanz der Zwickauer Mulde sind die Frachtanteile des As (16 %) und U (51 %) aus Punktquellen des Belastungsgebietes Schlema bedeutsam. Der Blick in die Belastungsgebiete selbst zeigt jedoch auch, dass nicht alle Einträge in die Fließgewässer durch diese Punkquellen erklärt werden können. Diese Aussage trifft vor allem auf das Belastungsgebiet Freiberg zu, in dem die mengenmäßig bedeutenden Elemente Cd und Zn zu weniger als 50 % aus Punktquellen erklärt werden können. Aufgrund der großen Unsicherheiten in der Bilanzierung der Schüttung der Punktquellen wie des Stangenbergbaches, des VGS und des HSU und der damit verbundenen Unsicherheit in der Bilanzierung der emittierten Frachten, sind Unterschätzungen nicht auszuschließen. Für die Freiberger Mulde unterhalb des Belastungsgebietes ist der Zufluss der Zschopau als wasserreicher Fluss zu berücksichtigen, der zumeist die Konzentrationen der Freiberger Mulde verdünnt, jedoch den entscheidenden Frachtzuwachs beim Element As liefert. Im Belastungsgebiet Schlema geht die Bilanz für die Zwickauer Mulde unter Berücksichtigung der Zuflüsse Schwarzwasser und Schlemabach bei den Problemelementen As und U, aber auch bei Ni und Zn nahezu auf (Tab. 7).

Tab. 7: Frachtbilanzen für die Freiberger und Zwickauer Mulde unter besonderer Berücksichtigung der Belastungsgebiete, Betrachtungszeitraum 2003-2008

Zeitraum 2003-2008	**FM-Freiberg**	**ZM-Schlema**	**FM-Freiberg**	**ZM-Schlema**
	As	**As**	**Cd**	**Cd**
Mündung [t/a]	19,1	7,53	1,86	0,586
Input Belastungsgebiet [t/a]	0,238	0,597	0,042	0,057
Output Belastungsgebiet [t/a]	1,51	4,62	0,930	0,203
Zunahme im Belastungsgebiet [t/a]	1,27	4,02	0,888	0,146
davon durch Punktquellen erklärbar	<0,068	1,20	<0,399	<0,015
davon durch Zuflüsse erklärbar	-	2,52	-	<0,155
Anteil des Belastungsgebietes an der Gesamtfracht des Teileinzugsgebietes [%],	**7**	**53**	**48**	**25**
davon aus Punktquellen	**<1**	**16**	**21**	**<3**

FM-Freiberg	**ZM-Schlema**	**FM-Freiberg**	**ZM-Schlema**	**FM-Freiberg**	**ZM-Schlema**	**FM-Freiberg**	**ZM-Schlema**	**ZM-Schlema**
Cu	**Cu**	**Ni**	**Ni**	**Pb**	**Pb**	**Zn**	**Zn**	**U**
11,8	10,2	6,32	9,56	31,5	6,38	142	66,4	4,93
0,305	1,01	0,722	1,21	0,273	0,388	2,36	5,03	0,306
2,01	2,84	0,783	4,93	3,73	1,11	80,2	19,0	3,45
1,70	1,83	0,061	3,72	3,46	0,722	77,8	14,0	3,14
<0,651	<0,113	0,161	<0,161	0,202	<0,038	35,9	<0,502	2,51
-	1,37	-	4,23	-	<0,442	-	13,2	0,402
14	**18**	**1**	**39**	**11**	**11**	**55**	**21**	**64**
6	**<1**	**<3**	**<2**	**<1**	**<1**	**25**	**<1**	**51**

(5) Welche weiteren Möglichkeiten zur Schadstoffreduzierung in den Belastungsgebieten gibt es?

(5a) Hauptbelastungsgebiet Freiberg / Freiberger Mulde

Aus den identifizierten hydraulischen und stofflichen Problemen (Anlage 41) ergibt sich dringender Handlungsbedarf, sowohl hinsichtlich des Grabens als Reaktions-, Sedimentations- und (versus) Transportraum als auch hinsichtlich der Quellen und des Ausmaßes der Belastung. Es müssen demnach die hydraulischen Verhältnisse verbessert, die identifizierten (Schad-) Stoffströme quantifiziert/entkoppelt und die Schadstoffeinträge (durch passive oder technische Maßnahmen) minimiert werden.

Es sind beide Lösungsansätze notwendig, um das System wasserwirtschaftlich wie ökologisch zu sanieren, aber auch den Sanierungserfolg zu erhalten und die Wiederverschlammung des RG zu minimieren. Mehrere unter- und übertägige Varianten der geregelten und nachhaltigen Schadstoffrückhaltung wurden ebenso geprüft wie Varianten zur Sanierung des Roten Grabens (Anlage 42). Bei den Varianten zur Sanierung des Roten Grabens wurde die Variante C priorisiert, die eine Entschlammung und bauliche Sanierung (Erhaltung mit Wasserlauf) auf der Teilstrecke zwischen VGS und HSU und eine Verrohrung und Abdeckung auf der Teilstrecke zwischen HSU und Halsbrücke (Erhaltung als Bodendenkmal) mit Schlammbergung vorsieht (Janneck et al. 2008). Nur bei einer vollständigen Entfernung der schwermetallhaltigen Schlämme aus dem Graben lässt sich die Gefährdung der o.g. Schutzgüter beseitigen. Eine ebenfalls diskutierte in-situ-Verwahrung der Schlämme mit Hilfe einer Oberflächenabdichtung führt nicht zu einer vollständigen Eliminierung des Gefährdungspotenziales (Janneck et al. 2009b).

Die Varianten G und F sind aus ökologischer Sicht bedenklich. Der Totalabschlag der Grubenwässer in Höhe des Huthauses des Thurmhof Hilfsstollns aufgrund der Zerstörung der Stützmauern am Roten Graben durch das Hochwasser im August 2002 wirkte sich sofort negativ auf die Artenzahl und Abundanzen des Makrozoobenthos als mittlere Stufe in der Nahrungskette des Ökosystems Fluss aus. Die Artenzahl sank mit der vollständigen Übergabe des Roten Grabens an die Mulde deutlich ab und erholte sich erst ab Obergruna (sonst bereits ab Kleinvoigtsberg) wieder. Beim Fischbestand zeigte sich ebenfalls ein deutlicher Bestandseinbruch nach dem ersten Abschlag des Roten Grabens in die Mulde. Untersuchungen an Wassermoosen bestätigten den Einfluss der Bergbau- und Hüttenaltlasten bereits ab Muldenhütten und verstärkt ab Beginn der Abschläge vom Roten Graben (Kunau 2004).

Weiterhin muss angemerkt werden, dass es bei der Sanierung des RG verschiedene Randbedingungen gibt, die Belange des Natur- (FFH-Gebiet „Oberes Freiberger Muldetal“) und Denkmalschutzes (technisches Denkmal, Antrag der „Montanregion Erzgebirge“ als UNESCO-Weltkulturerbe) berühren. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Verbleib der Grabensedimente, da es aufgrund seiner hohen Schwermetall- und Arsengehalte und seiner Konsitenz nicht primär einbau- oder deponierbar ist. Nach einer Schadstoffimmobilisierung und Stabilisierung wäre ein Einbau auf Flächen der Saxonia mbH Freiberg während der noch durchzuführenden Sanierungsarbeiten denkbar (Janneck et al. 2008). Das Erdstoffmanagement der Saxonia mbH zielt auf die Verwertung von Bodenaushub bei Bauvorhaben zur Altlastensicherung, so ist eine Erdstoffmanagementfläche auf dem Hammerberg mit bis zu 400.000 m^3 mit 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. Dabei sollte sich auf die Wässer aus dem VGS konzentriert werden, da hier mehr als 80 % der Cd- und Zn-Frachten des Roten Grabens erfasst werden können. Die Variante 2.3.2 bietet mit einer komplett oberirdischen Behandlung des gesamten Volumenstroms des VGS

und einer Cd-Eliminierung von >90 % wirtschaftliche und umsetzungstechnische Vorteile. Jedoch ist es in jedem Fall erforderlich, die unbelasteten (Kühlwasser) von den belasteten Wässern zu trennen, eine überirdische Ableitung sollte geprüft werden. Eine passive Behandlung wird am VGS aufgrund der großen Volumenströme und entsprechenden Schlammanfalls als nicht machbar eingeschätzt (Janneck et al. 2008).

Sowohl die Untersuchungen am Stangenbergbach als auch am Roten Graben zeigten die Bedeutung der Gesamtschau möglicher Einzelmaßnahmen an den Standorten der SAXONIA-Liegenschaften. Der Blick sollte in „3D“ sowohl räumlich in die Fläche als auch über den (Alt-)Bergbau in die Tiefe gerichtet werden, 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 Rothschönberger Stolln oder zwischen dem Revier Morgenstern und dem Verträglichen Gesellschaft Stolln so wichtig.

Mit dem Verständnis des komplexen Systems Grube – Halde – Industriefläche gewinnt die Diskussion über mögliche technische Eingriffe zur Schadstoffminimierung ein neues Niveau, indem einige Varianten eine gemeinsame Behandlung mehrerer Punktquellen vorsehen (Anlage 42). Bei einer Bündelung der Mehrheit der Quellen (Variante 3) läge der Effekt der Cd-Eliminierung bei 93 % (für die Freiberger Mulde) bei einem zu reinigenden Volumenstrom von ca. 252 m^3/h. 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 Freiberger Mulde an der Messstelle Obergruna bewirken (Martin et al. 2010a). Die Bündelung der Quellen im Rothschönberger Stolln und eine zentrale Behandlung an dessen Mundloch (Variante 4) würde zwar eine nahezu vollständige Entfernung des Schadelements aus den Punktquellen (Freiberger Mulde + Triebisch) erbringen, die zu behandelnde Wassermenge wäre mit ca. 2.200 m^3/h jedoch doppelt so groß wie die Kapazität der WBA Schlema (max. 1.150 m^3/h).

Seitens des Freistaates Sachsen wurde durch das Sächsische Staatsministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie an den Koordinierungsrat der FGG Elbe ein Antrag für die Inanspruchnahme von Projektmitteln aus dem Projekt ELSA für eine konkrete Maßnahme am Roter Graben mit dem Ziel der „nachhaltigen Reduzierung der Schwermetalleinträge aus den Erzbergbaurevieren im Raum Freiberg“ gestellt.

(5b) Hauptbelastungsgebiete Schlema-Alberoda und Crossen / Zwickauer Mulde

Die Sanierungstätigkeit auf den Wismut-Liegenschaften ging kontinuierlich voran, wobei die Arbeiten untertage am weitesten fortgeschritten sind (Tab. 8). Arbeiten, die andauern, sind Sanierungsarbeiten an Spülhalden und verbliebenen Berghalden sowie die Wasserreinigung. Die Wasserreinigung wird die Sanierungsaufgabe mit der längsten Zeitdauer sein. Dementsprechend sind auch die Langzeitaufgaben der Wismut GmbH ausgerichtet (Tab. 8).

Tab. 8: Übersicht über den Stand der Sanierungstätigkeit und die Langzeitaufgaben der Wismut GmbH (alle Wismut-Liegenschaften) (Wismut GmbH 2013a, Mann 2012)

Schwerpunkte und Stand der Sanierungstätigkeit (Wismut 10.05.2013)	**Sicherung der Sanierungsergebnisse und Langzeitaufgaben (Mann 2012)**
- Stilllegung der Bergwerke durch Abwerfen von Grubengebäuden (99 %), Verfüllung von Hohlräumen (99 %), Sicherung der Grubengebäude (94 %) - Flutung der Gruben (98 %) - Demontage und Abbruch kontaminierter Anlagen und Gebäude (90 %) - Sanierung von Halden und Schlammteichen durch Konturierung/Profilierung (93 %), Flächensanierung/-abdeckung (73 %) - Wasserbehandlung (53 %)	- Dokumentation, Wissens-Erhalt und Informationsmanagement - Kontrolle, Reparatur, Wartung und Instandhaltung von Abdeckungen - Behandlung von kontaminierten Flutungs- und Sickerwässern - Sicherung von langfristig offen zu haltenden Grubenbauen - Umgebungsüberwachung (Monitoring) - Beseitigung von Bergschäden

Die Beeinflussung der Zwickauer Mulde aus Objekten der ehemaligen SDAG/SAG Wismut, jetzt Wismut GmbH, findet vornehmlich am Standort Schlema statt. Die beiden wesentlichsten Elemente der Belastung sind Uran und Arsen. Arsen stammt überwiegend aus Bereichen des Altbergbaus aus dem Raum Schneeberg. Aus der Grube Schneeberg wird weiterhin mit den derzeitigen Emissionen hinsichtlich Menge (ca. 5 Mio. m3) und Qualität gerechnet. Uran ist das charakteristische Element des Uranbergbaus, der Grubenflutung und der Haldensanierung. Der Hauptbeitrag des Uran-Konzentrationsanstieges in der Zwickauer Mulde erfolgt durch die Wasserbehandlungsanlage Schlema mit einem Durchsatz von 7 bis 8 Mio. m³ Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda pro Jahr. Die Stoffnachlieferung wird als rückläufig eingeschätzt. Die Emissionen aus den Gruben werden mittelfristig gegenüber denen aus den Halden dominieren (Meyer et al. 2012). Die Wasserbehandlung ist eine der wichtigsten Langzeitaufgaben der Wismut GmbH (30 Jahre (Wismut GmbH 2013a)), die parallel eine technologisch stabile Rückstandsverwahrung an den jeweiligen Standorten erfordert. Haldenemissionen werden bereits teilweise bereits behandelt (Versturz nach untertage, WBA mit Ionenaustauscher). Hinsichtlich einer Behandlung weitere Lastanteile wird neben der Beobachtung der Wirkung der natürlichen Verminderung nach erfolgter Abdeckung eine Kosten-/Nutzenbetrachtung für notwendig erachtet (Kreyβig et al. 2011).

Einige Aspekte im Umgang mit belasteten Wässern und ihrer Abgabe in Fließgewässer sind unter rechtlicher Sicht zu betrachten. Haldensickerwässer werden zu Punktquellen, wenn sie im Rahmen einer Haldensanierung gefasst werden. Es gibt keinen grundlegenden Umgang mit Haldensickerwässern, die Verfahrensweisen sind aber in der Diskussion. Fakt ist, dass sie in den meisten Fällen eine erhebliche Belastung für die Oberflächenwässer darstellen.

Emissionsseitige Anforderungen für die Direkteinleitung in ein Gewässer sind in §23 und §57ff WHG geregelt, wobei nach §57 WHG der stets einzuhaltende Stand der Technik gilt. Unter den Randbedingungen Behandlungsvolumen und Zulaufkonzentration wurde für die WBA Schlema eine maximale Ablaufkonzentration von 0,3 mg/l Arsen und 0,5 mg/l Uran festgesetzt. Die Einleitgenehmigungen von gefassten Sickerwässern können unter dem Aspekt der Unverhältnismäßigkeit davon abweichen (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.
Neben der Direkteinleitung gibt es einerseits die Möglichkeit der Mitbehandlung in der WBA Schlema-Alberoda, andererseits die Behandlung in separaten WBAs. Seit 2006 werden Sickerwässer der Halden 66/207 und 366 über Bohrungen in den Flutungsraum der Grube Schlema-Alberoda verstürzt und so indirekt in der WBA Schlema mitbehandelt. Der überwiegende Teil der Sickerwässer der Halde 371/I wird seit 2009 in einer separaten Anlage gereinigt. Eine eventuelle Einbeziehung weiterer Sickerwässer (Halde 371/II bzw. Borbachtal) in eine konventionelle Reinigung wird von deren zeitlicher Konzentrations- bzw. Frachtentwicklung, der Prognose der Reinigungskosten sowie der Einführung neuer rechtlicher Regelungen abhängig sein (Meyer et al. 2012).

(6) Gibt es weitere Möglichkeiten des Schadstoffrückhalts im Einzugsgebiet?

Neben dem Muldestausee als größtem Wasserreservoir im Einzugsgebiet der Mulde gibt es an den Nebenflüssen und Bächen zahlreiche Talsperren, Speicher und Regenrückhaltebecken, die möglicherweise ebenfalls zu einem Elementrückhalt im Fließgewässersystem beitragen. Seitens des Landesmessnetzes Oberflächenwasser liegen keine systematischen räumlichen und zeitlichen Untersuchungen der Zu- und Abflüsse dieser Stauhaltungen vor. Es wurden die beiden großen Talsperren (TS) Eibenstock und Kriebstein betrachtet, für die es an den Zu- und Abläufen partielle Untersuchungen gibt. Die Talsperren unterscheiden sich hinsichtlich der Größe des Einzugsgebietes, des Stauraums, der Zuflussmenge und Nutzung sehr voneinander (Tab. 9). Die Wirkung des Muldestausees wird in Junge (2013) beschrieben.

Tab. 9: Übersicht über wichtige Kenngrößen der Talsperren Muldenstein, Eibenstock und Kriebstein

	EZG [km²]	**Stauraum [Mio. m³]**	**Jahres- Zufluss [Mio. m³]**	**Jahres- Zufluss / Stauraum**	**Gewöhnlicher HW-Rückhalteraum [Mio. m³]**
Muldestausee	6.170	120	2.021	17	k.A.
TS Eibenstock	200	74,65	102,5	1,4	10,0
TS Kriebstein	1.738	11,66	738	63	0

Die **TS Eibenstock** im Oberlauf der Zwickauer Mulde ist die flächenmäßig größte Talsperre in Sachsen und verfügt gleichfalls über das größte Fassungsvermögen aller sächsischen Talsperren. Sie besitzt eine Vorsperre im Zulauf der Zwickauer Mulde (VS Schönheiderhammer) und vier Vorbecken (VB Rähmerbach, VB Geidenbach, VB Rohrbach, VB Weißbach) an kleineren Zuflüssen (Anlage 67). Ihre Hauptaufgabe ist die Trinkwasserversorgung. Sie dient weiterhin dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung und der Energiegewinnung.

Zur Betrachtung der Wirkung der TS Eibenstock auf die Belastung der Zwickauer Mulde werden die beiden Punkte Schönheide (Input) und Blauenthal (Output) an der Zwickauer Mulde betrachtet. Pegelseitig gilt Schönheide 3 für Schönheide (Faktor 0,981) und Neidhardtsthal für Blauenthal (Faktor 1,0).

Bei den Konzentrationen der bereits diskutierten umweltrelevanten Elemente zeigt sich mit Ausnahme des Elementes Mangan eine Abnahme der Konzentrationen. Die ermittelten Frachtbilanzen sind für Schönheide (Input) und Blauenthal (Output) nur aus den Jahren 2001-2004 und 2009 beidseits für die Gesamtgehalte (n=5 … n=10) vorhanden (Tab. 10). Das führt zu großen Unsicherheiten in der Aussage, zumal wie 2003 belegbar, höhere TS-Abflüsse bei ähnlichen Konzentrationen zu höheren Frachten führen und einen Austrag vortäuschen können (Anlagen 68 bis 70). Insgesamt wird eingeschätzt, dass die TS Eibenstock über ein Rückhaltepotential verfügt, das elementspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Da die vorgenommene Quantifizierung nur auf wenigen Daten beruht, sollten die Angaben als Anhaltspunkte dienen. Ein weiterer erwähnenswerter Effekt ist die Homogenisierung der Gehalte während der TS-Passage.

Tab. 10: Übersicht über die Durchflussmengen (Q), Gesamtgehalte (As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, U, Zn), abfiltrierbare Stoffe (AFS), Gesamtfrachten in der Zwickauer Mulde und ihre Änderungen während der Passage der Talsperre Eibenstock, Input: Schönheide (OBF38900), Output: Blauenthal (OBF39000), Angaben der Konzentrationen in µg/l, MQ in m^3/s, AFS in mg/l, Angaben der Frachten in t/a

	Q* **In→Out**	**As** **In→Out**	**Cd** **In→Out**	**Cu** **In→Out**	**Mn** **In→Out**
Konz.					
2001	2,7 ↓ 1,8	2,1 ↓ 1,7	0,44 ↓ 0,23	3,6 ↓ 2,4	136 ↑ 156
2002	4,4 ↓ 3,9	2,6 ↓ 1,9	0,48 ↓ 0,37	4,4 ↓ 3,3	133 ↑ 180
2003	1,5 ↑ 3,6	2,0 → 2,0	0,35 ↓ 0,30	4,2 ↓ 4,0	125 ↑↑ 200
2004	2,7 ↓↓ 1,2	4,0 ↓ 2,2	0,50 ↓ 0,30	4,8 ↓ 2,7	141 ↑ 177
2009	3,8 ↓ 2,4	3,6 ↓↓ 1,8	0,33 ↓ 0,22	4,4 ↓ 2,4	114 ↑ 115
Fracht					
2001		0,151 ↓ 0,084	0,031 ↓↓ 0,012	0,261 ↓↓ 0,116	10,7 ↓ 7,23
2002		0,316 ↓ 0,239	0,063 ↓ 0,044	0,540 ↓ 0,438	17,2 ↑ 21,7
2003		0,089 ↑ 0,120	0,019 → 0,019	0,254 ↑ 0,372	6,73 ↑ 11,6
2004		0,563 ↓↓ 0,142	0,046 ↓↓ 0,021	0,575 ↓↓ 0,207	14,6 ↓ 12,3
2009		0,587 ↓↓ 0,171	0,039 ↓ 0,020	0,544 ↓ 0,253	14,6 ↓ 11,4

*Mittelwert der realen Durchflüsse (nur Probenahmetage mit Beprobung der Gesamtgehalte)

	Ni **In→Out**	**Pb** **In→Out**	**U** **In→Out**	**Zn** **In→Out**	**AFS** **In→Out**
Konz.					
2001	4,1 ↓ 3,0	1,8 ↓↓ 0,69	3,8 ↓↓ 1,3	31 ↓ 21	3,6 ↓↓ 1,8
2002	2,4 ↓ 2,2	1,4 ↓↓ 0,64	3,9 ↓ 2,0	30 ↓ 24	5,3 ↓ 3,9
2003	2,5 ↑ 2,8	0,45 ↓ 0,32	2,3 ↓ 2,0	25 ↓ 23	3,8 ↓ 3,7
2004	33 ↓↓ 5,3	2,3 ↓↓ 0,51	4,6 ↓↓ 1,6	33 ↓ 23	10 ↓↓ 1,2
2009	2,3 ↑ 2,5	1,3 ↓↓ 0,27	3,8 ↓↓ 1,9	24 ↓ 18	3,8 ↓ 2,4
Fracht					
2001	0,379 ↓↓ 0,144	0,173 ↓↓ 0,026	0,247 ↓↓ 0,064	2,39 ↓↓ 1,00	288 ↓ 145
2002	0,306 ↓ 0,271	0,192 ↓↓ 0,096	0,476 ↓ 0,266	3,73 ↓ 3,03	603 ↓ 358
2003	0,113 ↑ 0,140	0,024 ↑ 0,033	0,119 ↑ 0,142	1,27 ↑ 1,32	170 ↓↓ 78
2004	2,44 ↓↓ 0,263	0,442 ↓↓ 0,048	0,575 ↓↓ 0,117	3,43 ↓↓ 1,59	1870 ↓↓ 139
2009	0,169 ↑ 0,220	0,296 ↓↓ 0,024	0,483 ↓↓ 0,175	2,55 ↓ 1,74	390 ↓ 201

Geophysikalische Untersuchungen an der VS Schönheiderhammer als größte Vorsperre der TS Eibenstock mit 2,54 Mio. m³ Stauvolumen ergab eine Sedimentmenge von 230.000 m^3 (Fugro Consult GmbH 2011), wobei die Sedimentschichten Mächtigkeiten bis zu 3,90 m erreichen können. Die Qualität der Sedimente wurden im Längsverlauf der Vorsperre untersucht, wobei die Gesamtprobe im Mittelpunkt stand (Bewertung nach LAGA) (Pöyry GKW GmbH 2010). Im Konflikt mit den Vorgaben der WRRL steht das Arsen, welches aus dem oberen Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde bereits mit mittleren Konzentrationen von 140 mg/kg in den feinkörnigen Sedimenten (<63 µm) bzw. im Zulauf Schönheide mit 210 mg/kg in der Fraktion <20 µm in Erscheinung tritt (Anlage 71). Die Änderungen innerhalb der Talsperre sind gering und mit den geringen Stichproben nicht gesichert auszuweisen.

Die **TS Kriebstein** im Unterlauf der Zschopau wird durch ein großes Einzugsgebiet gespeist. Sie dient vorrangig der Energiegewinnung, Fischerei, Schifffahrt und der Naherholung. Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Zufluss/Stauraum bietet sie kaum Hochwasserschutz (Anlage 67).

Zur Betrachtung der Wirkung der TS Kriebstein auf die Belastung der Zschopau werden die beiden Punkte Ringethal (Input) und Kriebethal (Output) betrachtet (Anlage 72). Pegelseitig gilt Kriebstein UP. Da der Durchfluss während der Passage durch die TS Kriebstein durch

seitliche Zuflüsse nur geringfügig zunimmt, ist es unter dem Gesichtspunkt einer Rückhaltefunktion ausreichend, die Konzentrationen am Zu- und Ablauf zu vergleichen. Der Vergleich ist nicht stichhaltig, da Zu- und Ablauf nicht am gleichen Tag beprobt und auch die Gesamtgehalte nicht immer analysiert wurden. In den gemittelten (Jahres-)Durchflüssen sind große Unterschiede zu erkennen. In den Jahren 2001 und 2002 liegen die Durchflüsse am Zu- und Ablauf auf ähnlichem Niveau und die Konzentrationen der Elemente As, Cd, Cu, Ni, U, Zn und die AFS verringerten sich (häufig nur geringfügig) (Tab. 11). Aufgrund der Inkonsistenz der Probenahme kann der TS Kriebstein kein wesentliches Rückhaltepotential bescheinigt werden.

Tab. 11: Übersicht über die Durchflussmengen (Q), Gesamtgehalte (As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, U, Zn), abfiltrierbare Stoffe (AFS), Gesamtfrachten in der Zschopau und ihre Änderungen während der Passage der Talsperre Kriebstein, Input: Ringethal (OBF35200), Output: Kriebethal (OBF35250), Angaben der Konzentrationen in µg/l, MQ in m^3/s, AFS in mg/l, Angaben der Frachten in t/a

	Q* **In→Out**	**As** **In→Out**	**Cd** **In→Out**	**Cu** **In→Out**	**Mn** **In→Out**
Konz.					
2001	29,9 ↑ 31,4	7,8 ↓ 7,1	0,30 ↓ 0,25	5,9 ↓ 4,5	61 ↑ 85
2002	13,1 ↑ 13,9	15 ↓ 10	0,11 ↑ 0,19	4,8 ↓ 4,6	75 ↑ 110
2003	17,3 ↑ 38,3	8,9 ↑ 9,9	0,15 ↑ 0,17	4,6 ↑ 19	42 ↑↑ 110
2004	23,8 ↑ 33,3	8,0 ↑ 9,7	0,18 → 0,18	3,8 ↑ 4,9	38 ↑↑ 94
Fracht					
2001		9,81 ↓ 7,91	0,436 ↓ 0,361	7,28 ↓ 5,84	80,2 ↑ 87,1
2002		3,00	0,145	2,26	30,9
2003		5,07 ↑ 5,98	0,119 ↑ 0,147	2,85 ↑ 5,87	27,4 ↑ 86,1
2004		6,26 ↑ 9,22	0,235 ↑ 0,251	3,56 ↑ 5,36	36,9 ↑ 83,0

*Mittelwert der realen Durchflüsse (nur Probenahmetage mit Beprobung der Gesamtgehalte)

	Ni **In→Out**	**Pb** **In→Out**	**U** **In→Out**	**Zn** **In→Out**	**AFS** **In→Out**
Konz.					
2001	4,6 ↓ 4,2	3,1 ↑↑ 16	0,60 ↓ 0,55	32 ↓ 28	15 ↓↓ 6,8
2002	4,1 ↓ 3,4	2,0 ↑ 2,3	1,0 ↓ 0,65	11 ↑ 20	7,2 ↓ 6,4
2003	5,0 ↓ 4,4	1,4 ↑↑ 8,3	0,73 ↓ 0,68	21 ↑ 24	6,5 ↑ 9,9
2004	4,5 ↓ 4,2	1,3 ↑↑ 2,9	0,68 → 0,68	20 → 20	6,2 ↑ 12
Fracht					
2001	5,72 ↓ 5,43	4,36 ↑ 19,6	0,75 ↓ 0,65	41,8 ↓ 38,9	19200 ↓↓ 8850
2002	1,87	0,73	0,27	12,8	4030 ↓ 2530
2003	3,17 ↑ 3,43	0,83 ↑ 10,4	0,43 → 0,44	15,0 ↑ 24,2	5060 ↑ 11600
2004	4,60 ↓ 4,47	1,54 ↑ 4,00	0,55 → 0,55	23,0 ↑ 28,1	8170 ↑ 15200

Stauhaltungen jeder Art führen zu verringerten Strömungsgeschwindigkeiten und damit zum verstärkten Absetzen feinkörnigen Materials aus der mitgeführten Schwebstofffracht. Die abgesetzten Materialien verringern den nutzbaren Stauraum und können die Wasserqualität verschlechtern. Geophysikalische Untersuchungen zur Ermittlung der seit Inbetriebnahme der Talsperre im Jahr 1930 abgelagerten Sedimente wurden 1992 (Forkmann u. Hoppe 1992) und 2009 (analytec 2010) durchgeführt, nach dem 1975 (Badura u. Schmegg 1975) bereits eine erhebliche Verlandung der Ober- und Mittellaufes festgestellt wurde. Zwischen 1975 und 1992 ist eine eindeutige Tendenz der Verlagerung der Sedimente vom Ober-/Mittel- in den Unterlauf der Talsperre zu erkennen. Die 1975 ermittelte Sedimentmenge von ca. 4,3 Mio. m^3 konnte bei den Untersuchungen im Herbst 2009 nicht bestätigt werden. Derzeit wird von einem potenziell zu beräumenden Sedimentvolumen von 355.000 m^3 ausgegangen.

Im Vergleich mit VS Schönheiderhammer (Anlage 73) liegen die As-Konzentrationen hier auf geringerem Niveau, jedoch immer noch über der UQN (40 mg/kg). Geochemisch gesehen sind, so es die Vergleichbarkeit an zwei Punkten überhaupt erlaubt, zwischen 1992 und 2009 keine wesentlichen Änderungen festzustellen (Anlage 73).

(7) Wie hoch ist das Nachlieferungspotential an Schwermetallen und Arsen im Belastungsabschnitt Freiberg?

Die Frage nach der Nachlieferung belasteter Schwebstoffe und ihre Sedimentation am Gewässergrund stellte sich bereits nach dem Hochwasser 2002, nachdem große Mengen belasteter Sedimente innerhalb der Gewässer verfrachtet und nachfolgend in die Auen ausgetragen wurden. Das Ausbringen von Sedimentationsfallen und die monatliche Probenentnahme erwiesen sich 2003 als gangbare Variante zur Gewinnung aktuell abgelagerter Schwebstoffe. Es wurde die Fraktion <20 µm untersucht. Mit der Umstellung der Sedimentanalytik von der Fraktion <20 µm auf die Fraktion <63 µm im sächsischen Oberflächenwassermessnetz erhob sich erneut die Frage nach der Vergleichbarkeit der beiden Fraktionen, die seit mindestens drei Jahrzehnten (Ackermann et al. 1983, Hellmann 1983) diskutiert wird.

Im Jahr 2012 wurden im April drei, später vier Sedimentationsfallen im Abschnitt zwischen Berthelsdorf und Halsbrücke (Berthelsdorf-Straßenbrücke, Muldenhütten-oh. Hüttenbach, Hilbersdorf-Straßenbrücke, Halsbrücke-Altväterbrücke) ausgebracht, die sedimentierte Schwebstoffe durch Nasssiebung im jeweiligen Flusswasser auf beide Korngrößen fraktioniert und mittels Königswasserauszug aufgeschlossen. Die Untersuchung des Korngrößeneffekts konnte somit an relativ unbelasteten Proben (Berthelsdorf) und hoch belasteten Proben (Halsbrücke) untersucht werden.

Methodischer Aspekt

Die gesammelten Sedimente sind insgesamt sehr feinkörnig, wodurch eine quantitative Ermittlung des Feinkornanteils nicht ohne immensen Aufwand möglich war. Die Elementkonzentrationen unterscheiden sich zwischen den beiden Fraktionen nur gering (Anlagen 74 bis 76). Im Mittel ergibt sich bei den im Belastungsabschnitt charakteristischen umweltrelevanten Elementen (Ag, As, Vd, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn) ein Anreicherungsfaktor von 1,1 in der Fraktion <20 µm gegenüber der Fraktion <63 µm (Tab. 12). Dabei ist der Unterschied zwischen gering und hoch belasteten Proben gering.

Tab. 12: Mittlere Anreicherungsfaktoren (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

	n	**Ag**	**Al**	**As**	**Ba**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**
BE	*8*	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1
MU	*5*	1,1	1,2	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
HI	*8*	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
HA	*8*	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0
Mittel		**1,1**	**1,1**	**1,1**	**1,0**	**1,1**	**1,1**	**1,1**	**1,1**

	Fe	**Mn**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Sb**	**Sn**	**V**	**Zn**
BE	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1		1,1	1,0	1,1
MU	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1
HI	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
HA	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1
Mittel	**1,1**	**1,1**	**1,0**	**1,0**	**1,1**	**1,1**	**1,1**	**1,0**	**1,1**

BE-Berthelsdorf, MU-Muldenhütten, HI-Hilbersdorf, HA-Halsbrücke

Stofflicher Aspekt

Die Elementkonzentrationen nehmen von Berthelsdorf bis Halsbrücke elementspezifisch bis zu einer Größenordnung zu (Tab. 13). Die Variationsbreite der Elementgehalte ist in Berthelsdorf als unbelastetem Standort am geringsten und in Halsbrücke am höchsten (Anlagen 77 und 78). Die sehr geringen Konzentrationen in Halsbrücke in den beiden Sammelzeiträumen 23.07.2012-21.08.2012 und 21.08.2012-18.09.2012 sind derzeit nur mit einem Eintrag von unbelastetem Material (vermutlich Baumaßnahmen) zu erklären, da das Sediment auch

aufgrund seiner hellbeigen Farbe nicht zu dem gewöhnlich graubraunen Erscheinungsbild der Proben passt und dieser Effekt nur am Punkt Halsbrücke auftritt.

Im untersuchten Abschnitt ist bei einigen Elementen bereits ein signifikanter Anstieg zwischen Berthelsdorf und Muldenhütten zu verzeichnen, andere Elemente haben ihr Maximum in der Konzentrationszunahme zwischen Hilbersdorf und Halsbrücke. Es sind mittlere Anreicherungsfaktoren von 1,5 und mehr zwischen
- Berthelsdorf und Muldenhütten: Pb, Sb > Sn > Ag, Zn > Cd, Cu, Mo, As
- Muldenhütten bis Hilbersdorf: Zn > Ag, Cd, As, Sn > Mo, Pb, Cu, Co, Ni
- Hilbersdorf bis Halsbrücke: Ag > Sn, Sb > Zn, As, Co, Cd, Cu zu finden.

Tab. 13: Mittlere Elementgehalte in den sedimentierten Schwebstoffen (Fraktionen <20 µm und <63 µm) aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, mittlere Anreicherungsfaktoren (AF) bezogen auf Berthelsdorf

	BE<20	**BE<63**	**MU<20**	**MU<63**	**HI<20**	**HI<63**	**HA<20**	**HA<63**
Ag [mg/kg]	0,96	0,96	1,9	1,7	4,7	4,1	28	31
AF			2,0	1,8	2,5	2,4	6,0	7,6
As [mg/kg]	63	57	91	87	190	160	300	280
AF			*1,4*	*1,5*	*2,9*	*2,9*	*4,8*	*4,9*
Al [mg/kg]	27.000	25.000	53.000	48.000	38.000	35.000	33.000	32.000
AF			*2,0*	*1,9*	*1,4*	*1,4*	*1,2*	*1,3*
Ba [mg/kg]	420	410	460	440	540	520	470	490
AF			*1,1*	*1,1*	*1,3*	*1,3*	*1,1*	*1,2*
Cd [mg/kg]	10	10	17	16	41	38	63	59
AF			*1,7*	*1,7*	*4,0*	*3,9*	*6,1*	*6,1*
Co [mg/kg]	17	16	14	14	25	23	42	40
AF			*0,9*	*0,9*	*1,5*	*1,4*	*2,5*	*2,5*
Cr [mg/kg]	43	40	40	39	63	58	47	48
AF			*0,9*	*1,0*	*1,5*	*1,4*	*1,1*	*1,2*
Cu [mg/kg]	70	66	110	110	210	190	320	310
AF			*1,6*	*1,6*	*3,0*	*2,9*	*4,5*	*4,6*
Fe [mg/kg]	32.000	30.000	29.000	27.000	33.000	31.000	33.000	32.000
AF			*0,9*	*0,9*	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,1*
Mn [mg/kg]	1.600	1.600	1.200	1.200	1.700	1.500	4.500	4.200
AF			*0,8*	*0,7*	*1,0*	*0,9*	*2,8*	*2,6*
Mo [mg/kg]	1,3	1,4	2,1	2,1	3,9	4,0	3,9	4,0
AF			*1,6*	*1,5*	*3,0*	*2,9*	*3,0*	*2,9*
Ni [mg/kg]	43	41	38	38	63	60	59	59
AF			*0,9*	*0,9*	*1,5*	*1,4*	*1,4*	*1,4*
Pb [mg/kg]	190	170	700	670	1.300	1.200	1.600	1.500
AF			*3,7*	*3,9*	*6,7*	*6,7*	*8,3*	*8,7*
Sb [mg/kg]	<8	(5,0)	19	19	26	23	56	49
AF			*ca. 4*	*3,8*	*ca. 5*	*4,6*	*ca. 11*	*9,8*
Sn [mg/kg]	13	11	30	26	60	56	180	160
AF			*2,3*	*2,3*	*4,7*	*5,0*	*14*	*14*
V [mg/kg]	27	26	25	24	28	27	28	28
AF			*0,9*	*0,9*	*1,1*	*1,0*	*1,1*	*1,1*
Zn [mg/kg]	680	630	1.300	1.200	4.100	3.700	7.900	7.200
AF			*1,9*	*2,0*	*6,1*	*5,9*	*12*	*12*

BE-Berthelsdorf, MU-Muldenhütten, HI-Hilbersdorf, HA-Halsbrücke

Eine Analyse von Schwebstoffen aus Sammlern für Untersuchungen der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH (Martin u. Engel 2012) in Muldenhütten ober- und unterhalb der nach dem Hochwasser 2002 errichteten Zyklopenmauer zeigt systematische kleinräumige Änderungen in den Arsen- und Schwermetallgehalten. Bei den Elementen Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, Zn konnte eine Zunahme um mehr als 10 % im Flussverlauf beobachtet werden. Besonders das umweltrelevante Elemente Cd sowie Zn nehmen auf diesem Flussabschnitt um mehr als das Doppelte zu (Anlage 79).

Zeitlicher Aspekt

Durch das Hochwasser 2002 wurden aus den Schlackenhalden des Muldebogens im Bereich Muldenhütten beachtliche Mengen der Elemente As, Pb, Sb und Sn in die Freiberger Mulde verfrachtet und in den Hochflutsedimenten 2002 entlang der Freiberger Mulde bis mindestens Nossen wiedergefunden. Durch das Ausbringen der Sedimentationsfallen konnten „Hotspots“ z.B. 2004 in Hilbersdorf (As, Sb) nachgewiesen werden, die Umlagerungen dieser kontaminierten Materialien innerhalb des Gewässers zuzuordnen sind (Anlagen 80 bis 82).

Die Konzentrationen der Elemente As, Pb, Cd, Cu, Ag, Al, Ba, Fe, Sb, Sn in den Schwebstoffen haben in Hilbersdorf und Halsbrücke zwischen 2003/2004 und 2012 um mehr als eine Größenordnung abgenommen (Tab. 14).

Für die Elemente Co, Cr, Ni sind die Veränderungen gering, genauso wie die generellen Änderungen am Punkt Berthelsdorf. Für die Elemente Cd und Zn ist zwar zwischen 2003 und 2004 eine Reduzierung der Gehalte festzustellen, aber nicht zwischen 2004 und 2012. Dies ist mit der Abhängigkeit der Elemente vom Durchfluss zu erklären (Anlage 83). Bei geringen Durchflüssen steigt das Zn/Cd-Verhältnis an, d.h. das ubiquitäre Element Zn nimmt im Vergleich zum Cd besonders bei extremem Niedrigwasser, wie im Sommer/Herbst 2003, zu.

Tab. 14: Mittlere Elementgehalte in den sedimentierten Schwebstoffen (Fraktion <20 µm) aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, mittlere Anreicherungsfaktoren (AF) bezogen auf Berthelsdorf

Punkt	Jahr	As		Ba		Cd		Co	
		Mittel mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*
FM 19 BE	**2003**	80	*7*	470	*7*	10	*22*	15	*29*
Berthels-	**2004**	79	*13*	450	*10*	6,8	*26*	17	*10*
dorf	**2012**	63	*19*	420	*14*	10	*8*	16	*8*
FM 17 HI	**2003**								
Hilbers-	**2004**	4.200	*106*	1.100	*19*	86	*79*	25	*7*
dorf	**2012**	190	*23*	540	*19*	41	*27*	23	*20*
FM 15 HA	**2003**	1.300	*15*	1.500	*18*	140	*42*	47	*35*
Hals-	**2004**	2.430	*42*	2.200	*26*	78	*32*	29	*20*
brücke	**2012**	300	*39*	470	*82*	63	*53*	38	*28*

Punkt	Jahr	Cr		Cu		Mn		Ni	
		Mittel mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*
FM 19 BE	**2003**	50	*9*	77	*7*	1.600	*32*	46	*38*
Berthels-	**2004**	49	*6*	69	*14*	1.200	*17*	40	*7*
dorf	**2012**	43	*11*	70	*11*	1.600	*20*	43	*11*
FM 17 HI	**2003**								
Hilbers-	**2004**	60	*21*	1.000	*64*	1.300	*8*	64	*11*
dorf	**2012**	63	*25*	210	*26*	1.700	*16*	63	*23*
FM 15 HA	**2003**	54	*9*	910	*14*	3.900	*70*	72	*27*
Hals-	**2004**	54	*8*	940	*22*	1.700	*36*	56	*14*
brücke	**2012**	47	*21*	320	*61*	4.500	*53*	59	*33*

Punkt	Jahr	Pb		Sb		Sn		Zn	
		Mittel mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*	**Mittel** mg/kg	***RSD*** *%*
FM 19 BE	**2003**	260	*10*	3,3	*27*	13	*81*	820	*24*
Berthels-	**2004**	220	*17*	2,6	*6*	7,7	*32*	540	*15*
dorf	**2012**	190	*6*			13		680	*6*
FM 17 HI	**2003**								
Hilbers-	**2004**	8.500	*19*	240	*26*	240	*34*	2.900	*9*
dorf	**2012**	1.300	*3*	60	*34*	60	*15*	4.100	*34*
FM 15 HA	**2003**	4.500	*17*	380	*49*	380	*380*	15.000	*49*
Hals-	**2004**	7.600	*30*	220	*44*	220	*220*	5.900	*26*
brücke	**2012**	1.600	*8*	180	*57*	180	*180*	7.900	*51*

Stellt sich die Frage, ob die 2002 abgespülten und verfrachteten hoch kontaminierten Materialien aus Muldenhütten nach 2004 aus dem System ausgetragen worden sind oder noch partiell im Flussbett ruhen und bei erhöhten Wasserständen aufgegriffen und transportiert werden. Nach dem Winterhochwasser, welches im Dezember 2012 und Januar 2013 in drei Wellen die Freiberger Mulde durchspülte, wurde am Punkt Halsbrücke eine Probe des frisch abgelagerten Hochflutsediments entnommen und analysiert.

Gegenüber 2002 konnte 2013 eine Abnahme der Elementgehalte von Ag, As, Cu, Pb, Sb, Sn ermittelt werden. Die Konzentrationen der Elemente Cd, Co, Cr, Ni, Zn blieben vergleichbar. Jedoch ist festzustellen, dass im Fall von Arsen die Konzentration in diesem Überflutungssediment höher ausfällt als in den Schwebstoffen in den Fallen. Dies spricht wiederum für eine durchflussinduzierte Nachlieferung aus Altsedimenten (Anlage 84).

(8) Welche Auswirkungen haben Hochwasserwellen auf den Schadstoffaustrag aus dem Belastungsgebiet Freiberg?

Ein Ziel der Einzelprojekte im ELSA-Verbund bestand darin, die Auswirkungen von Hochwässern auf das Schadstoffverhalten zu untersuchen, nach Möglichkeit an einem im Bearbeitungszeitraum auftretenden Hochwasser. Dies gelang für dieses Projekt am Beispiel eines Winterhochwassers, welches mit der dritten Hochwasserwelle fast den MHQ erreichte. Es wurde im Zeitraum vom 15.12.2012 bis 22.01.2013 an den beiden Punkten Freiberger Mulde-Halsbrücke (Altväterbrücke) und Münzbach-Mündung-Halsbrücke (Altväterbrücke) beobachtet, beprobt und die Gesamtprobe sowie eine filtrierte Probe analysiert.

Für das Belastungsgebiet Freiberg stand nach dem Hochwasser 2002 die bereits im Kap. 7 diskutierte Nachlieferung von Schadelementen durch Resuspension/ Remobilisierung von Altsedimenten bzw. die Frage nach dem Verteilungsverhalten dieser Elemente bei Hochwassersituationen im Blickpunkt. Neben dem Punkt Halsbrücke an der Freiberger Mulde als Output-Punkt des Belastungsgebietes Freiberg wurde der Münzbach ausgewählt, da insbesondere in dessen Oberlauf ebenfalls das typische Elementspektrum der Freiberger Bergbau- und Hüttenregion zur Verfügung steht, das im Stadtgebiet von Freiberg mit kommunalen Zuflüssen vermischt wird.

Meteorologische und hydrologische Situation

Der Dezember 2012 war zu nass, überdurchschnittlich sonnig, jedoch normal temperiert (LfULG 2013a). Ab der Nacht zum 04.12. bestimmten Schneefälle das Wettergeschehen in Sachsen. Am Morgen des 10.12.2012 lag eine geschlossene Schneedecke von 8 cm bis 17 cm im Tiefland, 20 bis 50 cm im Bergland, 74 cm auf dem Fichtelberg. Die Schneedecke auf dem Fichtelberg erhöhte sich weiter und betrug am Ende der ersten Monatsdekade 94 cm. Im Flachland wurden Schneehöhen von 10 bis 23 cm registriert. Das Wasseräquivalent der Schneedecke betrugt in Höhenlagen unterhalb 300 m 15 bis 25 mm und in Lagen oberhalb 300 m 25 bis 60 mm. Am 11./12.12.2012 gab es weitere Schneefälle mit bis zu 10 cm Neuschnee im Bergland. Ein kräftiges Tiefdruckgebiet über Großbritannien lenkte ab dem 14.12.2012 eine Warmfront nach Sachsen und leitete einen milden (frostfreien) und wechselhaften Witterungsabschnitt mit Regenmengen von 2 bis 7 mm ein. Die Schneehöhen reduzierten sich vom 15. zum 16.12. im Bergland um 6 bis 17 cm und im Tiefland um 4 bis 10 cm. Bis zum 17.12.2012 taute die Schneedecke im Tiefland vollständig ab und im Bergland reduzierte sie sich auf 20 bis 35 cm. Es kam zu einem ersten Anstieg der Pegel im Muldeeinzugsgebiet (1. Welle) mit Durchflüssen bis zum 2fachen des MQ(Monat). Ab dem 20.12.2012 setzte eine Wetterberuhigung ein, am 21./22.12.2012 Dauerfrost und länger anhaltende Schneefälle mit Neuschneemengen von 1 bis 6 cm im Bergland.

Am 23.12.2012 griffen die Ausläufer des Tiefs über den Britischen Inseln auf Sachsen über und führten sehr milde Luftmassen maritimen Ursprungs heran. Die Schneeschauer gingen allmählich in flächendeckenden Regen mit Niederschlagsmengen von 20 bis 40 mm über. Durch den Temperaturanstieg bis ins zweistellige Niveau kam es zu Tauwetter bis in das obere Bergland. Es entwickelte sich in Verbindung mit den Starkniederschlägen eine Hochwassersituation im Einzugsgebiet der Mulde (2. Welle), die zum Ansteigen der Pegel über die Richtwerte der Alarmstufe 2 führte. Am Monatsende wurde auf dem Fichtelberg eine Schneedecke von 52 cm gemessen.

Der Januar 2013 war deutlich zu nass, zu kalt und extrem sonnenscheinarm (LfULG 2013c). Nachdem die Temperaturen und die Schneefallgrenze zunächst sanken, gelangte am 04.01.2013 die Warmfront eines nordatlantischen Tiefs in die Region und brachte lang anhaltenden Regen mit Niederschlagssummen von 20 bis 50 mm im Erzgebirge mit sich.
Die mild-feuchte Witterung hielt bis zum 10.01.2013 an und löste wiederum eine Hochwassersituation im Einzugsgebiet der Mulde aus (3. Welle). Im Einzelfall wurde der Richtwert der Alarmstufe 4 überschritten, an den meisten Pegeln der Richtwert der Alarmstufe 2. Die Front des Tiefs über dem Baltikum führte rückseitig polare Kaltluft nach Mitteldeutschland. Am

Morgen des 11.01.2013 wurden Neuschneemengen von 6 bis 15 cm im Bergland und 1 bis 3 cm im Tiefland gemessen. Durch Temperaturrückgang und die auftretenden Schneeschauer lag zu Monatsmitte in Sachsen bis ins Tiefland Schnee. Im Bergland wurde zwischen 10 und 20 cm Schnee, auf dem Fichtelberg betrug 53 cm, im Flachland 1 bis 10 cm gemessen. Mitte Januar 2013 lagen die Durchflüsse noch bei dem 2 bis 3fachen des MQ(Monat). Bis zum Ende des Beobachtungszeitraums blieb es bis ins Flachland frostig mit weiteren Schneeschauern und die Pegel sanken langsam ab (Anlage 85).

Die im Beobachtungszeitraum angetroffenen Hochwasserwellen unterscheiden sich in ihrer Bildung und lassen sich wie folgt charakterisieren (Tab. 15, Anlage 86):

Tab. 15: Charakterisierung der Hochwasserwellen im Zeitraum 16.12.2012 bis 21.01.2013

	Welle 1	**Welle 2**	**Welle 3**
Beobachtungs-Zeitraum	16.-20.12.2012	23.-31.12.2012	04.-21.01.2013
Maximale Temperatur [°C] (1)	3,6	10,3	6,6
Niederschlags-Summe [mm] (2)	9	49	74
Auslöser, Charakteristik	überwiegend Schneeschmelze aufgrund Temperaturerhöhung	Schneeschmelze aufgrund Temperaturerhöhung, überlagert von Starkniederschlägen	Starkniederschläge, untergeordnet Schneeschmelze
maximaler Durchfluss [m^3/s] (3)	4,11 (16.12.2012) 4,55 (20.12.2012)	24,4 (24.12.2012) 24,9 (26.12.2012)	35,6 (05.01.2013) 36,9 (07.01.2013)
Entnommene Proben	5	8	11

(1) Reiche Zeche, (2) Großhartmannsdorf, (3) Halsbrücke (1. und 2. Spitze)

Die Durchflüsse am Punkt Halsbrücke beziehen sich auf den Pegel Berthelsdorf, für den Münzbach gibt es leider keine Wasserstands- bzw. Mengenmessung. Aufgrund des wesentlich kleineren Einzugsgebietes ist die Scheitelwelle an der Münzbachmündung ca. einen Tag eher als in der Freiberger Mulde (Altväterbrücke) zu erwarten.

Am Pegel Berthelsdorf wird der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) mit der 3. Welle fast erreicht. Aufgrund der Schneeschmelze in den Flachlandlagen (2. Welle) und der starken Niederschläge (3. Welle) wird diese hydrologische Kenngröße am Pegel Nossen sowohl mit der 2. als auch der 3. Welle überschritten (Anlage 86), so dass insgesamt von einer markanten Hochwasserabflusssituation gesprochen werden kann.

Schadstoffverhalten in der Freiberger Mulde

Sowohl zwischen der Freiberger Mulde und dem Münzbach als auch zwischen den einzelnen Wellen gibt es elementspezifische Unterschiede im Verhalten der Elemente. Die Schwebstoffspitzen lagen – wie in der Literatur beschrieben - zeitlich vor den Abflussspitzen. Ob die Schwebstoffspitze bei täglicher Probenahme wirklich exakt erfasst wurde, ist unsicher.

Bereits vor dem Hochwasserscheitel der ersten Welle stiegen die Schwebstoffkonzentrationen in der Freiberger Mulde an und mit ihnen die Konzentrationen der Elemente (Gesamtgehalte), die gewöhnlich bevorzugt in partikulärer Form transportiert werden, wie Ag, Al, As, Fe, Pb, Ti (Anlage 87). Aber auch bei den Elementen, die nur zu geringen Teilen partikulär transportiert werden, wie Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Sb, U, Zn, wurden hier die höchsten Konzentrationen (Gesamtgehalte) beobachtet (Anlage 88). Daraus wird geschlussfolgert, dass die Energie dieser ersten, im Vergleich zu den beiden folgenden Wellen, niedrigen Welle ausreicht, um zu einer Mobilisierung von feinpartikulärem, vermutlich jüngst abge-

lagertem und wenig verfestigtem Material zu führen und damit einen Schadstoffausstoß aus dem Belastungsgebiet Freiberg zu induzieren. Im weiteren Verlauf der ersten Hochwasserwelle blieben die Durchflüsse auf ähnlichem Niveau und die Schwebstoff- und Elementkonzentrationen sanken ab. Das spricht für die Erschöpfung der Quellen, d.h. mehr feinpartikuläres Material kann bei diesen Durchflüssen nicht mobilisiert werden.

Eine zweite Hochwasserwelle deutete sich an, nachdem am 23.12.2012 bei milden Temperaturen Niederschlagsmengen um 40 mm registriert wurden. Am 24.12.2012 wurde mit 92 mg/l die maximale Schwebstoffmenge des gesamten Ereignisses bestimmt. Der Hochwasserscheitel zog sich aufgrund der hinzutretenden Schneeschmelze bis zum 26.12.2012 hin. Danach fielen die Wasserstände kontinuierlich ab. Parallel zum Schwebstoffpeak der zweiten Welle konnten erneut hohe Gesamtgehalte der Elemente Ag, Al, As, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Ti, U, Zn, zusätzlich Ba, registriert werden, die im weiteren Verlauf kontinuierlich abfielen. Bei diesen Beobachtungen ist von einem weiteren Austrag kontaminierter Sedimente aus dem Belastungsgebiet Freiberg aufgrund der fünffach höheren Durchflussmenge auszugehen.

Die dritte Hochwasserwelle wurde durch ergiebige Niederschläge am 03./04.01.2013 bei milden Temperaturen ausgelöst. Das Schwebstoffmaximum am 05.01.2013 lag weit vor dem Hochwasserscheitel, der sich aufgrund der andauernden starken Niederschläge bis zum 06.01.2013 erst am 07.01.2013 ausbildete. Der Durchfluss in der dritten Welle war etwa achtfach höher als der in der ersten Welle. Der damit erzeugte Impuls führte erneut zum sprunghaften Anstieg der Elemente Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Mo, Ni, Sb, Ti, U in der Gesamtprobe. Die Konzentrationen der Elemente Cd, Zn zeigten dagegen nur eine geringe Zunahme.

Die überwiegend in gelöster Form transportierten Elemente Na, K, Ca, Mg, Sr, B werden generell bei zunehmender Wassermenge in ihren Gehalten verdünnt (Anlage 90). Die Korrelation der partikulär transportierten Elemente fällt in Bezug auf die Durchflussmenge gering aus, da nur zu Beginn der jeweiligen Welle die Maximalgehalte auftreten, hier aber noch nicht die größten Wassermengen transportiert werden (Anlage 89).

Schadstoffverhalten im Münzbach

An der Mündung des Münzbaches wird das Schwebstoffmaximum der zweiten Welle bereits am 23.12.2012 – einen Tag eher als in der Freiberger Mulde - detektiert. Es wird vermutet, dass das Maximum der ersten Welle bereits am 15.12.2012 auftrat und somit nicht erfasst wurde. Die dritte Welle zeichnet sich durch zwei weniger deutlich ausgeprägte Schwebstoffspitzen am 04. und 06.01.2013 aus. Die Schwebstoffmaxima der zweiten und dritten Welle gehen mit einem Anstieg der Konzentrationen der Elemente Ag, Al, As, Cr, Cu, Fe, Pb, Ti (Anlage 87) einher, also der bevorzugt partikulär gebundenen Elemente. Für die Elemente Cd, Zn (und Ni) ist ein Verdünnungsverhalten bei zunehmender Wassermenge zu erkennen (Anlage 88), diese Elemente verhalten sich wie die überwiegend in gelöster Form transportierten Elemente Na, K, Ca, Mg, Sr, B.

Im Münzbach werden durch den städtischen Einfluss generell höhere Gehalte an Na, K, Ca, Mg, Sr, B sowie As, Cr angetroffen. In der dritten Welle steigen die Konzentrationen der Elemente Cd, Cu, Ni, Mo und Zn über das Niveau der Freiberger Mulde an (Tab. 16).

Tab. 16: Maximal detektierte Gesamtgehalte in den Hochwasserwellen im Zeitraum 16.12.2012 bis 21.01.2013 (Maximalwerte fett), Angaben in µg/l, AFS in mg/l

Element	Freiberger Mulde			Münzbach		
	Welle 1	Welle 2	Welle 3	Welle 1	Welle 2	Welle 3
Al	**2.800**	2.200	2.000	680	1.200	980
As	29	26	27	29	**65**	39
Ba	**100**	130	120	43	68	74
Cd	9,5	6,0	4,1	3,0	8,1	**12**
Co	**4,7**	2,4	1,8	0,8	1,5	1,2
Cr	3,1	2,9	2,8	3,2	**4,0**	2,4
Cu	**43**	28	22	18	32	40
Fe	**2.300**	2.300	2.100	1.000	1.900	1.300
Mn	**760**	320	220	130	260	170
Ni	**7,3**	5,4	4,6	3,1	3,8	5,9
Pb	130	87	84	50	**170**	85
Sb	**5,1**	3,7	1,8	1,1	1,6	1,3
Zn	1.100	580	380	370	910	**1.500**
AFS	*25,6*	***92,1***	*68,4*	*68,6*	*65,1*	*34,1*

Verteilungsverhalten der Elemente

Das Verteilungsverhalten der Elemente kann elementspezifisch stark variieren. Während die bevorzugt partikulär transportierten Elemente (Al, Fe, Pb) geringe Abweichungen zeigten, traten bei den partiell partikulär transportierten Elementen starke Schwankungen auf (Tab. 17). Der partikuläre Transport nimmt i.d.R. mit zunehmender Schwebstoffmenge zu (Anlage 91). Es ergibt sich folgende Reihung der Elemente in Abhängigkeit ihrer Affinität zum Schwebstoff:

Fe, Pb, Al (70…100 %) > As, Cu, Cr (10…87 %) > Mn, Co (0…87 %) > Cd, Zn, Sb (0…65 %)

Tab. 17: Verteilungsverhalten der Elemente in den Hochwasserwellen im Zeitraum 16.12.2012 bis 21.01.2013, Angaben zur Schwankungsbreite der partikulär transportierten Anteile in %

Element	Freiberger Mulde			Münzbach		
	Welle 1	Welle 2	Welle 3	Welle 1	Welle 2	Welle 3
Al	90…98	79…97	70…96	72…98	79…96	76…95
As	49…87	41…82	10…85	20…62	25…83	36…71
Ba	10…26	7…55	0…53	5…28	2…53	0…45
Cd	25…57	6…62	0…51	0…41	8…59	0…21
Co	40…83	0…79	0…78	0…25	0…53	9…55
Cr				22…56		23…50
Cu	33…86	21…74	19…64	31…73	29…74	19…58
Fe	93…95	90…98	87…98	92…97	87…98	82…96
Mn	50…87	18…78	0…78	15…47	7…69	0…47
Ni	0…52	0…43	0…39	0…3	0…18	0…58
Pb	96…99	88…98	79…98	95…99	91…100	86…99
Sb	13…65	0…46	0…56	0…18	0…44	0…30
Zn	21…62	3…49	0…33	14…38	3…56	9…24

Frachten in der Freiberger Mulde

Während des Hochwassers zum Jahreswechsel 2012/2013 wurden hohe As- und Schwermetallfrachten in der Freiberger Mulde flussabwärts transportiert. Aufgrund der hohen Schwebstoffanteile (Anlage 92), die am Beginn jeder der drei Hochwasserwellen freigesetzt wurden, und die mit hohen Schadstoffpotentialen verknüpft waren, bildeten sich Frachtspitzen aus, die im weiteren Verlauf wieder abfielen. In den Frachtspitzen wurden bis zu 80 kg As, 12 kg Cd, 65 kg Cu, 250 kg Pb, 1.100 kg Zn pro Tag transportiert. Die maximale Schwebstofffracht betrug 200 t/d.

Die Frachtkurven für die „partikulären" Elemente entsprechen der Form der Schwebstoffkurve, die der „gelösten" Elemente die der Durchflussmengenkurve. Daher besitzen die „partikulären" Elemente ein höheres Gewicht, wenn es um die Bilanzierung eines Hochwassers geht. Im Fall der Freiberger Mulde ist von einer Remobilisierung von relativ jungen schadstoffbehafteten Sedimenten bei der ersten Welle auszugehen, bei den beiden folgenden Wellen wird vermutet, dass auch lokale Anreicherungen von Altsedimenten weiter flussabwärts bewegt werden. Da jedoch die Konzentrationen von 2002 (Vergleich der Gesamtgehalte mit dem Oberflächenwassermessnetz) nicht angetroffen wurden, ist davon auszugehen, dass die damals abgerutschten Schlacken nur noch in geringem Umfang im Gewässerbett bzw. Uferbereich des Belastungsgebietes Freiberg liegen. Am Fingerprint der Belastung der Wasserphase ist nach wie vor ein Einfluss sowohl der Halden bzw. Altsedimente (As, Pb, Sb) als auch der Stollen (Cd, Zn) abzulesen.

Gemessen an der mittleren Jahresfracht an der Messstelle OBF31600 Halsbrücke im Zeitraum 1996-2011 wurden bei diesem Ereignis mit einer Gesamtdauer von 36 Tagen, was einem Anteil von 10 % am Jahr entspricht, ca. ¼ der Jahresschwebstoffmenge verfrachtet. Für die bevorzugt partikulär transportierten Elemente Pb und As entspricht dies einem Anteil von 37 bzw. 36 %. Bei den Elementen Cd und Zn, die bevorzugt gelöst transportiert werden, werden bis zu 20 % der Jahresmengen durch dieses Hochwasser gedeckt (Tab. 18).

Tab. 18: Transportierte Elementfrachten (gelöst und gesamt) und die Schwebstofffracht während des Hochwassers im Zeitraum 16.12.2012 bis 21.01.2013 [1], Anteil dieser Fracht an der mittleren Jahresfracht an der OBF31600 Halsbrücke im Zeitraum 1996-2011 [2]

	Al_gel	**Al_ges**	**As_gel**	**As_ges**	**B_gel**	**B_ges**	**Ba_gel**	**Ba_ges**
[1] in [kg]	3.500	31.000	150	480	830	830	2.900	4.000
[2] in [%]	33	37	30	31	15	14	29	31

	Cd_gel	**Cd_ges**	**Co_gel**	**Co_ges**	**Cu_gel**	**Cu_ges**	**Fe_gel**	**Fe_ges**
[1] in [kg]	150	180	27	46	340	670	---	30.000
[2] in [%]	17	18	16	23	28	30	---	41

	Li_gel	**Li_ges**	**Mn_gel**	**Mn_ges**	**Ni_gel**	**Ni_ges**	**Pb_gel**	**Pb_ges**
[1] in [kg]	130	150	3.200	5.900	140	160	83	1.400
[2] in [%]	23	23	16	25	23	15	19	36

	Sb_gel	**Sb_ges**	**Sr_gel**	**Sr_ges**	**Zn_gel**	**Zn_ges**		**AFS**
[1] in [kg]	41	56	4.400	4.400	15.000	17.000		760.000
[2] in [%]	18	23	29	29	19	20		26

(9) Wie groß ist die Anreicherung organischer Schadstoffe in den Sedimenten?

Die Untersuchungen zur Belastung von Flusssedimenten mit organischen Schadstoffen wurden an der Fraktion <2 mm durchgeführt. Im sächsischen Landesmessnetz Oberflächenwasser liegen ab 2002 derartige Analysen vor. Zur Auswertung wurden für die in den Hauptläufen Freiberger, Zwickauer und Vereinigte Mulde an den entsprechenden Stellen vorliegenden Schadstoffe Jahresmittelwerte gebildet, die wiederum über den verfügbaren Zeitraum von 2002-2011 gemittelt wurden. Diese wurden mit dem oberen Schwellenwert der Klassifizierung gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept verglichen.

Die PAKs (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) sind ein Sammelbegriff für aromatische Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit Ringsystem, die durch Kondensation von Benzol-Molekülen entstehen. Die Schadstoffgruppe umfasst mehrere hundert Verbindungen, die in natürlichen Substanzen (Erdöl, Kohle) und daraus hergestellten Produkten (Bitumen, Pech, Teer, Ruß, Tabakrauch, Flugasche, Abgase) vorkommen. Hauptquelle von PAK-Emissionen ist die Pyrolyse organischen Materials und alle damit verbundenen unvollständigen Verbrennungsprozesse (Waldbrand, Großfeuerungsanlagen, Hausbrand, Verbrennungsmotoren, Grillen, Räuchern und Rauchen). Über den Luftpfad kommt es zum partikelgebundenen Eintrag in Böden und Gewässer. Die Stoffgruppe zeichnet sich durch eine hohe Fettlöslichkeit und hohes Bioakkumulationspotential (typische log PO/W-Werte = 3 - 8), einige Einzelsubstanzen durch kanzerogene, teratogene, endokrin wirksame und gentoxische Potenziale aus (Thieme Chemistry 2013, Bahadir et al. 2000). Zu den PAKs, die im Sedimentmanagement von Bedeutung sind, zählen Anthracen ($C_{14}H_{10}$), Benzo(a)pyren ($C_{20}H_{12}$), Benzo(b)fluoranthen ($C_{20}H_{12}$), Benzo(k)fluoranthen ($C_{20}H_{12}$), Fluoranthen ($C_{16}H_{10}$) und Benzo(ghi)perylen ($C_{22}H_{12}$). Von den drei als Einzelsubstanzen zu betrachtenden PAKs Benzo(a)pyren, Anthracen und Fluoranthen besitzen Fluoranthen in der Freiberger Mulde und Zwickauer Mulde sowie Benzo(a)pyren in der Zwickauer Mulde Relevanz, wobei die Konzentrationen in den Sedimenten der Zwickauer Mulde i.d.R. höher als in der Freiberger Mulde sind (Anlagen 93 und 94).

HCH (Hexachlorcyclohexan, $C_6H_6Cl_6$) fasst verschiedene isomere chemische Verbindungen aus der Gruppe der Halogenkohlenwasserstoffe zusammen (α-, β-, γ-, δ-, ε-HCH). Sie zählen zu den persistenten organischen Verbindungen, von denen γ-HCH unter dem Namen Lindan als Insektizid besser bekannt ist. Lindan wird seit 1984 in der BRD, seit 1989 in der DDR nicht mehr hergestellt. Neben dem Einsatz in der Landwirtschaft wurde HCH auch als Holzschutzmittel verwendet. Für die Verbindungen α- und γ- HCH werden kanzerogene, mutagene Wirkungen beschrieben (Thieme Chemistry 2013, Bahadir et al. 2000). Alle drei untersuchten HCH-Verbindungen (α-, β-, γ-HCH) überschritten im Mittel den oberen Schwellenwert (Anlagen 95 und 96), wobei die Gehalte in Sedimenten der Freiberger Mulde höher als in der Zwickauer Mulde sind (und die Bestimmungsgrenze hier häufig im Bereich des Schwellenwertes lag).

DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan, $C_{14}H_9Cl_5$) und seine Metabolite gehören zur Gruppe der Insektizide und wurden weltweit als Kontakt- und Fraßgift vorwiegend in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt. Aufgrund seiner kanzerogenen, epigenetischen, endokrinen Wirkung wird es in der BRD seit 1972, in der DDR seit 1988 nicht mehr verwendet und ist gemäß der Stockholmer Konvention 2004 nur noch zur Bekämpfung krankheitsübertragender Insekten zulässig (Malaria) (Thieme Chemistry 2013). Im Rahmen der Schadstoffklassifizierung sind in den Sedimenten die Stoffe p,p-DDT, p,p-DDE und p,p-DDD von Relevanz. Es werden sowohl in den Sedimenten der Freiberger als auch der Zwickauer Mulde die oberen Schwellenwerte überschritten, wobei keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Flusssystemen festgestellt wurden (Anlagen 96 und 97)

PCBs (Polychlorierte Biphenyle) umfassen mehr als hundert giftige kanzerogene organische Chlorverbindungen, die mit steigenden Chlorierungsgrad zunehmend persistent sind. Ihr

Anwendungsbereich war wie ihre Verbreitung außerordentlich groß und reichte von flammfesten Isolier- und Kühlflüssigkeiten z.B. in Hochspannungstransformatoren bis zu Weichmachern in Lacken, Dichtungsmassen, Isoliermitteln und Kunststoffen. Ihre Herstellung und Verwendung ist gemäß Stockholmer Konvention seit 2001 weltweit verboten (Thieme Chemistry 2013). In Deutschland wird eine insgesamt rückläufige Belastung festgestellt. PCBs können photochemisch oder aerob durch Mikroorganismen abgebaut werden. Zur Charakterisierung der großen Stoffgruppe werden meist sechs sogenannte Indikator-Kongenere: PCB 101 (2,2,4,5,5 Pentachlorbiphenyl), PCB-138 (2,2',3,4,4',5-Hexachlorbiphenyl), PCB-153 (2,2'4,4'5,5'-Hexachlorbiphenyl), PCB-180 (2,2'3,4,4'5,5'-Heptachlorbiphenyl), PCB-28 (2,4,4'-Trichlorbiphenyl), PCB-52 (2,2',5,5'-Tetrachlorbiphenyl) sowie das PCB-118 (2,3',4,4',5-Pentachlorbiphenyl) als Stellvertreter für die Gruppe der dioxinähnlichen PCBs bestimmt. Diese o.g. Vertreter der PCBs sind auch im Sedimentmanagementkonzept von Bedeutung. Es kommt weder in den Sedimenten der Freiberger noch der Zwickauer Mulde zu Überschreitungen des oberen Schwellenwertes (Anlagen 98 bis 101).

HCB (Hexachlorbenzen, C_6Cl_6) gehört zu den chlorierten Kohlenwasserstoffen. Es wurde bis 1981 als Fungizid in der Landwirtschaft eingesetzt und ist heute durch die Stockholmer Konvention weltweit verboten. Trotz Anwendungsverbot verbleiben mögliche Eintragsquellen wie die Nutzung anderer chlorierter Pflanzenschutzmittel, Zusatz für pyrotechnische Produkte, unvollständige Verbrennung von kohlenstoff- und chlorhaltigen Substanzen, Altlasten sowie Abfällen aus der Produktion und Verarbeitung von chlorierten Lösungsmitteln, mikrobielle Umwandlung von Lindan zu HCB. Die Konzentrationen für HCB liegen in den Sedimenten der FM und ZM unterhalb des oberen Schwellenwertes (Anlage 101).

Pentachlorbenzen (Pentachlobenzol) ist eine Substanz aus der Gruppe der aromatischen Chlorkohlenwasserstoffe. Es entsteht als Nebenprodukt bei der Herstellung von Chlorbenzolen und diente als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Pflanzenschutzmitteln. Pentachlorbenzen ist seit 1992 in Deutschland (seit 2002 in der EU) verboten. Dennoch wurde es in geringer Konzentration in deutschen Gewässern nachgewiesen, die derzeit diskutierten möglichen EU-Qualitätsnormen für Oberflächengewässer werden jedoch eingehalten (Hillenbrand et al. 2007). Die Konzentrationen in den Sedimenten der FM und ZM liegen weit unterhalb des oberen Schwellenwertes (Anlage 102).

TBT (Tributylzinn, $C_{24}H_{54}OSn_2$) gehört zu den zinnorganischen Verbindungen, wobei TBT toxikologisch und ökotoxikologisch die größte Bedeutung hat. Es ist hauptsächlich als Bestandteil von Antifouling-Anstrichen zum Schutz vor biotischem Bewuchs bei Wasserfahrzeugen in der EU bis 2008 eingesetzt worden. Die Auslaugung von Antifoulingfarben wird als der mit Abstand wichtigste Emissionspfad in die Gewässer beschrieben (Hillenbrand et al. 2007). TBT kann auch bei der Herstellung anderer zinnorganischer Verbindungen als Verunreinigung entstehen und durch deren Verwendung als Stabilisator, Katalysator in weitere Produkte wie Kunststoffe oder Textilien gelangen. Der obere Schwellenwert wird ab Mittellauf von FM und ZM um ein Vielfaches überschritten (Anlage 102).

Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) sind zwei Stoffgruppen chemisch ähnlich aufgebauter chlorierter organischer Verbindungen, die im Sprachgebrauch als Dioxine (und Furane) bezeichnet werden. Sie entstehen unvermeidlich als Nebenprodukte bei der Herstellung chlororganischer Chemikalien oder bei beliebigen Oxidationsreaktionen von Kohlenwasserstoffverbindungen in Anwesenheit von Chlorverbindungen (z.B. Kochsalz). In der Regel entstehen nachweisbare Konzentrationen von Dioxinen bei Verbrennungen mit Temperaturen oberhalb 300 °C (Assoziation der Dioxinmoleküle) und unterhalb von 700 °C (Dissoziation der Dioxinmoleküle). Dioxine entweichen aus Anlagen der Metallindustrie, aus Müllverbrennungsanlagen und privaten Kaminen in die Luft. Sie werden nicht gezielt hergestellt und es gibt keinerlei technische Verwendung. Als langlebige organische Schadstoffe werden sie in der Umwelt bei niedrigen Temperaturen kaum abgebaut (Wikipedia 2013). Da die Giftigkeit der einzelnen Dioxin- und Furan-Kongenere unterschiedlich ist, wurde zur besseren Abschätzung der Gefährlichkeit von „Dioxingemischen“ das System der To-

xizitätsäquivalente (TEQ) eingeführt. Die Toxizität von 2,3,7,8-TCDD, der giftigsten Verbindung unter den polychlorierten Dibenzodioxinen, wird dabei als 1 gesetzt. Die übrigen Kongenere erhalten, abhängig von ihrer Toxizität und dem angewandten Berechnungsmodell Toxizitätsäquivalentfaktoren (TEF) zwischen 0,0001 und 1. In den Sedimenten wurden 16 Einzelstoffe analysiert und das TEQ ermittelt, wobei in Sermuth, Erlln und Bad Düben keine Überschreitung des Schwellenwertes festgestellt wurden. Eine Zusammenstellung gibt Tab. 19.

Tab. 19: Übersicht über die relevanten organischen Schadstoffe in Sedimenten/Schwebstoffen im Einzugsgebiet der Mulde, Auswahlkriterium: Schadstoffgehalt im Sediment > oberer Schwellenwert gemäß SSedM, bezogen auf den Mittelwert der Jahresmittelwerte der untersuchten Jahre im Zeitraum 2002 bis 2011, Feinboden <2 mm

	Freiberger Mulde Erlln	**Zwickauer Mulde Sermuth**	**Vereinigte Mulde Bad Düben**
α-HCH	x	x	x
β-HCH	x	x	x
γ-HCH	x	x	x
p,p-DDT	x	x	x
p,p-DDE	x	x	x
p,p-DDD	x	x	x
PCB-28	-	-	-
PCB-52	-	-	-
PCB-101	-	-	-
PCB-118	-	-	-
PCB-138	-	-	-
PCB-153	-	-	-
PCB-180	-	-	-
Pentachlorbenzen	-	-	-
HCB	-	-	-
Benzo(a)pyren	-	x	-
Anthracen	-	-	-
Fluoranthen	x	x	x
Σ PAK	-	x	-
TBT	x	x	x
Dioxine und Furane	-	-	-

x überschritten - nicht überschritten nb nicht bestimmt

Unterhalb eines Standortes der Hüttenindustrie an der Freiberger Mulde kommt es im Ablauf von Mischwässern (Hüttenrösche Muldenhütten) zu einer häufigen Überschreitung der oberen Schwellenwerte für weitere organische Schadstoffe (insbesondere PCBs, PAKs, Dioxine/Furane) in den Sedimenten. Es handelt sich um diffuse altlastengeprägte Austräge aus jeher industriell genutzten Flächen.

(10) Welche Defizite ergeben sich aus der Bearbeitung der Studie?

Die Untersuchungen im ELSA-Projekt haben gezeigt, dass seit Jahrzehnten viele Analysen an Wässern, Schwebstoffen und Sedimenten im Einzugsgebiet der Mulde unter verschiedenen Gesichtspunkten gemacht wurden und werden. Es wurde festgestellt, dass einige Programme durchaus aufeinander aufbauen, andere aus Kostengründen frühzeitig aufgegeben oder auch wichtige Parameter nicht oder nicht durchgängig bestimmt wurden. Im Rahmen der Studie musste eine Auswahl an Analysen getroffen werden. Zur Sicherstellung der Berücksichtigung aller relevanten Daten und Informationen wurde durch das LfULG eine projektbegleitende Arbeitsgruppe gebildet. Die Arbeitsgruppe bestand aus Vertretern der sächsischen Verwaltung (SMUL-Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, LfULG-Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, LDS-Landesdirektion Sachsen, LTV-Landestalsperrenverwaltung, OBA-Sächsisches Oberbergamt, LK MSA-Landkreis Mittelsachsen), aus den beiden Sanierungsgesellschaften der beiden Belastungsgebiete Freiberg (SAXONIA Standort- und Entwicklungsgesellschaft mbH) und Aue-Schlema (Wismut GmbH) sowie der BSU Hamburg als Auftraggeber. Die Übergabe von angeforderten bzw. nachträglich als sinnvoll erachteten Daten erstreckte sich von August 2012 bis April 2013 (Anlage 103).

Den größten Anteil der qualitativen Daten haben die Untersuchungen des LfULG im Rahmen des Landesmessnetzes Oberflächenwasser. Bei der Auswertung dieser Daten gab es zahlreiche Lücken in den Beprobungsreihen einiger Punkte, die gerade unter den Gesichtspunkten der ELSA-Studie in den Belastungsgebieten von besonderem Interesse waren. Dort fehlte auch häufig die durchgängige Analyse der Gesamtgehalte, die für die Berechnung von Frachten und zur Analyse des Verteilungsverhaltens erforderlich ist. Auch wenn die gesetzlichen Vorgaben primär auf die Toxizität der Elemente in der gelösten Phase zielen, ist für eine Gesamtschau des chemischen Zustandes der Gewässer die Gesamtprobe unumgänglich. Die Untersuchungsdichte und –häufigkeit des chemischen Sedimentstatus ist gegenüber den Wasseruntersuchungen wesentlich geringer. Das kann auch akzeptiert werden, da sich dort Änderungen erst in längeren Zeiträumen manifestieren. Trotzdem ist auch hier für ein- und austragsrelevante Punkte ein systematisches Untersuchungsprogramm wünschenswert. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass auch der Sedimentchemismus jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Die Probenentnahmen sollten mehrmals im Jahr mit einer Kelle per Hand, die nur das frische schwebstoffbürtige Sediment erfasst, oder mit Sedimentationsfallen erfolgen, die das Nachlieferungspotential besonders gut abbildet. Letztere haben den Vorteil, dass z.B. im zweimonatigen Zyklus ein Durchschnittsgehalt bestimmt werden kann und die Beprobung von Altsedimenten ausgeschlossen wird.

Einzeluntersuchungen an Einzelobjekten ergänzen den Kenntnisstand der durch die Landesbehörden erhobenen Daten und können zum Prozessverständnis der jeweiligen Region beitragen. Sie haben aber grundsätzlich den Nachteil, dass sie auf eine bestimmte Fragestellung, zumeist auf die Einhaltung von Grenz- oder Richtwerten, ausgerichtet sind und somit häufig nur das interessierende Parameterspektrum analysiert, die jeweilige Phase (gelöst oder gesamt) betrachtet oder eine (andere) dafür geforderte Korngröße verwendet wird. Insofern ist die Passfähigkeit zu anderen Untersuchungen begrenzt.

Das größte Defizit wird in den quantitativen Daten gesehen. Für viele Probenahmepunkte muss zwischen den Pegeln des Pegelmessnetzes interpoliert werden. Das geschieht über einen Faktor, der aber u.U. bei Hochwasserereignissen nicht mehr korrekt ist. Für zahlreiche Zuflüsse gibt es keine Mengenmessungen und auch keine verlässlichen Daten zur mittleren bzw. Niedrig- oder Hochwasserführung. Daher konnte z.B. am Münzbach keine Bilanzierung von Frachten für die Beprobung des Hochwassers vorgenommen werden. Hier trägt auch die Frachtschätzung für das Belastungsgebiet den Charakter einer Hochrechnung. Werden die Zuflüsse noch kleiner, sind die Angaben noch magerer. Eine völlig unbefriedigende Situation ist für die wasserlösenden Stollen festzustellen. Kontinuierliche Mengenmessungen gibt es behördlicherseits nur für den Rothschönberger Stolln. Die Wismut GmbH bestimmt die Wassermengen am Markus-Semmler-Stolln und die der behandelten Flutungswässer. Für die

wasserreichen Freiberger Stollen, den Königlich Verträglichen Gesellschaft Stolln und den Hauptstollnumbruch, aber auch für die Hüttenrösche in Muldenhütten gibt es keine aktuellen Angaben. Daher können keine exakten Frachtbilanzierungen gemacht werden. Die in dieser Studie vorgenommenen Frachtabschätzungen sind nicht belastbar. Angaben über die emittierten Wassermengen sind nicht nur für die Abschätzung des Schadstoffpotentials sondern auch für Aussagen zur Langzeitentwicklung und für ausstehende Planungen von Sanierungsaufgaben von großer Bedeutung.

Die Rolle des Roten Grabens als Schadstoffsenke, Schadstoffdepot und potentielle Schadstoffquelle im Freiberger Belastungsgebiet wurde bei der Auswertung der umfangreichen Untersuchungen erneut unterstrichen. Daraus resultierte ein zweiter Antrag des Freistaates Sachsens an den Koordinierungsrat der FGG Elbe für die Inanspruchnahme von Projektmitteln aus dem Projekt ELSA. Ziel ist die „nachhaltige Reduzierung der Schwermetalleinträge aus den Erzbergbaurevieren im Raum Freiberg“.

Zusammenfassung der Studie

(1)
Das Einzugsgebiet der Mulde stellt auch heute noch eine wesentliche überregionale Quelle für Schwermetalle und Arsen in der Elbe dar. Die Teileinzugsgebiete Freiberger und Zwickauer Mulde sind durch zahlreiche Mineralisationen und Lagerstätten gekennzeichnet (Hösel et al. 1997), die im Zuge des erzgebirgischen Bergbaus seit über 800 Jahren abgebaut und verarbeitet wurden. Damit sind primär geogen vorhandene Elementanreicherungen in Gesteinen (Kardel et al. 1996), Böden (Rank et al. 1999) und Gewässersedimenten (Greif et al. 2004) durch sekundäre anthropogene Belastungen überprägt worden, deren Anteil heute nur schwer abgeschätzt werden kann.

Die bergbaugeprägten Belastungen setzen bereits in den Oberläufen und Nebenflüssen ein (Abb. 1) und erreichen durch die Passage der zwei großen Bergbau- und Industriegebiete Freiberg an der Freiberger Mulde (nach Berthelsdorf bis Halsbrücke, teilweise auch bis Obergruna) und Aue-Schlema an der Zwickauer Mulde (nach Albernau bis Schlunzig, einschließlich des Aufbereitungsstandortes Crossen) ihr Maximum. Sowohl im Wasser (Gesamtgehalte) als auch in den schwebstoffbürtigen Sedimenten (Fraktion <20 µm) lässt sich die regionale Herkunft der einzelnen Elemente nachweisen. Anreicherungsfaktoren können den Grad der zusitzenden Belastung in den Belastungsgebieten abbilden (Tab. Z1). Die Elemente Zn, Cd, Pb und Cu haben ihren Belastungsschwerpunkt im Einzugsgebiet der Freiberger Mulde, die Elemente U und Ni stammen überwiegend aus der Zwickauer Mulde. Das Element As ist ein Belastungselement in beiden Flusssystemen.

Tab. Z1: Mittlere Anreicherungsfaktoren (>2) bergbaubürtiger Elemente in den Belastungsgebieten (Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008), mittlere Jahresfrachten an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer bzw. in der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Bezugszeitraum 2003-2008), Trendaussagen an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde bzw. an der Vereinigten Mulde in Bad Düben, (Wasser: Zeitraum 1994-2011, Sedimente: 2001-2011, Daten: LfULG))

	Freiberger Mulde		**Zwickauer Mulde**		**Vereinigte Mulde**
	Wasser (Gesamtgehalte)	**Sediment** (Fraktion <20 µm)	**Wasser** (Gesamtgehalte)	**Sediment** (Fraktion <20 µm)	**Wasser** (Gesamtgehalte)
Anreicherungsfaktoren der Konzentrationen in den Belastungsgebieten	Zn (44fach) Cd (29fach) Pb (20fach) As (7,9fach) Cu (6,6fach)	As (12fach) Cd (12fach) Pb (11fach) Zn (10fach) Cu (7fach)	U (5,8fach) As (3,5fach)	Ni (2,1fach)	entfällt
Mittere **Jahresfrachten** an den Mündungen FM, ZM bzw. VM in Bad Düben, t/a	**As (19,1)** **Cd (1,86)** Cu (11,8) Ni (6,32) **Pb (31,5)** U (0,737) **Zn (142)**	entfällt	As (7,53) Cd (0,586) Cu (10,2) **Ni (9,56)** Pb (6,38) **U (4,93)** Zn (66,4)	entfällt	As (29,5) Cd (2,56) Cu (22,2) Ni (17,5) Pb (41,9) U (5,60) Zn (209)
Trend in den Konzentrationen an den Mündungen FM, ZM bzw. VM in Bad Düben	sinkend: Cd, Cu, Ni, Pb, Zn gleichbleibend: As, U	sinkend: As, Cu, Pb gleichbleibend: Cd, Ni geringfügig steigend: Zn	sinkend: Cd, Cu, Ni, U, Zn geringfügig sinkend: As, Pb	sinkend: As, Cd, Cu, Pb gleichbleibend: Ni geringfügig steigend: Zn	sinkend: Cd, Cu, Ni, Pb, U, Zn geringfügig sinkend: As,

(2)
Nach Ermittlung der Frachten in den Teilsystemen bestätigt sich das für den Bezugszeitraum 2003 bis 2008 durch die Konzentrationen vorgezeichnete Bild. Mengenmäßig stammen die Elemente As, Cd, Pb und Zn bevorzugt aus dem Einzugsgebiet der Freiberger Mulde, Ni und U aus dem der Zwickauer Mulde. Das Element Cu ist etwa gleich verteilt (Tab. 1).

Trendaussagen sind aus den Konzentrations- nicht aus den Frachtverläufen abzuleiten (Tab. 1). In zeitlicher Sicht ergeben sich sowohl langfristige über die Jahre ermittelbare 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. der Anstieg der As-Gesamtgehalte in der Wasserphase ab Hilbersdorf).

(3)
In den Belastungsgebieten an der Freiberger und Zwickauer Mulde wurden die maßgeblichen Punktquellen ermittelt und quantifiziert. Dazu gehören Fließgewässer mit erheblichen Sickerwasserzuflüssen, Sickerwässer aus Halden, behandelte und unbehandelte Grubenwässer (Tab. Z2).

Im Freiberger Gebiet liegt die Mehrzahl der gelisteten Objekte im Sanierungsbereich des SAXONIA-Altlastenprojektes, im Gebiet Schlema im Sanierungsbereich der Wismut GmbH. Die Sanierungstätigkeiten sind an beiden Standorten weit vorangeschritten. Da die rechtlichen Zuständigkeiten jedoch nicht an jedem Einzelobjekt geklärt sind, gibt es auch noch nicht überall Untersuchungen bzw. Machbarkeitsstudien zur Verbesserung des Ist-Zustandes. Entscheidende Unterschiede zwischen den beiden Sanierungsstandorten ergeben sich aus dem Zeitpunkt der Grubenschließung (Freiberg, Schneeberg versus Schlema-Alberoda) und dem Umgang mit dem Flutungs- und Sickerwasser (Nichtbehandlung versus Behandlung). Die Sanierungsansätze der Haldenverwahrung und der Verwahrung industrieller Absetzbecken mit dem in-situ-Konzept sind an beiden Standorten ähnlich (Fritz 2012, SAXONIA 2012, Mann 2012, BMWi 2011, Kreyβig et al. 2011) (Tab. 3).

(4)
Im Belastungsgebiet Freiberg tritt ein bedeutender Frachtanteil der Elemente Cd (21 %) und Zn (25 %) der Freiberger Mulde aus bilanzierbaren Punktquellen zu. Für die Frachtbilanz der Zwickauer Mulde sind die Frachtanteile des As (16 %) und U (51 %) aus Punktquellen des Belastungsgebietes Schlema bedeutsam. Der Blick in die Belastungsgebiete selbst zeigt jedoch auch, dass nicht alle Einträge in die Fließgewässer durch diese Punkquellen erklärt werden können. Diese Aussage trifft vor allem auf das Belastungsgebiet Freiberg zu, in dem die mengenmäßig bedeutenden Elemente Cd und Zn zu weniger als 50 % aus Punktquellen erklärt werden können. Aufgrund der großen Unsicherheiten in der Bilanzierung der Schüttung der Punktquellen wie des Stangenbergbaches, des Königlich Verträglichen Gesellschaft Stolln, des Hauptstollnumbruchs und der damit verbundenen Unsicherheit in der Bilanzierung der emittierten Frachten, sind Unterschätzungen nicht auszuschließen. Für die Freiberger Mulde unterhalb des Belastungsgebietes ist der Zufluss der Zschopau als wasserreicher Fluss zu berücksichtigen, der zumeist die Konzentrationen der Freiberger Mulde verdünnt, jedoch den entscheidenden Frachtzuwachs beim Element Arsen liefert. Im Belastungsgebiet Schlema geht die Bilanz für die Zwickauer Mulde unter Berücksichtigung der Zuflüsse Schwarzwasser und Schlemabach bei den Problemelementen As und U, aber auch bei Ni und Zn nahezu auf.

Tab. Z2: Charakterisierung der identifizierten Punktquellen in den Belastungsgebieten an der Freiberger und Zwickauer Mulde

Art	Bezeichnung	Elemente	Ursache
Freiberger Mulde – Belastungsgebiet Freiberg			
Fließgewässer	Stangenbergbach Hüttenbach (Münzbach)	Cd, Zn Cd, Pb, Zn	Hütte Freiberg Hütte Freiberg Altbergbau, Hüttenwesen
Drainagen	RWE-Kanal MRU- Kanal	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn Pb, Cd, Zn	Hütte Muldenhütten Hütte Muldenhütten
unbehandelte Grubenwässer	Glücksilbersternstolln Hüttenrösche VGS HSU		Altbergbau, Hütte Muldenhütten Hütte Muldenhütten Altbergbau, Komplex David-schacht Altbergbau
unbehandelte Sickerwässer	Ablauf Hammerberg		Spülhalde Hammerberg
Zwickauer Mulde – Belastungsgebiet Schlema			
Fließgewässer	Schlemabach (Schwarzwasser)	As, U	Gemeinde Schlema Bergbau und Industrie
behandelte Grubenwässer	WBA Schlema	U, As, Ra, Mn, Fe	Grube Schlema-Alberoda
unbehandelte Grubenwässer	Markus Semmler Stolln	As, U	Grube Schneeberg
behandelte Sickerwässer	SiWa Halde 371/I		
unbehandelte Sickerwässer	SiWa Halde 371/II SiWa Halde 371/I SiWa Halde Borbach-damm SiWa Halde 382W		
Zwickauer Mulde – Belastungsgebiet Crossen			
Fließgewässer	Helmsdorfer (Ober-rothenbacher) Bach	U	IAA Helmsdorf
behandeltes Frei- und Po-renwasser	WBA Helmsdorf	U	IAA Helmsdorf

Tab. Z3: Vergleich der Sanierungskonzeptionen in den Sanierungsstandorten der Saxonia mbH und der Wismut GmbH, entscheidende Unterschiede *kursiv*

Sanierungsansatz	**Saxonia**	**Wismut**
Verwahrung der Gruben **→ Schließung** **→ Verwahrung** **→ Flutung**	1969 Ende des Freiberger Bergbaus, 1970 Flutung des Grubenreviers durch Überlauf am Rothschönberger Stolln abgeschlossen, keine rechtlich geregelten Zuständigkeiten für den Roten Graben bzw. den Rothschönberger Stolln	Seit 15. Jh. Bergbau in Schneeberg, 1947-1956 Uranerzabbau, seit Jahrhunderten Wasserableitung über Markus Semmler Stolln/Schlemabach, keine Zuständigkeit der Wismut GmbH *1990 Ende des Bergbaus in der Grube Schlema-Alberoda,* *1991 Beginn der Flutung,* *2008 Erreichen der -30m Sohle als Niveau Arbeitsspeicher WBA, Zuständigkeit: Wismut GmbH* *1990 Ende des Bergbaus in der Grube Pöhla,* *1991 bis 1995 Flutung*
Verwahrung von Halden **→ Umlagerung** **→ In-situ-Sanierung**	In-situ-Sanierung ist bevorzugte Maßnahme, Umlagerung kontaminierter Materialien innerhalb der Standorte	In-situ-Sanierung ist bevorzugte Maßnahme, Umlagerung von Halden im Deformationsgebiet
für die Verwahrung der industriellen Absetzanlagen **→ In-situ-Verwahrung**	Absetzbecken Hütte Freiberg	IAA Borbachtal IAA Helmsdorf
für den Umgang mit Betriebsgebäuden und Anlagen **→ Prüfung auf Wiederverwendbarkeit**	Abriss nicht mehr nutzbarer Anlagen und Gebäude, Umlagerung kontaminierter Materialien innerhalb der Standorte	Abriss nicht mehr nutzbarer Anlagen und Gebäude, Umlagerung (de-) kontaminierter Materialien innerhalb der Standorte
für die Nachnutzung von sanierten Flächen	Nachnutzung der Industriegelände durch Industrie und Gewerbe, Nachnutzung der sanierten Haldenflächen als Grünland, Freizeitfläche, Solaranlagenstandort	Nachnutzung überwiegend durch Aufforstung oder Grünflächenanlage, für die Freizeit (Golfplatz)
für die Behandlung kontaminierter Wässer **→ Wasserbehandlungsanlagen** **→ Rückstands-Verwahrung**	keine Behandlung der Grubenwässer, keine Behandlung der Haldensickerwässer	*Behandlung der Grubenwässer in der WBA Schlema bzw. der WBA Pöhla,* *Behandlung der Frei- und Porenwässer in der WBA Helmsdorf,* *Behandlung von Teilströmen von Haldensickerwässern der Halde 371/I,* *Verwahrung der Rückstände am jeweiligen Standort*

(5)
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 nicht möglich sein, den vorbergbaulichen bzw. vorindustriellen Zustand wiederherzustellen, da die Dispersion der Elemente über die Jahrhunderte weit fortgeschritten ist. Vielmehr gehen die aktuellen Sanierungskonzeptionen dahin, durch den Ansatz der Emissionsminderung die Transportpfade zu reduzieren (Wasserweg) bzw. zu unterbrechen (Luftpfad). Die verbleibende „duldbare" Restkontamination ist fallspezifisch unter Beachtung der Exposition der Altlast und der bestehenden Belastung des Umfeldes zu definieren (Mollée 2003). Die Belastung der Freiberger Mulde ist aufgrund der zusitzenden diffusen Belastung nicht auf das Maß der Vorbelastung (Cd 0,45 µg/l) rückführbar. In der Zwickauer Mulde sind bereits Vorbelastungen zu Beginn des Belastungsgebietes Aue-Schlema vorhanden. Dafür wirkt die Talsperre Eibenstock bei den Elementen As, U zu einem gewissen Prozentsatz als Sedimentationsfalle.

Stollen wurden im erzgebirgischen Bergbau in der Regel zur Wasserlösung der Gruben und zum Erztransport angelegt. Die wasserabtragende Funktion erhält sich auch nach Abwerfen der Gruben. Bei großen und tiefen Gruben ist sie sogar von entscheidender Bedeutung für die Standsicherheit der im Einzugsbereich der Hohlräume befindlichen Gebäude, Verkehrswege etc. Im Erzgebirge gab es über 10.000 Einzelbergwerke, bekannt sind in Sachsen über 900 Stollen (Greif & Klemm 2007), im Mulde-Einzugsgebiet etwa 700, 45 davon wurde als Hauptwasserhauptlösestollen eine besondere Bedeutung beigemessen. Je nach Größe und Tiefe des aufgefahrenen Hohlraums, des eingebrachten Versatzes, der anstehenden Mineralisationen und des Flutungsniveaus stellen sich abhängig von vertikal versickernden Niederschlägen, lateral einströmenden Grundwässern und aufsteigenden Tiefenwässern spezifische hydrodynamische Gleichgewichtszustände ein, die dem ausfließenden Grubenwasser die jeweilige stoffliche Charakteristik verleihen. Im Zuge der Stilllegung des Bergbaus und der Flutung der Gruben konnten einige Grubenwasserströme nicht direkt in die Vorflut abgegeben werden. An den Standorten der Wismut GmbH entstanden im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde Wasserbehandlungsanlagen zur Reinigung der Flutungswässer der Gruben Schlema-Alberoda und Pöhla.

Aufgrund dieser Prozesse sind Stollen als mineralisations- und altbergbaubedingte Quellen, Punktquellen im System, aus denen auch weiterhin mit Schwermetall- und Arsen-Emissionen zu rechnen ist. Streng genommen sind austretende Grubenwässer aufgrund der künstlichen Erzeugung von Hohlräumen anthropogene Bildungen, sie werden jedoch aufgrund ihrer Analogie zu natürlichen Wässern der Oxidationszonen von Lagerstätten korrekter als „quasigeogene" oder als „anthropogen freigesetzte geogene Bildungen" bezeichnet (Beuge et al. 1999).

Halden beherbergen ein breites stoffliches und häufig enormes mengenmäßiges Inventar an Umweltschadstoffen. Das als „taub" bewertete Gestein wurde seit Jahrhunderten nahe den die Gruben erschließenden Schächte und Stollen und somit häufig entlang der Ufer aufgeschüttet. Mit fortschreitender Gewinnungstätigkeit kamen Halden der Aufbereitungs- und Verhüttungsrückstände und schließlich auch Abfälle der modernen metallurgischen Produktion hinzu. Je nach Wissen und technischem Stand konnten noch nicht alle heute als Wertstoffe bekannte Elemente gewonnen werden und gelangten auf die Halden. Neben den Bergehalden, die überwiegend grobe erzarme Gesteinsbruchstücke enthalten, sind die sogenannten Tailings als gut aufgearbeitete feinkörnige Ablagerungen mit hohem Schadstoffpotential hervorzuheben. Neben der teilweise problematischen Standsicherheit resultieren aus diesen Anlagen die weit größeren Schadstoffemissionen in die Umwelt. Je nach dem Grad ihrer Sanierung geben Halden hauptsächlich über den Wasserpfad Schadstoffe in die Umwelt ab. Die Haldenschüttungen besitzen in der Regel keine Basisabdichtung, so dass lateral einströmendes Grundwasser Lösungsmechanismen in Gang setzen kann. Die aus der Ab-

wägung der Verhältnismäßigkeit zwischen Umweltgefährdung und Bearbeitungsaufwand getroffene Entscheidung der standsicheren Endverwahrung der Halden an Ort und Stelle führt mit der Maßnahme einer Abdichtung bzw. Abdeckung der Oberfläche zur Unterbrechung bzw. Reduzierung der Wasserpfade und somit zu einer Emissionsminderung. Mit der bestehen bleibenden Restkontamination in Form von Sickerwässern ist auch weiterhin zu rechnen. Eine Behandlung dieser Wässer wird nur im Einzelfall nach einer genauen Kosten-Nutzen-Rechnung möglich sein.

Im Belastungsgebiet Freiberg stellt der Rote Graben als Reaktions-, Sedimentations- und (versus) Transportraum einen Schwerpunkt der Schadstoffbelastung dar. Aus den identifizierten hydraulischen und stofflichen Problemen ergibt sich dringender Handlungsbedarf. Es gilt, einerseits die hydraulischen Verhältnisse zu verbessern, die identifizierten (Schad-) Stoffströme zu quantifizieren und zu entkoppeln, sowie andererseits die Schadstoffeinträge (durch passive oder technische Maßnahmen) zu minimieren. Seitens des Freistaates Sachsen wurde durch das Sächsische Staatsministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie an den Koordinierungsrat der FGG Elbe ein Antrag für die Inanspruchnahme von Projektmitteln aus dem Projekt ELSA für eine konkrete Maßnahme am Roten Graben mit dem Ziel der „nachhaltigen Reduzierung der Schwermetalleinträge aus den Erzbergbaurevieren im Raum Freiberg“ gestellt.

(6)
Mit den Talsperren Eibenstock (an der Zwickauer Mulde) und Kriebstein (an der Zschopau) befinden sich neben dem Muldestausee (an der Vereinigten Mulde) zwei weitere große Talsperren im Einzugsgebiet der Mulde, deren Funktion im Sinne des Schadstoffrückhalts an vorliegenden Daten untersucht wurde. Frachten sind von den Terminen der Probenahme und den angetroffenen Wassermengen abhängig, die leider nicht immer vergleichbar sind. Daher gelten die ermittelten Bilanzen als Anhaltspunkte. Trotz der Inkonsistenz der Daten konnte für die TS Eibenstock in vier der fünf betrachteten Jahre ein Rückhaltepotential für As, Cd, Cu, Ni, Pb, U, Zn festgestellt werden, wobei für die Elemente As, Pb und U dieses als besonders bedeutsam einzuschätzen ist. Für die TS Kriebstein sieht die Datenlage noch schlechter aus. Hier konnte kein signifikanter Elementrückhalt nachgewiesen werden, das Verhältnis von Zufluss/Stauraum ist wesentlich ungünstiger als in der TS Eibenstock. Die ermittelten Sedimentmengen belaufen sich in der TS Kriebstein 2009 auf ca. 355.000 m³ (3 % des Stauraums), und in der VS Schönheiderhammer 2010 auf ca. 230.000 m^3 (9 % des Stauraums). Die Sedimentqualität in den Talsperren(zuläufen) gibt Aufschluss über die Geochemie in den Einzugsgebieten. Das obere Einzugsgebiet der TS Eibenstock ist durch erhöhte geogene As-Konzentrationen geprägt, auch in der TS Kriebstein liegen die As-Gehalte über der UQN von 40 mg/kg.

(7)
Aus Untersuchungen zum Nachlieferungspotential an Schwermetallen und Arsen im Belastungsabschnitt Freiberg durch das Ausbringen von Sedimentationsfallen konnten methodische, stoffliche und zeitliche Aspekte betrachtet werden.

Methodisch konnte gezeigt werden, dass sich die Elementkonzentrationen der sedimentierten Schwebstoffe nur geringfügig zwischen den beiden untersuchten Fraktionen <20 µm und <63 µm unterscheiden. Im Mittel ergibt sich bei den im Belastungsabschnitt Freiberg charakteristischen umweltrelevanten Elementen Ag, As, Vd, Cu, Pb, Sb, Sn, Zn ein Anreicherungsfaktor von 1,1 in der Fraktion <20 µm gegenüber der Fraktion <63 µm.

Stofflich bestätigt sich die Zunahme der Elementkonzentrationen in den sedimentierten Schwebstoffen von Berthelsdorf bis Halsbrücke elementspezifisch bis zu einer Größenordnung. Untersuchungen von Material aus Sedimentationsfallen (in Zusammenarbeit mit G.E.O.S. GmbH) entlang der Zyklopenmauer in Muldenhütten, die wenige hundert Meter voneinander entfernt sind, zeigten kleinräumige Änderungen in den Konzentrationen (Ag, As,

Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sn, Zn), die im Fall von Cd und Zn bis zu 100 % betragen können.

Insbesondere die Elemente As, Pb, Sb, Sn wurden durch die Flut 2002 aus den Materialien der Schlackenhalden im Muldenbogen emittiert (Rank 2004, Klemm et al. 2004) und 2003 und 2004 in den sedimentierten Schwebstoffen wiedergefunden. Zeitlich gesehen, nahmen die Konzentrationen der gebietsprägenden Elemente As, Pb, Cd, Cu, Ag, Al, Ba, Fe, Sb, Sn in den Schwebstoffen in Hilbersdorf und Halsbrücke zwischen 2003/2004 und 2012 um mehr als eine Größenordnung ab. Für die im Gebiet wenig relevanten Elemente Co, Cr, Ni waren die Veränderungen gering. Die Elemente Cd und Zn verringerten sich kaum, sieht man von höheren Gehalten während der Niedrigwasserphase 2003 ab. Eine Ursache liegt hier in der ununterbrochenen Nachlieferung dieser Elemente aus den Grubenwässern des Freiberger Reviers über den dem Roten Graben.

Die Nachlieferung von Arsen und verschiedenen Metallen findet also auch weiterhin statt, auch wenn sich das Niveau seit 2002 bei vielen Elementen deutlich verringert hat. Damit findet auch weiterhin ein Austrag dieser Elemente aus dem Belastungsgebiet Freiberg und eine Verlagerung flussabwärts statt.

(8)
Hochwasserereignisse führen zu einem erhöhten Schadstoffaustrag aus belasteten Bereichen, wie am Beispiel eines Winterhochwassers mit drei Hochwasserwellen, induziert durch Schneeschmelze in Kombination mit ergiebigen Niederschlägen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 an der Freiberger Mulde im Ausgang des Belastungsgebietes Freiberg und an der Mündung des Münzbaches gezeigt werden konnte.

Der Austrag der primär partikelgebundenen Elemente (Ag, Al, As, Fe, Pb) erfolgte in der Freiberger Mulde synchron mit dem sprunghaften Anstieg der Schwebstoffgehalte vor/zu Beginn der Hochwasserwelle, was bei allen drei Wellen beobachtet werden konnte. Ebenso zeigten die partiell partikelgebundenen Elemente (Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Sb, U, Zn,) dieses Verhalten in abgeschwächter Form. Für die Elemente Cd und Zn konnte ein Anstieg nur in den Wellen 1 und 2 festgestellt werden. Hier kommt es vermutlich zu Überlagerungseffekten zwischen dem Eintrag partikulären Materials einerseits und einer Verdünnung durch die höheren Durchflüsse andererseits. Im Münzbach, der bergbau- und hüttentechnisch sowie kommunal geprägt ist, ist für diese Elemente ein Verdünnungsverhalten bei zunehmender Wassermenge zu erkennen, damit verhalten sie sich wie die überwiegend in gelöster Form transportierten Elemente Na, K, Ca, Mg, Sr, B.

Zu Beginn jeder Welle werden die größten Frachten freigesetzt, wobei die Frachtkurven für die „partikulären“ Elemente der Form der Schwebstoffkurve entsprechen, die der „gelösten“ Elemente die der Durchflussmengenkurve. Bei der Bilanzierung besitzen die „partikulären“ Elemente für das Belastungsgebiet Freiberg ein höheres Gewicht. Dies kann mit dem Fakt untermauert werden, dass die As- und Pb-Anteile der untersuchten Hochwasserwelle ca. 1/3 der Jahresfracht an der durchschnittlichen mittleren Jahresfracht 1996-2011, die Cd- und Zn-Anteile ca. 1/5 ausmachen.

Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass bereits ein sprunghafter Anstieg der Durchflussmenge von ½ MQ auf MQ in der Freiberger Mulde nach einer längeren Niedrigwasserphase (hier 3,5 Monate) ausreicht, um die jüngst im Gewässerbett abgelagerten feinpartikulären Sedimente zu mobilisieren, die das für diesen Abschnitt typische Schadstoffspektrum emittieren. Bei höheren Hochwasserwellen, die im Bereich von MHQ liegen, wurde ein verstärkter Austrag der „partikulären“ Elemente gefunden. Da speziell As und Pb auch charakteristische Elemente der Hochflutsedimente waren, die 2002 von den Schlackenhalden im Muldenbogen abgetragen wurden, besteht die Annahme, dass noch Altsedimente im Gewässerbett lagern, die bei derartigen Ereignissen mobilisiert werden können bzw. es sich

auch um neue Materialien handelt, die aus ungesicherten ufernahen Bereichen abgespült wurden.

Damit stellt das Belastungsgebiet Freiberg einen Gewässerabschnitt der Freiberger Mulde dar, aus dem bei Hochwasser die hier typischen, insbesondere die bevorzugt partikulär transportierten Elemente, in verstärktem Maße ausgetragen werden.

(9)
Die Auswertung der Analysen zur Belastung von Flusssedimenten mit organischen Schadstoffen an der Fraktion <2 mm ergab, dass die Stoffgruppe HCH, DDT und ihre Metabolite sowie TBT den oberen Schwellenwert der Klassifizierung gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept an der Mündung der FM, der ZM sowie in der VM (Bad Düben) überschreitet. Auch einzelne Vertreter der PAK, wie Fluoranthen, Benzo(a)pyren überschreiten diese Grenze. Für die Gruppe der PCBs, für die Gruppe der Dioxine und Furane sowie die Stoffe Pentachlorbenzen und HCB konnten keine Schwellenwertüberschreitungen festgestellt werden. An Altlastenstandorten kommt es im Einzelfall zu einer massiven Überschreitung der oberen Schwellenwerte, insbesondere bei PCBs, PAKs, Dioxinen/Furanen.

(10)
Defizite bestehen bei den qualitativen Daten in der Konsistenz der Untersuchungen hinsichtlich Wasser- und Schwebstoff/Sedimentpfad (gesamt, gelöst, Zeitreihe) an einigen Punkten, die zur Charakterisierung der Belastungsgebiete und ihrer Zuläufe wichtig sind. Größer sind die Defizite bei den quantitativen Daten. Hier gibt es insbesondere für die Quellen (Bäche, Stollen) häufig keine oder wenige aktuelle Angaben zu den geschütteten Wassermengen.

Die ermittelten Frachten unterliegen großen Schwankungen und werden trotz der Wichtung über den MQ_{Jahr} (IKSE-SM 2012) stark von der zum Probenahmezeitpunkt abfließenden Wassermenge bestimmt. Die damit verbundenen Unsicherheiten können zu Falschaussagen in der Trendbetrachtung führen. Es wird empfohlen, Aussagen zur zeitlichen Entwicklung aus den Jahresreihen der Konzentrationen abzuleiten. Zu Aussagen zum Verteilungsverhalten und möglicher Änderungen werden Analysen der Gesamt- und gelösten Gehalte benötigt, die an den für die Belastungsgebiete relevanten Stellen durchgängig zu erheben sind.

Literaturverzeichnis

Ackermann F., Bergmann H., Schleichert U. (1983): Monitoring of heavy metals in coastal and estuarine sediments - a question of grain-size: <20 µm versus <60 µm. Environmental Technology Letters 4: 317–328.

analytec (2010): Talsperre Kriebstein - gestauter Abschnitt der Zschopau von der Staumauer bis ca. 500 m oberstromig der Brücke Weißthal. Ergebnisbericht im Auftrag der TU Bergakademie Freiberg. Chemnitz.

Badura M., Schmegg J. (1975): Aufnahme der Verschlammung der Talsperre Kriebstein. Ingenieurpraktikum.

Bahadir M., Parlar H. u. Spiteller M. (2000): Springer Umweltlexikon. Springer. Berlin, New York. xxii, 1455.

Beuge P., Greif A., Hoppe T., Klemm W., Kluge A., Mosler U., Starke R., Alfaro, J., Haurand M., Knöchel A., Meyer A. (1999): Die Schwermetallsituation im Muldesystem. Schlußbericht zu den Fördervorhaben ; Förderkennzeichen [BMBF]: 02 WT 9113 (Schadstoffbestandsaufnahmen), 02 WT 9114 (Schadstoffmobilisierung) ; Abschlußdatum des Vorhabens 31.12.1994. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Freiberg, Hamburg, Hannover.

BMWi (2011): 20 Jahre Wismut GmbH - Sanieren für die Zukunft. http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/wismut,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf. Aufgerufen am 6.5.2013.

Eckstein, L. (2003): Festlegung von Sanierungszielen unter Beachtung einer großräumigen geogenen und anthropogenen Belastung. In: SAXONIA (Hrsg.): 10 Jahre Altlastenprojekt SAXONIA. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH. Nossen: 31–40.

Forkmann B., Hoppe T. (1992): Mengenberechnung und Unbedenklichkeitsabschätzung von in der Talsperre Kriebstein abgelagerten Sedimenten. Ergebnisbericht im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung Sachsen. Freiberg.

Fritz E. (2003): SAXONIA GmbH - ein Unternehmen in der Verantwortung für Tradition, Aufbruch und Entwicklung. In: SAXONIA (Hrsg.): 10 Jahre Altlastenprojekt SAXONIA. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH. Nossen: VII–XXIII.

Fritz E. (2012): Revitalisierung von Altstandorten/Flächenrecycling. Vortrag am 18.01.2012. Freiberg. 93 S.

Fugro Consult GmbH (2011): Ergebnisbericht Vorsperre Schönheiderhammer, geophysikalische Sedimenterkundung. im Auftrag der Landestalsperreverwaltung Sachsen. Torgau. 7 S.

Greif A. (2013): Studie zur Charakterisierung der Schadstoffeinträge aus den Erzbergbaurevieren der Mulde in die Elbe. Abschlussbericht im Auftrag der BSU Hamburg. Freiberg.

Hellmann H. (1983): Korngrößenverteilung und organische Spurenstoffe in Gewässersedimenten und Böden. Fresenius Z Anal Chem 316.

HGC GmbH (2012): Wassermonitoring SAXONIA 2009-12. Jahresbericht 2011. Freiberg.

Hillenbrand T., Marscheider-Weidemann F., Strauch M., Heitmann K. u. Schaffrin D. (2007): Emissionsminderung für prioritäre und prioritäre gefährliche Stoffe der Wasserrahmenrichtlinie. - Stoffdatenblätter -. Berlin. 483 S.

Hoppe T. (1995): Geochemische Untersuchungen an Gewässern und ihren Sedimenten im Einzugsgebiet der Mulde. Dissertation. Freiberg.

Hösel G., Tischendorf G., Wasternack J. (1997): Erläuterungen zur Karte "Mineralische Rohstoffe Erzgebirge - Vogtland/Krušné hory". Karte 2: Metalle, Fluorit/Baryt - Verbreitung und Auswirkungen auf die Umwelt 1 : 100.000. Bergbaumonographie. Freiberg.

IKSE-SM (2012): Methodik der Berechnung von Schadstoff-Jahresfrachten an den Bezugsmessstellen im Rahmen des IKSE-Sedimentmanagements. Bearbeitungsstand: 19.07.2012, Programmversion 14.

Janneck E.; Martin M.; Pinka J. (2009a): Sanierungsuntersuchung am Stangenbergbach zur Verminderung des Schwermetalleintrages in die Freiberger Mulde. Bericht im Auftrag der SAXONIA Standortentwicklungs- und –verwaltungsgesellschaft mbH Freiberg. Freiberg.

Janneck, E.; Martin, M.; Zimmermann, M. (2008): Erarbeitung einer Vorplanung mit Kostenabschätzung zur Sanierung und Unterhaltung des künstlichen Gewässers Roter Graben. Bericht im Auftrag der Landesdirektion Chemnitz, Abt. Umweltschutz. Freiberg.

Janneck E., Pinka J., Martin M. (2009b): Gefährdungsabschätzung „Roter Graben". als Ergänzung der HOAI – Lph. 1 Grundlagenermittlung und Fortschreibung des Variantenvergleiches der vorliegenden als Ergänzung der HOAI – Lph. 1 Grundlagenermittlung und Fortschreibung des Variantenvergleiches der vorliegenden Vorplanung, HOAI Lph.2, Bericht im Auftrag der Landesdirektion Chemnitz, Abt. Umweltschutz. Freiberg.

Kardel K., Rank G., Pälchen W. (1996): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen, Teil 1: Spurenelementgehalte in Gesteinen. Radebeul. 37 S.

Klemm W., Greif A., Knittel U. (2004b): Schwermetall- und Arsenverlagerungen in der Freiberger 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 une Mulde. Kompetenzzenrum Digitaldr. Nürnberg: 159–172.

Kreyβig E., Meyer J., Schramm A. (2011): Stoffliche Einträge in die Zwickauer Mulde im Prozess der Uranbergbausanierung durch die Wismut GmbH. Lichtenstein.

Kreyβig E., Sporbert U., Eulenberger S. (2008): From remediation to long-term monitoring - The concept of key monitoring points at WISMUT. In: Merkel, B. J. u. Hasche-Berger, A. (Hrsg.): Uranium, Mining and Hydrogeology. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg: 415–423.

Kunau J. (2004): Die Schwermetallbelastung der Freiberger Mulde im Abschnitt Muldenhütten - Obergruna unter Bezugnahme auf das Altlastenprojekt SAXONIA. Praktikumsarbeit. 104 S.

LfULG (2012a): Gewässergütedaten 1999-2011. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/7112.htm. Aufgerufen am 10.1.2012.

LfULG (2012c): Gewässergütedaten 1996-1998. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/7112.htm. Aufgerufen am 10.1.2012.

LfULG (2013a): Gewässerkundlicher Monatsbericht. Dezember 2012. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/Monatsbericht_2012__12.pdf. Aufgerufen am 26.2.2013.

LfULG (2013c): Gewässerkundlicher Monatsbericht. Januar 2013. http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/Monatsbericht_2013_01.pdf. Aufgerufen am 25.6.2013.

Mann S. (2012): Die Wismut- Sanierung und ihre Rechtfertigung – Ziele und Ergebnisse. Freiberg.

Martin M., Engel J. (2012): Weitere Untersuchungen der Schlackenhalden Muldenbogen und Hilbersdorfer Tor bezüglich des Eintrages dioxinhaltiger Feststoffe in das Oberflächengewässer „Freiberger Mulde" (Untersuchung Muldesedimente). Bericht im Auftrag der SAXONIA Standort- und Entwicklungsgesellschaft mbH. Freiberg. 18 S.

Meyer J., Schramm, A., Kreyßig, E. (2012): Konzept Wassermanagement am Sanierungsstandort Aue (Datenstand 2011). Chemnitz.

Mollée R. (2003): Altlasten und Bodenmanagement unter Berücksichtigung der Bedingungen des Standortes Freiberg. In: SAXONIA (Hrsg.): 10 Jahre Altlastenprojekt SAXONIA. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH. Nossen: 73–94.

Murglat P. (1994): Die Auflösung diffuser Kontaminationsquellen in einem konkreten Flussabschnitt der Mulde. Diplomarbeit. Freiberg.

OBA (2005): Der Bergbau in Sachsen. http://www.smwa.sachsen.de/set/431/jahresbericht_2004.pdf. Aufgerufen am 29.01.13.

Pöyry GKW GmbH (2010): Repräsentative Probenahme, Vermessung und Analyse der Sedimente der Vorsperre Schönheiderhammer, Talsperre Eibenstock. Dresden.

Rank, G. (2004): Arsen- und Schwermetallbelastung im Mulde- und Elbe-Einzugsgebiet nach dem Augusthochwasser 2002 in Sachsen. Wasser und Abfall 3 (34-40).

SAXONIA (2012): Altlastenprojekt Saxonia. http://www.saxonia-freiberg.de/cgi-bin/click.system?navid=Altlastenprojekt-SAXONIA_1301&sid=c. Aufgerufen am 8.2.13.

Schräber D. (2006): Bergbaugeschichtlicher Erkundungsweg "Roter Graben". http://www.freiberg.de/freiberg/ressourcen.nsf/docname/Ressourcen_5BDE2D7E6A9D34EEC12574480047467F/$File/RtrGrbn.pdf?OpenElement. Aufgerufen am 25.1.2012.

Schreckenbach J. (2010): Untersuchungen der Schwermetall- und Arsenverteilung im Ablauf des Roten Grabens. Studienarbeit. Freiberg.

Thieme Chemistry (2013): Thieme RÖMPP Chemielexikon Online. - http://www.roempp.com/prod/.

Wasternack J., Tischendorf G., Hösel G., Kuschka E., Breiter K., Chrt J., Komínek J., Štemprok M. (1995): Mineralische Rohstoffe Erzgebirge-Vogtland/ Krušné hory. Karte 2: Metalle, Fluorit/ Baryt - Verbreitung und Auswirkungen auf die Umwelt 1 : 100.000.

Wikipedia (2013): Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane. - http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=118430533. Aufgerufen am 2.7.2013.

Wismut GmbH (2005a): Umweltbericht 2004. http://www.wismut.de/de/downloads/UWB2004_neu.pdf. Aufgerufen am 21.1.2013.

Wismut GmbH (2010c): Chronik der Wismut (CD). Mit erweitertem Sanierungsteil (1998-2010). Chemnitz.

Wismut GmbH (2012a). Umweltbericht 2011. www.wismut.de. Aufgerufen am 21.1.2013.

Wismut GmbH (2013a): Internetseite des Unternehmens. www.wismut.de. Aufgerufen am 10.5.2013.

Wismut GmbH (2013b): 10 Jahre Sanierung von sächsischen Wismut-Altstandorten. http://www.wismut.de/de/download.php?download=2845. Aufgerufen am 10.5.2013.

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Übersicht über die Lage des Muldeeinzugsgebietes im Elbeeinzugsgebiet

Anlage 2: Geologische Übersichtskarte des Muldeeinzugsgebietes

Anlage 3: Übersicht über die Mineralisationen und bedeutenden Bergbaureviere im oberen Einzugsgebiet der Mulde

Anlage 4: Übersicht über die Lage der Messstellen an den Hauptfließgewässern (sächsisches Landesmessnetz Oberflächenwasser) und Auswahl der Hauptbetrachtungspunkte im Muldeeinzugsgebiet

Anlage 5: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: As-Gesamtgehalte

Anlage 6: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cd-Gesamtgehalte

Anlage 7: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cu-Gesamtgehalte

Anlage 8: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Ni-Gesamtgehalte

Anlage 9: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Pb-Gesamtgehalte

Anlage 10: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: U-Gesamtgehalte

Anlage 11: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Zn-Gesamtgehalte

Anlage 12: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: As-Gesamtgehalte

Anlage 13: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cd-Gesamtgehalte

Anlage 14: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cu-Gesamtgehalte

Anlage 15: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Ni-Gesamtgehalte

Anlage 16: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Pb-Gesamtgehalte

Anlage 17: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: U-Gesamtgehalte

Anlage 18: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Zn-Gesamtgehalte

Anlage 19: Trendentwicklung für Arsen in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 20: Trendentwicklung für Cadmium in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 21: Trendentwicklung für Kupfer in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 22: Trendentwicklung für Nickel in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 23: Trendentwicklung für Blei in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 24: Trendentwicklung für Uran in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 25: Trendentwicklung für Zink in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben

Anlage 26: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der As-Konzentrationen und der As-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 27: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Cd-Konzentrationen und der Cd-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 28: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Cu-Konzentrationen und der Cu-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 29: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Ni-Konzentrationen und der Ni-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 30: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Pb-Konzentrationen und der Pb-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 31: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der U-Konzentrationen und der U-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 32: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Zn-Konzentrationen und der Zn-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde

Anlage 33: Einschätzung der Frachtermittlungen: Beprobte Durchflüsse an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde und ihre Auswirkungen auf die Frachten am Beispiel von Arsen

Anlage 34: Schema des Belastungsgebietes Freiberg an der Freiberger Mulde mit wesentlichen Nebenflüssen und Punktquellen einschließlich einer Übersicht über die Bergbau- und Hüttenstandorte der SAXONIA-Liegenschaften im Freiberger Raum

Anlage 35: Überblick über die größten Sanierungsobjekte und die dort vorgenommenen Maßnahmen an den Standorten des SAXONIA-Altlastenprojekts

Anlage 36: Zeitliche Entwicklung der Cd- und Zn-Gehalte in den Wässern des Stangenbergbaches

Anlage 37: Zeitliche Entwicklung der Cd- und Pb-Gehalte in den Wässern des Hüttenbaches

Anlage 38: Zeitliche Entwicklung der Cd-Gehalte in den Wässern des RWE-Kanals und der Pb-Gehalte in den Wässern des MRU-Kanals (Gesamtgehalte), Daten: LfULG, SAXONIA mbH

Anlage 39: Zeitliche Entwicklung der Cd- und Pb-Gehalte in den Wässern der Hüttenrösche

Anlage 40: Elementgehalte in den Wässern (Gesamtgehalte) und Sedimenten (Fraktion <20 µm) des Roten Grabens

Anlage 41: Hydraulische und stoffliche Probleme im Roten Graben und ihre Ursachen sowie Lösungsansätze

Anlage 42: Diskutierte Varianten zur Sanierung des Roten Grabens und Varianten zur Wasserbehandlung und Möglichkeiten zur Reduzierung der Cd-Einträge aus dem Freiberger Raum

Anlage 43: Schema der Belastungsgebiete Schlema und Crossen an der Zwickauer Mulde mit wesentlichen Nebenflüssen und Punktquellen

Anlage 44: Sanierungskonzeption der Wismut GmbH

Anlage 45: Zeitliche Entwicklung der As- und U-Konzentrationen bzw. –frachten im Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda, Wirksamkeit der WBA Schlema

Anlage 46: Wirksamkeit der WBA Schlema hinsichtlich der Arsen- und Uran-Abtrennung

Anlage 47: Zeitliche Entwicklung der mittleren Wassermengen und ausgewählter Konzentrationen (Mittelwerte) im Markus Semmler Stolln

Anlage 48: Zeitliche Entwicklung der mittleren Wassermengen sowie der As- und U-Konzentrationen (Mittelwerte) im Schlemabach, Daten: LfULG, Wismut GmbH

Anlage 49: Wirksamkeit der WBA Helmsdorf hinsichtlich der Arsen- und Uran-Abtrennung

Anlage 50: Durchflussbilanz für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 51: Frachtbilanz für Arsen für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 52: Frachtbilanz für Cadmium für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 53: Frachtbilanz für Kupfer für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 54: Frachtbilanz für Nickel für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 55: Frachtbilanz für Blei für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 56: Frachtbilanz für Zink für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 57: Durchflussbilanz für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 58: Frachtbilanz für Arsen für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 59: Frachtbilanz für Cadmium für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 60: Frachtbilanz für Kupfer für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 61: Frachtbilanz für Nickel für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 62: Frachtbilanz für Blei für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 63: Frachtbilanz für Uran für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 64: Frachtbilanz für Zink für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008

Anlage 65: Übersicht über die betrachteten Punkte im Gewässer, den Zuflüssen und den Punktquellen der Freiberger Mulde als Grundlage für den Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008

Anlage 66: Übersicht über die betrachteten Punkte im Gewässer, den Zuflüssen und den Punktquellen der Zwickauer Mulde als Grundlage für den Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008

Anlage 67: Lage und Ausdehnung der TS Eibenstock und der TS Kriebstein

Anlage 68: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der As-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009

Anlage 69: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der U-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009

Anlage 70: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Mn-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009

Anlage 71: Mittlere Elementkonzentrationen in Sedimenten der Zwickauer Mulde im Zu- und Ablauf der TS Eibenstock sowie in der VS Schönheiderhammer
Anlage 72: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der As-, Cd-, U- und Mn-Konzentrationen in der Zschopau oberhalb (Ringethal) und unterhalb (Kriebethal) der Talsperre Kriebstein

Anlage 73: Mittlere Elementkonzentrationen in Sedimenten in der Zschopau im Zu- und Ablauf der TS Kriebstein sowie in der TS Kriebstein

Anlage 74: Mittlere As- und Cd-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

Anlage 75: Mittlere Cu- und Pb-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

Anlage 76: Mittlere Zn- und Cr-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

Anlage 77: Mittlere Elementgehalte (As, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm/<63 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

Anlage 78: Mittlere Elementgehalte (Sb, Sn, Al, Ba, Cr, Fe, V, Zn) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm/<63 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012

Anlage 79: Kleinräumige Änderungen in den Elementgehalten der Schwebstoffe der Freiberger Mulde im Abschnitt Muldenhütten oberhalb (oh.) und unterhalb (uh.) der Zyklopenmauer (rechtsseitig), Fraktion <63 µm

Anlage 80: Mittlere Durchflussmengen (Q) und mittlere Elementgehalte (Cr, Ni) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

Anlage 81: Mittlere Elementgehalte (As, Pb, Sb) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

Anlage 82: Mittlere Elementgehalte (Cd, Zn, Cu) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

Anlage 83: Verhalten der Zn- und Cd-Konzentrationen in den Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) in Abhängigkeit von den jeweiligen mittleren Durchflussmengen

Anlage 84: Variationsbreite ausgewählter Elemente in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

Anlage 85: Entwicklung der meteorologischen und hydrologischen Situation im Zeitraum vom 15.12.2012 bis 22.01.2013 im Gebiet der oberen bis mittleren Freiberger Mulde

Anlage 86: Charakterisierung der Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 an den Pegeln Berthelsdorf und Nossen, Probenahmeschema am Punkt Halsbrücke und Bezug zu den hydrologischen Parametern

Anlage 87: Zeitlicher Verlauf der Schwebstoff-, As- und Pb-Konzentrationen in den drei Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke (FM) und im Münzbach/Mündung (MÜ) in Relation zum Durchfluss (Q) in der Freiberger Mulde

Anlage 88: Zeitlicher Verlauf der Cd-, Zn- und Cu-Konzentrationen in den drei Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke (FM) und im Münzbach/Mündung (MÜ) in Relation zum Durchfluss (Q) in der Freiberger Mulde

Anlage 89: Abhängigkeit der Schwebstoffmenge und der As-, Pb-, Zn und Fe-Gehalte von der Durchflussmenge (Q) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

Anlage 90: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der Na-, Cd- und Zn-Gehalte von der Durchflussmenge (Q) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

Anlage 91: Abhängigkeit der partikulären Elementanteile von der Schwebstoffmenge (AFS) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke und im Münzbach/Mündung

Anlage 92: Schwebstoff- und Elementfrachten während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

Anlage 93: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe Anthracen und Benzo(a)pyren in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 94: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite des organischen Schadstoffs Fluoranthen in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 95: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe α-HCH und β-HCH in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 96: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe γ-HCH und p,p-DDT in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 97: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe p,p-DDE und p,p-DDD in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 98: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-101 und PCB-138 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 99: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-153 und PCB-180 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

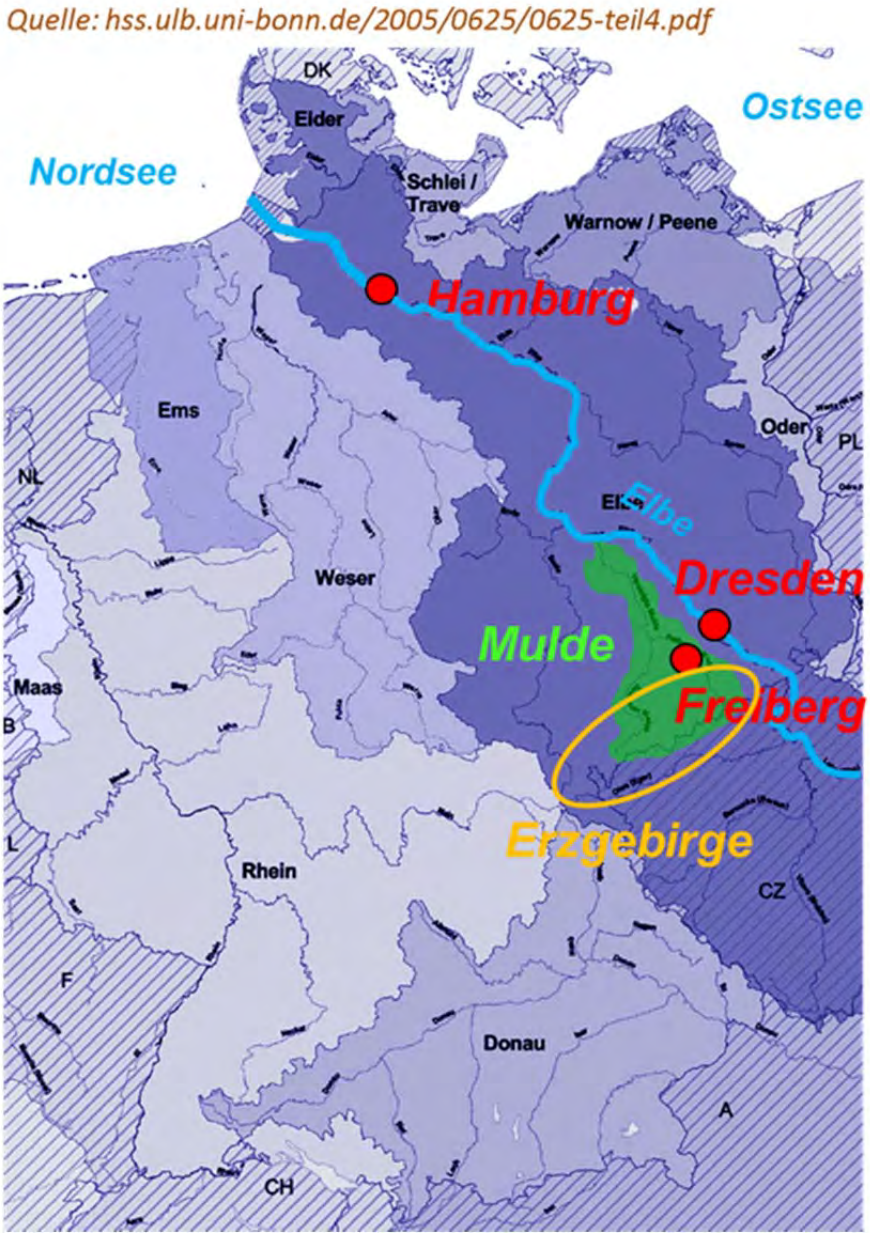
Anlage 100: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-28 und PCB-52 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 101: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-118 und HCB in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

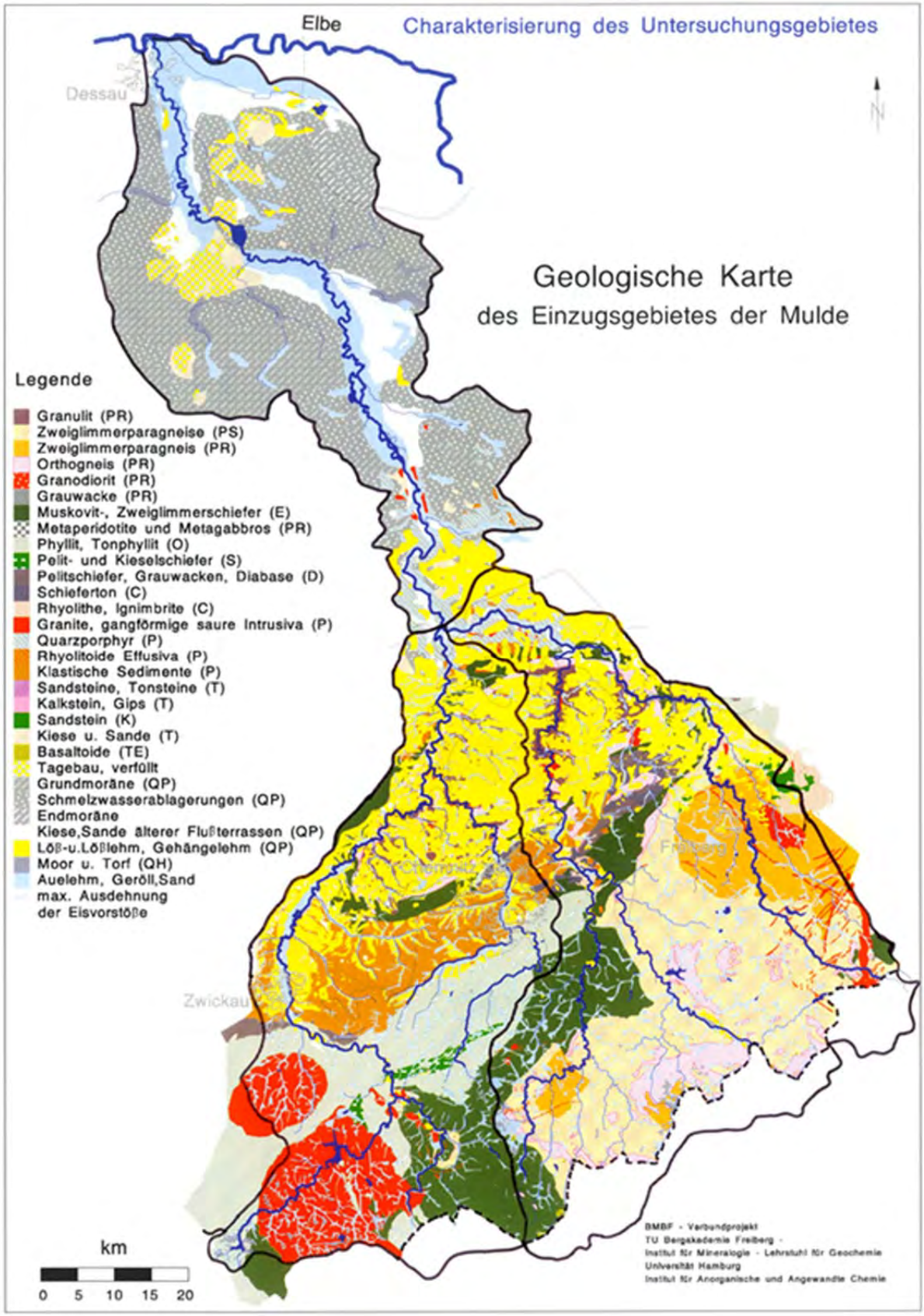
Anlage 102: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe Pentachlorbenzen und TBT in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

Anlage 103: Überblick über die beteiligten Institutionen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe, den zeitlichen Verlauf der Datenübergabe und die Menge der recherchierten Daten

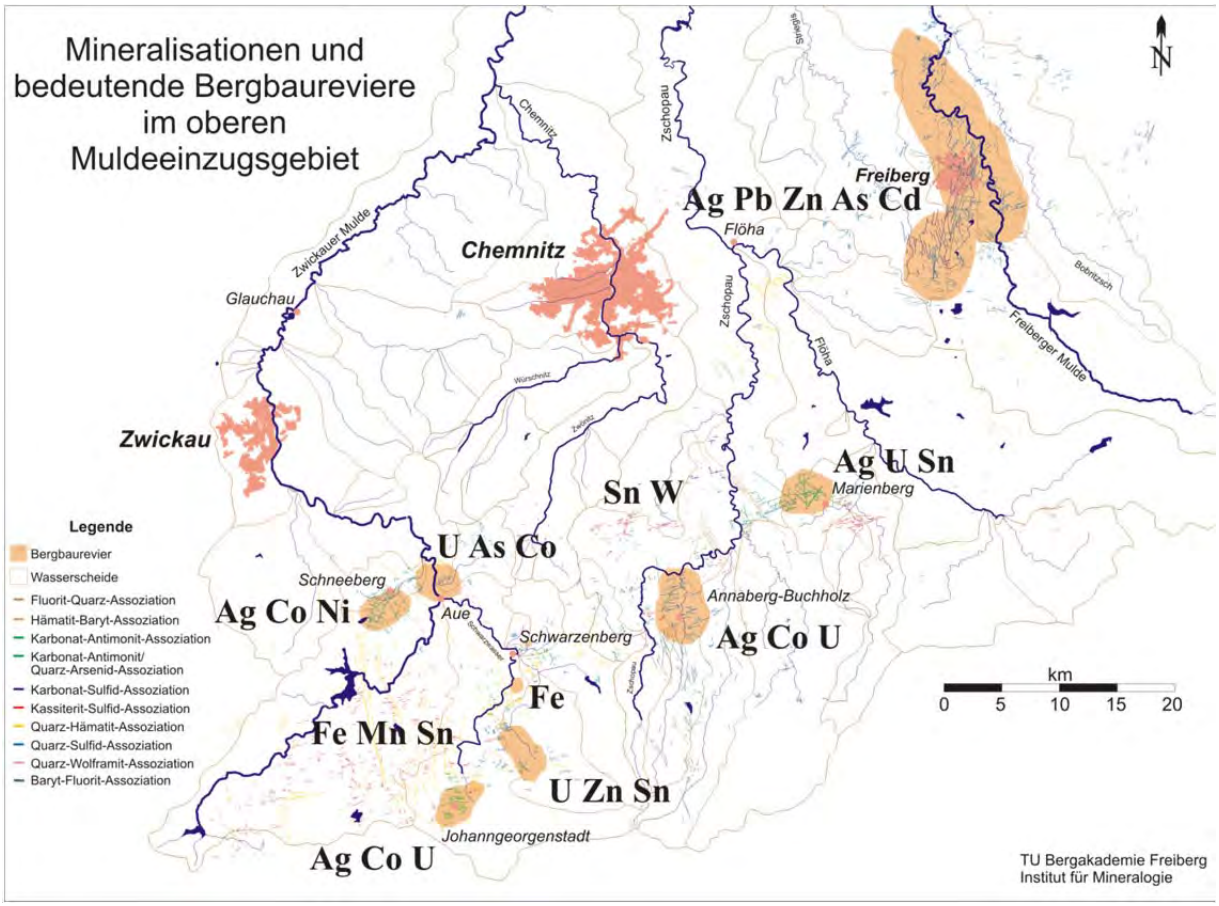
Anlage 1: Übersicht über die Lage des Muldeeinzugsgebietes im Elbeeinzugsgebiet



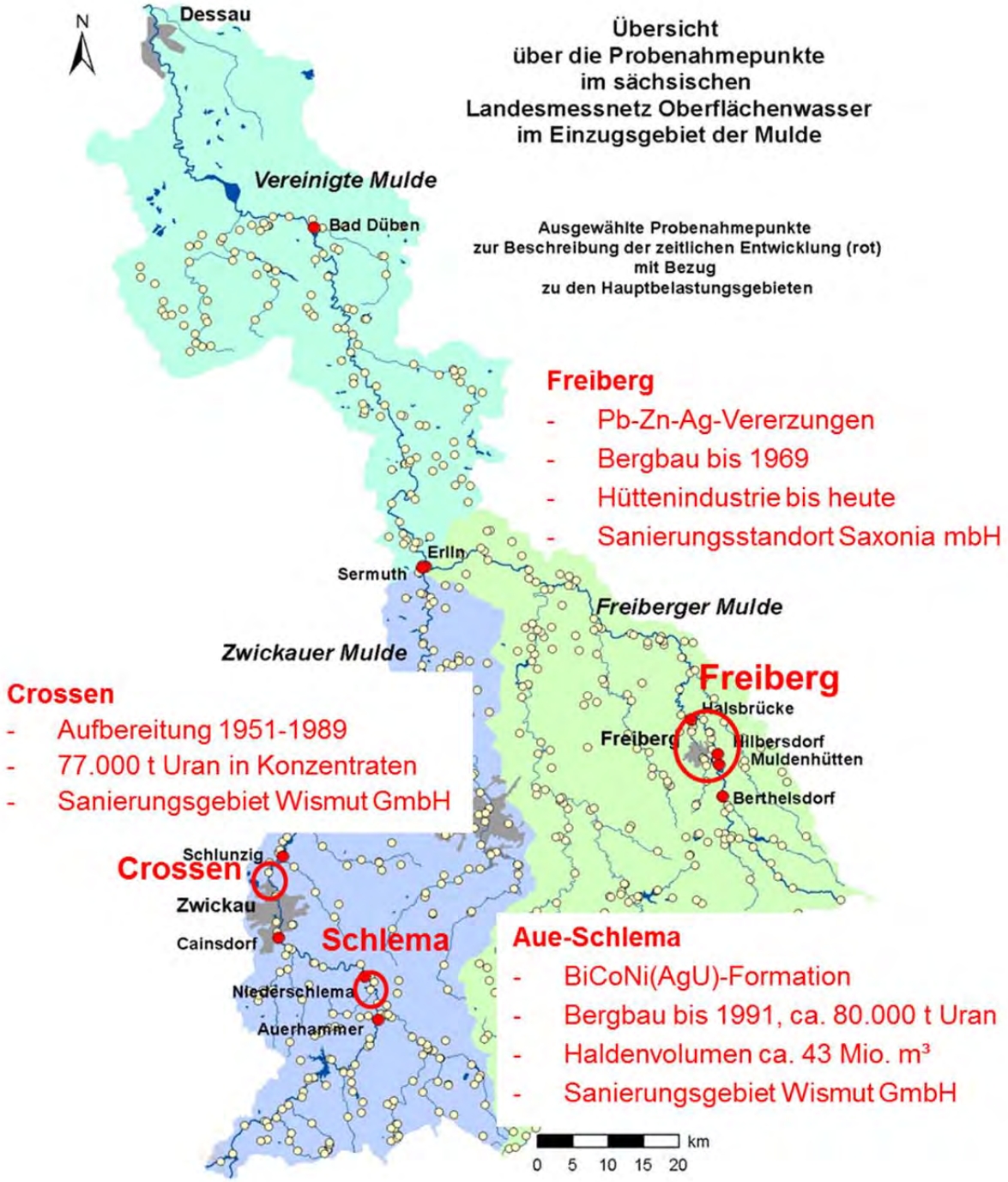
Anlage 2: Geologische Übersichtskarte des Muldeeinzugsgebietes (Beuge et al. 1999)



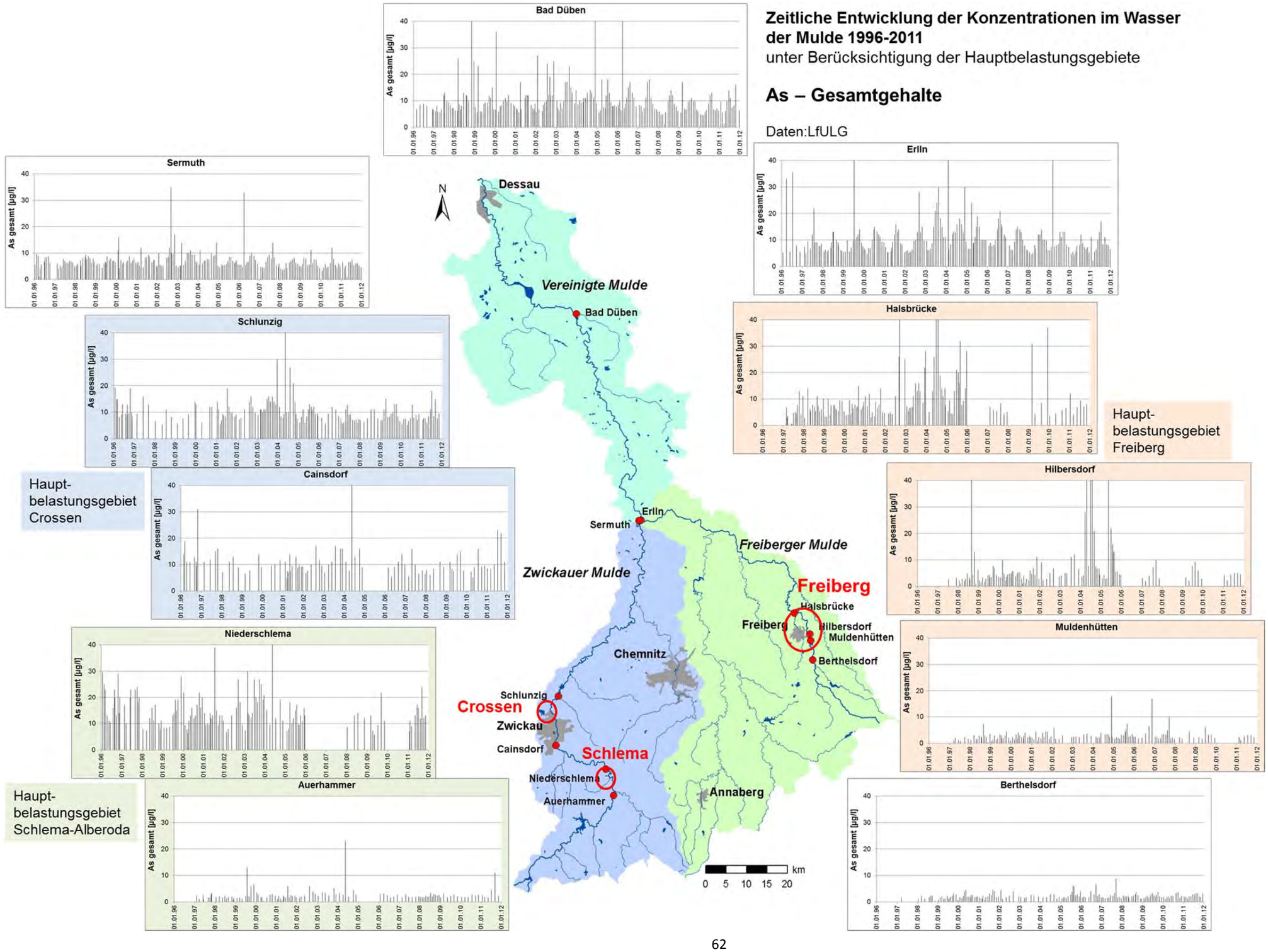
Anlage 3: Übersicht über die Mineralisationen und bedeutenden Bergbaureviere im oberen Einzugsgebiet der Mulde (Beuge et al. 1999)



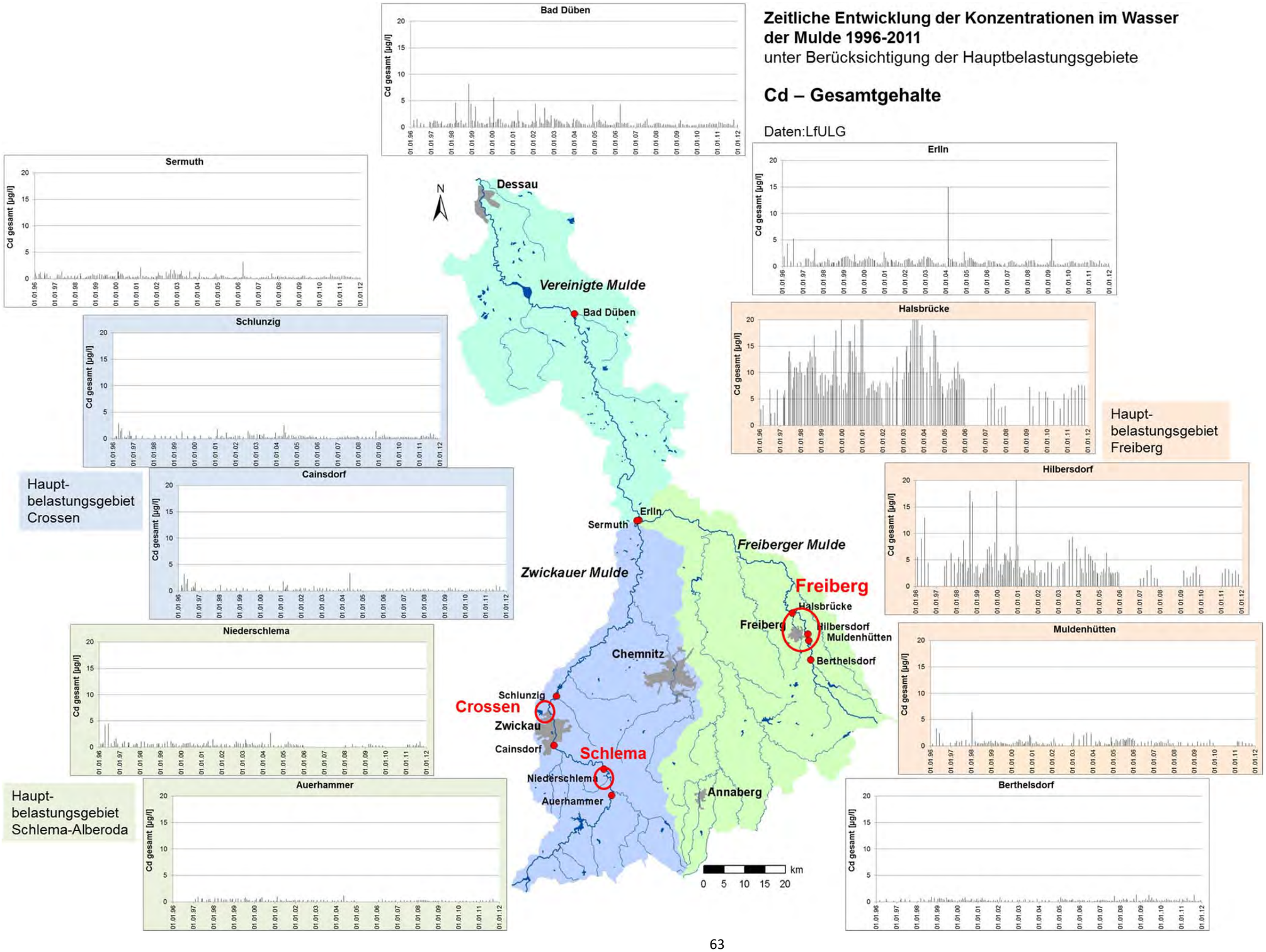
Anlage 4: Übersicht über die Lage der Messstellen an den Hauptfließgewässern (sächsisches Landesmessnetz Oberflächenwasser) und Auswahl der Hauptbetrachtungspunkte im Muldeeinzugsgebiet (LfULG 2012a)



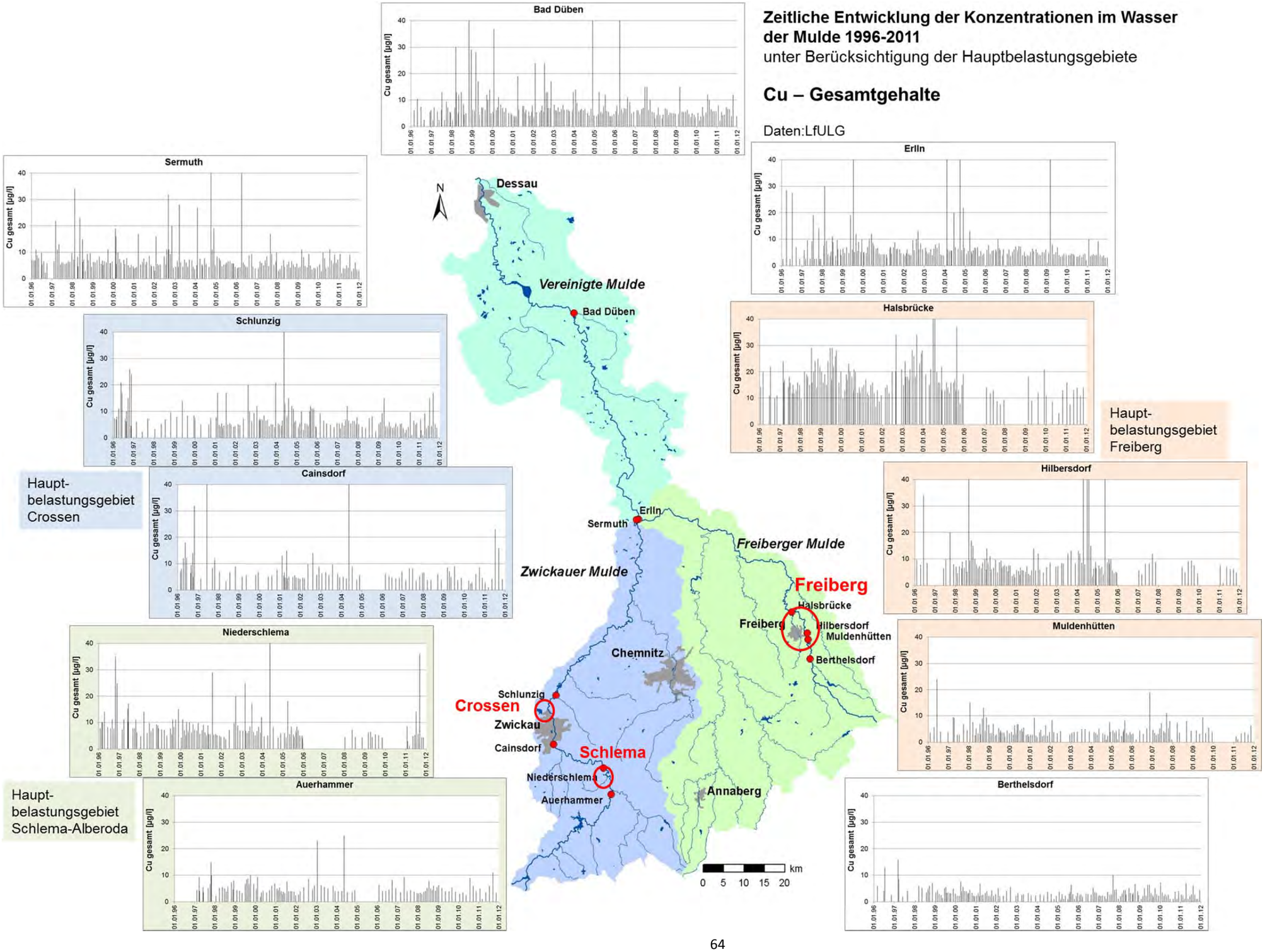
Anlage 5: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: As-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



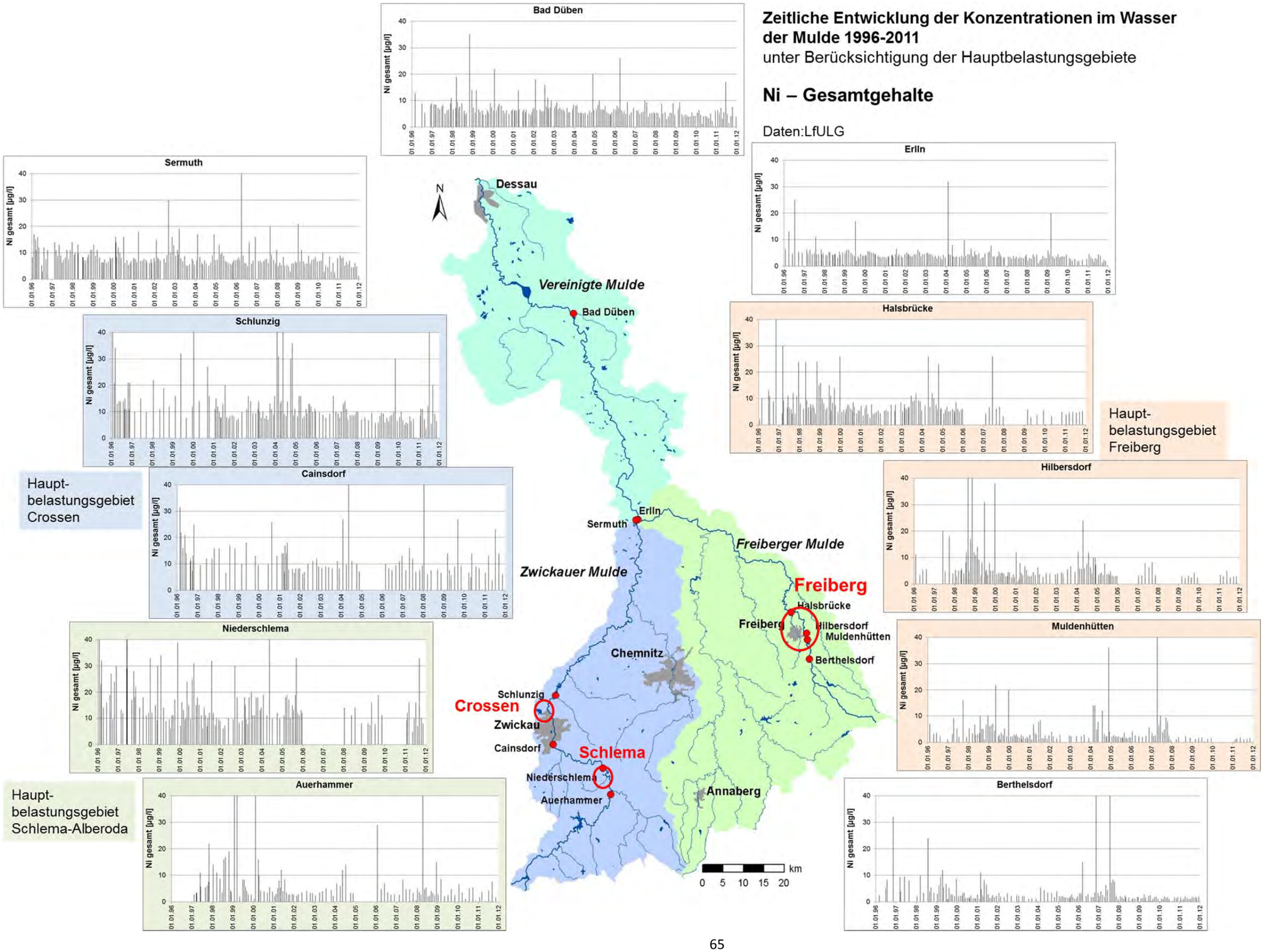
Anlage 6: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cd-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



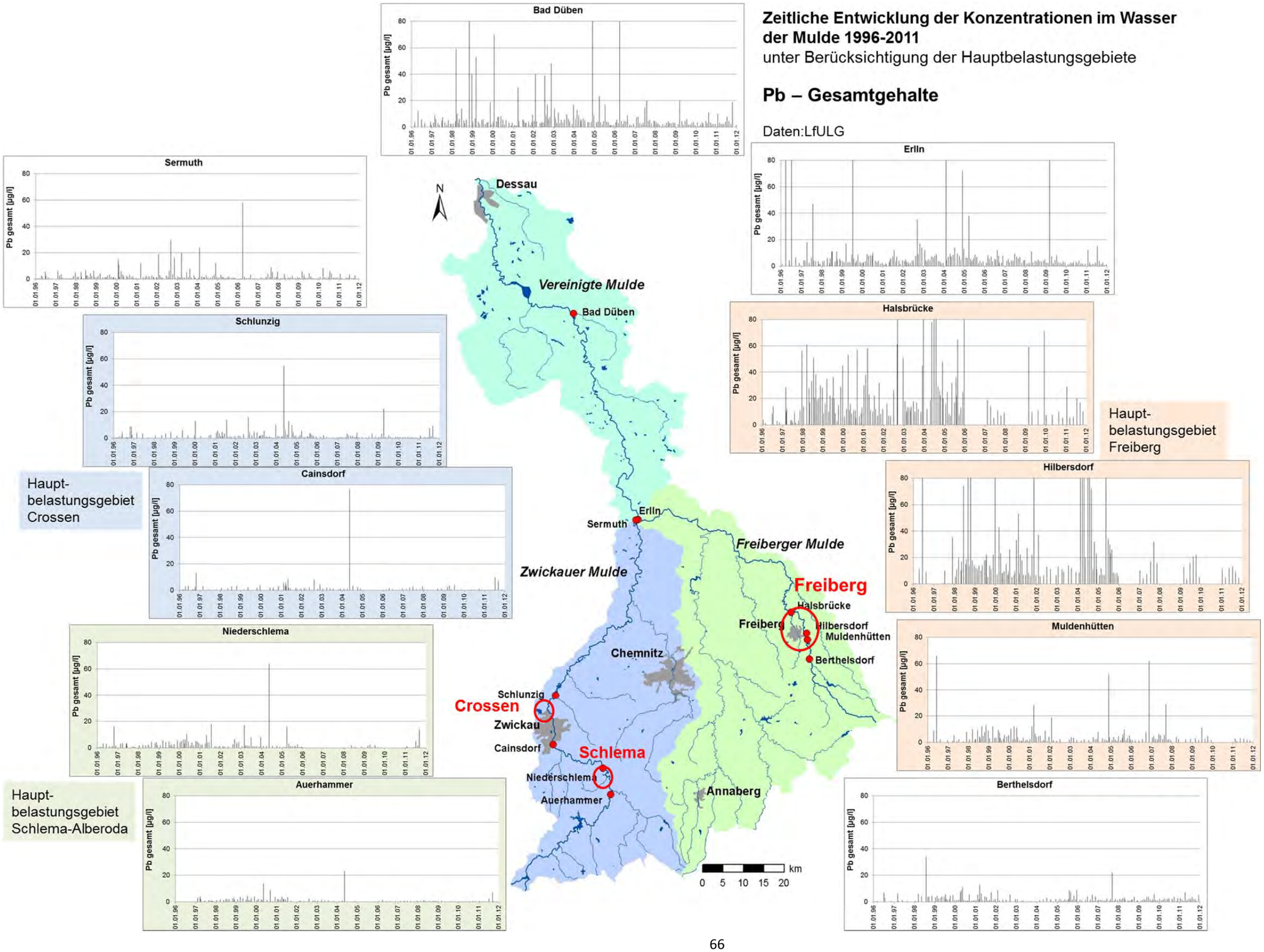
Anlage 7: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cu-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



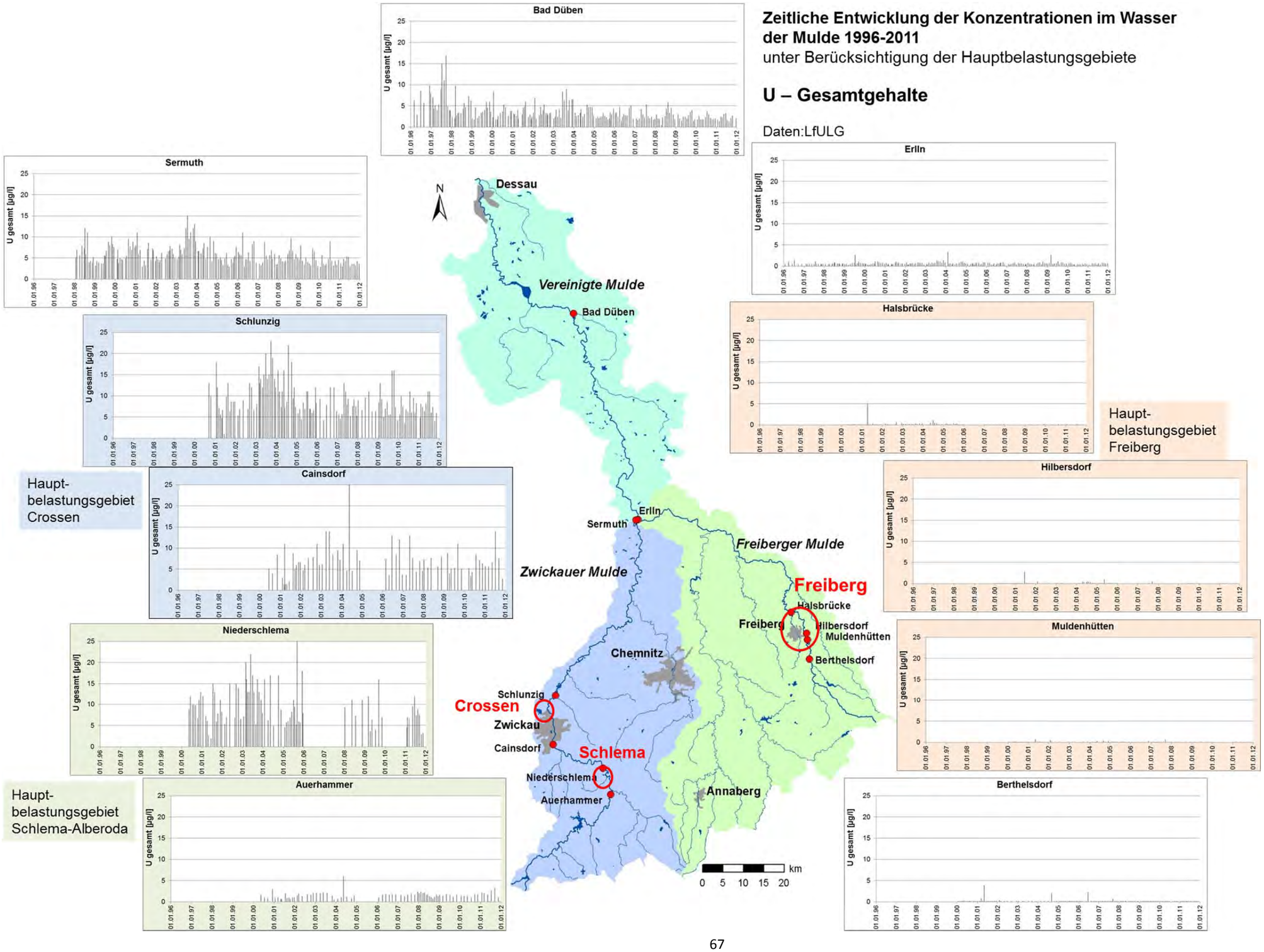
Anlage 8: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Ni-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



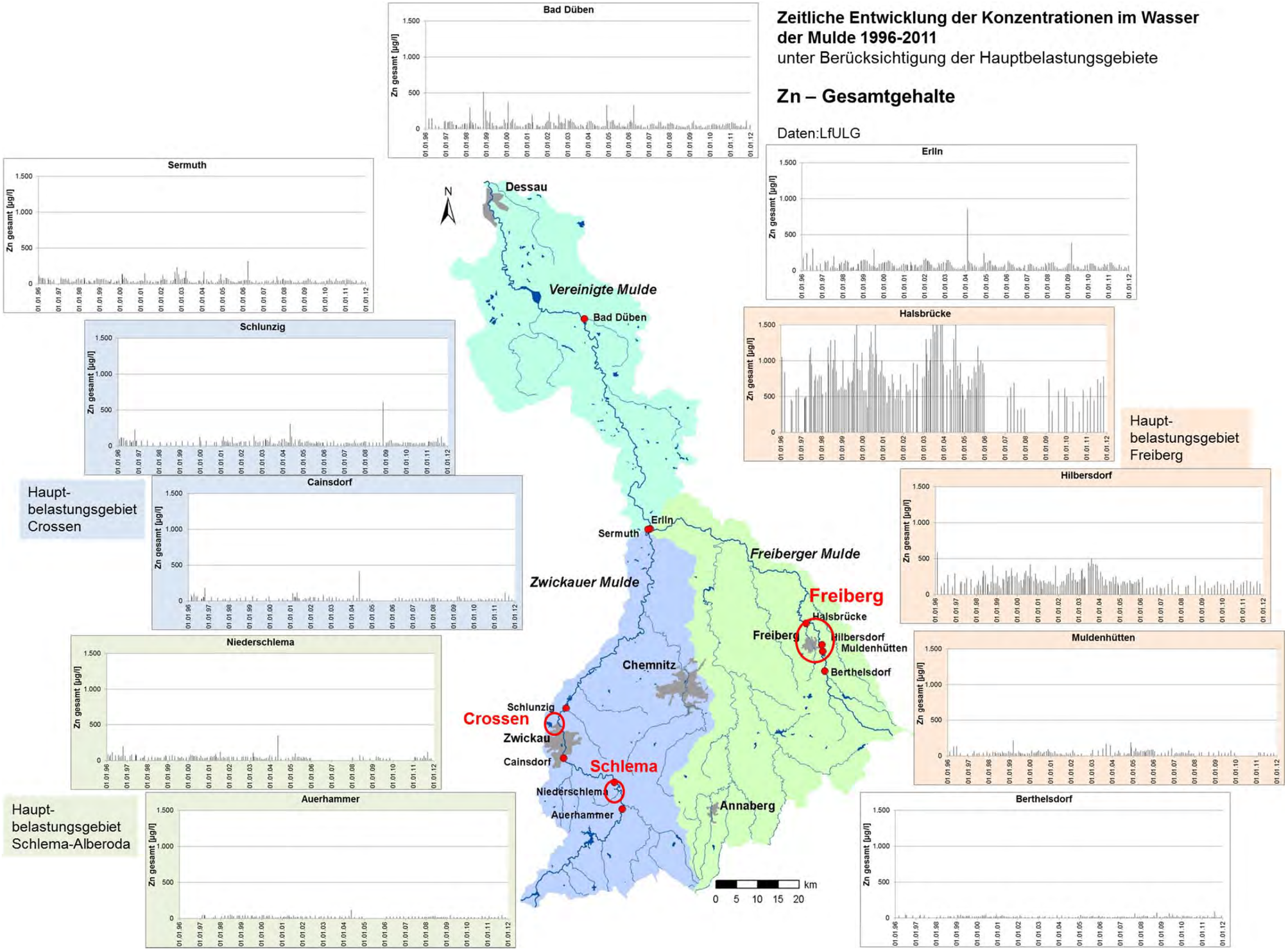
Anlage 9: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Pb-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



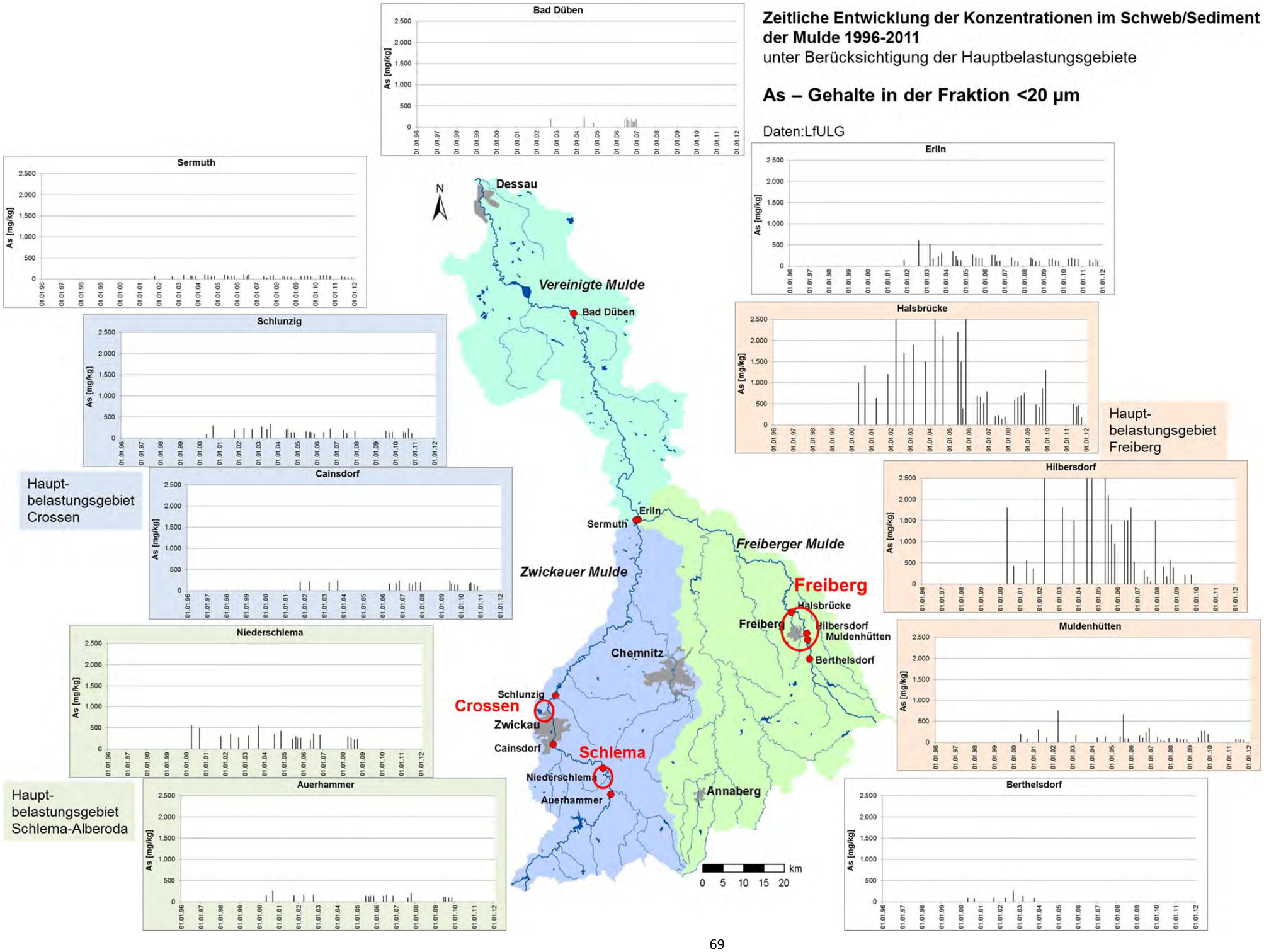
Anlage 10: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: U-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



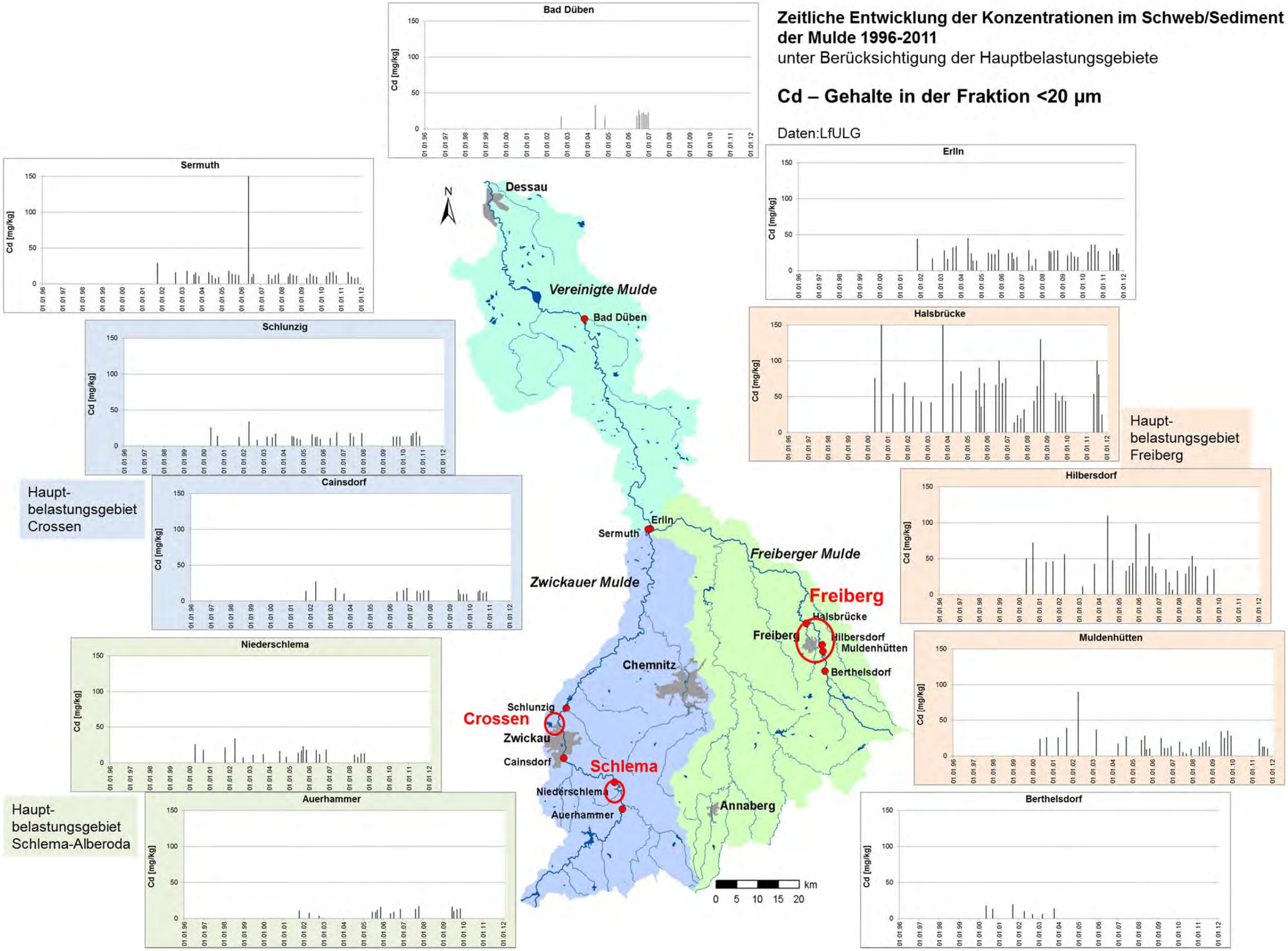
Anlage 11: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Wasser der Mulde 1996-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Zn-Gesamtgehalte (LfULG 2012a, LfULG 2012c)



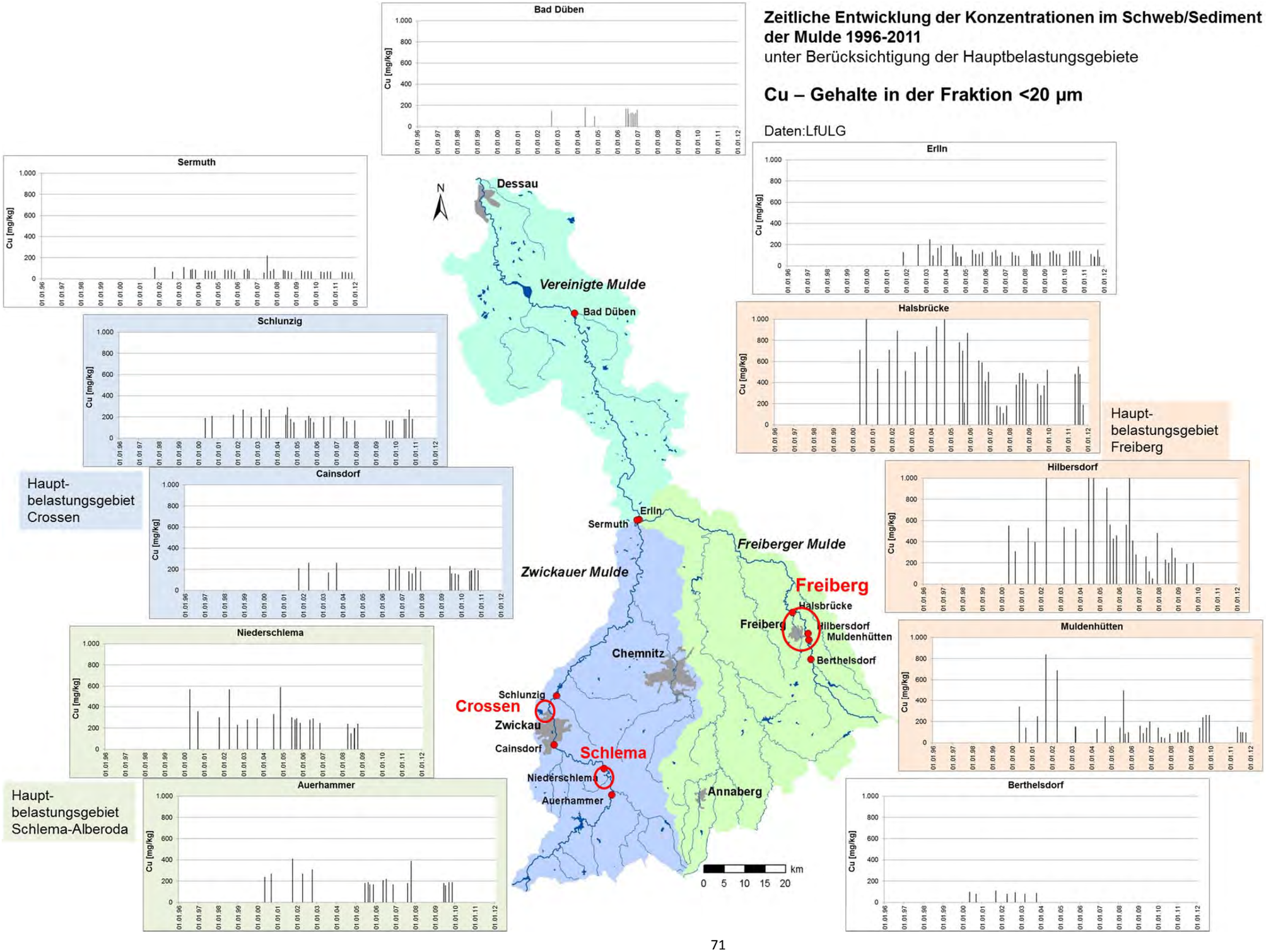
Anlage 12: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: As-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



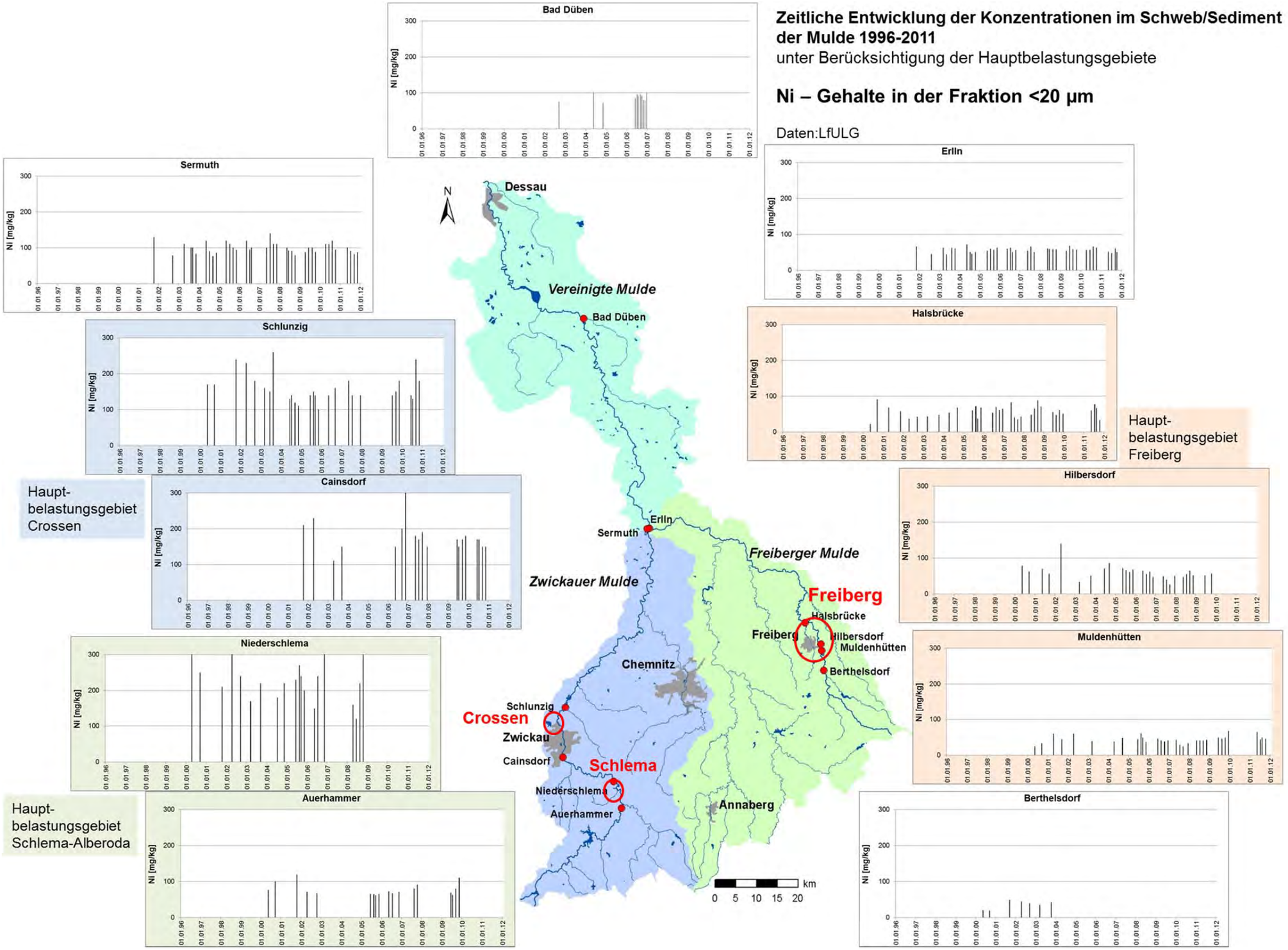
Anlage 13: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cd-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



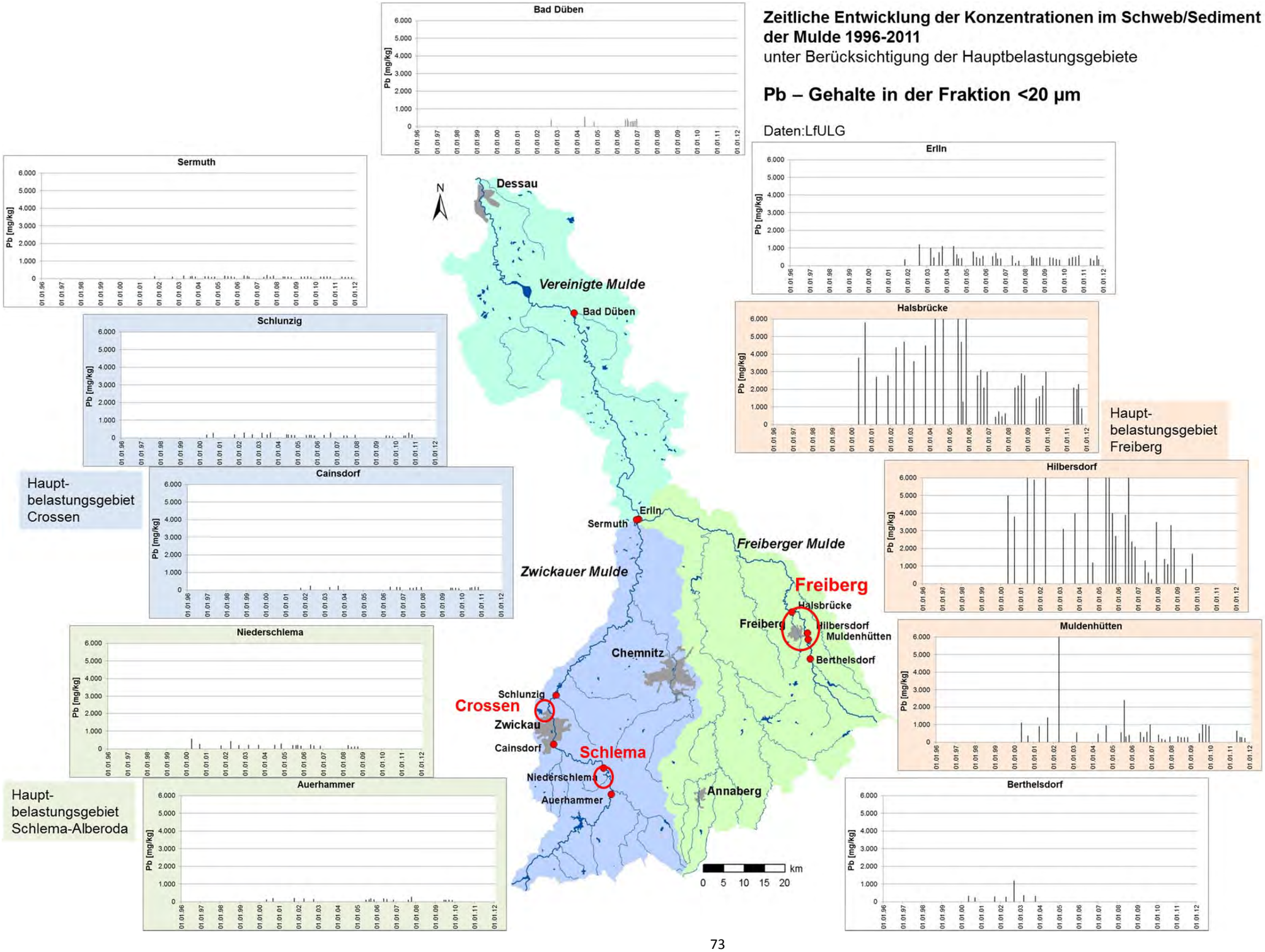
Anlage 14: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Cu-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



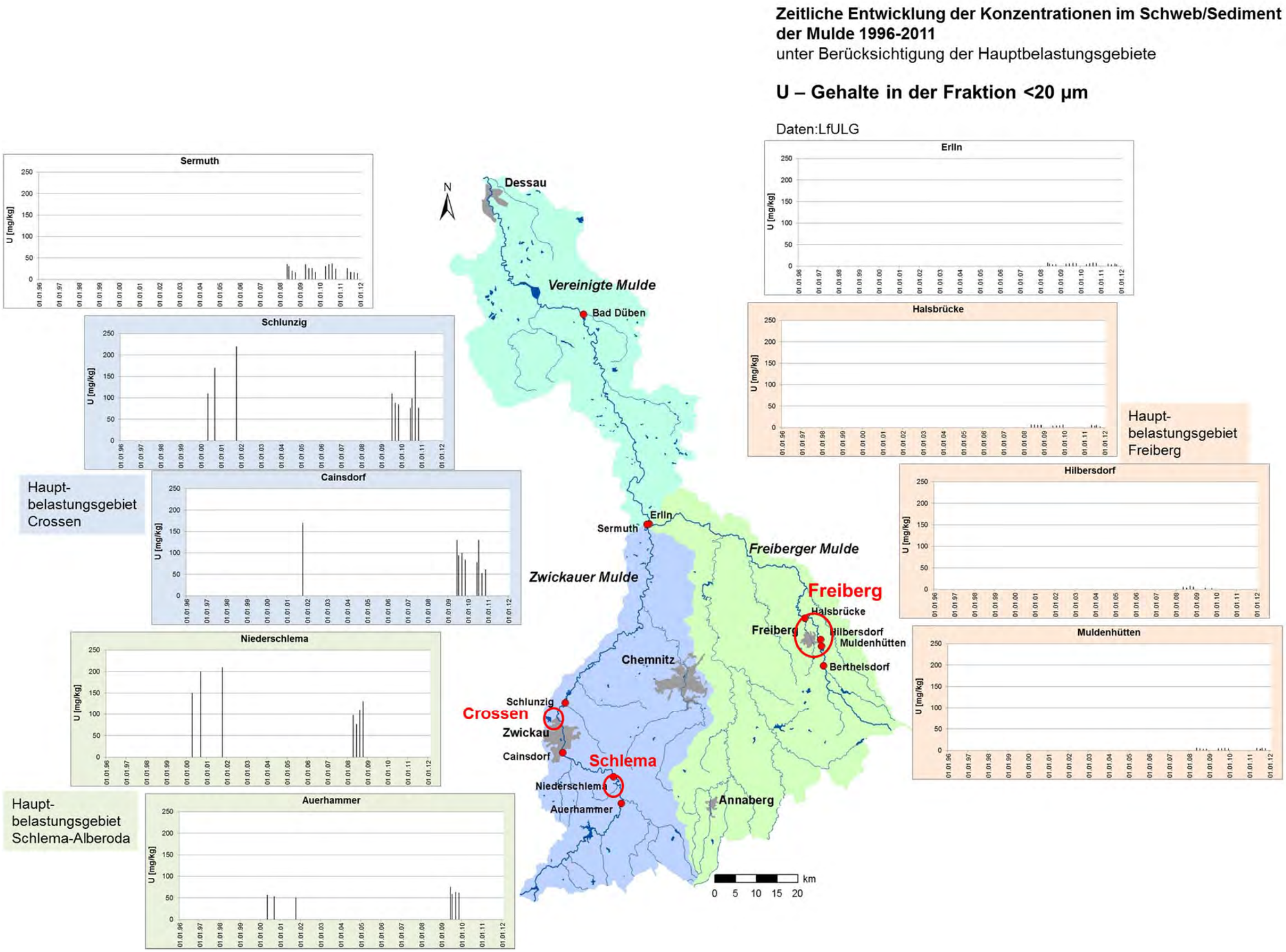
Anlage 15: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Ni-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



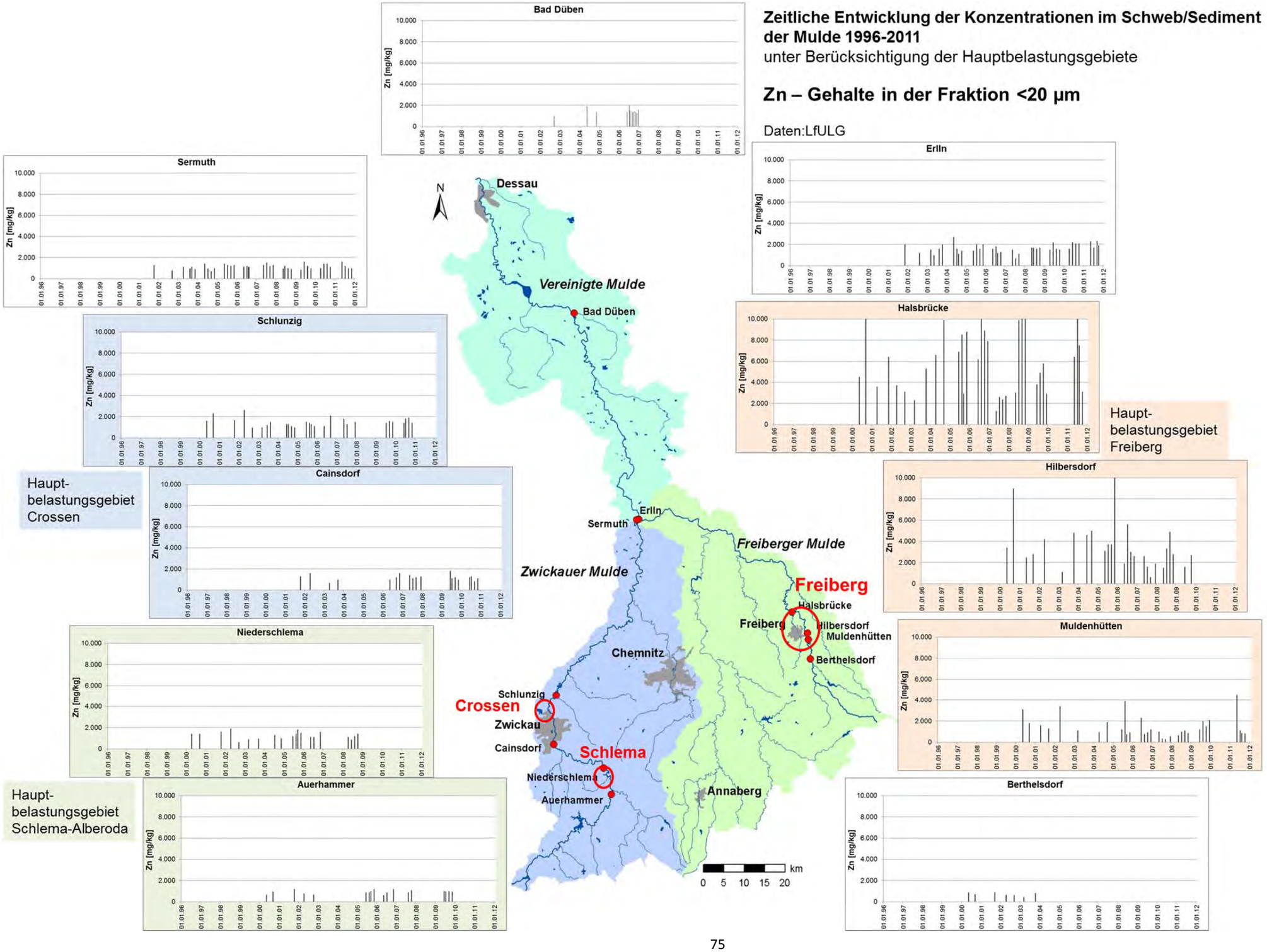
Anlage 16: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Pb-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



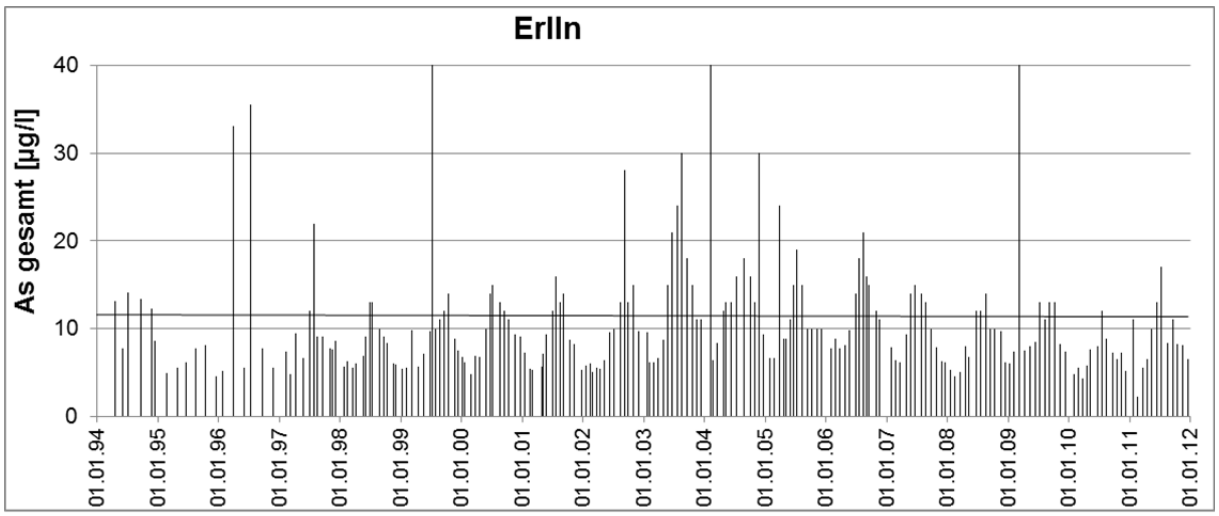
Anlage 17: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: U-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)

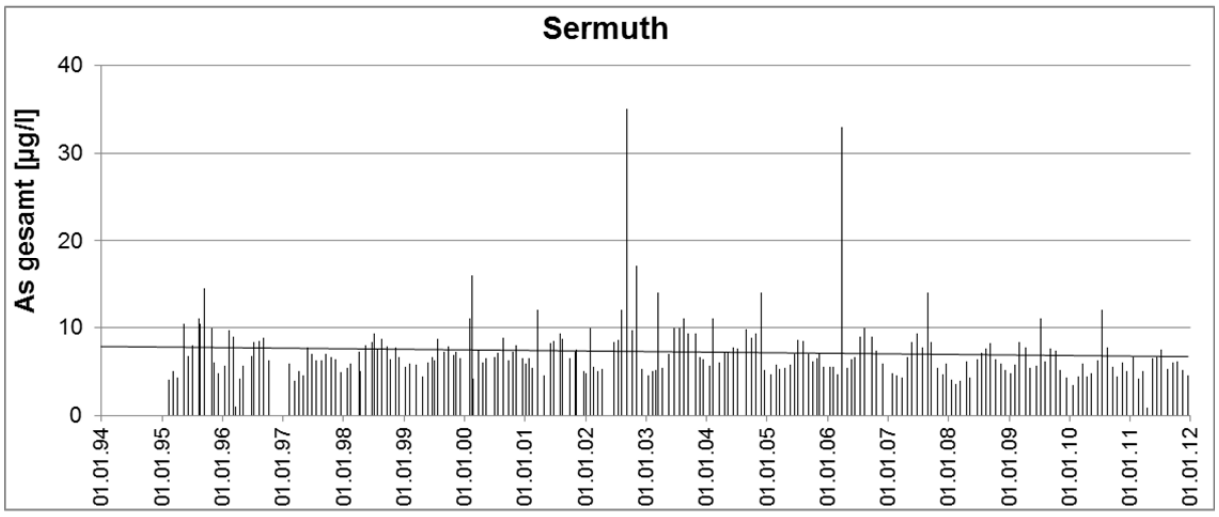


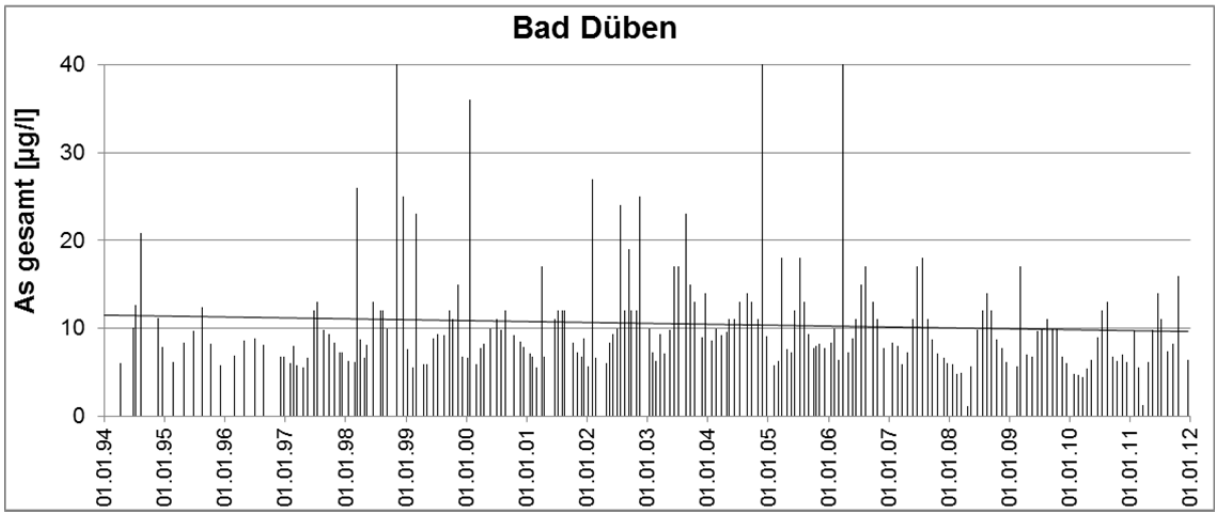
Anlage 18: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen im Sediment der Mulde 1999-2011 unter Berücksichtigung der Hauptbelastungsgebiete: Zn-Gesamtgehalte (LfULG 2012a)



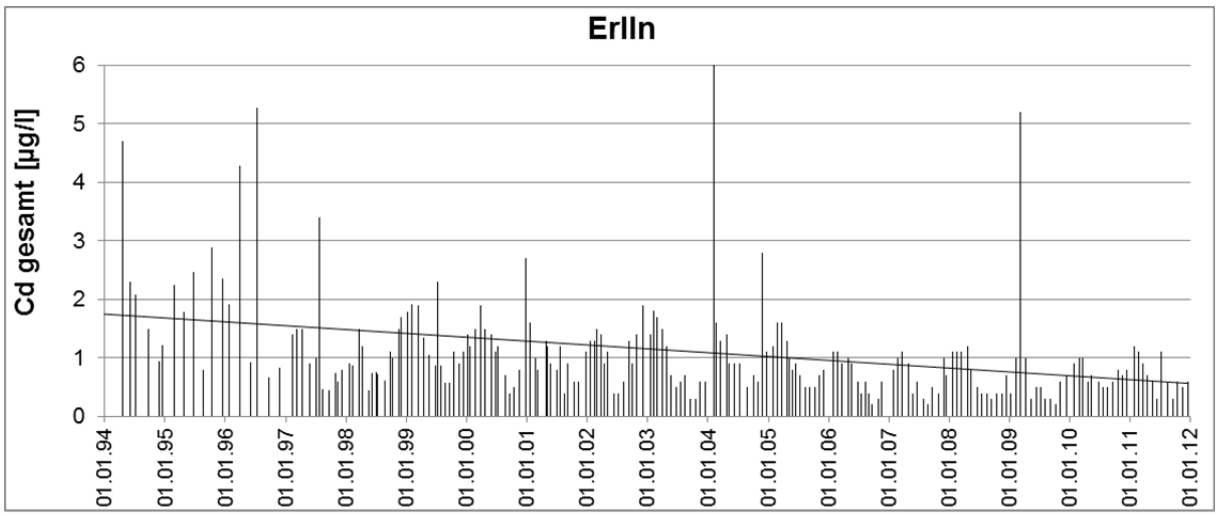
Anlage 19: Trendentwicklung für Arsen in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)

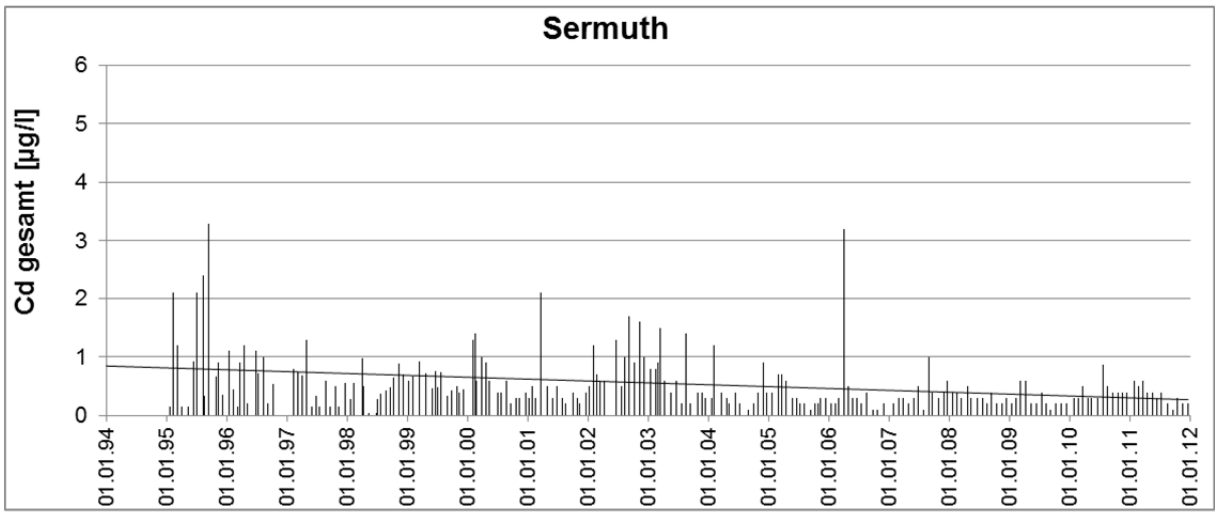


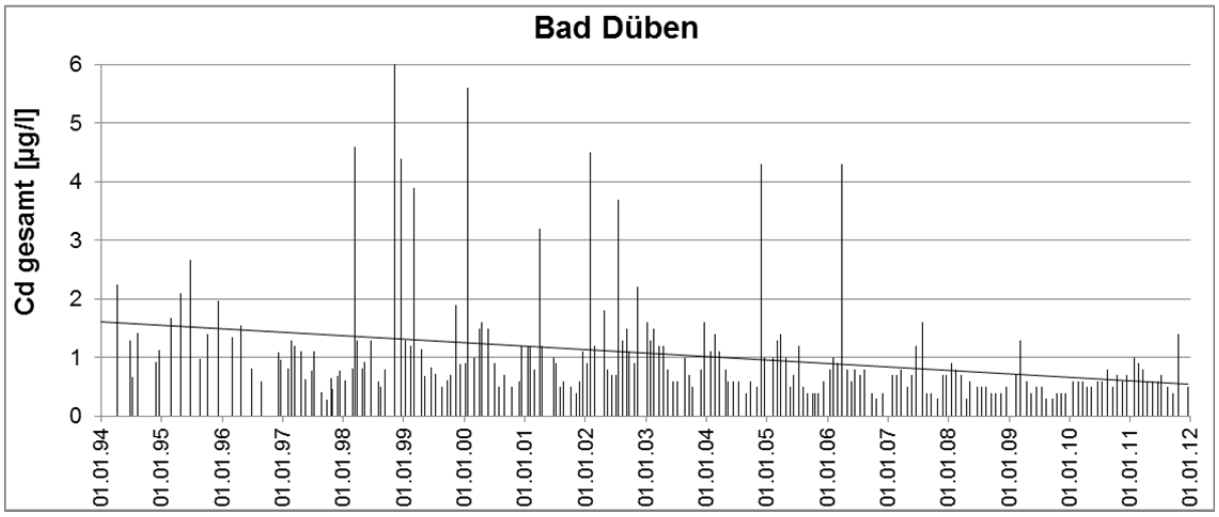




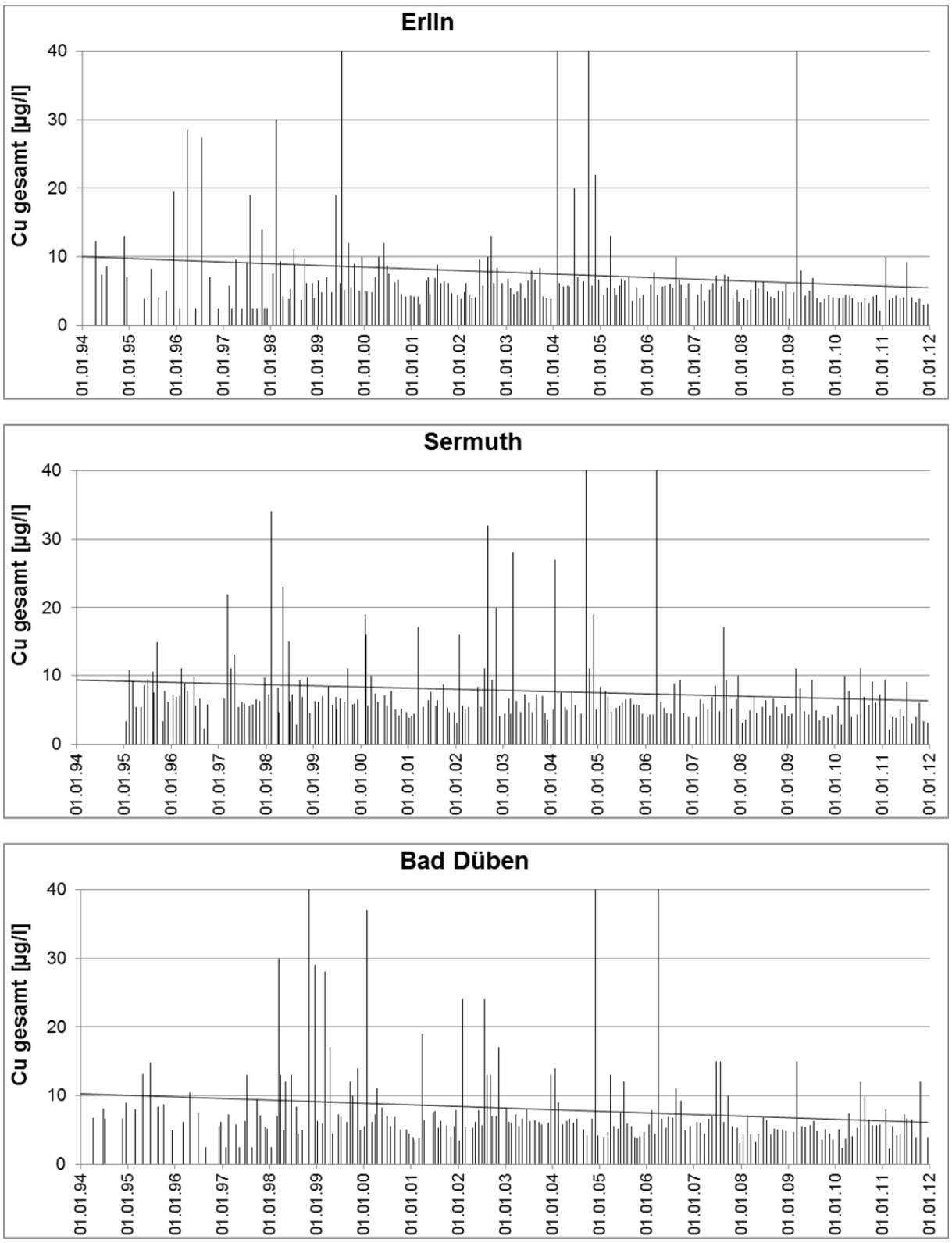
Anlage 20: Trendentwicklung für Cadmium in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



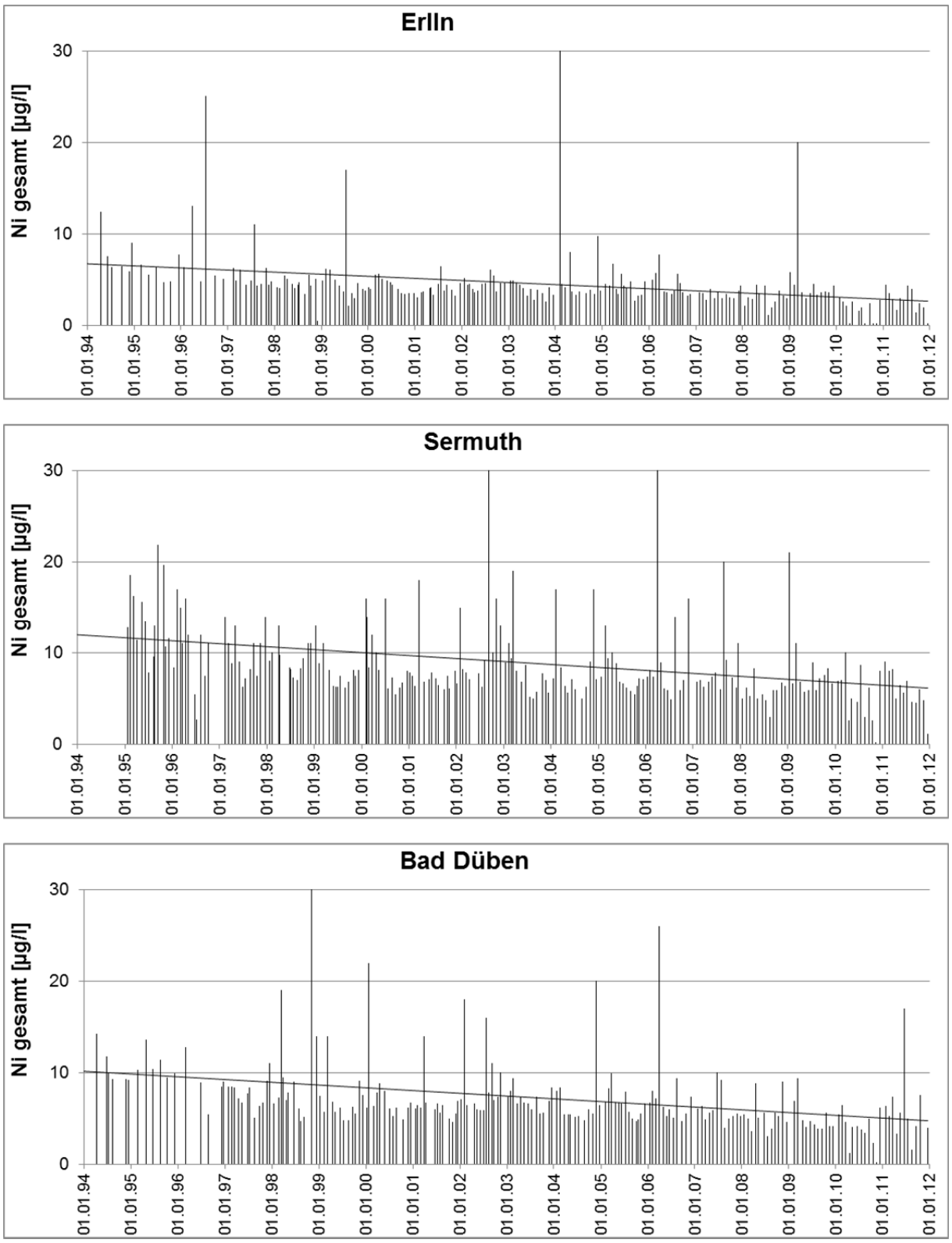




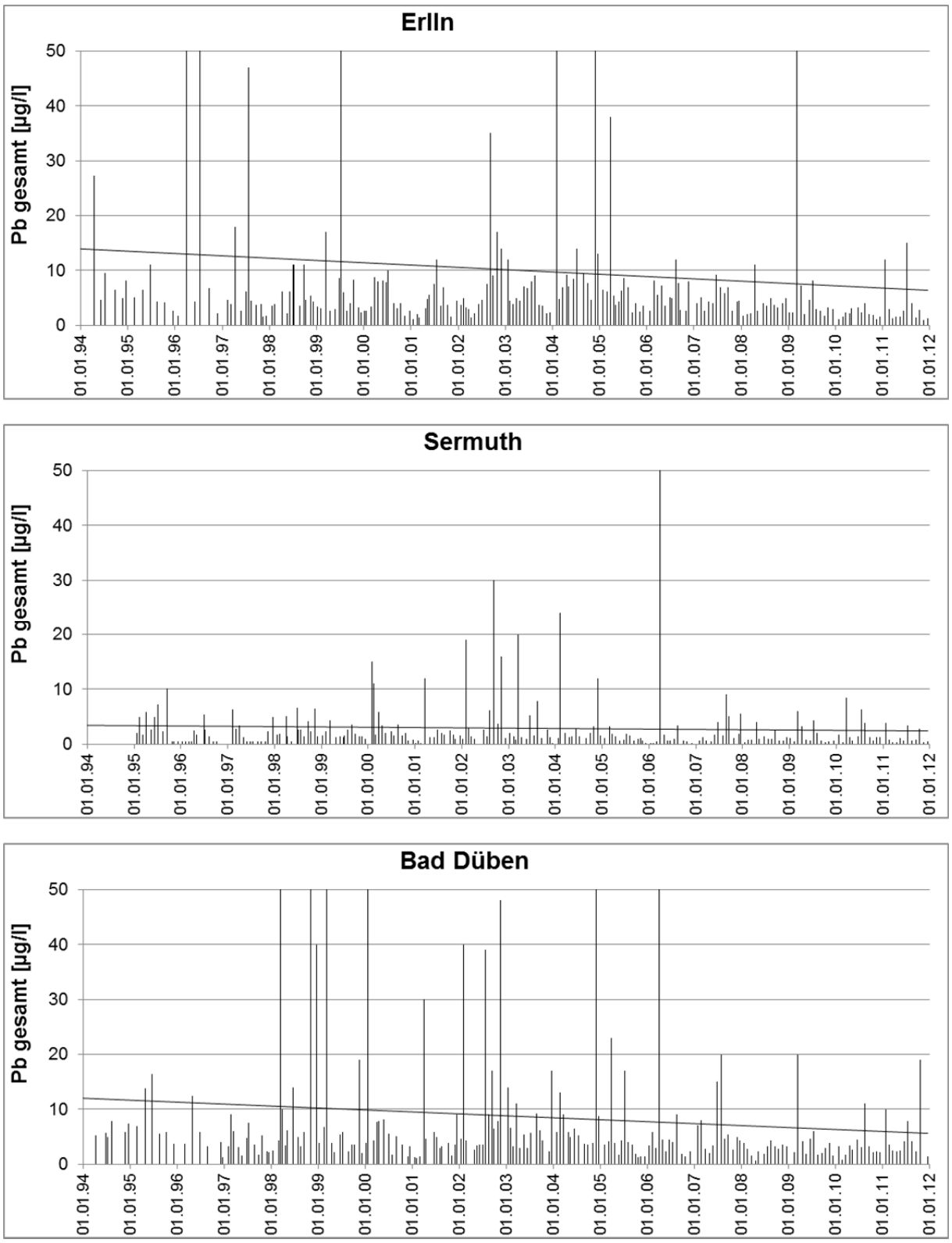
Anlage 21: Trendentwicklung für Kupfer in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



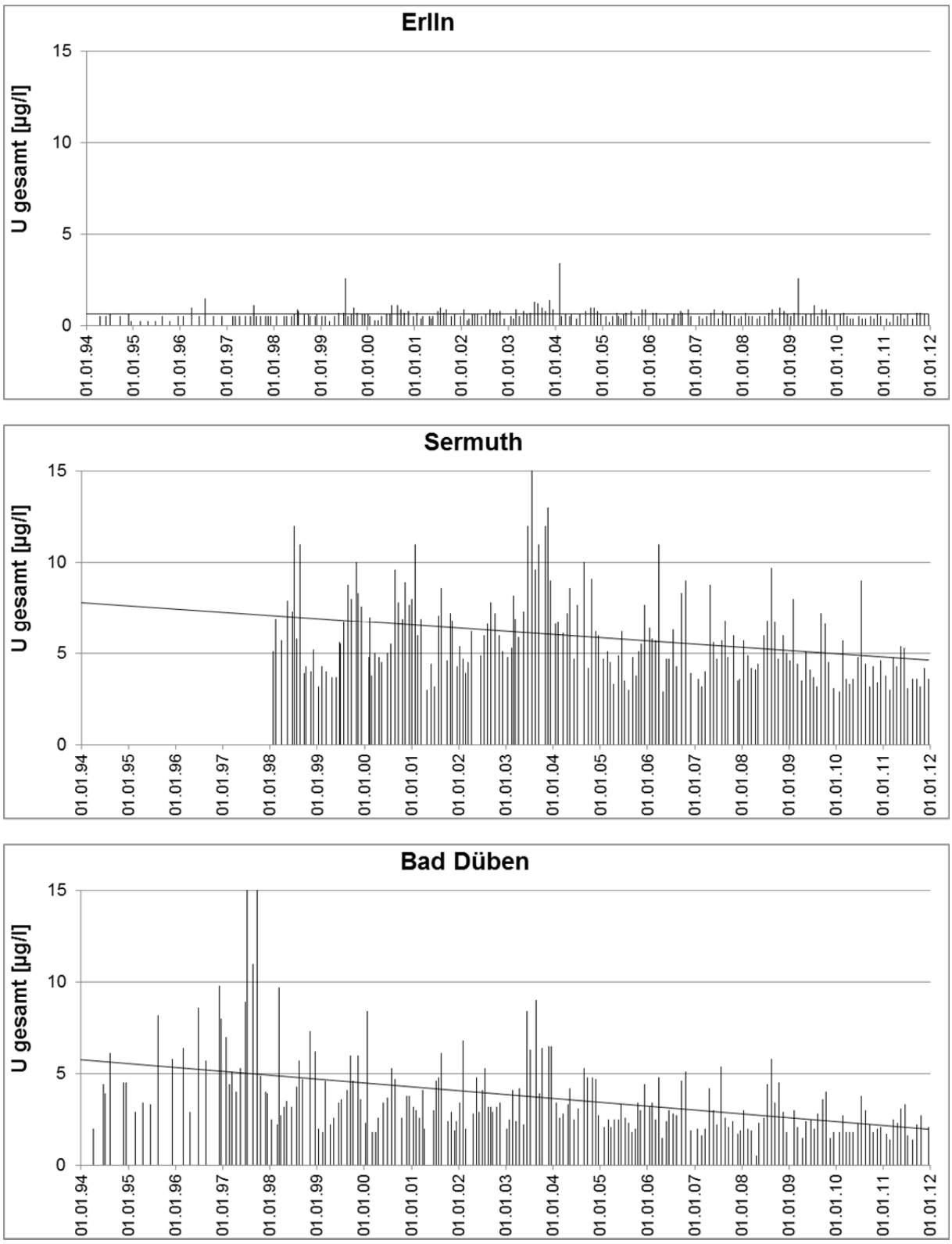
Anlage 22: Trendentwicklung für Nickel in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



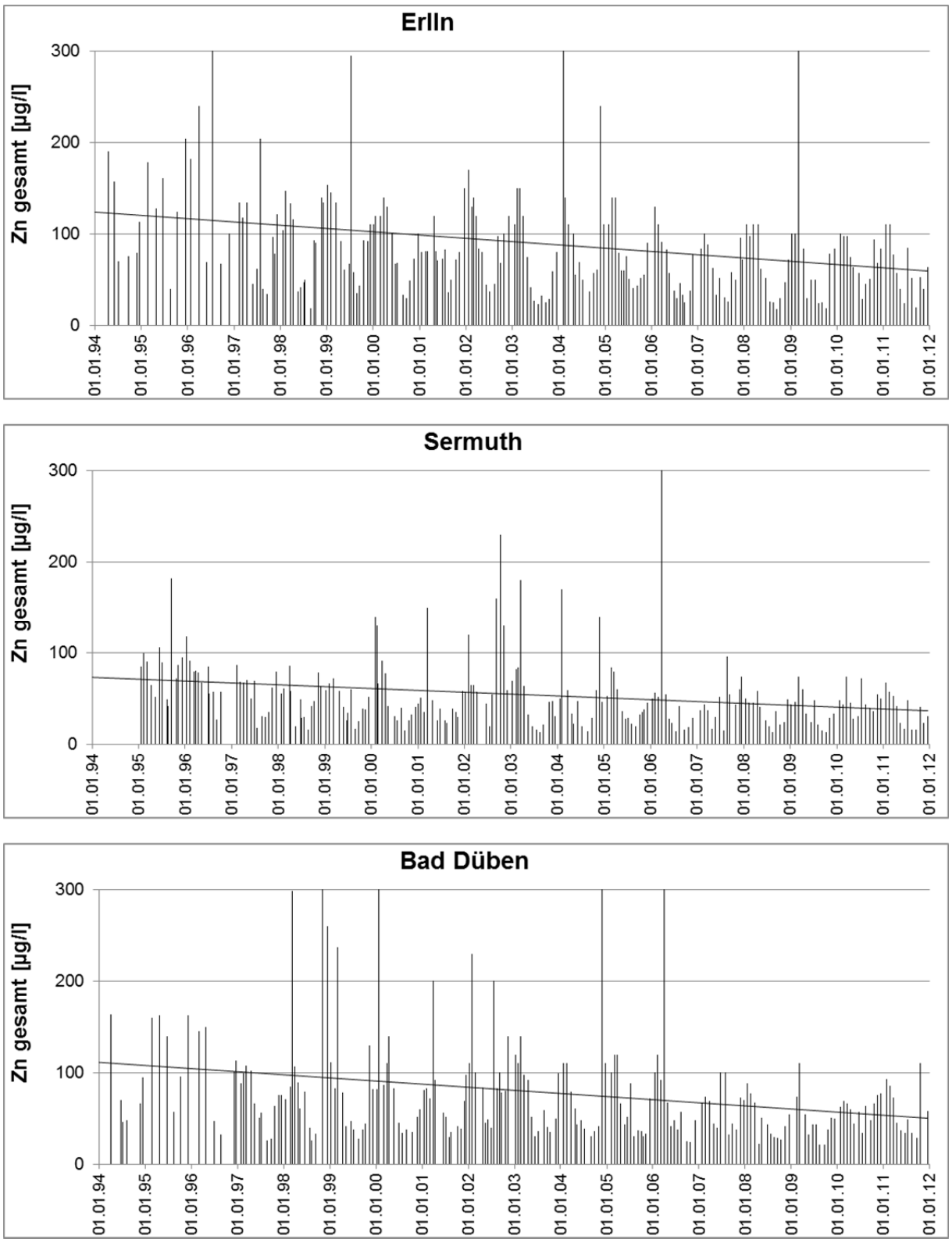
Anlage 23: Trendentwicklung für Blei in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



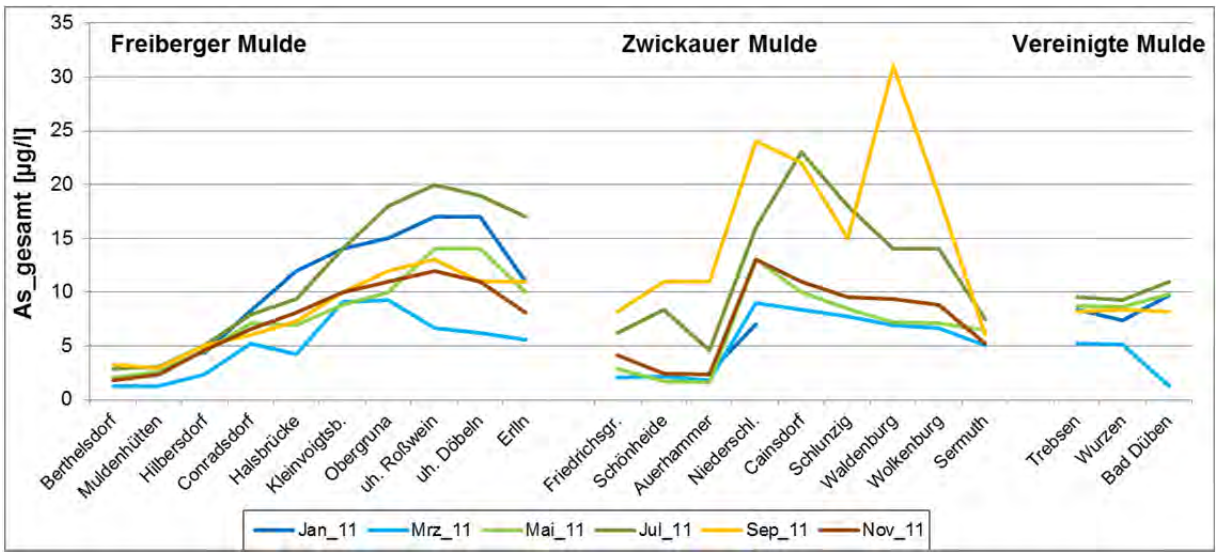
Anlage 24: Trendentwicklung für Uran in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)

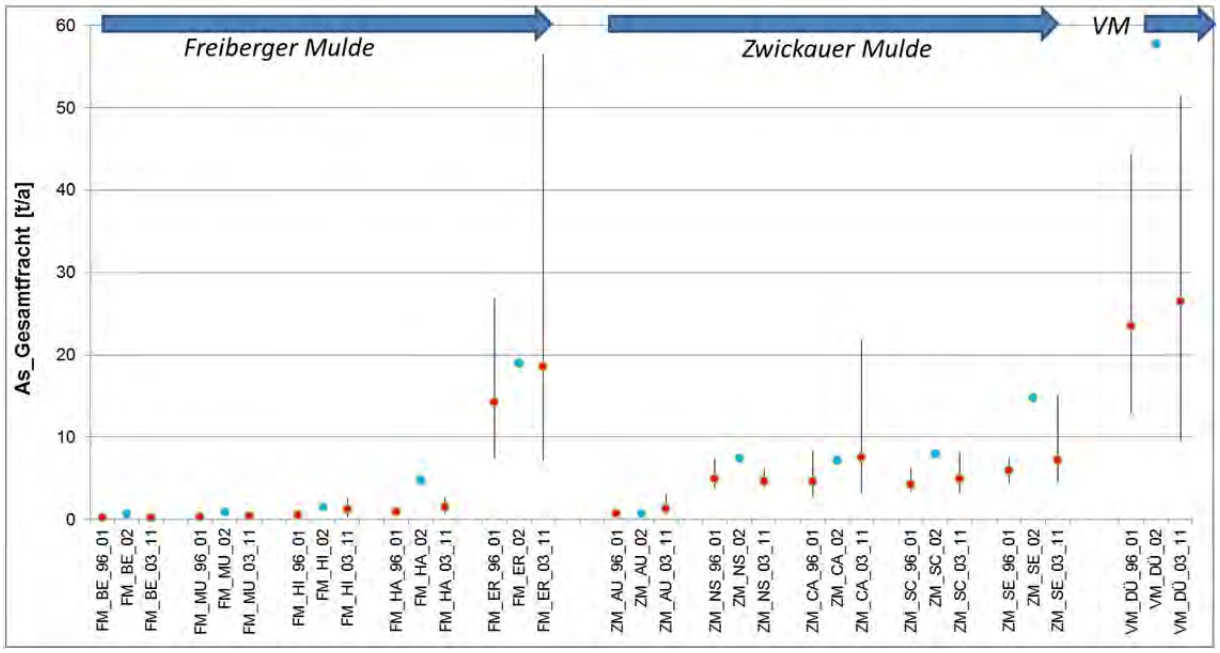


Anlage 25: Trendentwicklung für Zink in den Mündungsmessstellen der Freiberger und Zwickauer Mulde sowie der Vereinigten Mulde in Bad Düben (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)

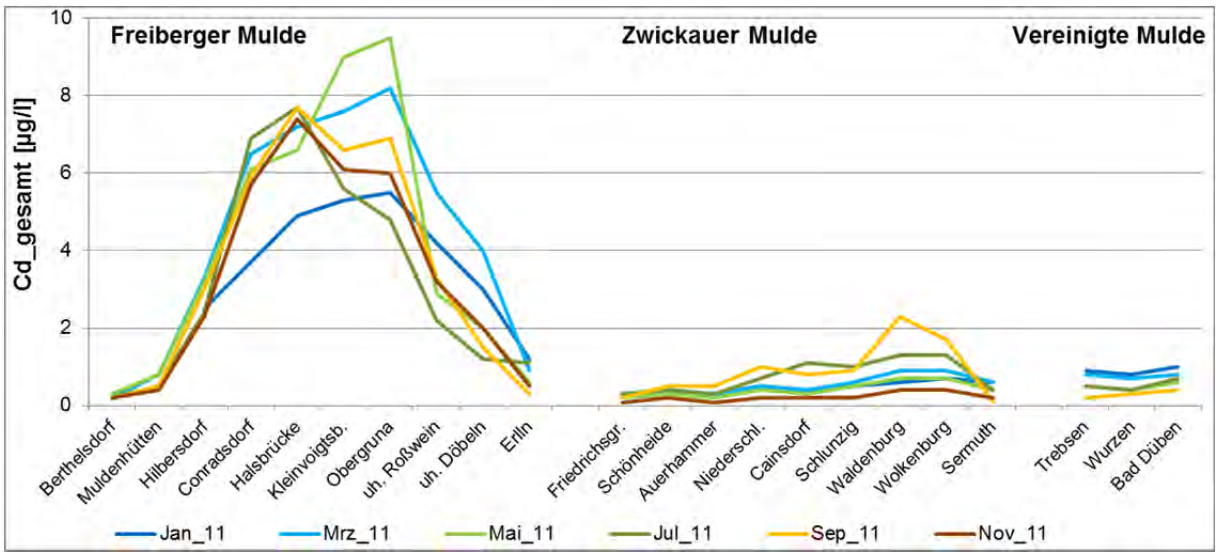


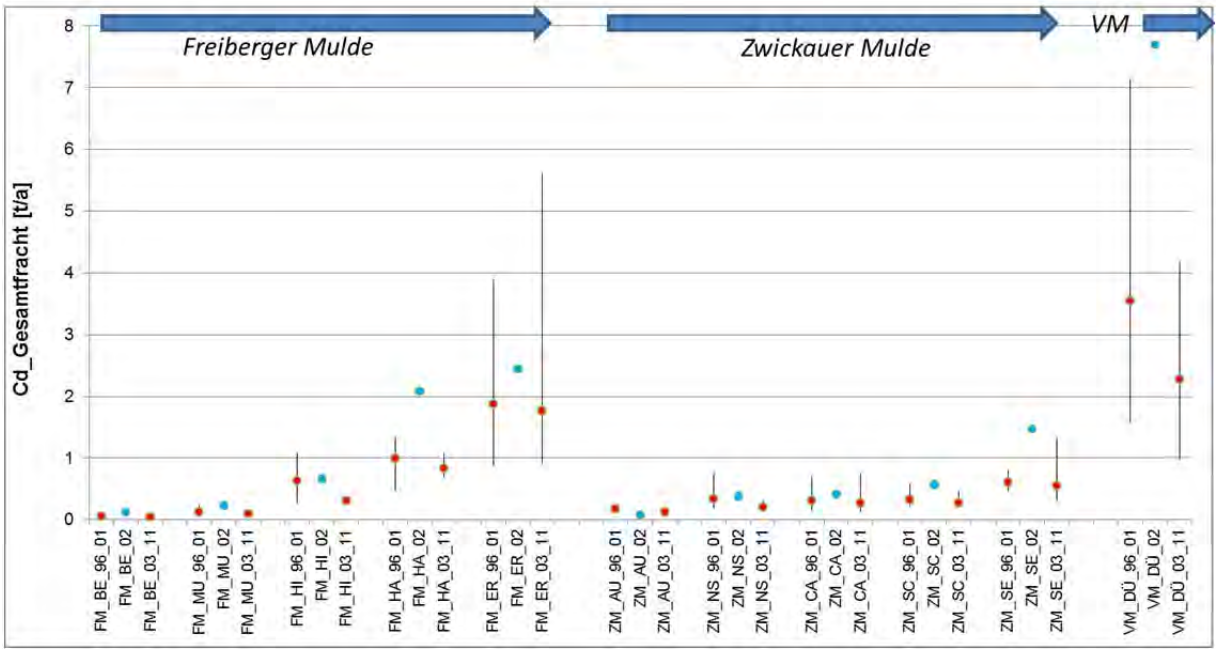
Anlage 26: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der As-Konzentrationen und der As-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



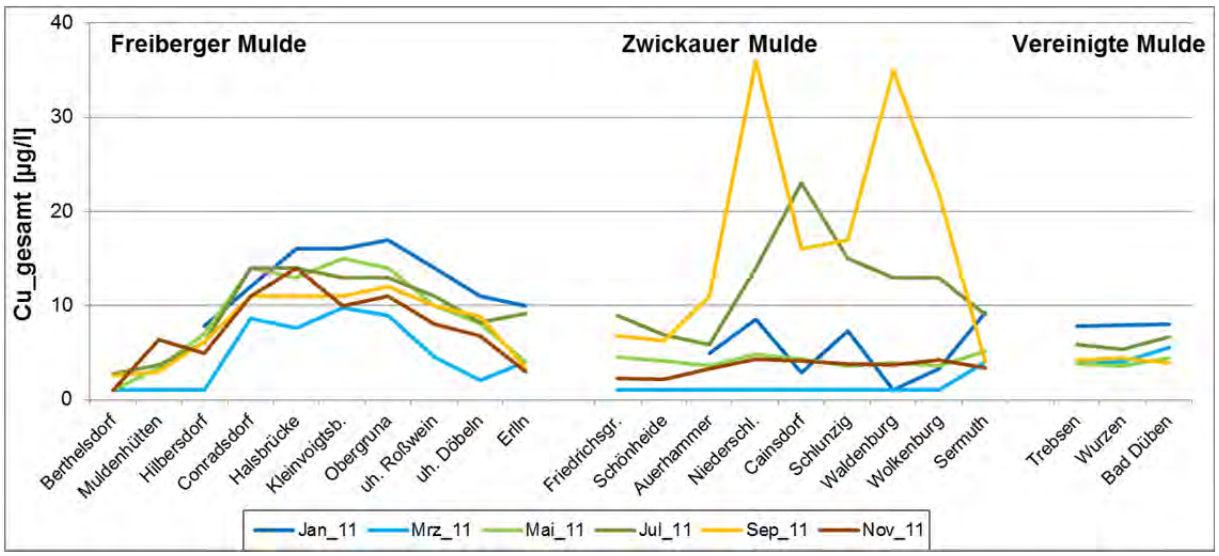


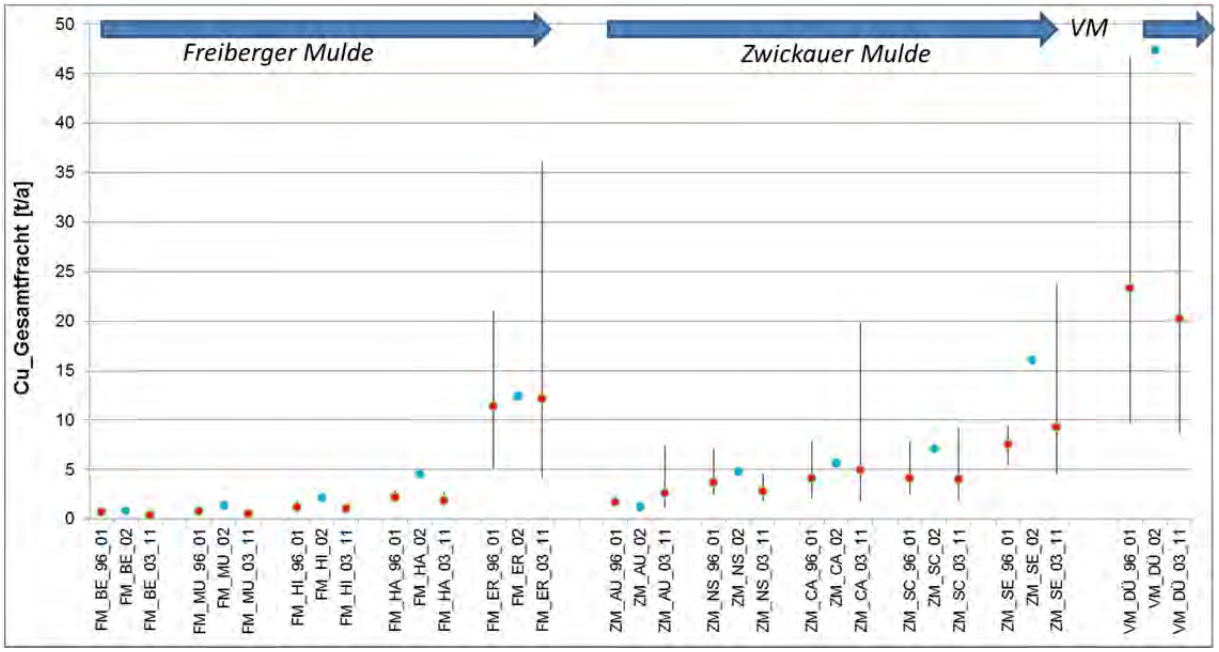
Anlage 27: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Cd-Konzentrationen und der Cd-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



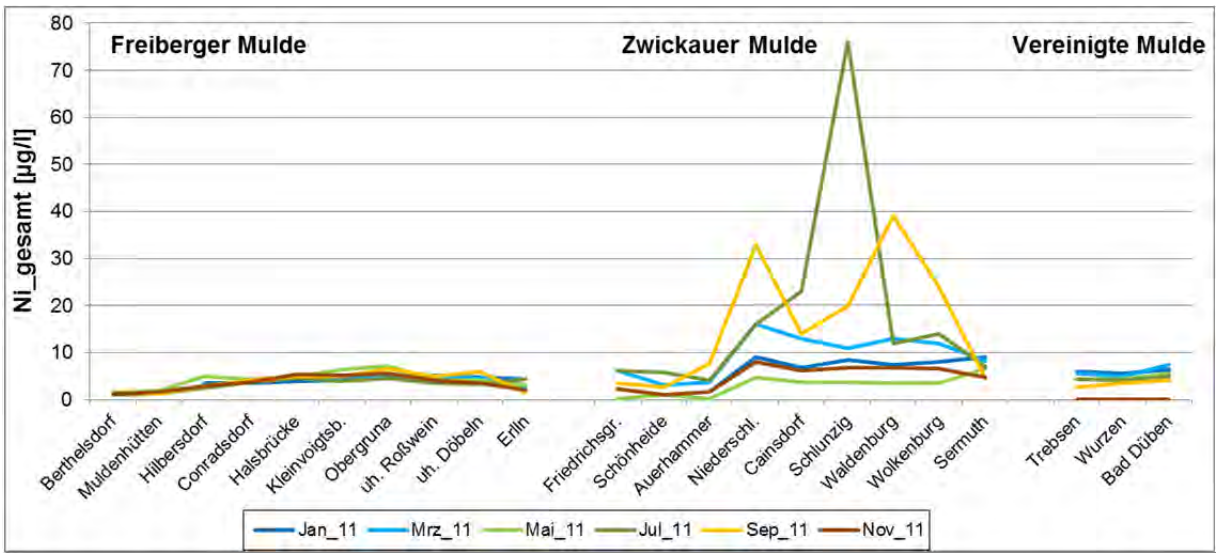


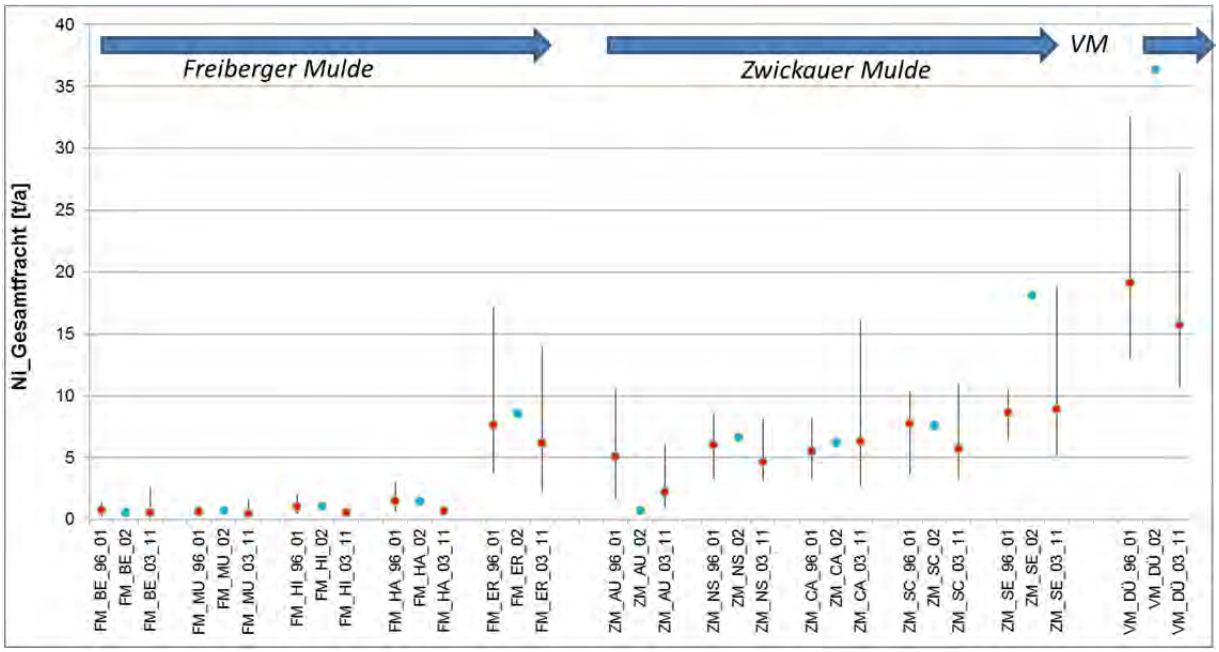
Anlage 28: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Cu-Konzentrationen und der Cu-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



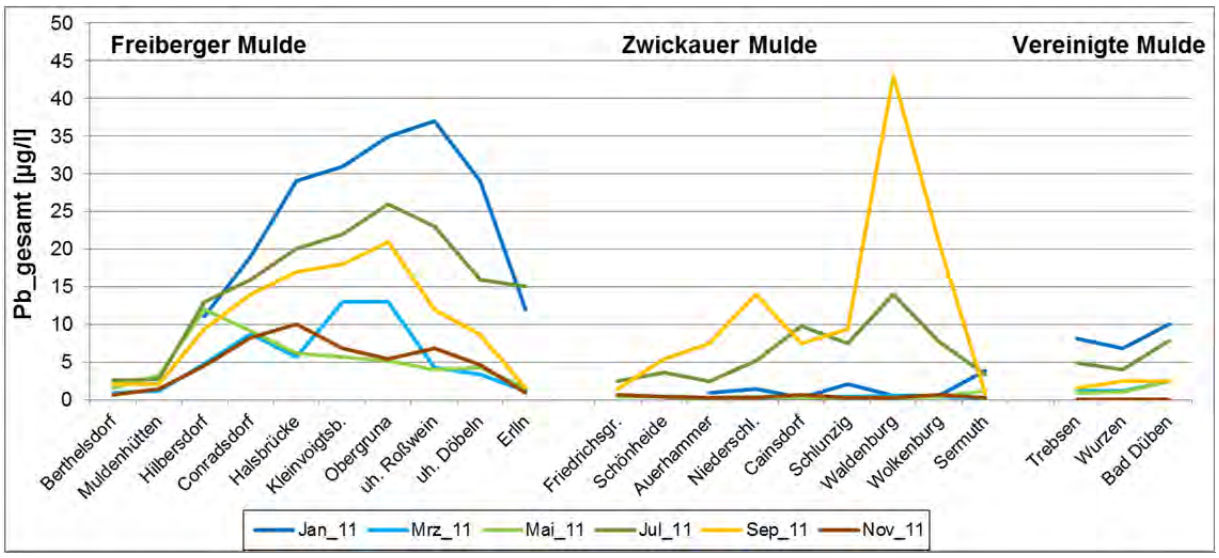


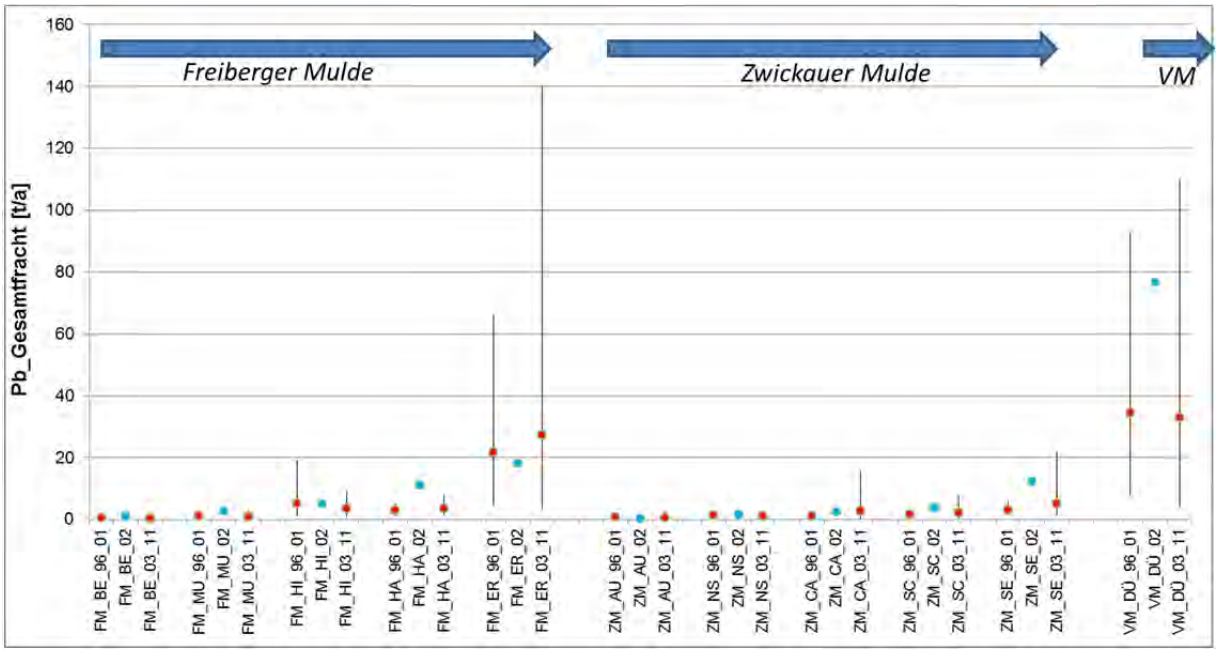
Anlage 29: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Ni-Konzentrationen und der Ni-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



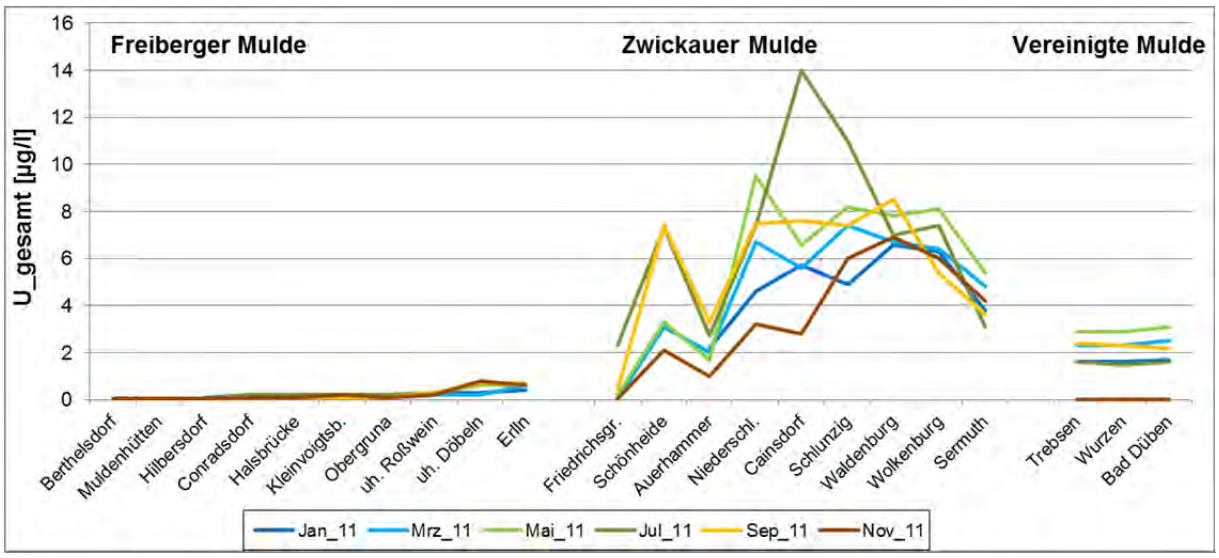


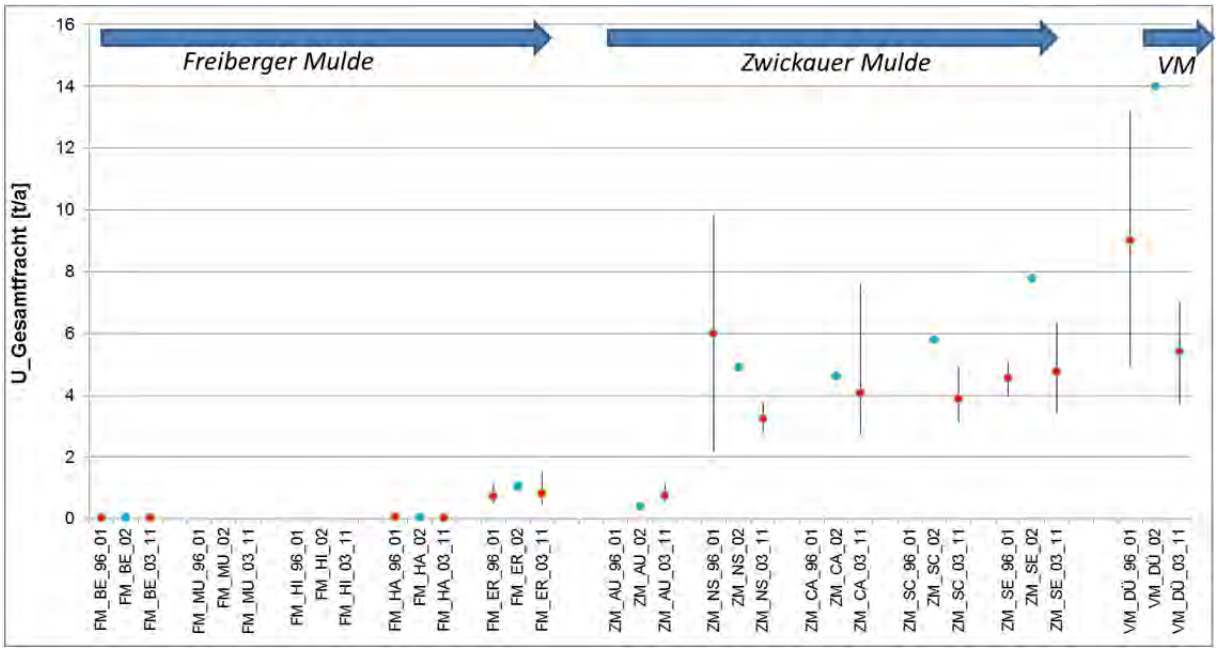
Anlage 30: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Pb-Konzentrationen und der Pb-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



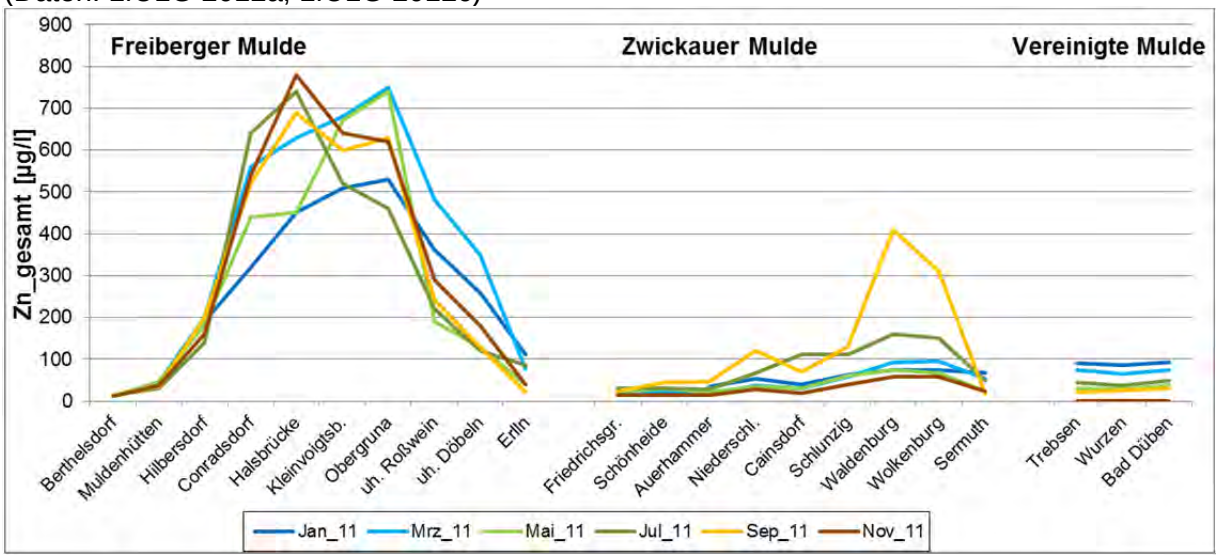


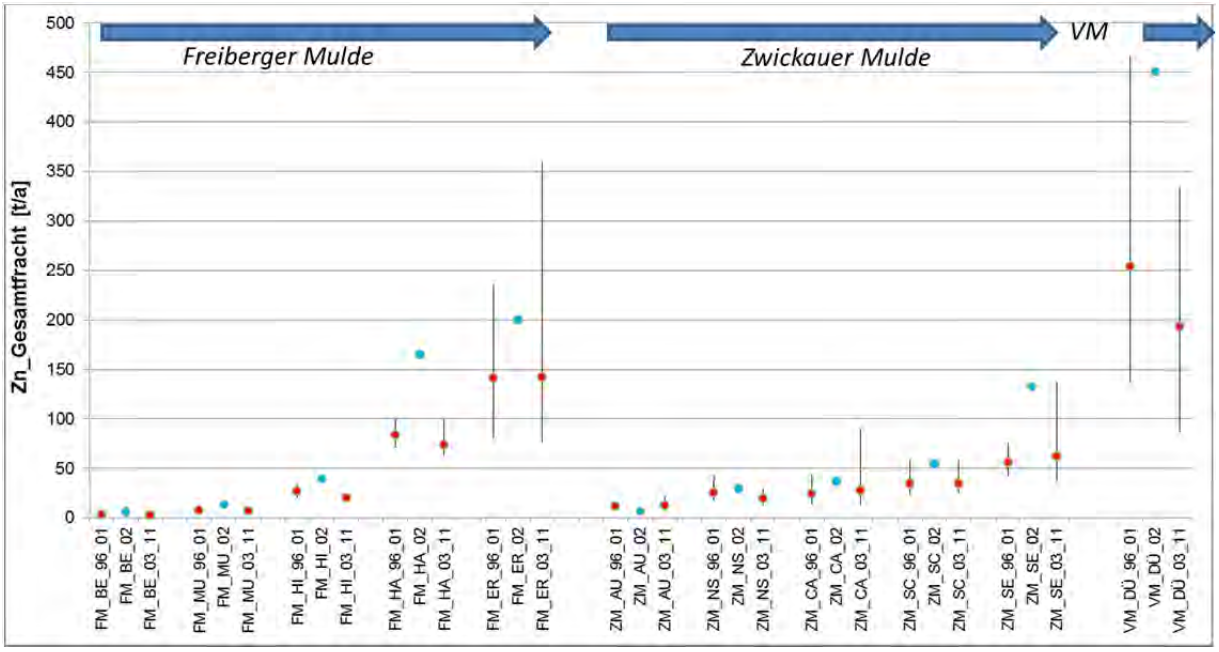
Anlage 31: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der U-Konzentrationen und der U-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)



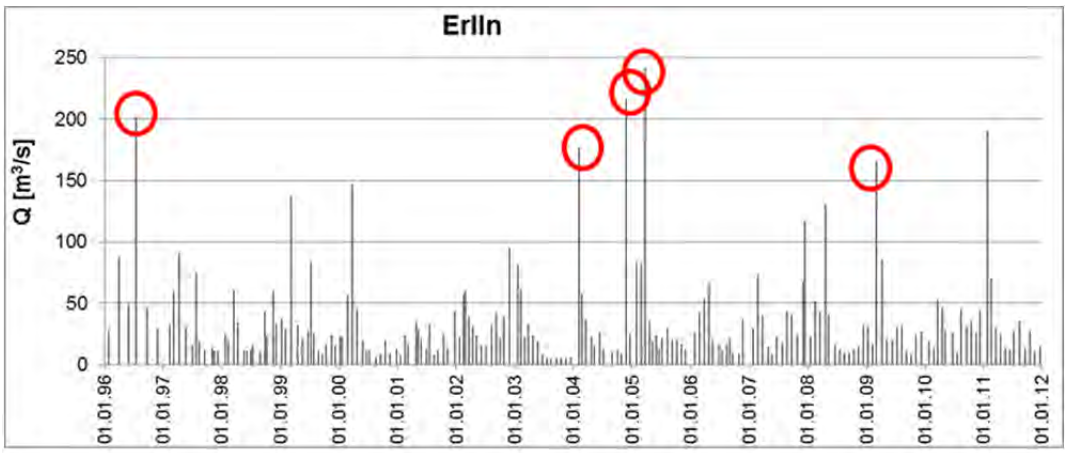


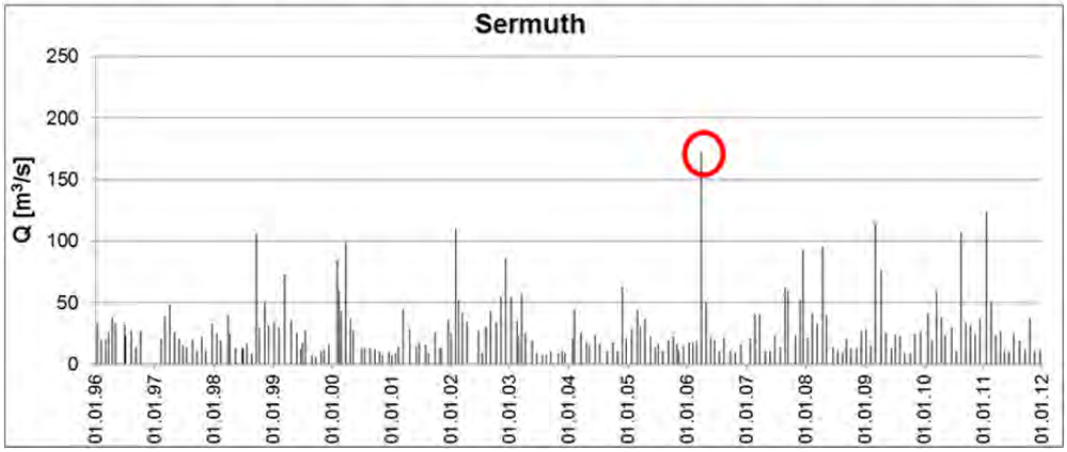
Anlage 32: Regionale Herkunft und zeitliche Entwicklung der Zn-Konzentrationen und der Zn-Gesamtfrachten in den Hauptläufen der Freiberger, Zwickauer und Vereinigten Mulde (Daten: LfULG 2012a, LfULG 2012c)

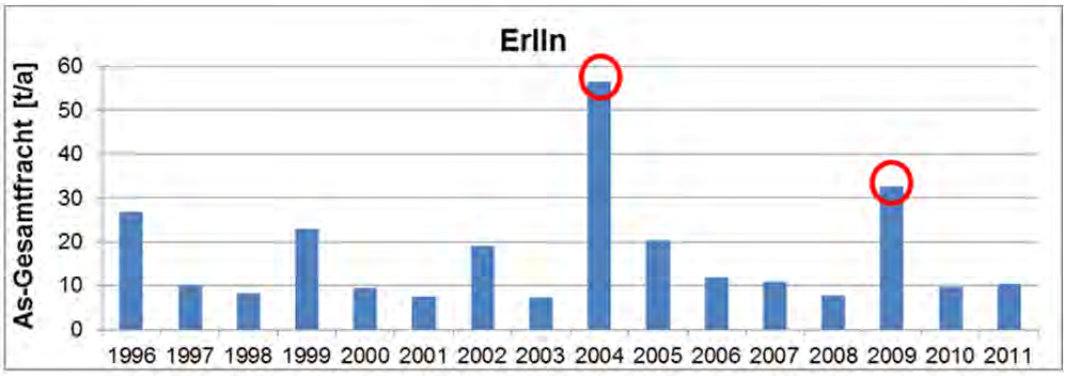


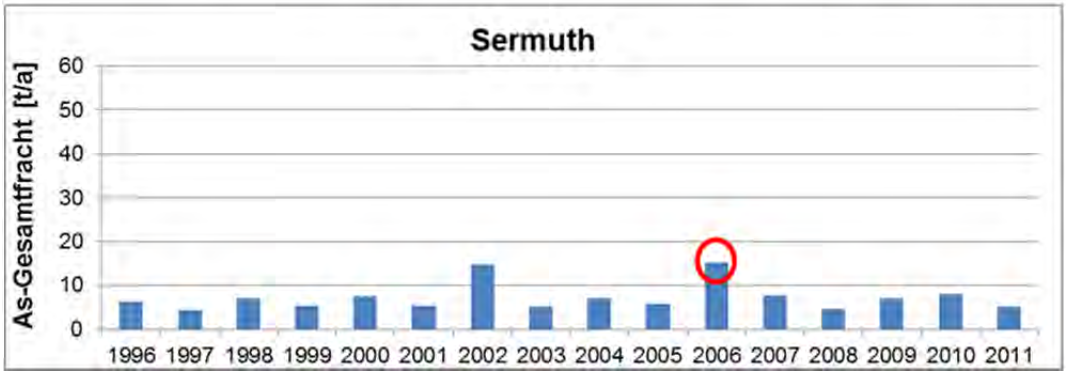


Anlage 33: Einschätzung der Frachtermittlungen: Beprobte Durchflüsse an den Mündungen der Freiberger und Zwickauer Mulde und ihre Auswirkungen auf die Frachten am Beispiel von Arsen

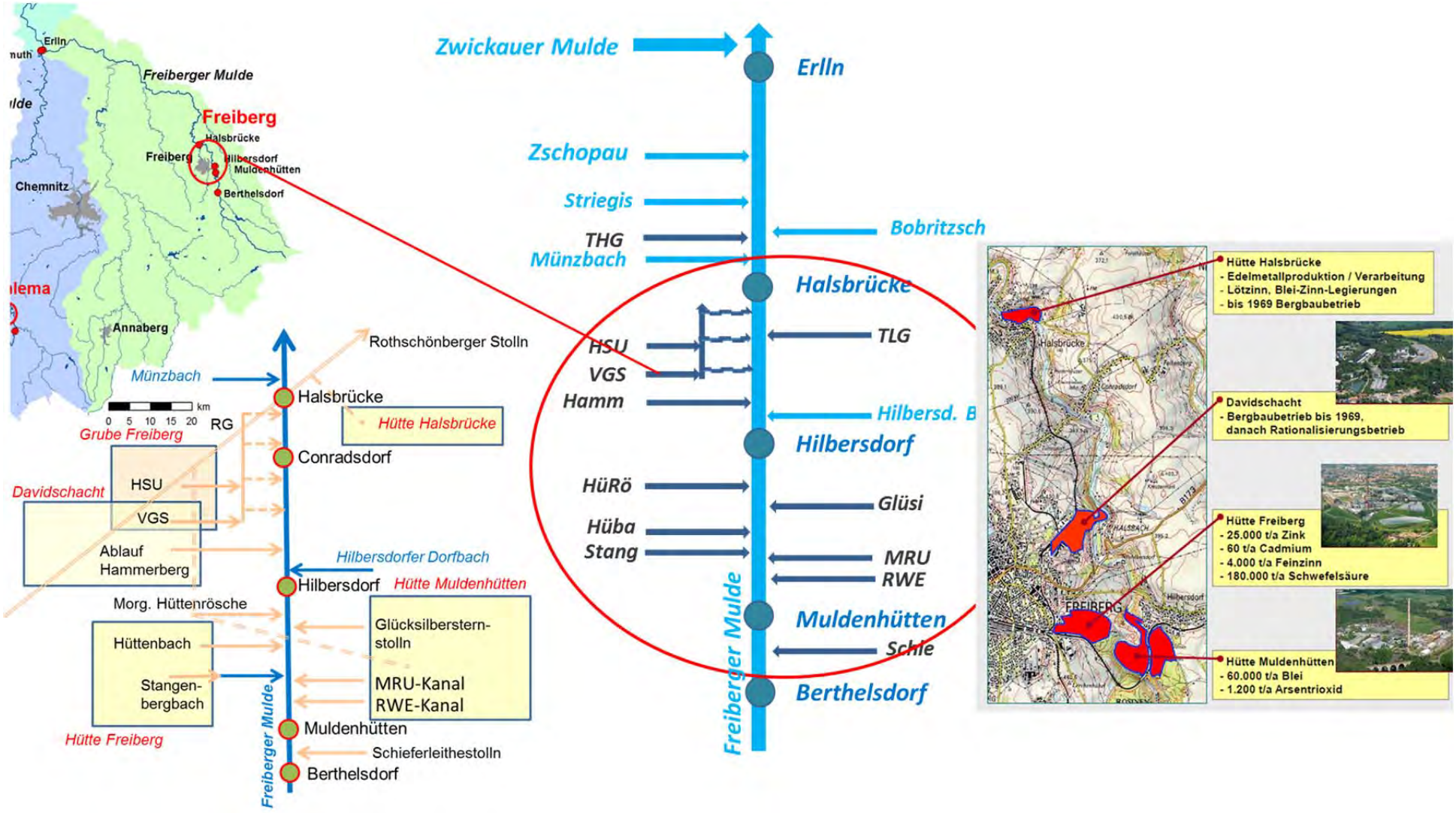








Anlage 34: Schema des Belastungsgebietes Freiberg an der Freiberger Mulde mit wesentlichen Nebenflüssen und Punktquellen einschließlich einer Übersicht über die Bergbau- und Hüttenstandorte der SAXONIA-Liegenschaften im Freiberger Raum (Fritz 2012)



Anlage 35: Überblick über die größten Sanierungsobjekte und die dort vorgenommenen Maßnahmen an den Standorten des SAXONIA-Altlastenprojekts (SAXONIA 2012; Fritz 2012)

Hütte Freiberg

	Betriebszeit Sanierungszeit Finanzvolumen	**Fläche Volumen Material**	**Probleme**	**Sanierungs-Maßnahmen**
Absetz-becken	1969-1991 1991-2002 1,483 Mio. €	25.000 m^2 140.000 m^3 schwer-metall-haltiger Schlamm	Wasserwegsam-keiten in den Untergrund (Altbergbau)	Herstellung einer Trennebene, Einbau Dränagen, Verfüllung, Kunststoff-dichtungsbahn, Kultur- und Speicherschicht
Industrie-gelände „Saxonia-Areal“	1950er bis 1991 seit 1993 1,7 Mio. €	30.000 m^2 Industrie-Anlagen	Kontaminierte Gebäude, kontaminierte Böden, Schadstoff-mobilisierung über Niederschlags- & Sickerwasser	Flächenentsiegelung durch Rückbau, Behandlung kontaminierter Abwässer, Neubau Abwassersystem, Umlagerung kontaminierter Böden, Flächenversiegelung durch Neubebauung
Abbrand-halde	1959-1975 1995-2007 ca. 1 Mio. €	18.000 m^2 144.000 m^3 Kiesab-brände, Wälz-schlacke, Neutra-Schlämme	Staubabwehungen, Zinnschlacke mit erhöhter Ortsdosisleistung	Abdeckung des unteren Plateaus, Abdichtung des oberen Plateaus, Rekultivierung
Halden-komplex	1955-1990 1993-2005 3 Mio. €	80.000 m^2 680.000 m^3 Wälz-schlacke, Aschen Neutra-Schlämme, Bauschutt	Staubabwehungen, hohe Konzentrationen an As, Pb, Cu, Zn, Cd, Glimmbrände, dadurch Oxidation von As und Sulfiden und Anstieg deren Löslichkeit	Zwischenabdeckung, Brandbekämpfung, Dichtschicht, Dränageschicht, Abdeckschicht I + II, Rekultivierung

(Anlage 35-Fortsetzung) **Hütte Muldenhütten**

	Betriebszeit Sanierungszeit Finanzvolumen	**Fläche Volumen Material**	**Probleme**	**Sanierungs-Maßnahmen**
Arsenhütte	1859-1990 1994-1996 870.000 €	Gebäude, Rauchgas-kanäle	Extrem hohe Kontaminationen mit As und Pb	Abriss der Gebäude, Verwahrung des Bauschutts vor Ort, Entsorgung von Flugstäuben, Abdeckung mit unbelastetem Recyclingmaterial, bituminöse Oberflächenab-dichtung, Böschungssicherung mit Bentonitmatten
Hüttenhof und Zwischen-produkt-freilager	bis 1990 2000-2008 550.000 €	25.000 m^2 Industrie-bauten, Schlacken	Standsicherheit der Stützmauern, Denkmalpflege, hohe Kontamination der Flächen, Austritt belasteter Sicker-wässer (Cu, Ni)	konservierende Verwahrung der Stützmauern durch Vorschüttung, Verringerung der Durchsickerung um ca. 80 %
Otto-Deponie	1972-1988 1993-2001 720.000 €	20.000 m^2 110.000 m^3 Flugstaub, Schlacken-sand, Steinsand, Schlacken-granulat	Schwermetalle im Sickerwasser, die die Maßnahmenwerte der SALM weit überschreiten	mineralische Oberflächen-abdichtung mit einer Restdurchsickerung von ≤ 10 %, Drainageschicht, Abdeckschicht I+II
Schlacken-halden Mulden-bogen und Hilbers-dorfer Tor	18. Jh.-vor 1945 1993-2004 1,2 Mio. €	11.000 m^2 46.000 m^3 (Hilb. Tor) Hütten-schlacken, Abbrand, Schlacken-sand, Bauschutt, Ofen-ausbruch, Ölschaden	Böschung ohne Dauer-Standsicherheit, Böschungsfuß im Hochwasser-Wechselbereich, Erhaltung der Kontur der Halde als technisches Denkmal, Abtrag von 3.600 m^3 haldenmaterial beim Hochwasser 2002	Haldenfußsicherung gegen Hochwasser durch Zyklopenmauer und Böschungspflaster, Sicherung der Haldenplateaus durch Trisoplastdichtschicht mit einer Erdstoffüberdeckung
Rauchgas-kanäle	1855-1990 1994-2001 2,47 Mio €	Flugstäube, As-Ver-bindungen	sehr hohe Gehalte an As und Pb sowie hohe Eluierbarkeit, Sickerwasser-bildung durch die Dränagewirkung	Beräumung (ca. 650 m), Entsorgung (ca. 2.500 t), Sicherung/ Versatz (ca. 1.500 m^3), Abpumpen/ Behandeln von Sickerwasser (ca. 3000 m^3)

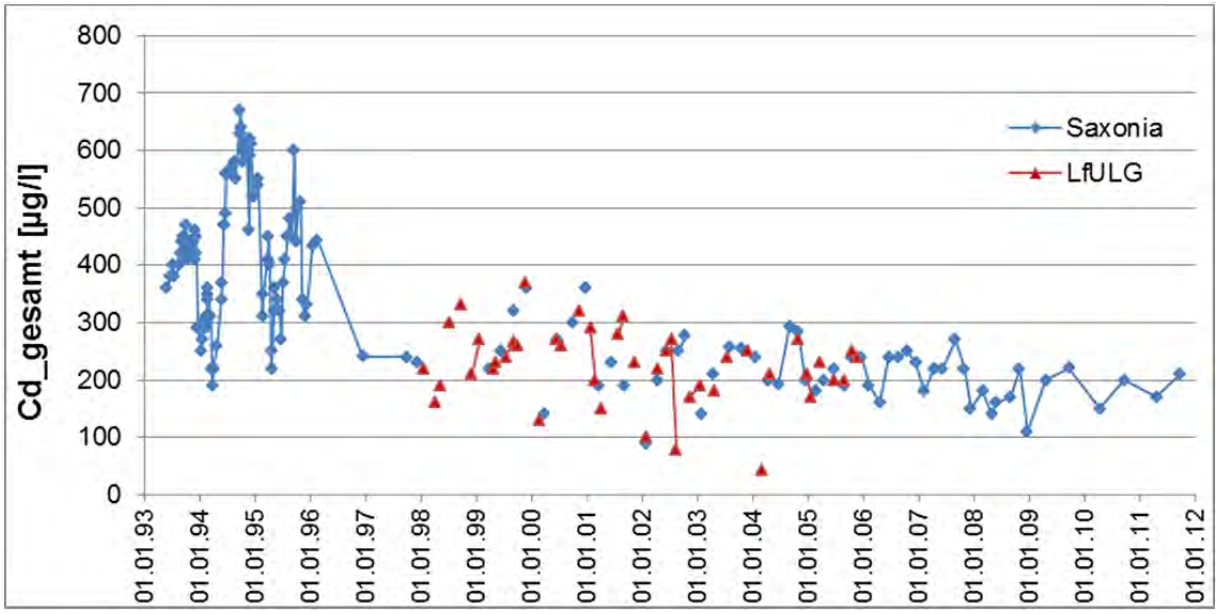
(Anlage 35-Fortsetzung) **Standort Davidschacht**

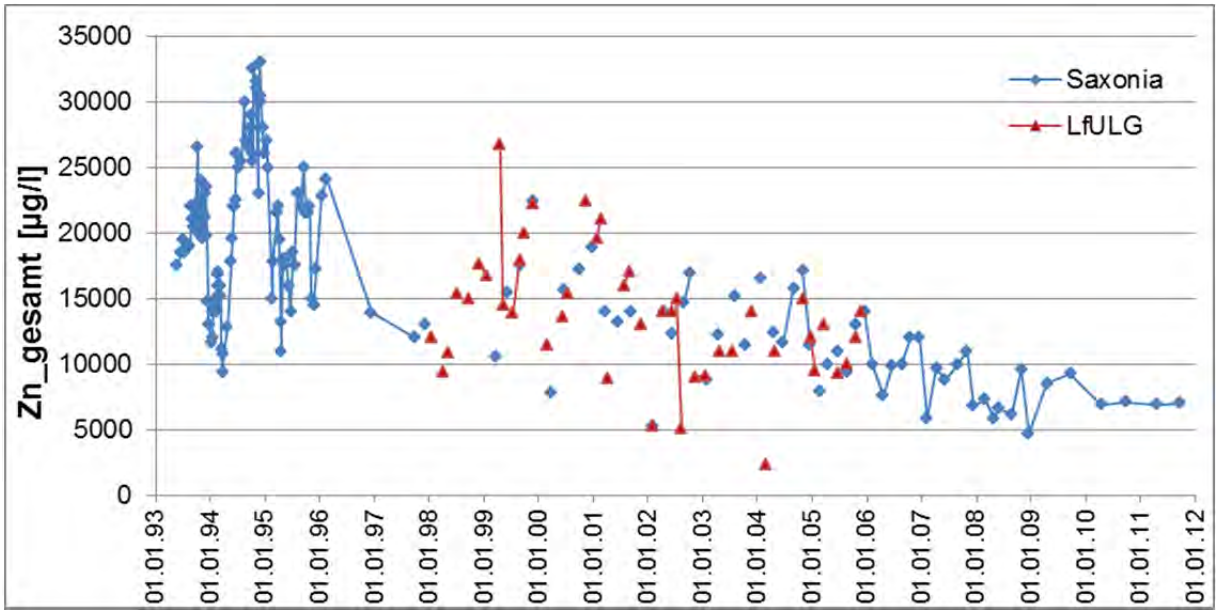
	Betriebszeit Sanierungszeit Finanzvolumen	**Fläche Volumen Material**	**Probleme**	**Sanierungs-Maßnahmen**
Grobberge-halde David-schacht	bis 1970 bis 1990 teilweise Aufarbeitung der Halde 2007-2009 1,244 Mio. €	150.000 m^2 >5 Mio. m^3 Grobberge	Enge Verflechtung der Komplexe Grobberge- und Spülhalde, hohe Belastungen von Cd im Sickerwasser (auch untertägig)	Überhöhung der Halde mit 2 m dünnschichtiger Abdeckung aus mineralischen Materialien und Dichtungsbaustoff TRISOLPLAST
Spülhalde David-schacht	1951-1964	63.000 m^2 760.000 m^3 Flotations-abgänge		Geplant: umfangreiche Erdstoffüberbauung (nicht im SAXONIA-Altlastenprojekt)
Spülhalde Hammer-berrg	1964-1970	33.000 m^2 300.000 m^3 Flotations-abgänge Wälz-schlacke	Nutzung als Garagenstandort (>1000)	Geplant: umfangreiche Erdstoffüberbauung (nicht im SAXONIA-Altlastenprojekt)

Hütte Halsbrücke

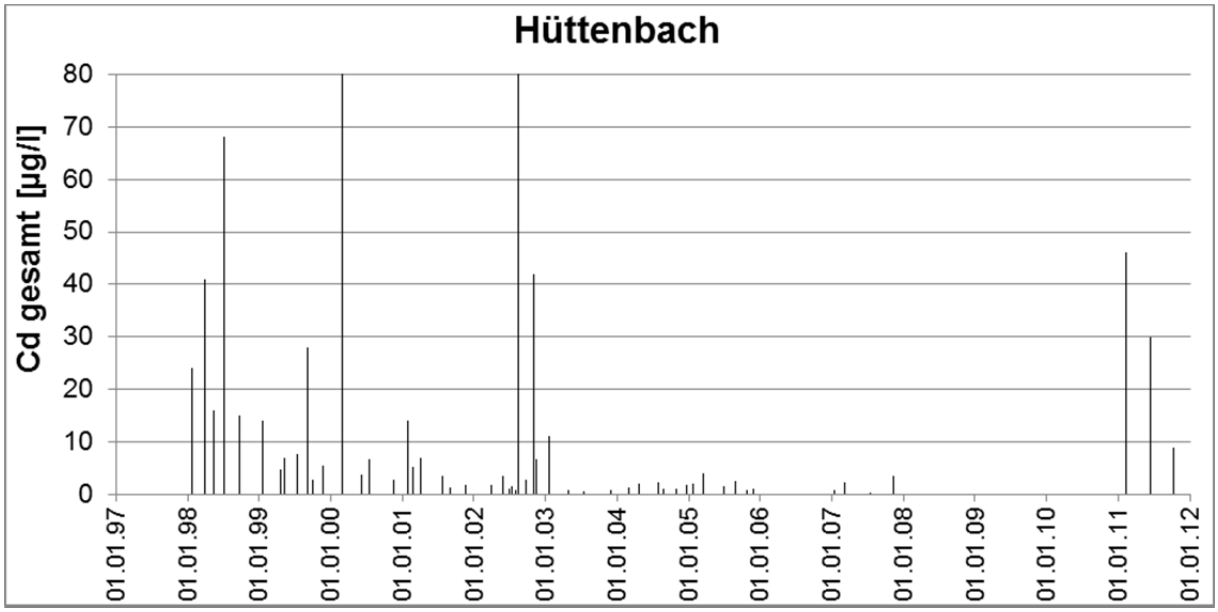
	Betriebszeit Sanierungszeit Finanzvolumen	**Fläche Volumen Material**	**Probleme**	**Sanierungs-Maßnahmen**
Obere Schlacken-halde	1850-1989 1995-2005 450.000 €	11.000 m^2 150.000 m^3 Schlacke Asche	Belastung durch As, Pb, Zn, Haldenfuß im Hochwasser-wechselbereich, Sickerwässer	Sanierungsplanung Abdeckung (teilweise)
Schlacken-halde „Hohe Esse“	1917-1961 1962, 1993-2005 k.A.	24.600 m^2 125.000 m^3 Schlacke	Schlackenrippe steht unter Denkmalschutz, Verbindung zum Altbergbau, Staubemissionen	1962 mit Erdaushub bedeckt, Abdeckung (teilweise), Erkundungen
Pochwerks-halde	k.A. 1995-2003 300.000 €	8.000 m^2 50.000 m^3 Schlacken, Ofenaus-bruch, Bauschutt	Obergraben unterquert Halde, Verbindung zum Altbergbau, Abgrenzung zur öffentlichen Straße durch nicht standsichere Mauer	Sanierung der Halde, Abdeckschicht I+II

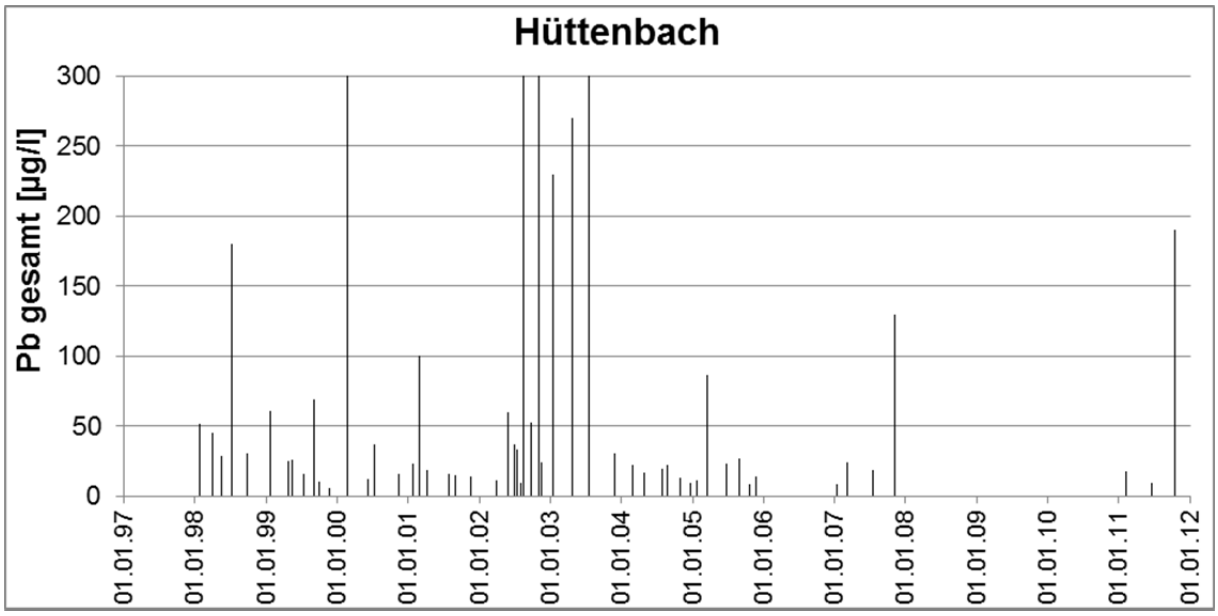
Anlage 36: Zeitliche Entwicklung der Cd- und Zn-Gehalte in den Wässern des Stangenbergbaches (Gesamtgehalte), Daten: LfULG, SAXONIA mbH



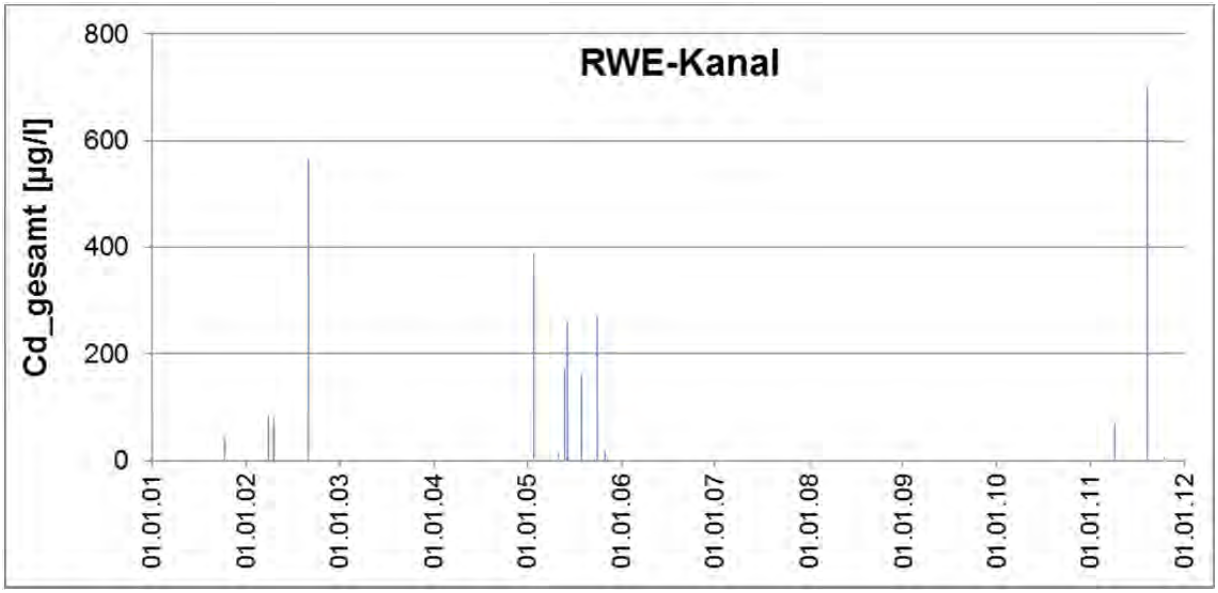


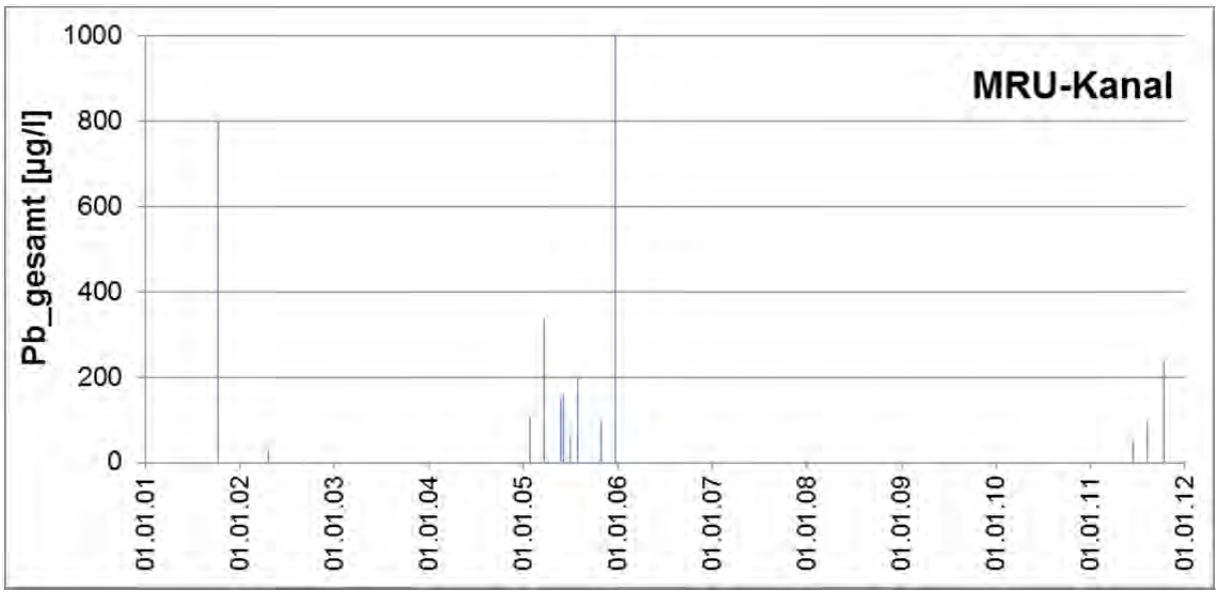
Anlage 37: Zeitliche Entwicklung der Cd- und Pb-Gehalte in den Wässern des Hüttenbaches (Gesamtgehalte), Daten: LfULG, SAXONIA mbH



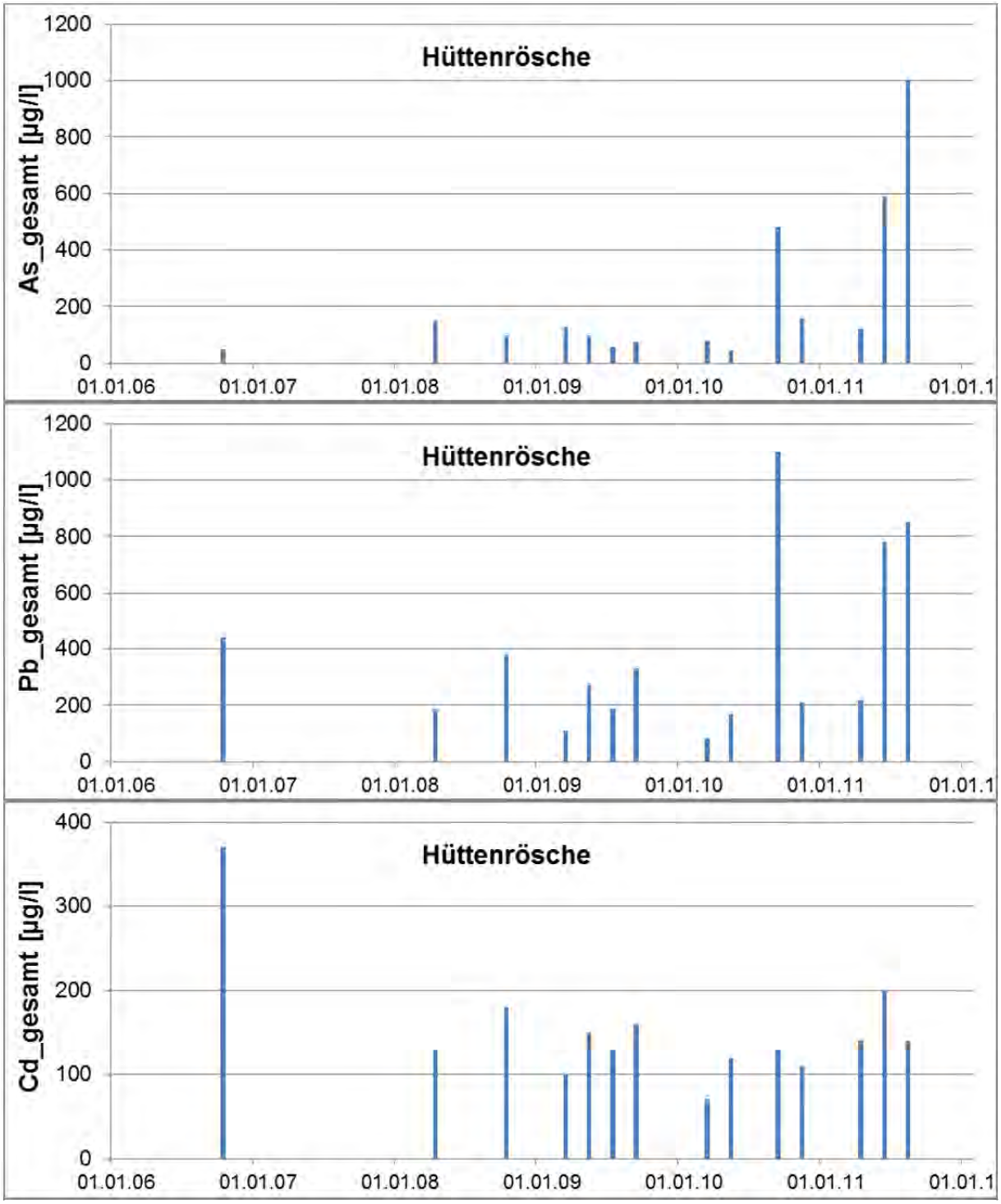


Anlage 38: Zeitliche Entwicklung der Cd-Gehalte in den Wässern des RWE-Kanals und der Pb-Gehalte in den Wässern des MRU-Kanals (Gesamtgehalte), Daten: LfULG





Anlage 39: Zeitliche Entwicklung der As-, Pb- und Cd-Gehalte in den Wässern der Hüttenrösche (Gesamtgehalte), Daten: LfULG



Anlage 40: Elementgehalte in den Wässern (Gesamtgehalte) und Sedimenten (Fraktion <20 µm) des Roten Grabens, gerundet auf zwei signifikante Stellen, Daten: LfULG

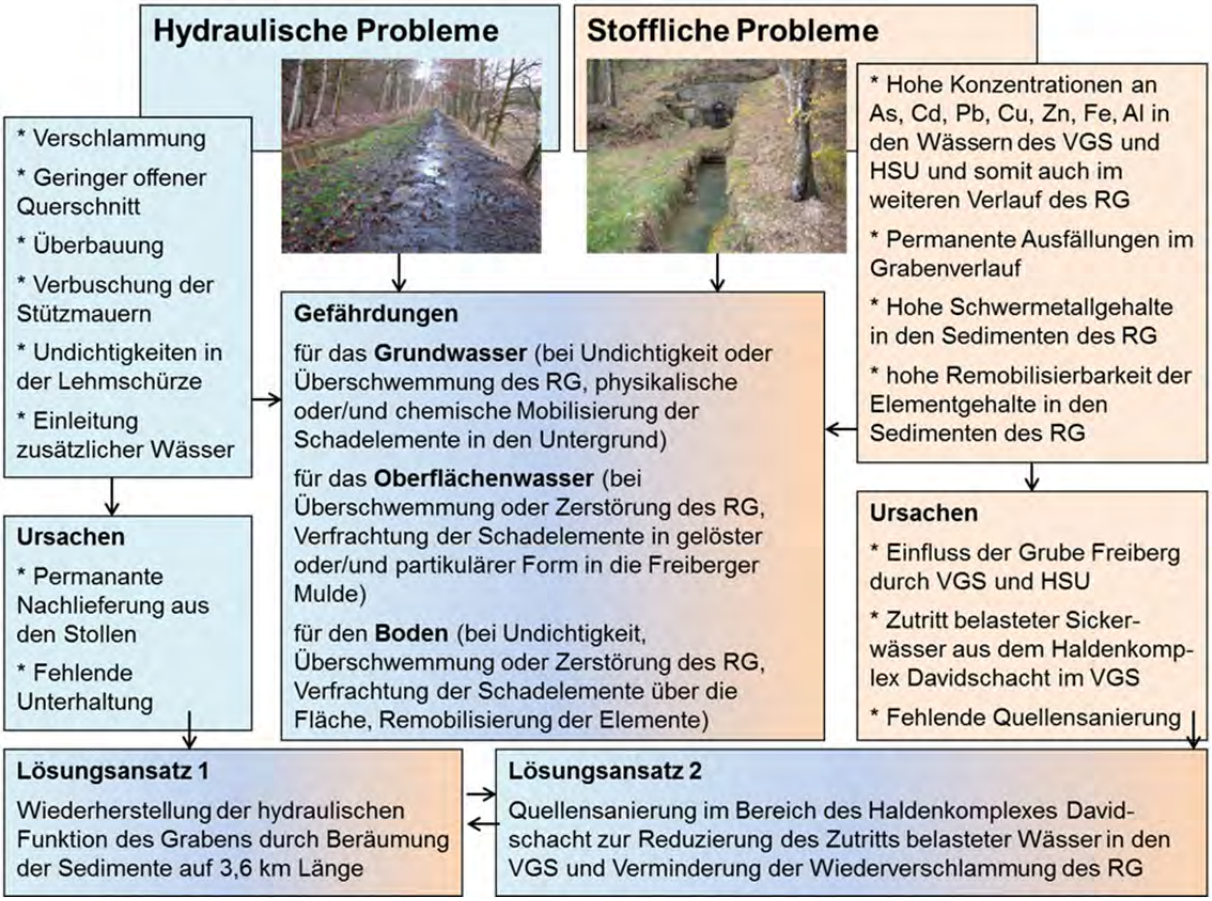
Wässer (Gesamtgehalte), Angaben in µg/l

	OBF33010 VGS 1999-2011			**OBF33020 HSU 1999-2011**			**OBF33030 RG 1999-2005**		
	Min	Max	**Mittel**	Min	Max	**Mittel**	Min	Max	**Mittel**
As	4,4	48	**18**	10	75	**30**	7,9	69	**25**
Pb	4,6	79	**23**	2,7	64	**19**	4,5	62	**21**
Cd	34	310	**150**	11	110	**48**	11	170	**79**
Cr	<1	6,4	**1,2**	<1	6,9	**1,1**	<1	11	**1,2**
Fe	180	2.800	**1.100**	460	4.580	**2.200**	520	5.200	**1.700**
Cu	72	780	**270**	17	220	**83**	33	90	**63**
Mn	1.600	11.000	**5.300**	2.500	6.100	**4.500**	2.700	7.100	**4.600**
Ni	14	110	**49**	15	72	**44**	18	86	**44**
Hg	<0,02	0,4	**0,11**	<0,02	0,54	**0,082**	0,04	0,3	**0,21**
Ag	<0,1	1,4	**0,30**	<0,1	1,6	**0,27**	<0,1	1,2	**0,26**
Tl	<0,1	5	**0,28**	<0,1	1,2	**0,15**	<0,1	0,7	**0,13**
Zn	3.800	45.000	**15.000**	1.900	13.000	**6.200**	1.800	21.000	**9.200**

Sedimente (Fraktion <20 µm), Angaben in mg/kg

	OBF33010 VGS 2000-2005			**OBF33020 HSU 2000-2005**			**OBF33030 RG 2000-2005**		
	Min	Max	**Mittel**	Min	Max	**Mittel**	Min	Max	**Mittel**
As	500	6.600	**2.200**	820	6.700	**2.500**	500	3.000	**1.700**
Pb	350	5.600	**1.700**	520	2.200	**1.500**	920	3.600	**1.400**
Cd	5,3	230	**62**	25	210	**120**	11	100	**40**
Cr	19	84	**49**	11	41	**26**	13	70	**37**
Fe	27.000	210.000	**82.000**	44.000	320.000	**170.000**	120	140.000	**86.000**
Cu	510	2500	**1.400**	630	6.400	**2.800**	230	3.600	**1.700**
Mn	160	4.000	**1.200**	910	39.000	**19.000**	1.400	18.000	**5.400**
Ni	8,1	50	**27**	22	150	**79**	19	54	**35**
Hg	0,07	1,5	**0,49**	0,2	6,6	**1,0**	0,108	1,6	**0,43**
Ag	11	23	**18**	13	31	**19**	16	23	**18**
Tl	0,08	2,0	**0,74**	0,46	1,5	**0,92**	0,31	1,8	**0,68**
Zn	1.000	10.000	**4.800**	4.400	18.000	**12.000**	1.500	9.100	**4.100**

Anlage 41: Hydraulische und stoffliche Probleme im Roten Graben und ihre Ursachen sowie Lösungsansätze



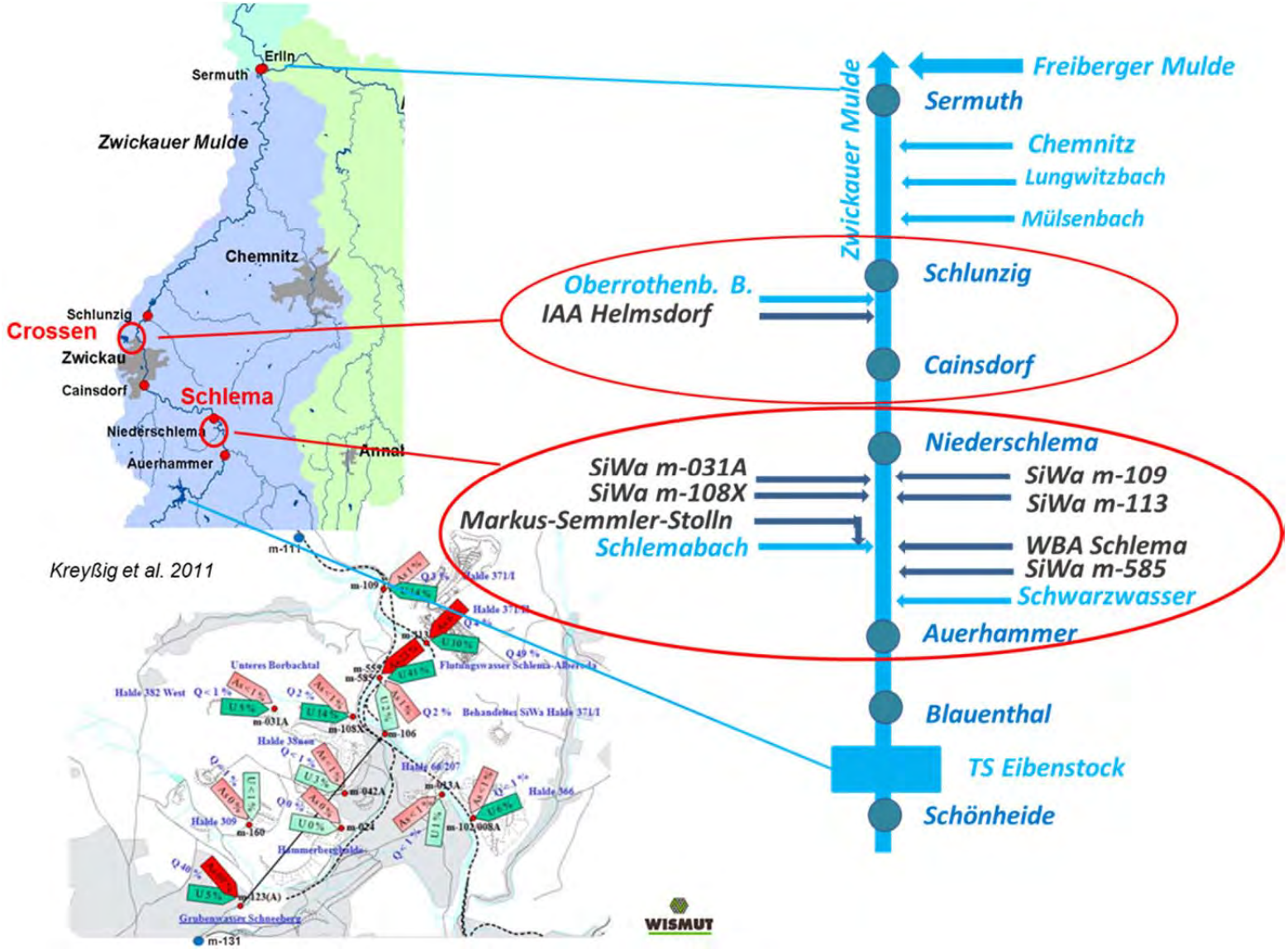
Anlage 42: Diskutierte Varianten zur Sanierung des Roten Grabens und Varianten zur Wasserbehandlung ({Janneck 2008 #1734}) und Möglichkeiten zur Reduzierung der Cd-Einträge aus dem Freiberger Raum (Martin et al. 2010b, 2013)

Varianten zur Sanierung des Roten Grabens	**Varianten der Wasserbehandlung (Auswahl übertage)**
A komplette Entschlammung und bauliche Sanierung auf kompletter Grabenlänge	2.1 Behandlung beider Abflüsse (VGS und HSU) in einer gemeinsamen Anlage in der Nähe des Mundloches des HSU
B Entschlammung und bauliche Sanierung auf Teilstrecke zwischen VGS und HSU, Verrohrung und Abdichtung neben dem Graben zwischen HSU und Halsbrücke ohne Schlammbergung	2.2 Behandlung mit technischen Maßnahmen am VGS und naturnahe Behandlung am HSU
C Entschlammung und bauliche Sanierung auf Teilstrecke zwischen VGS und HSU, Verrohrung und Abdeckung zwischen HSU und Halsbrücke mit Schlammbergung	2.3 Behandlung des Abflusses aus dem VGS und Verzicht auf die Behandlung des Abflusses aus dem HSU
D komplette Entschlammung ohne bauliche Sanierung auf kompletter Grabenlänge	2.3.1 Auftrennung der Teilströme und Sedimentation in der Ludwigschachter Aufschlagrösche (entspricht V1.6 untertägig)
E Teilberäumung des Grabenprofils auf kompletter Grabenlänge (Querschnitt-vergrößerung) ohne bauliche Sanierung	**2.3.2 Behandlung gesamter Volumenstrom VGS (komplett oberirdische Behandlung)**
F Entschlammung und bauliche Sanierung auf Teilstrecke zwischen VGS und HSU	**Cd-Abtrennung >90 %**
G Direktabschlag der Wässer am VGS und HSU in die Mulde ohne Schlammberäumung ohne Vollverfüllung auf kompletter Grabenlänge	
H Direktabschlag der Wässer am VGS und HSU in die Mulde mit Schlammberäumung mit Vollverfüllung auf kompletter Grabenlänge	

	Varianten zur Reduzierung der Cd-Einträge aus dem Freiberger Raum	**Reduzierung der Cd-Gehalte aus Punktquellen in der Freiberger Mulde**
1	Reinigung der Wässer des Verträgliche Gesellschaft Stolln (ohne Berücksichigung einer „Quellensanierung“ im Bereich Davidschachtkomplex)	um 64 %
2	Zusammenfassung und Reinigung der Wässer von Verträgliche Gesellschaft Stolln und Stangenbergbach	um 77 %
3	Zusätzliche Einbindung von MRU-und RWE-Kanal, Glücksilbersternstolln, Hüttenrösche Morgenstern und Ablauf Spülhalde Hammerberg	um 93 % Q ca. 252 m^3/h
4	Einleitung der o.g. Punktquellen in den Rothschönberger Stolln und Reinigung an dessen Mundloch	um fast 100 % * Q ca. 2.200 m^3/h

* in der Freiberger Mulde und Triebisch

Anlage 43: Schema der Belastungsgebiete Schlema und Crossen an der Zwickauer Mulde mit wesentlichen Nebenflüssen und Punktquellen



Anlage 44: Sanierungskonzeption der Wismut GmbH (zusammengestellt nach Wismut GmbH 2013c, BMWi 2011)

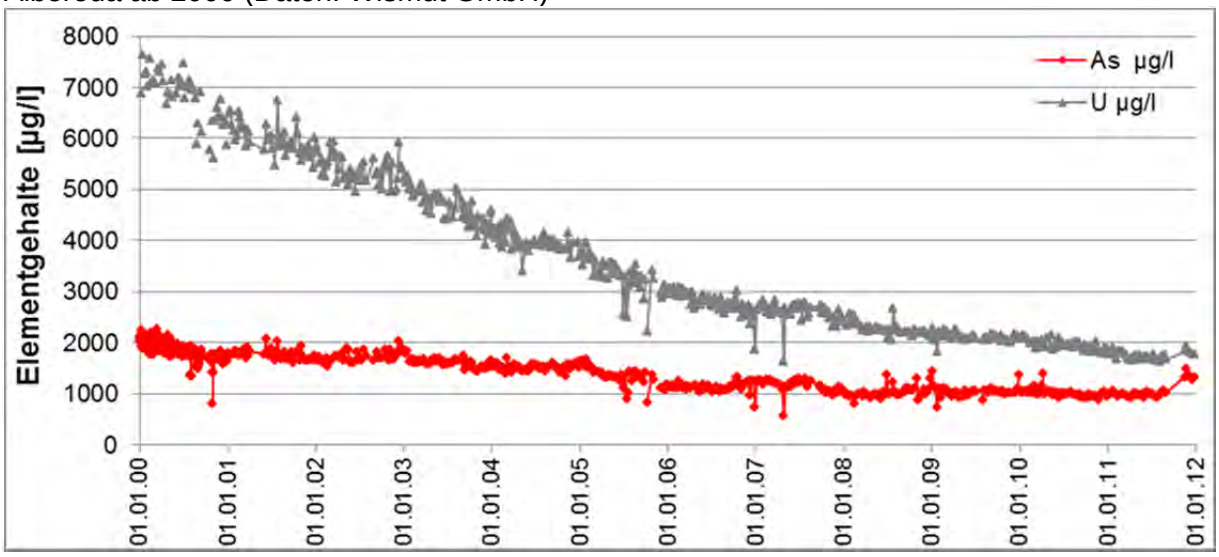
Konzept	**Indikationen**	**Lösungen**
<u>für die Verwahrung der Gruben</u> **→ Schließung** **→ Verwahrung** **→ Flutung**	* Minimierung des Schadstoffpotential im ausfließenden Wasser * Gewährleistung der Stabilität des Grubengebäudes und Wassserabtrags * Ausnutzen des natürlichen Flutungsvorganges durch Grundwasseranstieg * Minimierung des Schadstoffaustrags über den Luftpfad	→ Entfernung von Ölen, Fetten und Chemikalien aus der Grube → Sanierung gebirgsmechanisch instabiler (tagesnaher) Hohlräume mit selbsthärtendem Versatz → Abschalten der Pumpen → Schaffung einer radonableitenden Bewetterung
<u>für die Verwahrung von Halden</u> **→ Umlagerung** **→ In-situ-Sanierung**	* Minimierung des Schadstoffaustrags über den Luftpfad * Minimierung des Schadstoffaustrags über den Wasserpfad * Gewährleistung der Stabilität der Böschungen der Halden	→ Unterbindung des direkten Kontakts mit Haldenmaterial und Reduzierung der vom Haldenmaterial ausgehenden radioaktiven Belastung durch Haldenabdeckung → Reduzierung der Infiltration von Niederschlagswässern in den Haldenkörper durch Haldenabdeckung und Wasserfassung → Herstellung der Standsicherheit der Böschungen der Halden durch Materialumlagerung
<u>für die Verwahrung der industriellen Absetzanlagen</u> **→ „trockene“ In-situ-Verwahrung mit technischer Teilentwässerung**	* Minimierung der Freiwasserflächen * Berücksichtigung der geringen Tragfähigkeit des Untergrundes * Gewährleistung der Standsicherheit und Minderung der Erosionsgefahr * Minimierung des Schadstoffaustrags/ Radionuklidaustrags über den Wasserpfad/ Luftpfad	→ Entfernung des Freiwassers aus den Absetzbecken durch Abpumpen → Abdeckung der tonig-schluffigen Feinschlamm-Tailings mit Geovlies/ -gitter; Einbau von Vertikaldräns; Einbringung einer Zwischenabdeckung aus durchlässigem Haldenmaterial → Konturierung und Abdeckung der Tailings mit Erdmaterial → Minimierung des Schadstoffaustrags über den Wasserpfad durch Haldenabdeckung und Wasserfassung

Anlage 44 (Fortsetzung)

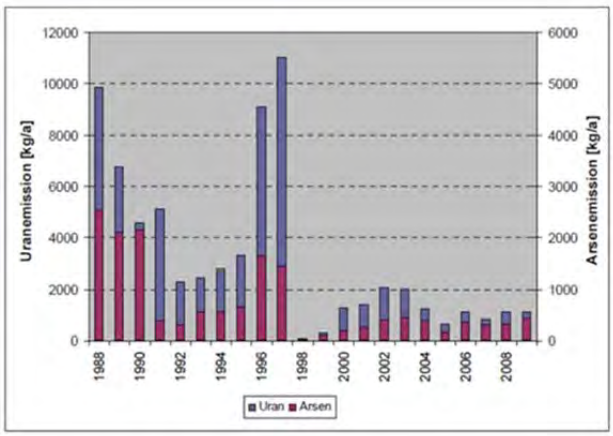
Konzept	**Indikationen**	**Lösungen**
<u>für den Umgang mit Betriebsgebäuden und Anlagen</u> **→ Prüfung auf Wiederverwendbarkeit**	* Nutzung im Rahmen der andauernden Sanierungsarbeiten * Nutzung kontaminierter Anlagen/ Materialien * Nutzung nichtkontaminierter Materialien	→ Abriss nach Beendigung der Arbeiten → Abriss und Einlagerung von radioaktiv oder chemisch kontaminiertem Schrott und Bauschutt auf Absetzanlagen und Halden → Rückführung von Schrott in den Wirtschaftskreislauf; Verwendung von Bauschutt im Wegebau auf sanierten Flächen
<u>für die Nachnutzung von sanierten Flächen</u> **→ diese ist festgeschrieben**	* Orientierung an bestehenden regionalen Raumordnungs- und Flächennutzungsplänen unter Beachtung der Strahlenschutzgrundsätze	→ Nachnutzung sanierter Flächen vorzugsweise als Wald oder Grünfläche → Nachnutzung ausgewählter sanierter Betriebsflächen für gewerbliche oder industrielle Aktivitäten
<u>für die Behandlung kontaminierter Wässer</u> **→ Wasserbehandlungs-anlagen** **→ Rückstands-Verwahrung**	* Anfall von Flutungswässern während und nach Abschluss der gesteuerten Flutung der Bergwerke, die mit Uran, Radium, Schwermetallen und Arsen kontaminiert sind, z.B. Grube Schlema-Alberoda * Anfall von kontaminierten Frei- und Porenwässern, die zur Trockenlegung der Tailings abgepumpt werden müssen, z.B. IAA Helmsdorf * Anfall von kontaminierten Sickerwässern, die aus den abgedeckten Absetzanlagen austreten, z.B. Halde 371/I in Schlema	→ Wasserbehandlung mit modifizierter Kalkfällung, Einlagerung der immobilisierten Rückstände auf Halden (Halde 371), zeitweise biologische Wasserbehandlung (Pöhla) → Wasserbehandlung mit modifizierter Kalkfällung, Einlagerung der immobilisierten Rückstände auf den Absetzanlagen → Wasserbehandlung mit Ionenaustausch, Einlagerung der immobilisierten Rückstände auf Halden (Halde 371)

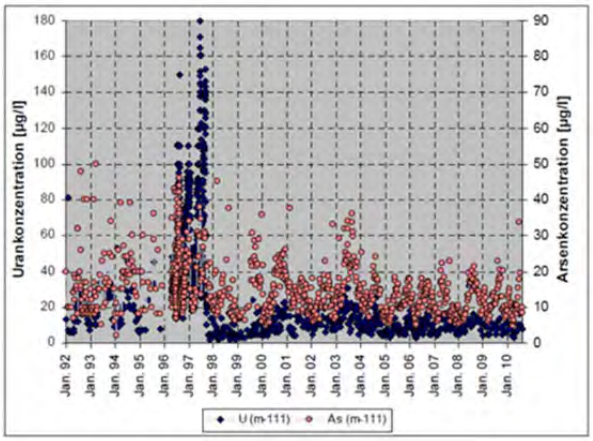
Anlage 45: Zeitliche Entwicklung der As- und U-Konzentrationen bzw. –frachten im Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda

Entwicklung der As- und U-Konzentrationen im Flutungswasser der Grube Schlema-Alberoda ab 2000 (Daten: Wismut GmbH)

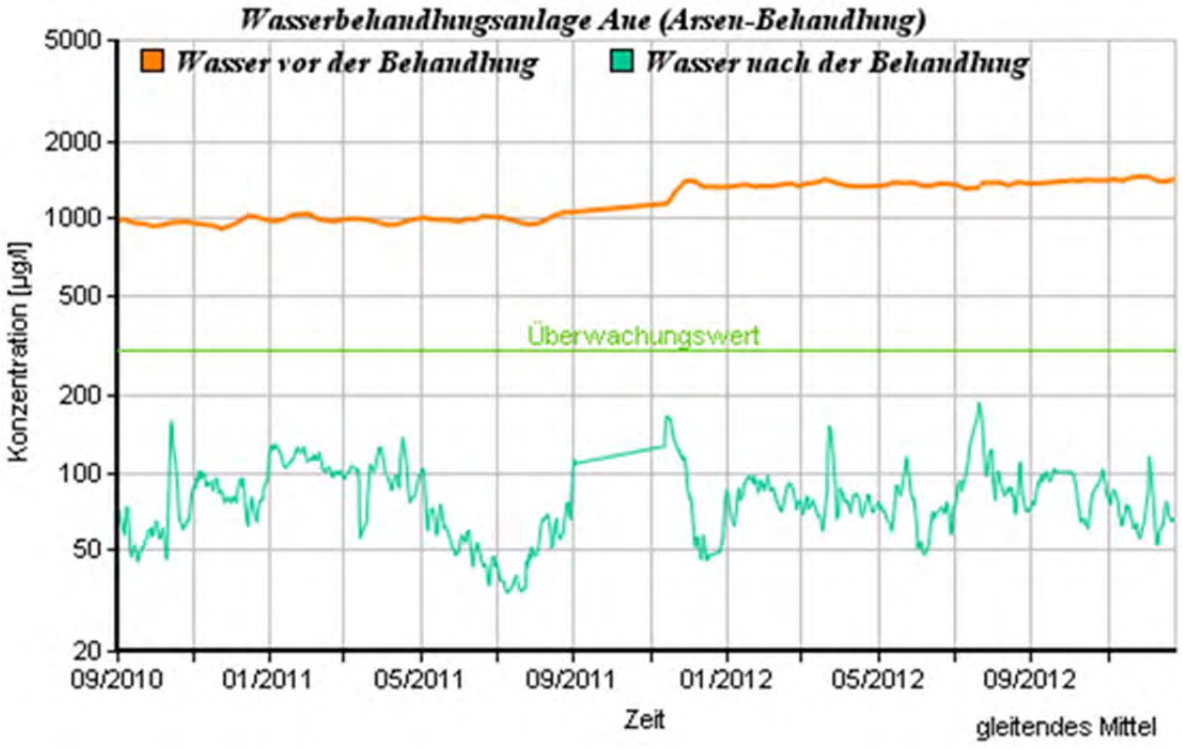


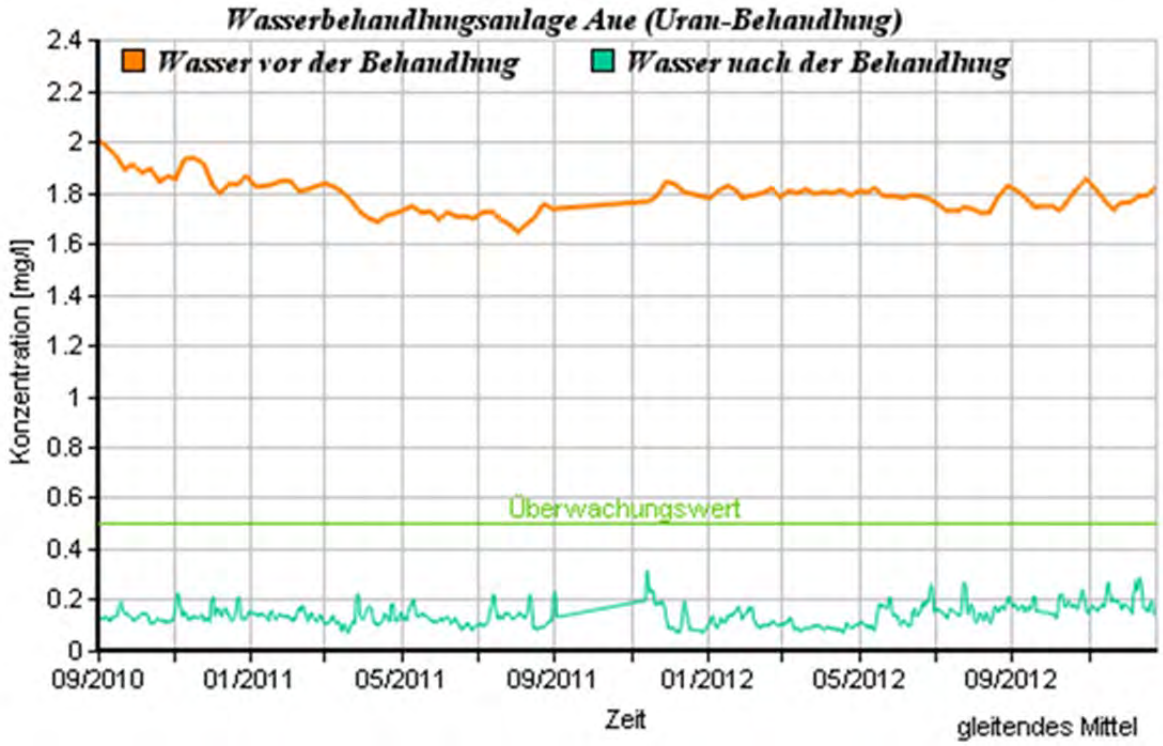
Bilanzierung der Uran- und Arsenemissionen aus der Grube Schlema-Alberoda (links), zeitliche Entwicklung der Uran- und Arsenkonzentrationen in der Zwickauer Mulde unterhalb von Niederschlema (rechts) (Wismut 2010c)



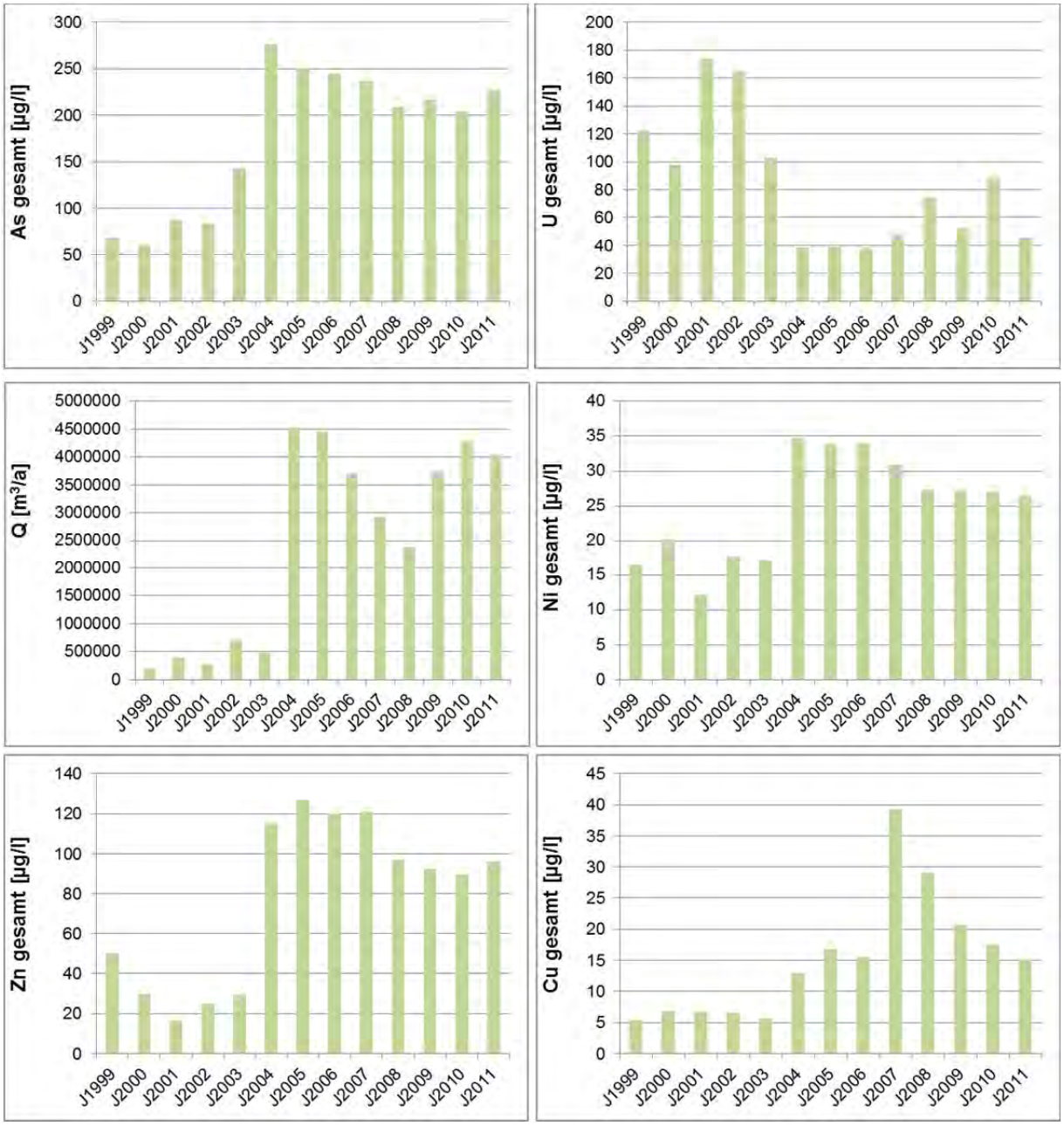


Anlage 46: Wirksamkeit der WBA Schlema hinsichtlich der Arsen- und Uran-Abtrennung (Wismut GmbH 2013a)

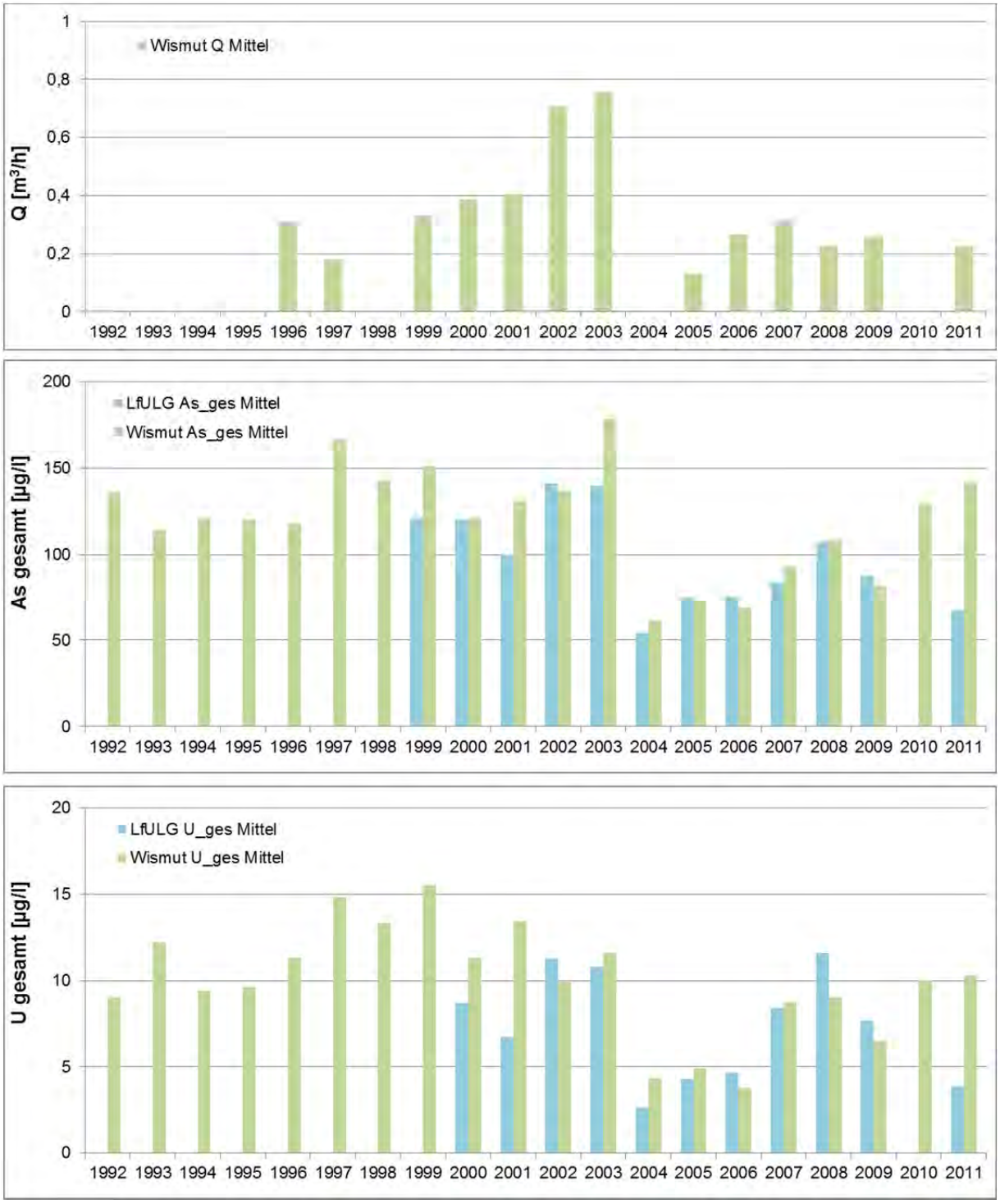




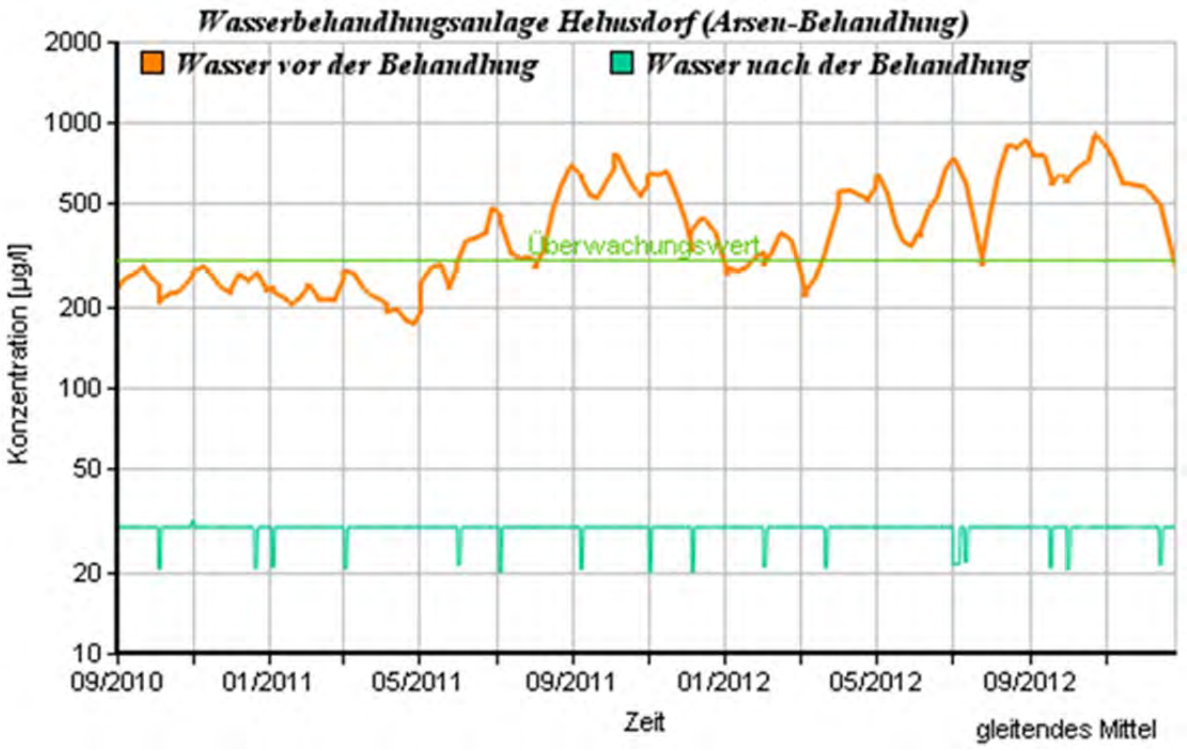
Anlage 47: Zeitliche Entwicklung der mittleren Wassermengen und ausgewählter Konzentrationen (Mittelwerte) im Markus Semmler Stolln, Daten: Wismut GmbH

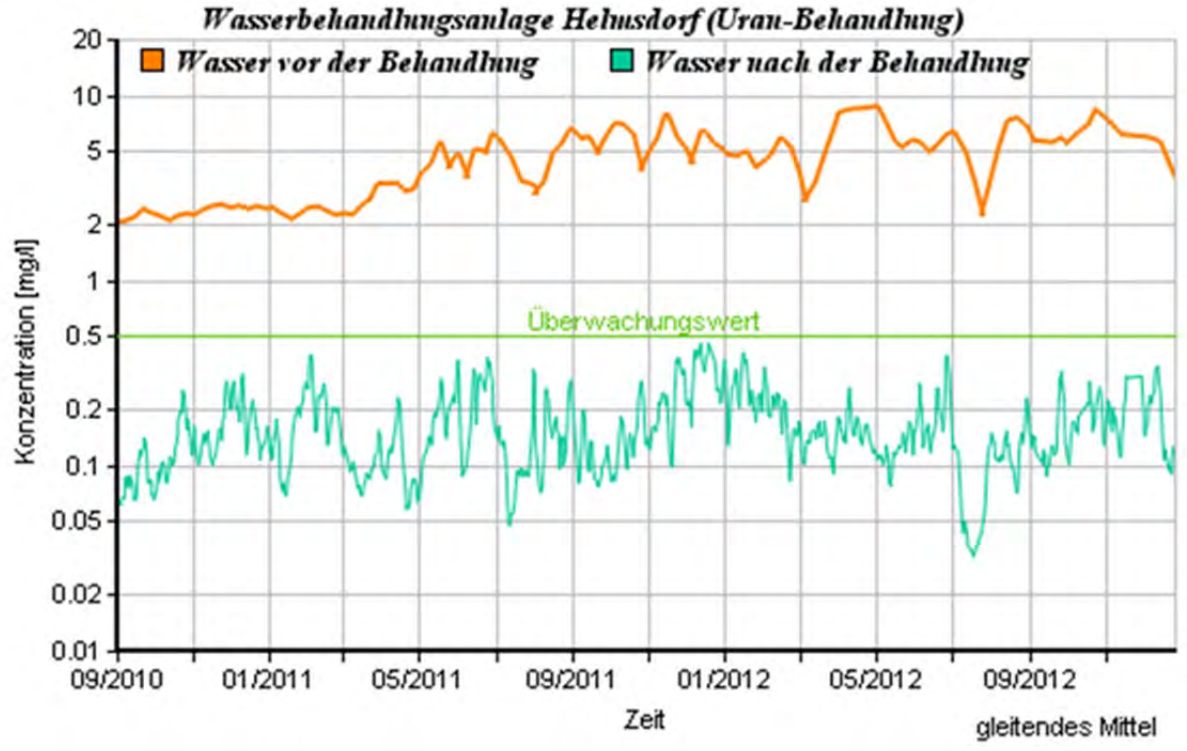


Anlage 48: Zeitliche Entwicklung der mittleren Wassermengen sowie der As- und U-Konzentrationen (Mittelwerte) im Schlemabach, Daten: LfULG, Wismut GmbH

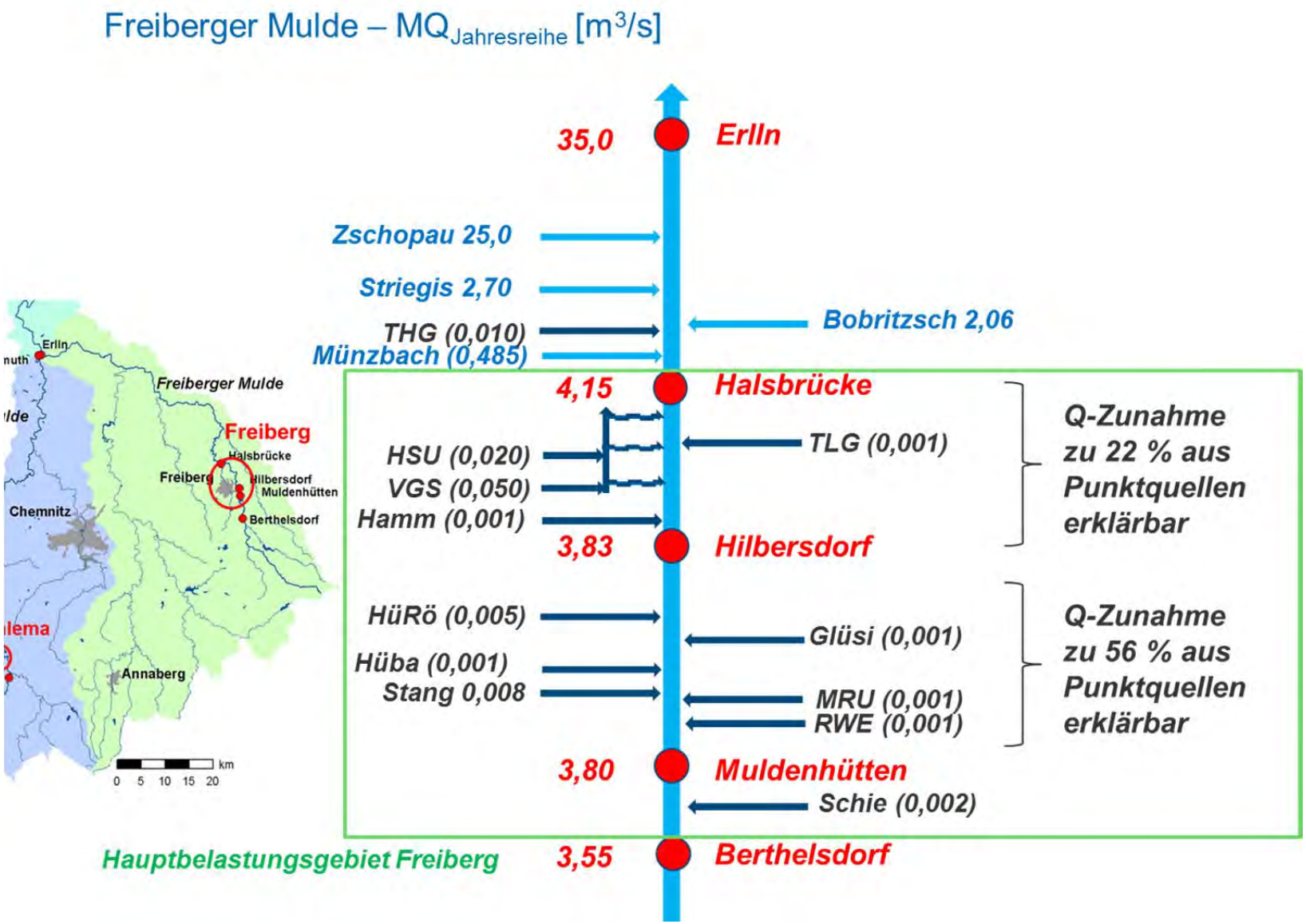


Anlage 49: Wirksamkeit der WBA Helmsdorf hinsichtlich der Arsen- und Uran-Abtrennung (Wismut GmbH 2013a)

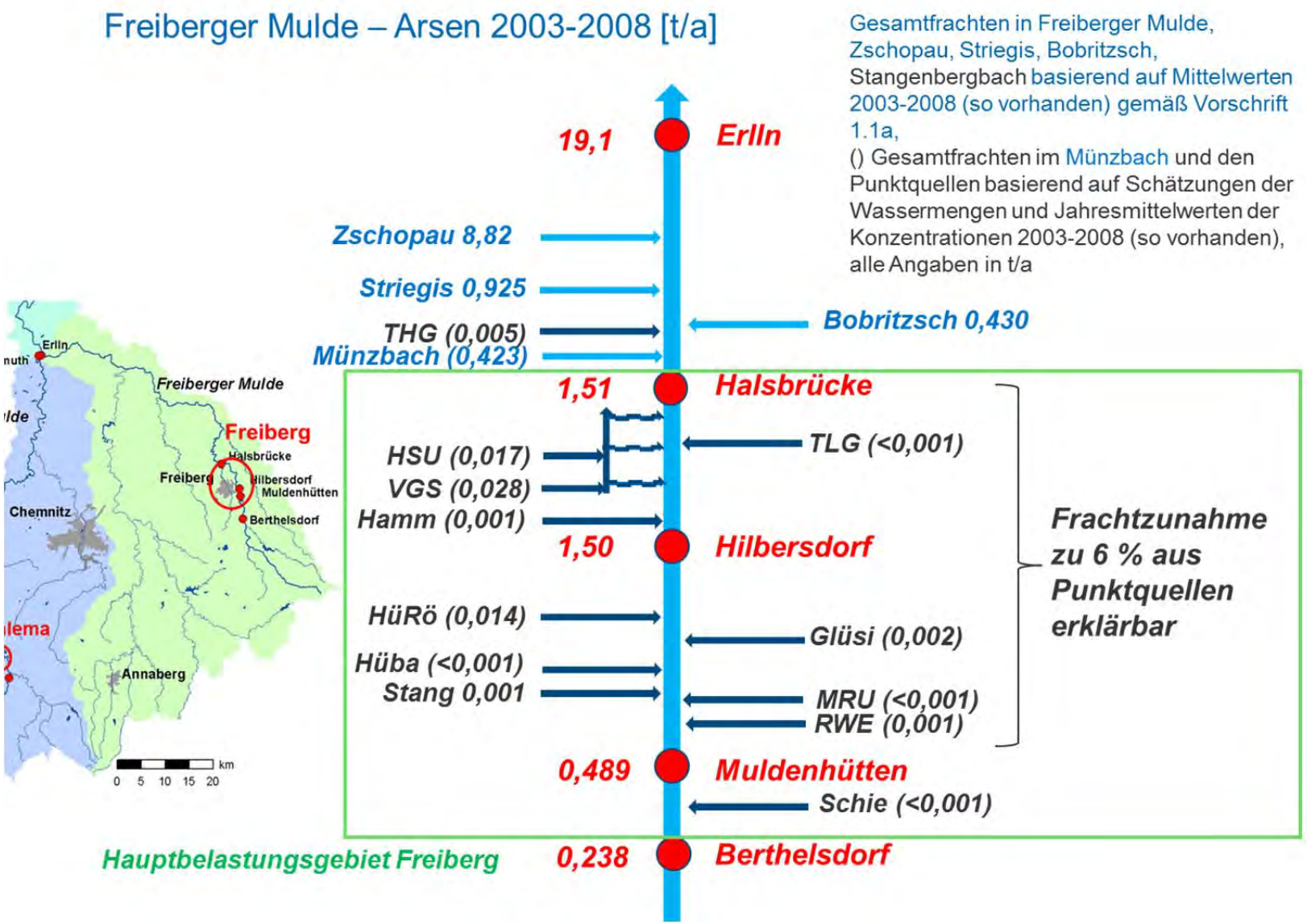




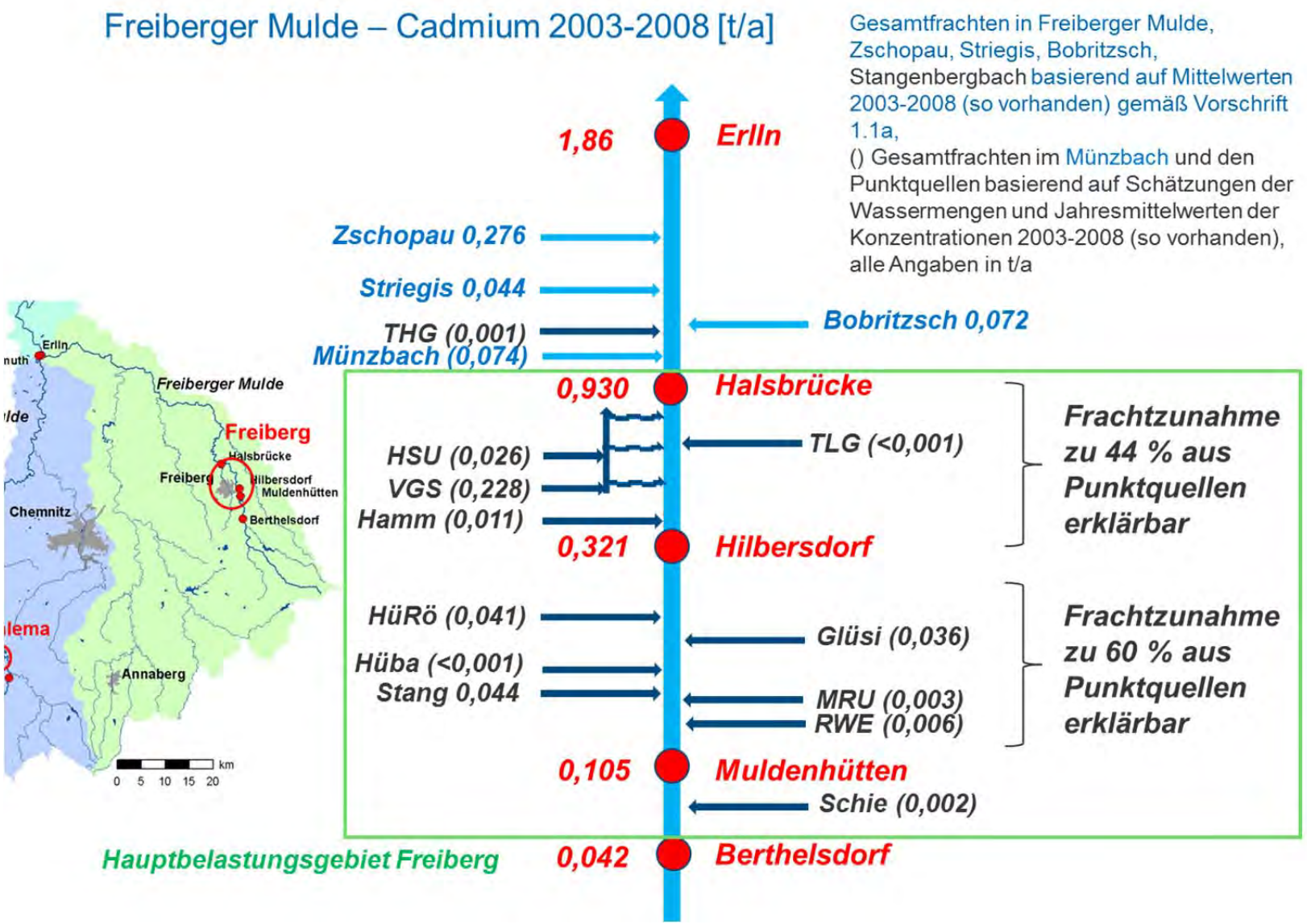
Anlage 50: Durchflussbilanz für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



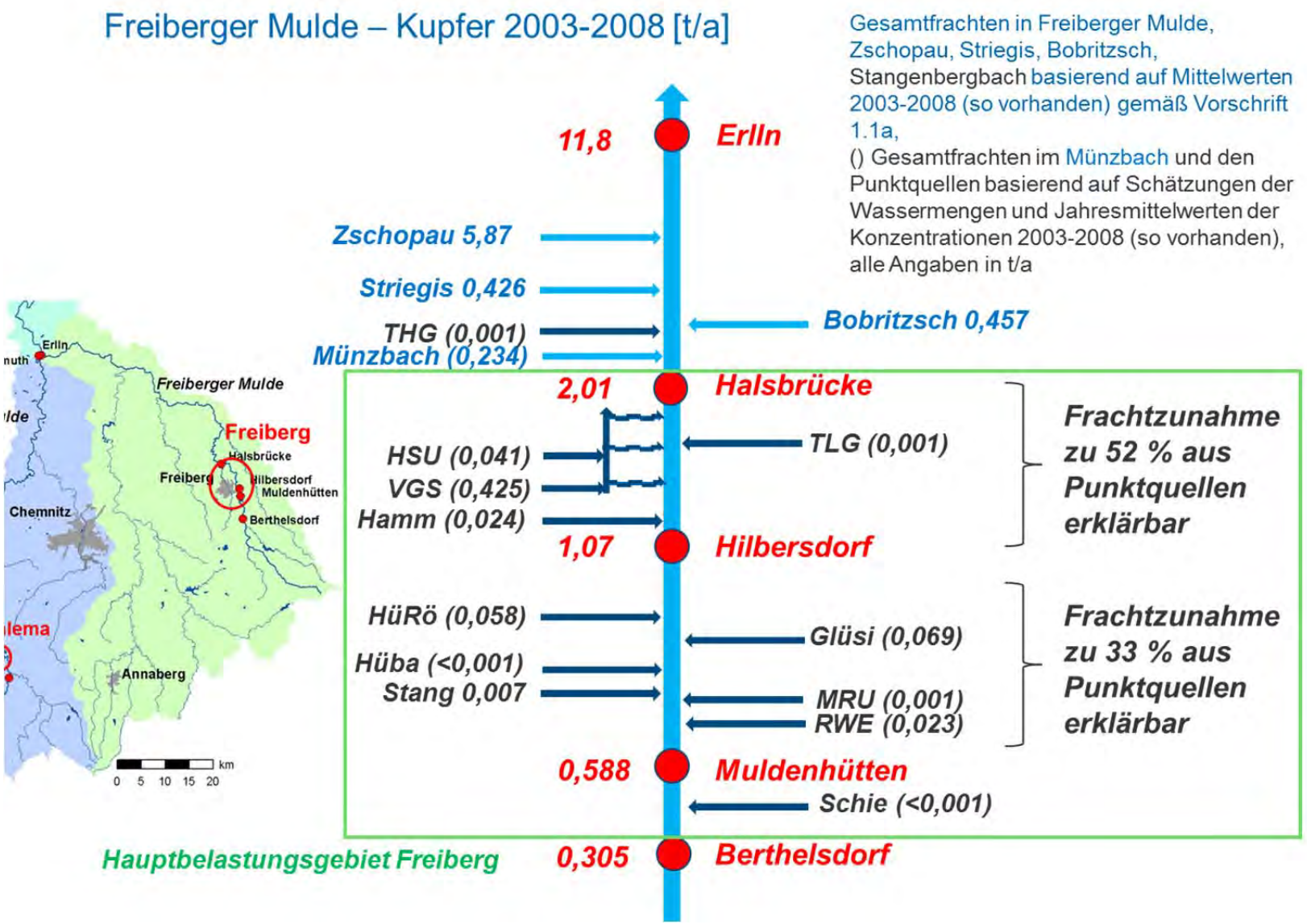
Anlage 51: Frachtbilanz für Arsen für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



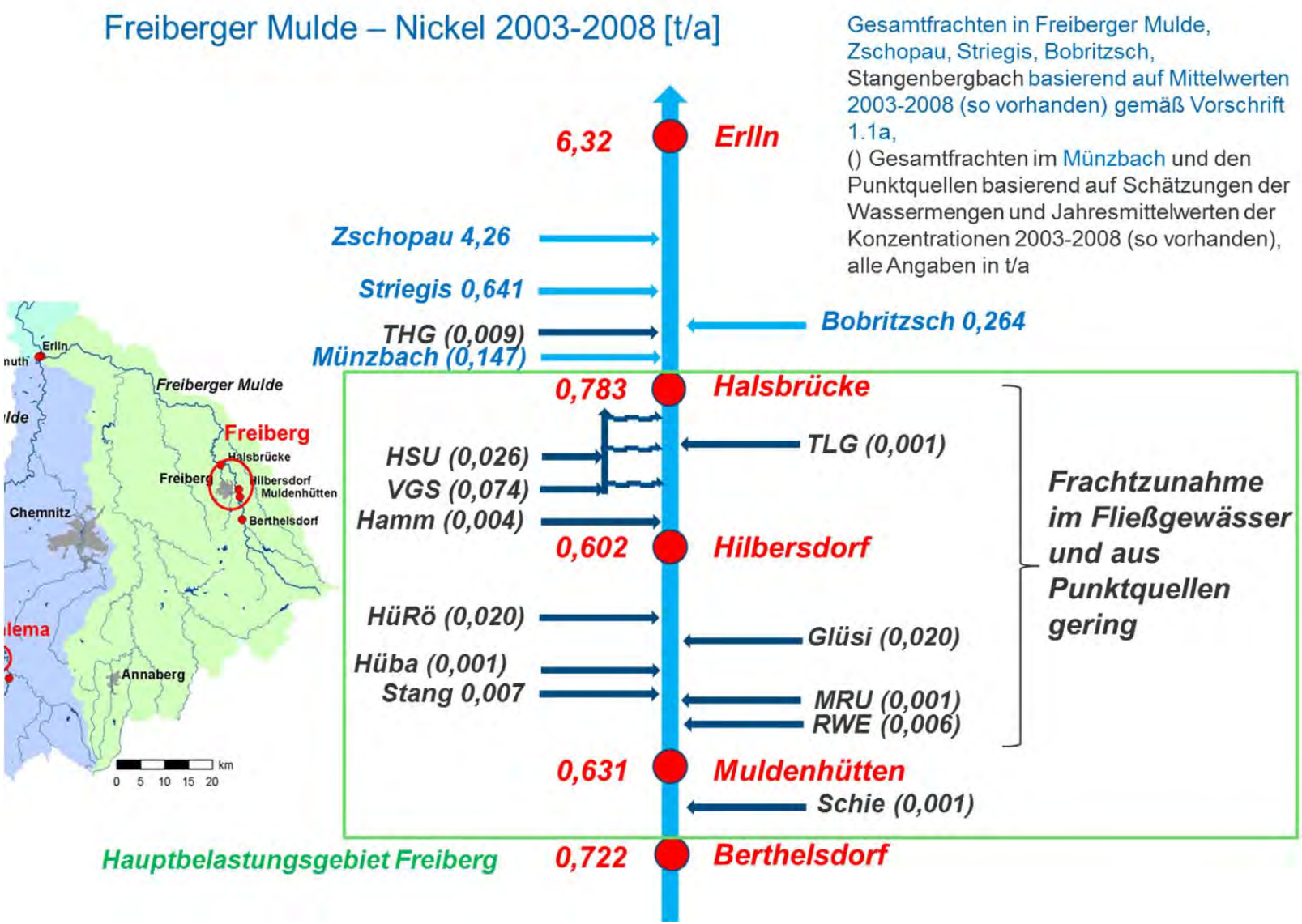
Anlage 52: Frachtbilanz für Cd für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



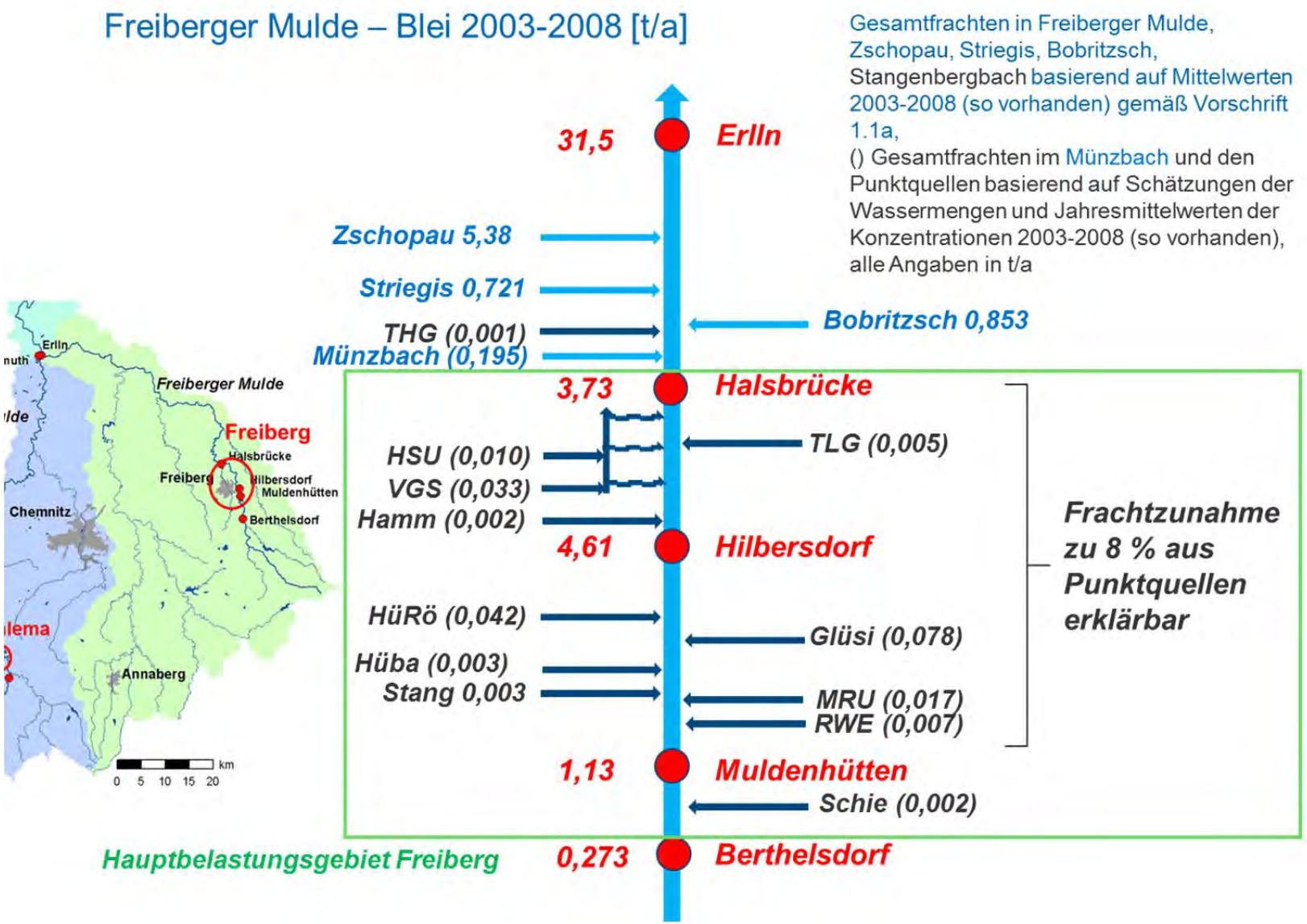
Anlage 53: Frachtbilanz für Kupfer für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



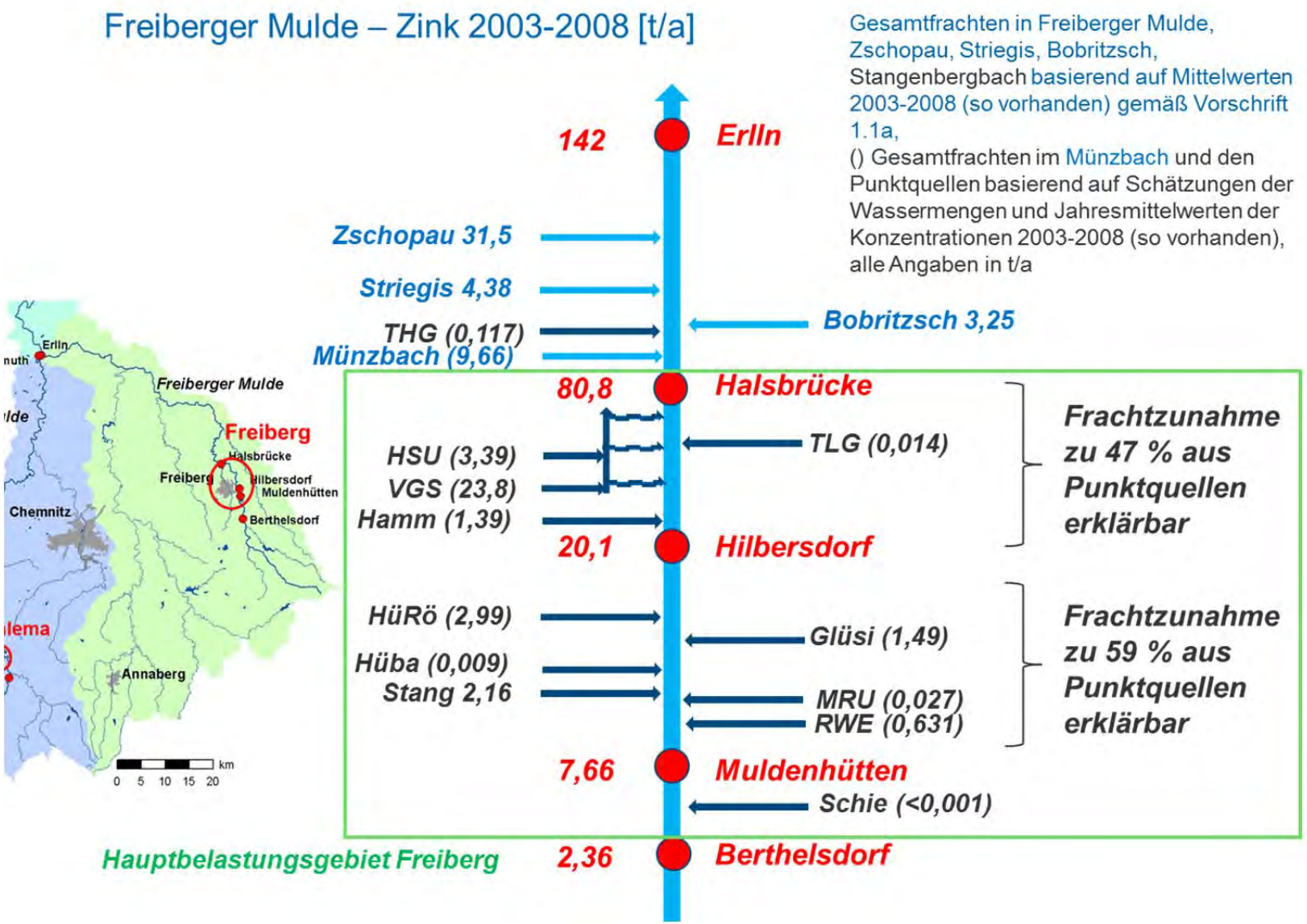
Anlage 54: Frachtbilanz für Nickel für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



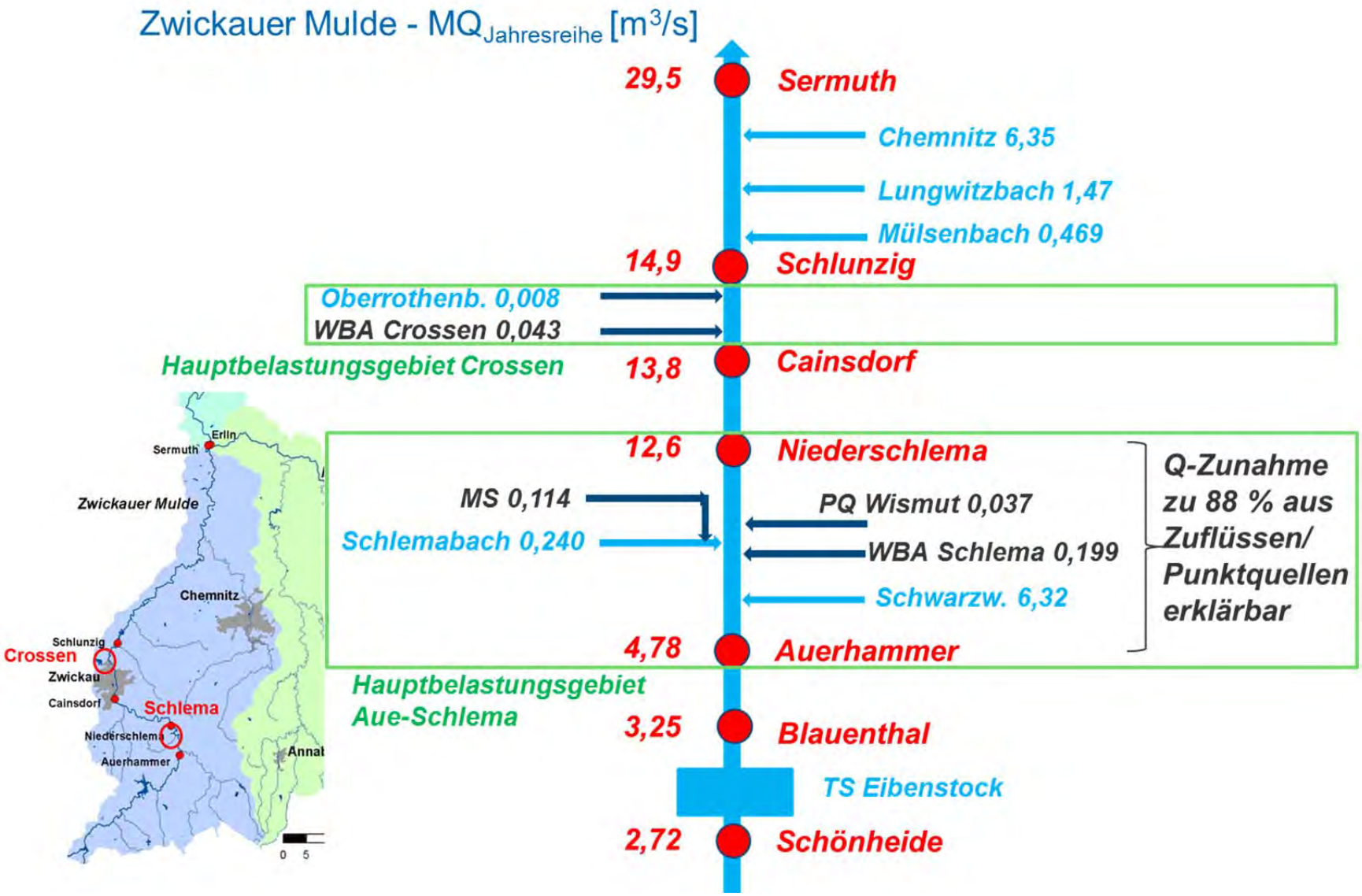
Anlage 55: Frachtbilanz für Blei für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



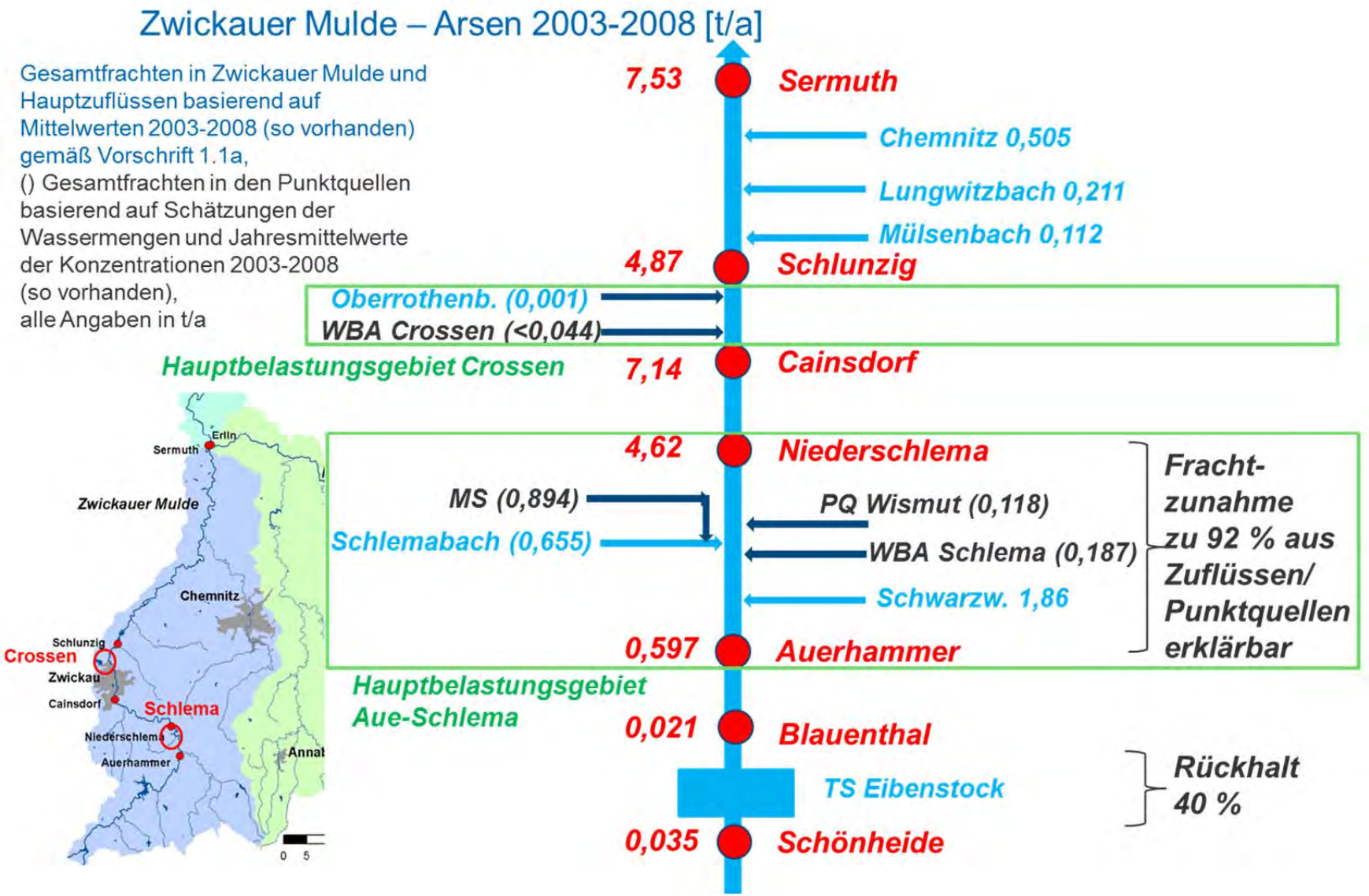
Anlage 56: Frachtbilanz für Zink für die Freiberger Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Freiberg, Bezugszeitraum 2003-2008



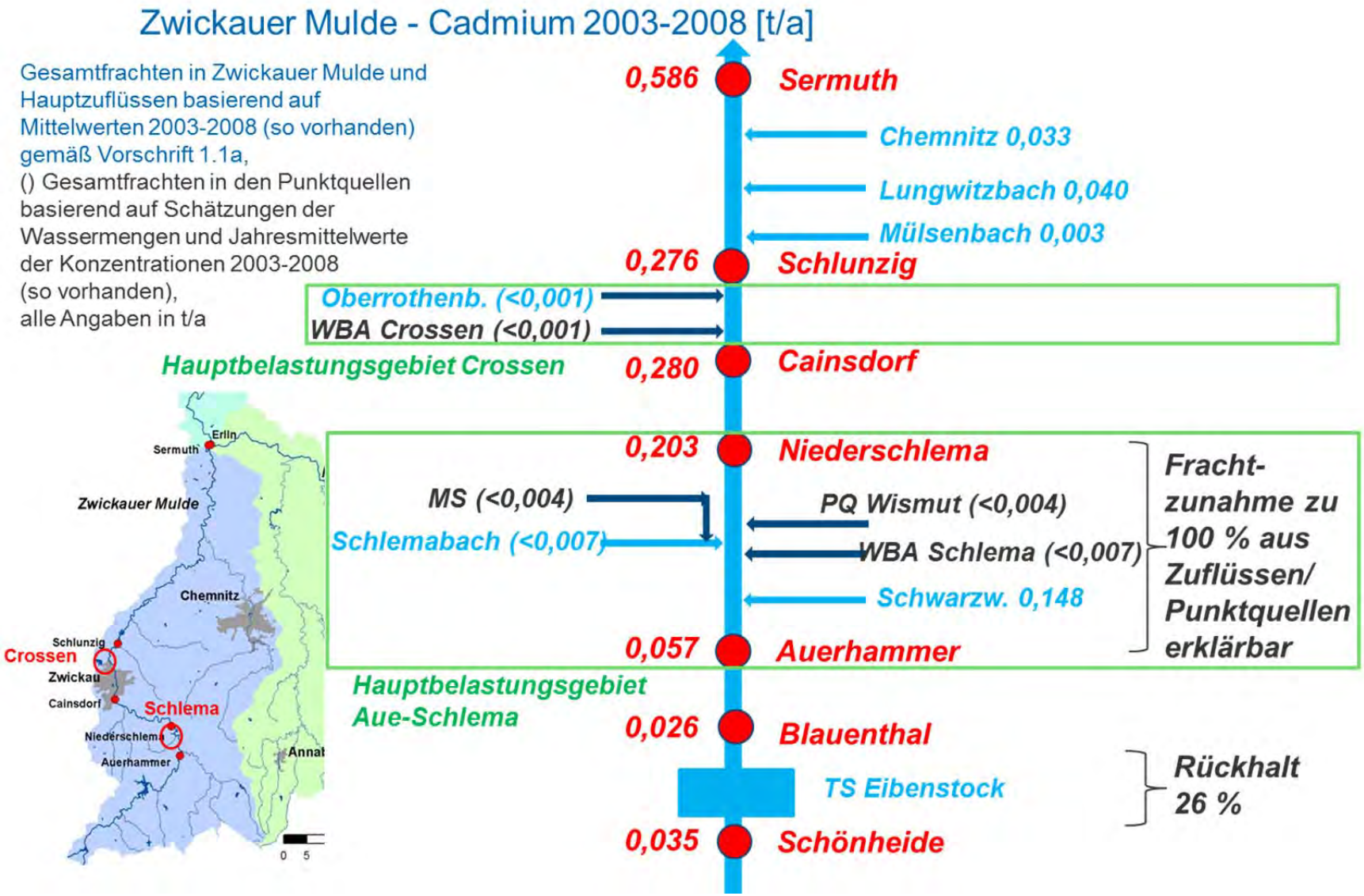
Anlage 57: Durchflussbilanz für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



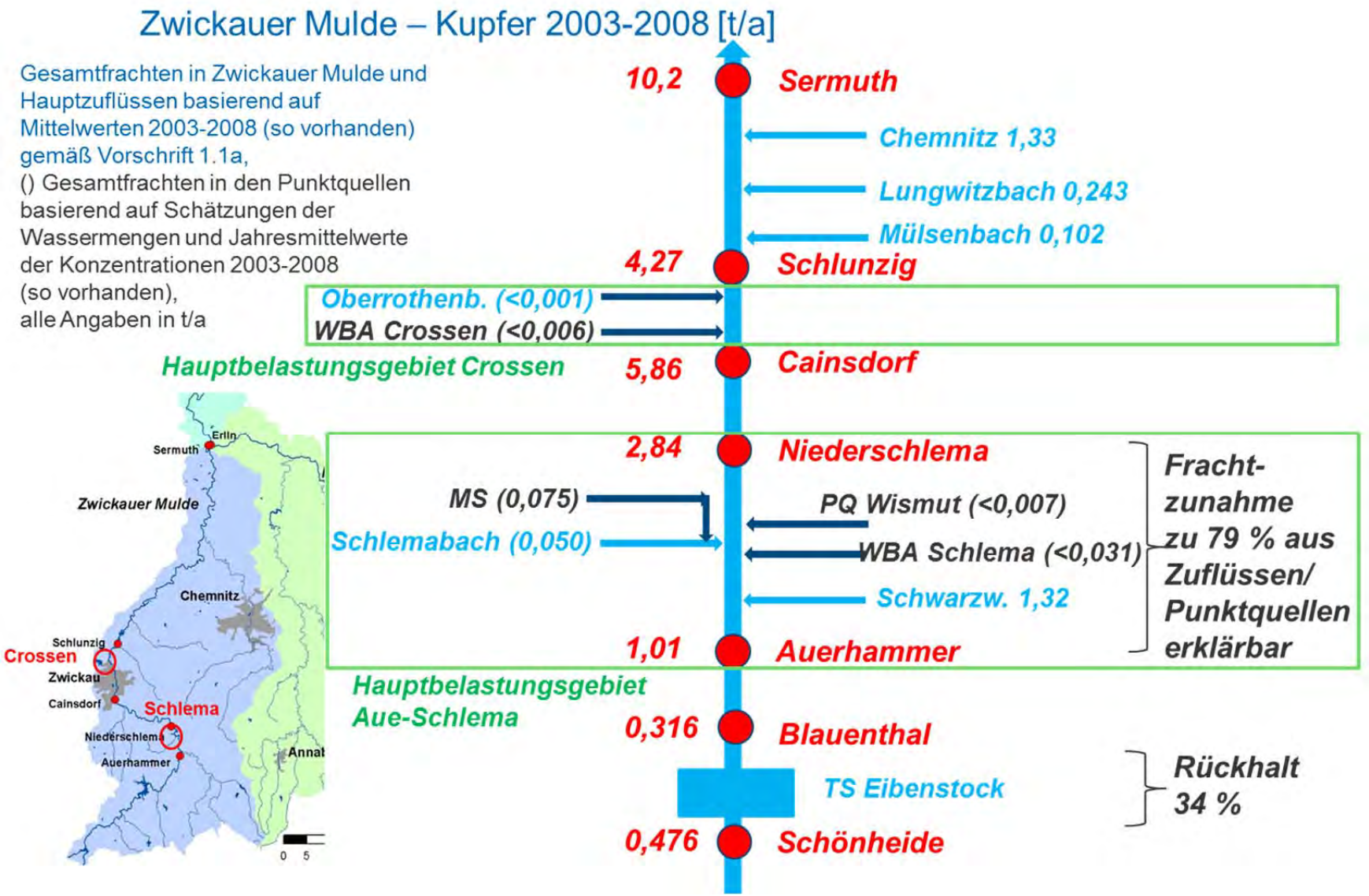
Anlage 58: Frachtbilanz für Arsen für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



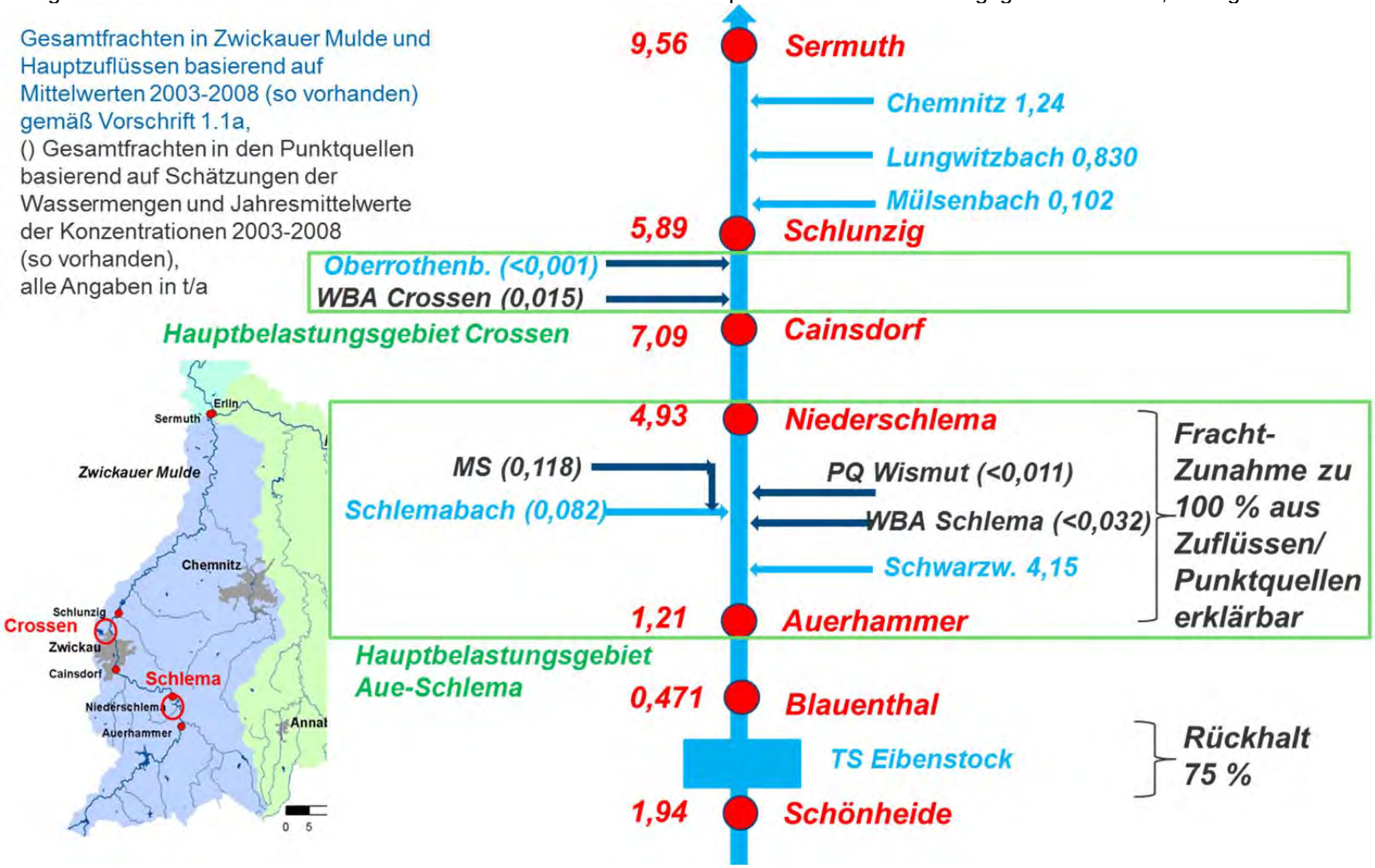
Anlage 59: Frachtbilanz für Cd für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



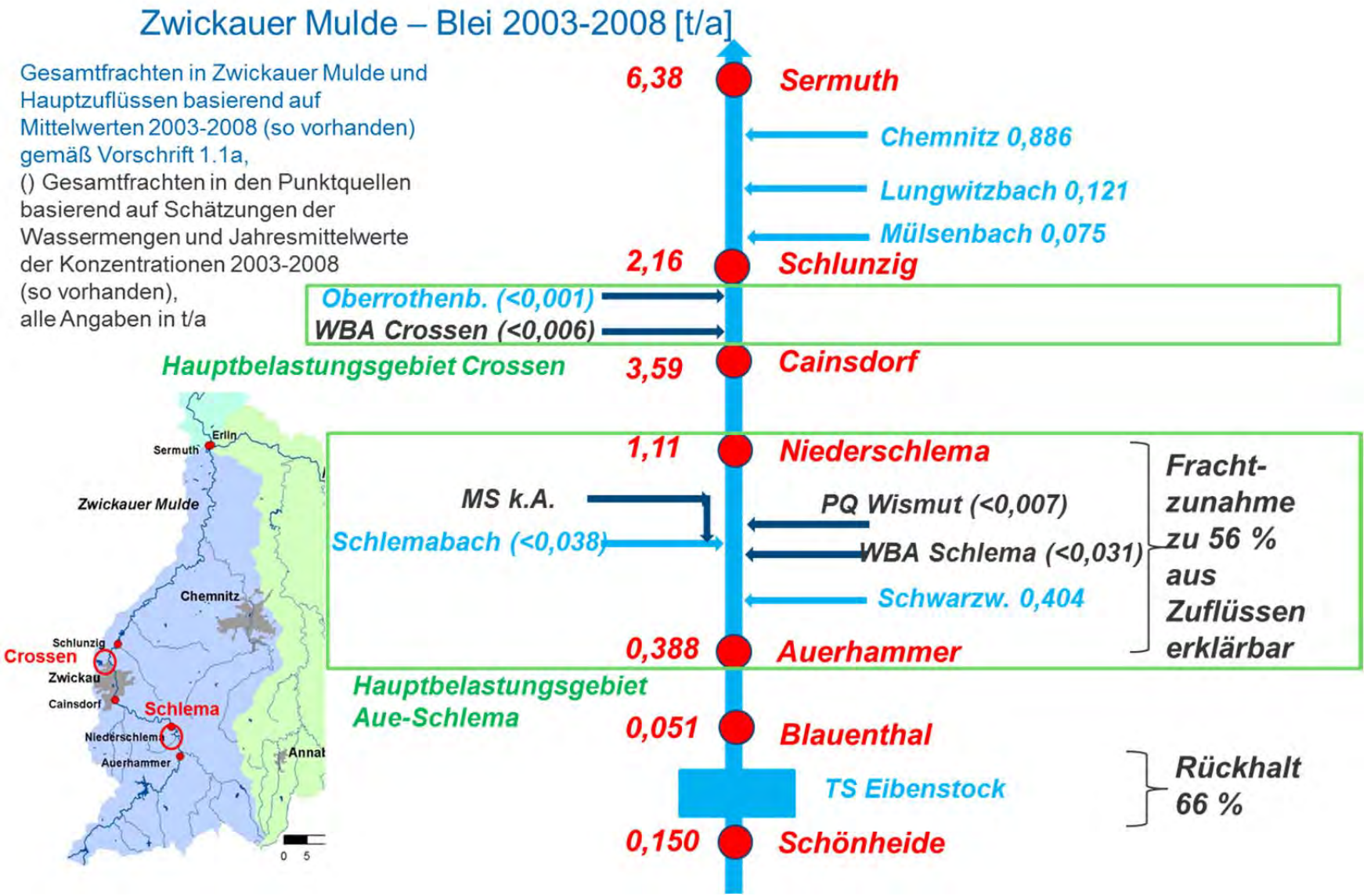
Anlage 60: Frachtbilanz für Kupfer für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



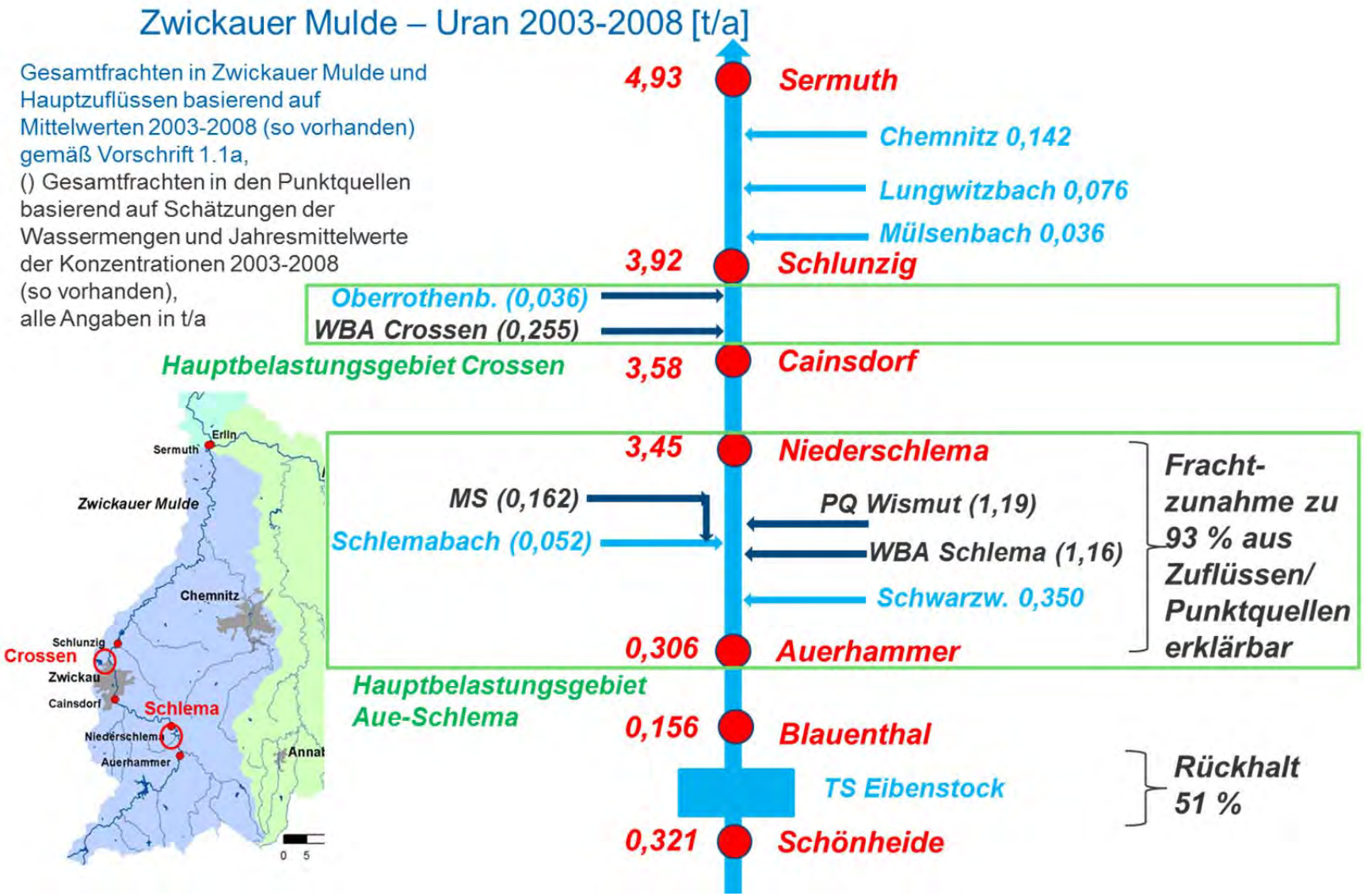
Anlage 61: Frachtbilanz für Nickel für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



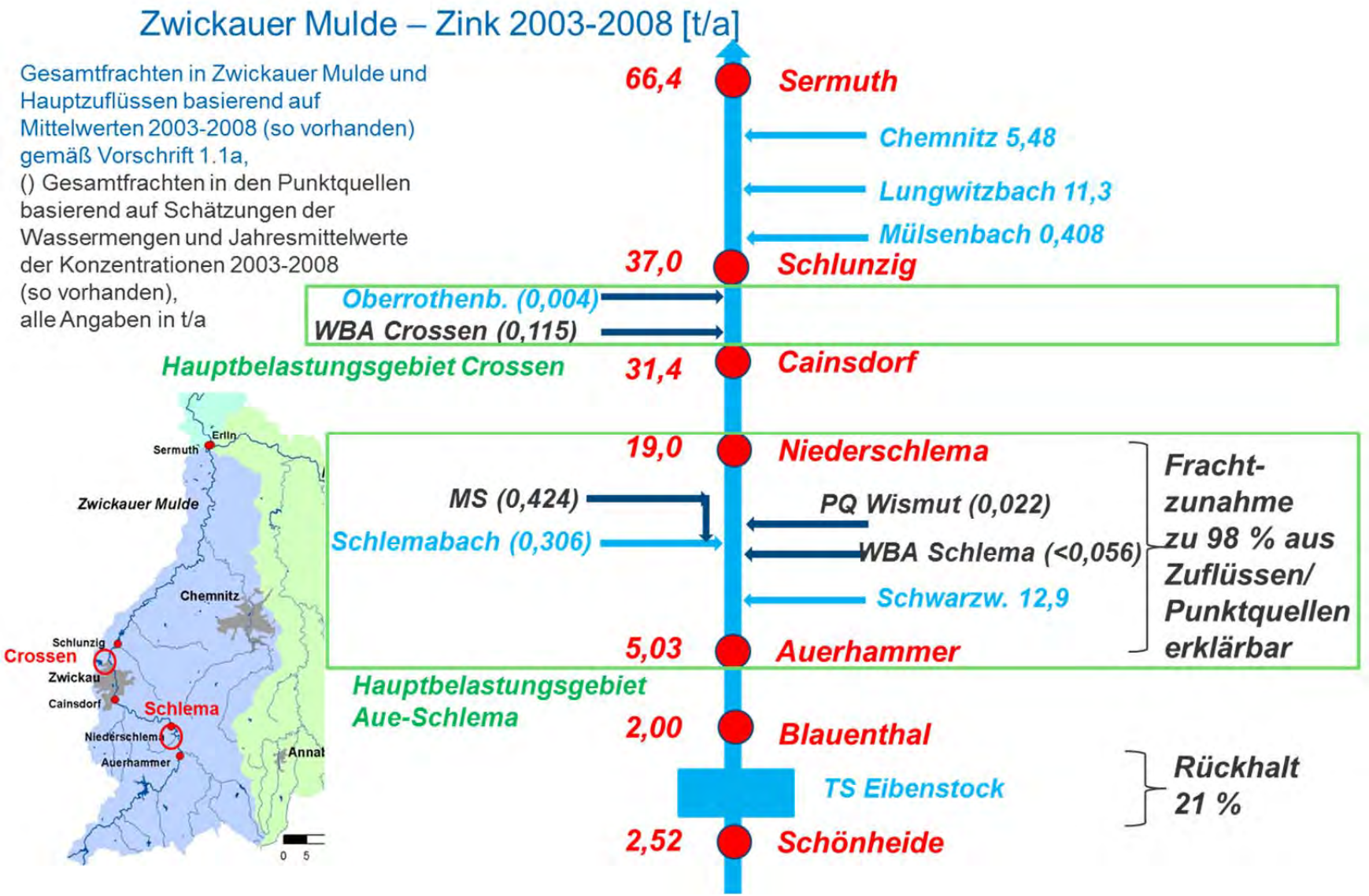
Anlage 62: Frachtbilanz für Blei für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



Anlage 63: Frachtbilanz für Uran für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



Anlage 64: Frachtbilanz für Zink für die Zwickauer Mulde mit Schwerpunkt auf dem Belastungsgebiet Schlema, Bezugszeitraum 2003-2008



Anlage 65: Übersicht über die betrachteten Punkte im Gewässer, den Zuflüssen und den Punktquellen der Freiberger Mulde als Grundlage für den Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008

Gewässer	**MQ Jahresreihe [m^3/s]**	**verwendete Datenquelle**	**verfügbarer Zeitraum (Gesamtgehalte im Wasser)**
Freiberger Mulde, Berthelsdorf	3,55	LfULG-OW	2003-2008
Freiberger Mulde, Muldenhütten	3,80	LfULG-OW	2003-2008
Freiberger Mulde, Hilbersdorf	3,83	LfULG-OW	2003-2005, 2007
Freiberger Mulde, Halsbrücke	4,15	LfULG-OW	2003-2007
Freiberger Mulde, Erlln (Mündung)	35,0	LfULG-OW	2003-2008
Münzbach (Mündung)	0,485	LfULG-OW	2003-2008
Bobritzsch (Mündung)	2,06	LfULG-OW	2005-2008
Striegis (Mündung)	2,70	LfULG-OW	2003-2004, 2006-2008
Zschopau (Mündung)	25,0	LfULG-OW	2003-2008
Quellen	**MQ geschätzt**		
Schieferleithestolln (Schie)	0,0022 (kontinuierlich)	LfULG-GW	1999-2001
RWE-Kanal (RWE)	0,001 (diskontinuierlich)	LfULG-OW	2005
MRU-Kanal (MRU)	0,001 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2005
Stangenbergbach (Stang)	0,008 (kontinuierlich)	LfULG-OW Saxonia	2003-2005 2003-2008
Hüttenbach (Hüba)	0,001 (diskontinuierlich)	LfULG-OW	2003-2005, 2007
Glücksilbersternstolln (Glüsi)	0,001 (kontinuierlich)	Ticho 2010 Saxonia	2004-2007 1995 (As)
Hüttenrösche (HüRö)	0,005 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2006, 2008
Ablauf Hammerberg (Hamm)	0,001 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2005
Verträgliche Gesellschaft Stolln (VGS)	0,050 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2003-2005, 2007
Hauptstollnumbruch (HSU)	0,020 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2003-2005
Tiefer Lorenz Gegentrum Stolln (TLG)	0,001 (kontinuierlich)	LfULG-OW	2009
Tiefer Hilfe Gottes Stolln Obergruna (THG)	0,010 (kontinuierlich)	LfULG-GW	2003-2007

LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
OW - Landesmessnetz Oberflächenwasser
GW - Landesmessnetz Grundwasser
Saxonia – Saxonia Standort- und Entwicklungsgesellschaft mbH
Ticho - Tichomirowa, M.; Heidel, C.; Junghans, M.; Haubrich, F.; Matschullat, J. (2010): Sulfate and strontium water source identification by O, S and Sr isotopes and their temporal changes (1997–2008) in the region of Freiberg, central-eastern Germany. - Chemical Geology 276, 1-2, 104–118
Frachtberechnungen ohne Gewähr

Anlage 66: Übersicht über die betrachteten Punkte im Gewässer, den Zuflüssen und den Punktquellen der Zwickauer Mulde als Grundlage für den Betrachtungszeitraum 2003 bis 2008

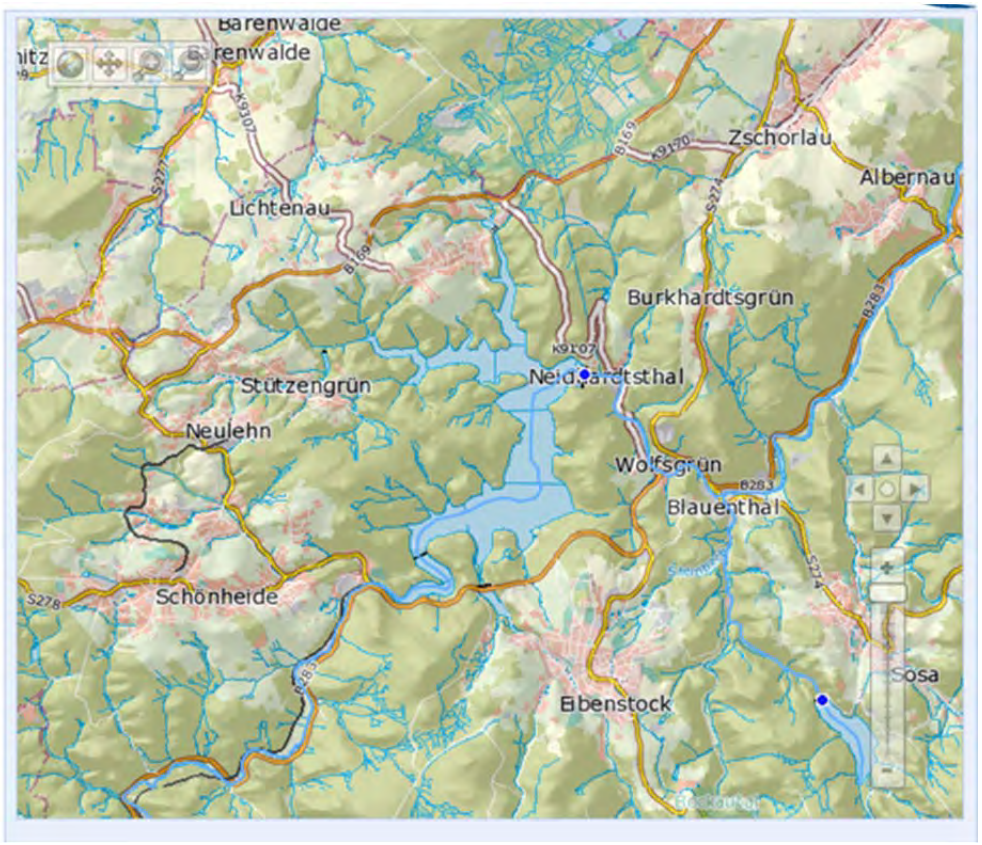
Gewässer	**MQ Jahresreihe [m^3/s]**	**verwendete Datenquelle**	**verfügbarer Zeitraum (Gesamtgehalte im Wasser)**
Zwickauer Mulde, Schönheide	2,72	LfULG-OW	2003-2004, 2006-2008
Zwickauer Mulde, Blauenthal	3,25	LfULG-OW	2003-2005
Zwickauer Mulde, Auerhammer	4,78	LfULG-OW	2003-2004, 2006-2008
Zwickauer Mulde, Niederschlema	12,6	LfULG-OW	2003-2005, 2008
Zwickauer Mulde, Cainsdorf	13,8	LfULG-OW	2003-2004, 2006-2008
Zwickauer Mulde, Schlunzig	14,9	LfULG-OW	2003-2008
Zwickauer Mulde, Sermuth, Mündung	29,5	LfULG-OW	2003-2008
Schwarzwasser, Mündung	6,32	LfULG-OW	2003-2008
Schlemabach, Mündung	0,240(4)	Wismut	2005-2008
Oberrothenbacher Bach, Mündung	0,008(1)	Wismut LfULG-OW	2003-2008 2003, 2005 (Cd)
Mülsenbach, Mündung	0,469	LfULG-OW	2003, 2007-2008
Lungwitzbach, Mündung	1,47	LfULG-OW	2003-2008
Chemnitz, Mündung	6,35	LfULG-OW	2003-2008
Quellen	**MQ aus Jahresmenge**		
WBA Schlema	0,199(5)	Wismut	2003-2008
WBA Crossen	0,043(2)	Wismut	2011
Markus-Semmler-Stolln	0,114(3)	Wismut	2003-2008
Punktquellen Wismut m-109, m-585, m-113, m-108X, m-031A	0,037(6)	Wismut	2003-2008

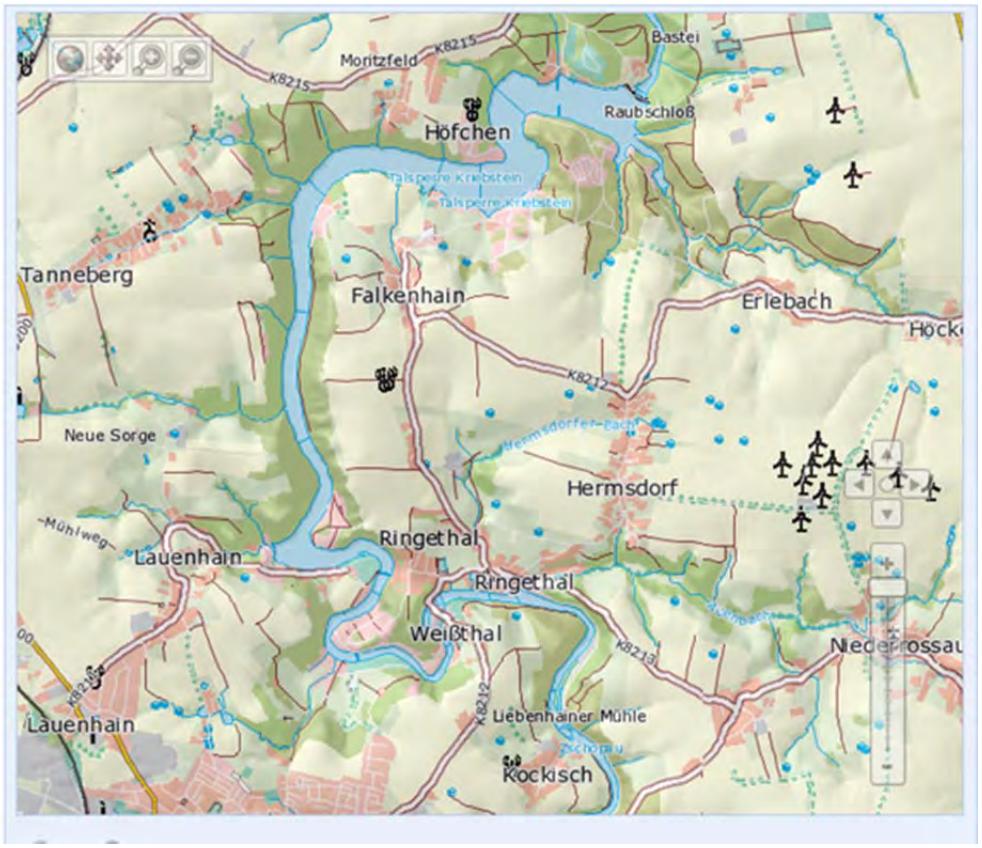
LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
OW - Landesmessnetz Oberflächenwasser
GW - Landesmessnetz Grundwasser
Wismut – Wismut GmbH

(1) Daten Wismut GmbH 2000-2011
(2) Daten Wismut GmbH 1996-2011
(3) Daten Wismut GmbH 2004-2008
(4) Daten Wismut GmbH 2005-2008
(5) Daten Wismut GmbH 2003-2008
(6) Daten Wismut GmbH 2003-2008 so vorhanden

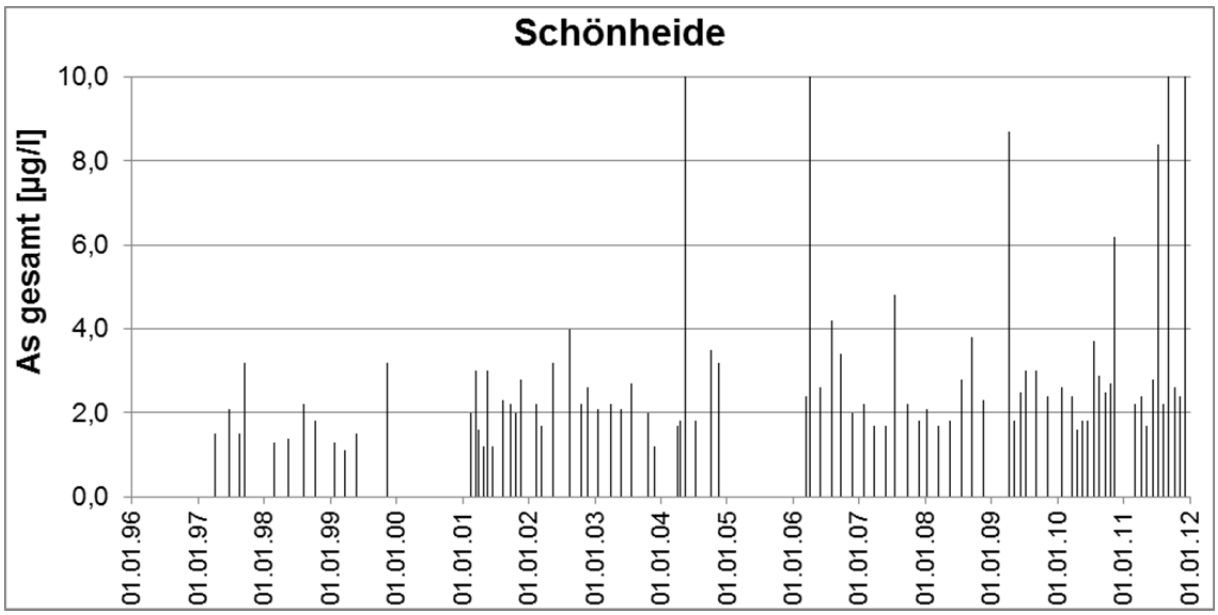
Frachtberechnungen ohne Gewähr

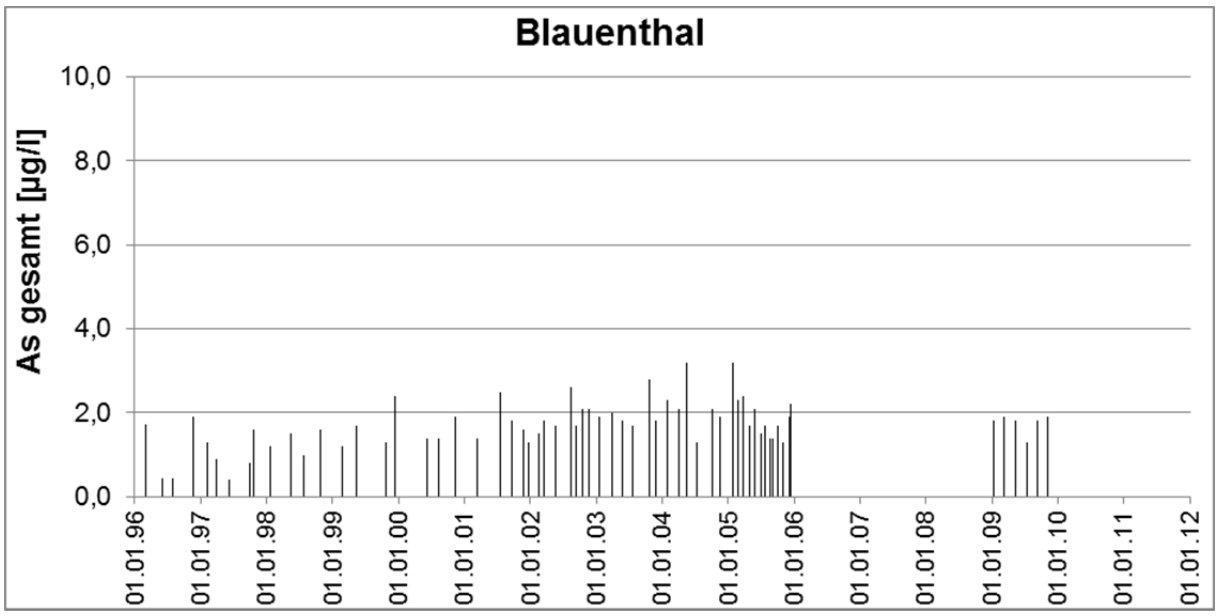
Anlage 67: Lage und Ausdehnung der TS Eibenstock (oben) und der TS Kriebstein (unten) (http://www.smul.sachsen.de/ltv/16984.htm)

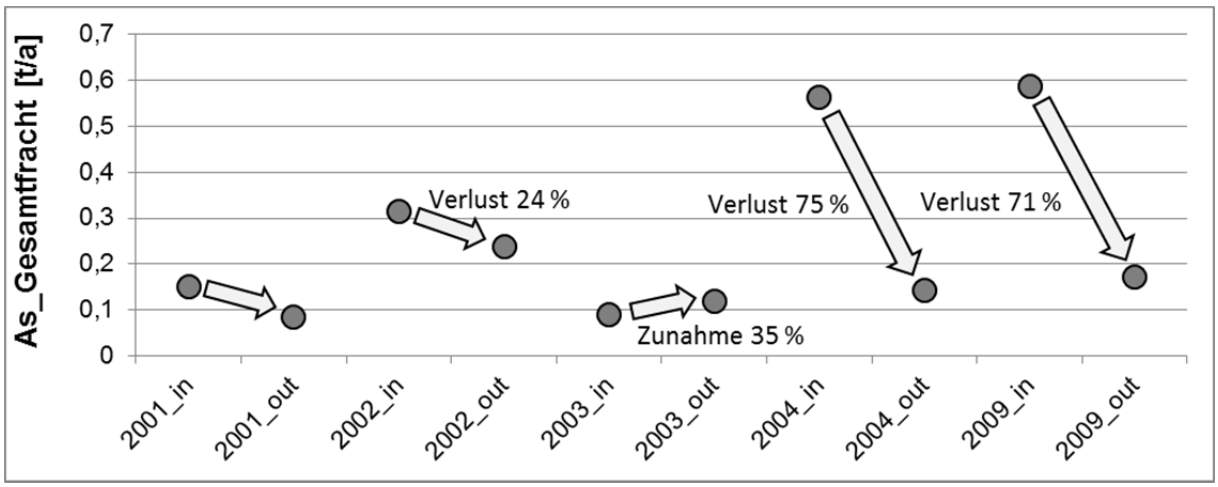




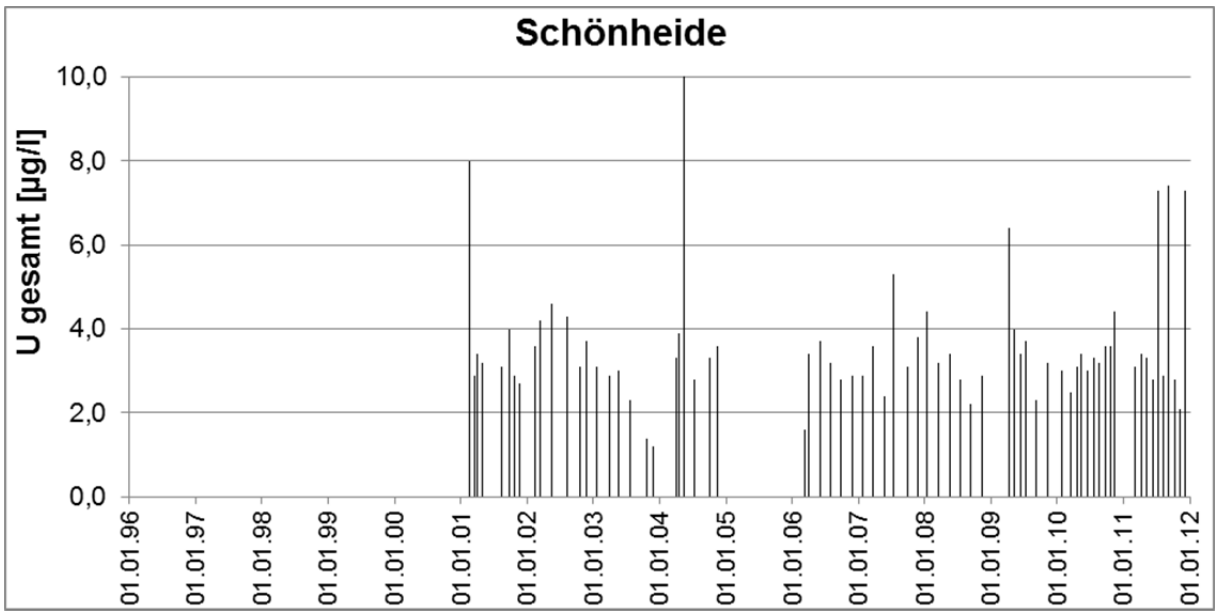
Anlage 68: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der As-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009

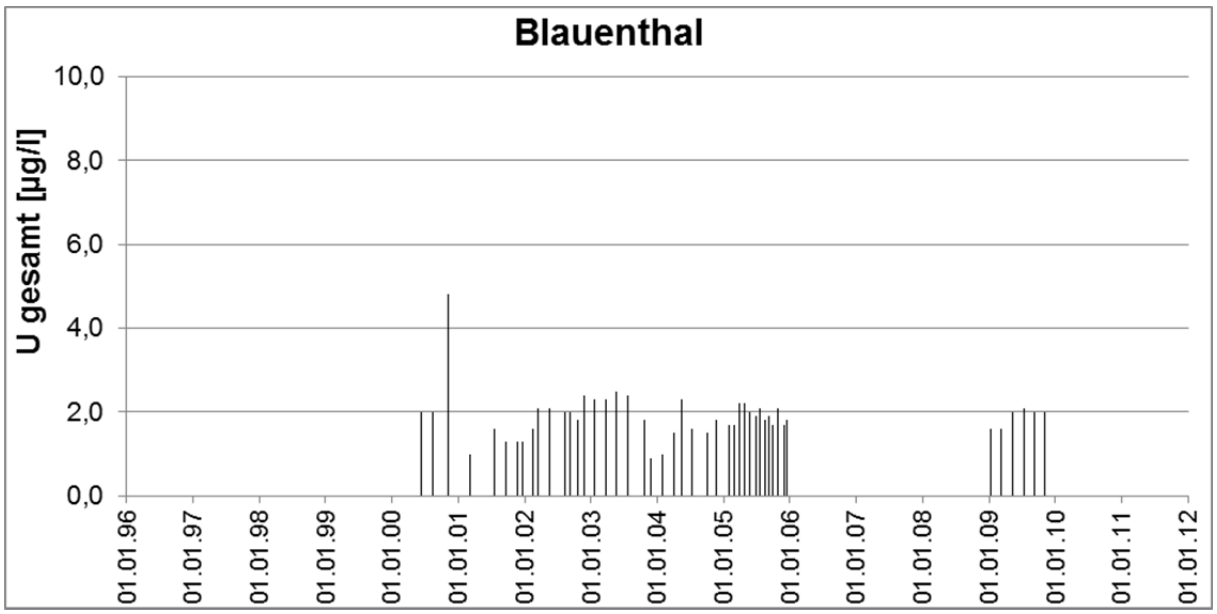


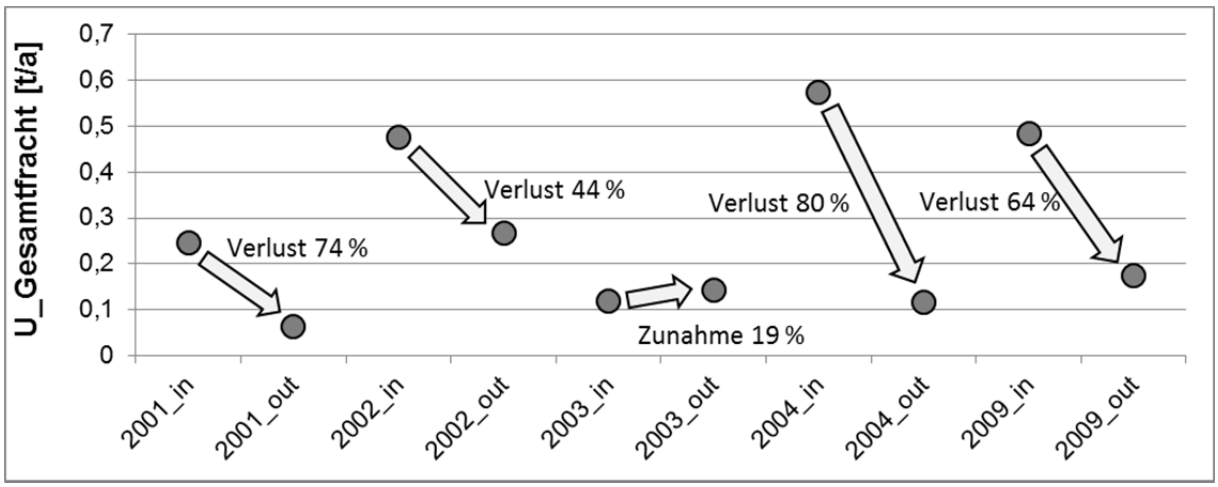




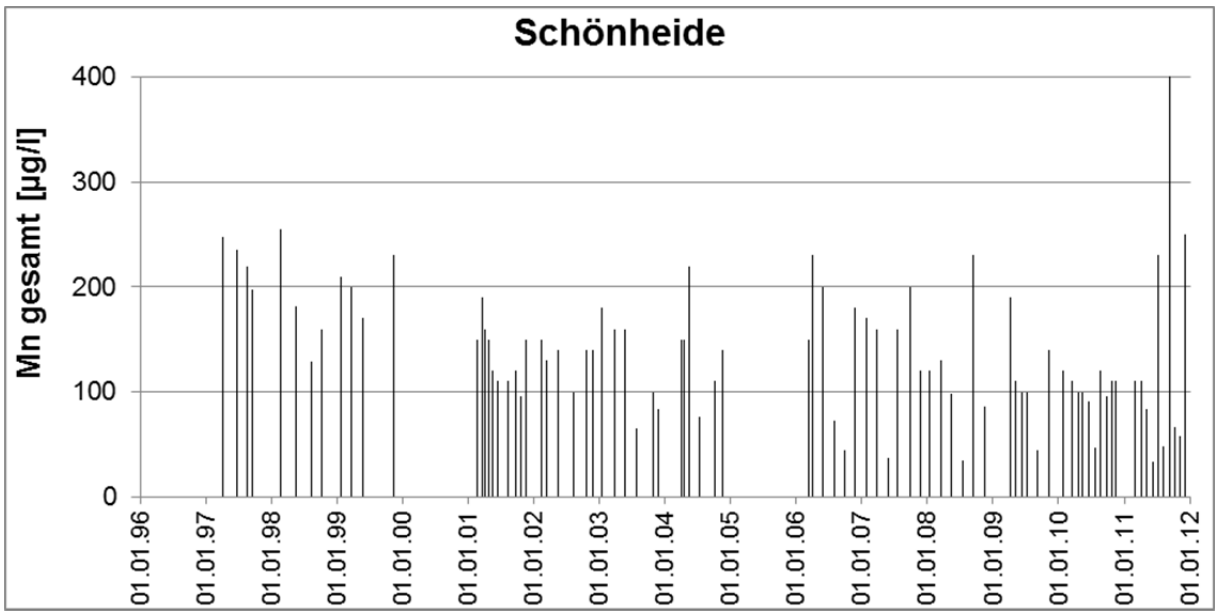
Anlage 69: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der U-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009

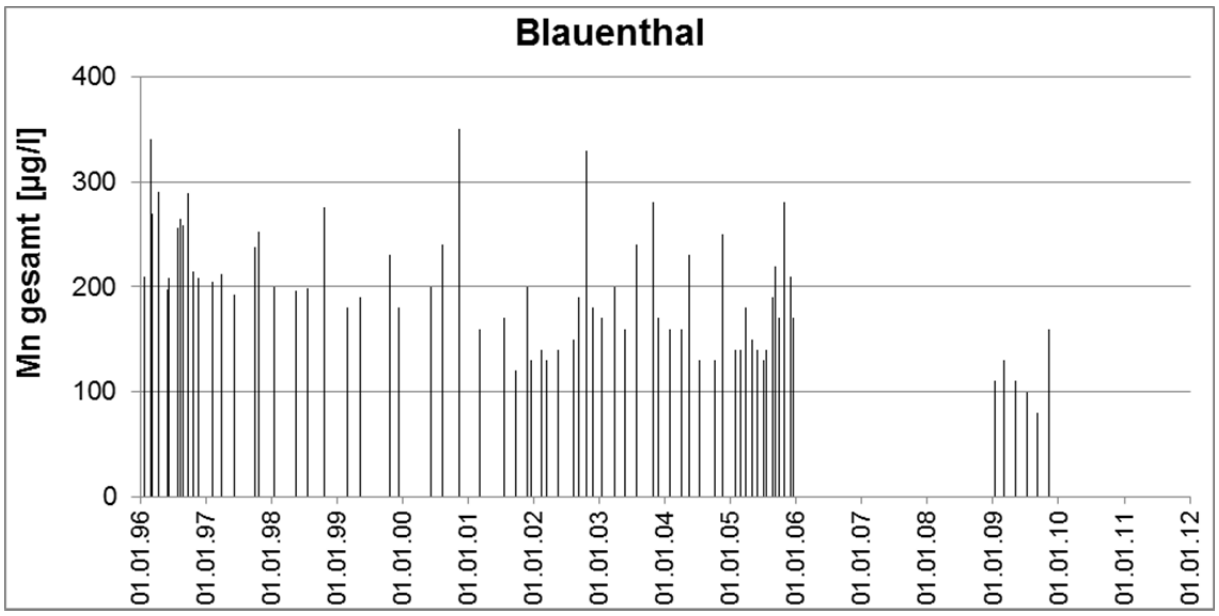


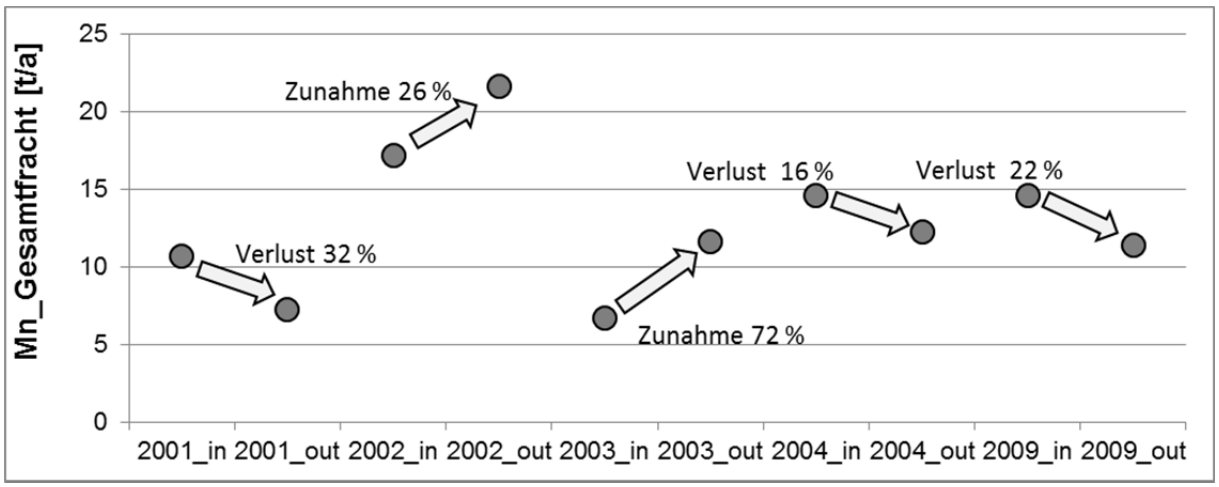




Anlage 70: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Mn-Konzentrationen in der Zwickauer Mulde oberhalb (Schönheide) und unterhalb (Blauenthal) der Talsperre Eibenstock, Frachtbilanz für die Vergleichsjahre 2001-2004, 2009







Anlage 71: Mittlere Elementkonzentrationen in Sedimenten der Zwickauer Mulde im Zu- und Ablauf der TS Eibenstock sowie in der VS Schönheiderhammer

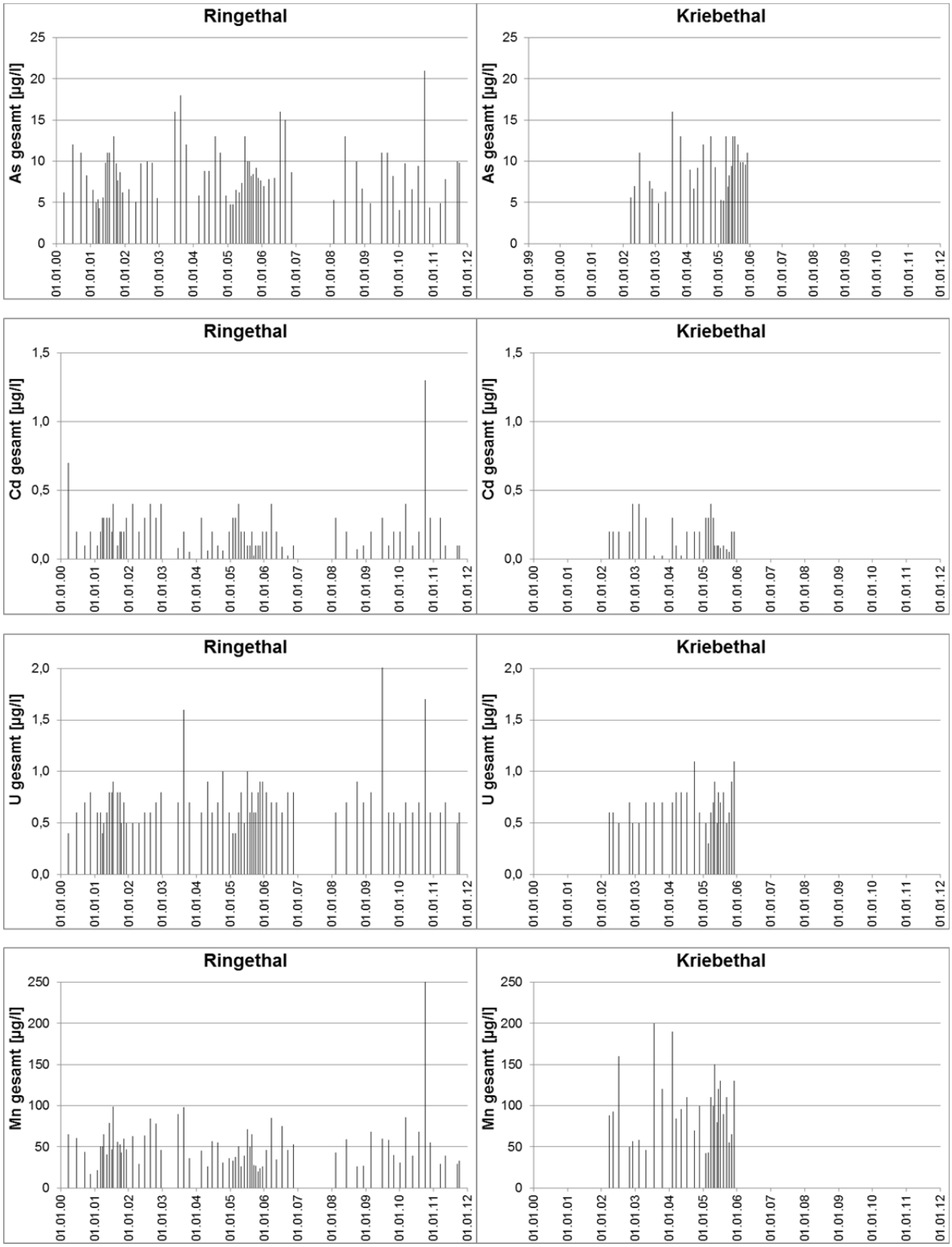
Mittlere Elementkonzentrationen (Min…Max, Mittelwert) in den Sedimenten (Gesamtgehalte) der VS Schönheiderhammer 2010, Fraktion <2 mm bzw. Fraktion <63 µm, Angaben in mg/kg (Pöyry GKW GmbH 2010)

As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Fraktion <2 mm							
59…140 100	0,84…3,3 2,0	10…36 23	28…110 72	0,03…0,31 0,16	13…28 20	42…110 75	81…230 150
Fraktion <63 µm							
110…210 140	1,7…3,7 2,8	27…54 36	58…150 96	0,11…0,30 0,21	22…39 28	79…110 94	140…280 210

Mittlere Elementkonzentrationen (Min…Max, Mittelwert) in den oberen Sedimenten in der Zwickauer Mulde am Zu- und Ablauf der TS Eibenstock, Input: Schönheide 2000-2002 (OBF38900), Output: Blauenthal 2000-2002 (OBF39000), Daten: LfULG, Fraktion <20 µm, Angaben in mg/kg

As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn
Schönheide							
180…330 210	1,5…16 6,9	29…60 51	57…130 98	24…57 39	100…150 130	59…88 71	270…660 400
Blauenthal							
160…260 210	5,7…12 8,8	47…120 68	94…130 120	43…68 57	140…220 170	96…120 108	600…780 710

Anlage 72: Übersicht über die zeitliche Entwicklung der As-, Cd-, U- und Mn-Konzentrationen in der Zschopau oberhalb (Ringethal) und unterhalb (Kriebethal) der Talsperre Kriebstein



Anlage 73: Mittlere Elementkonzentrationen in Sedimenten in der Zschopau im Zu- und Ablauf der TS Kriebstein sowie in der TS Kriebstein

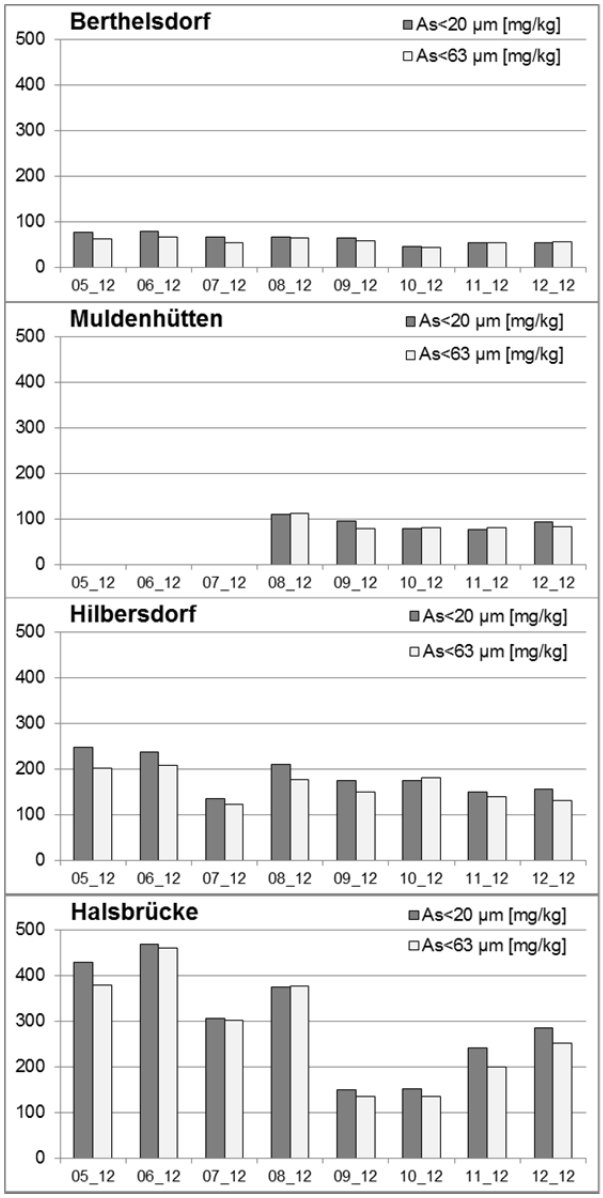
Mittlere Elementkonzentrationen (Min…Max, Mittelwert) in den oberen Sedimenten der TS Kriebstein 1992 (n=3) und 2009 (n=10), Gesamtgehalte ({Renger 2010 #1760}), Angaben in mg/kg

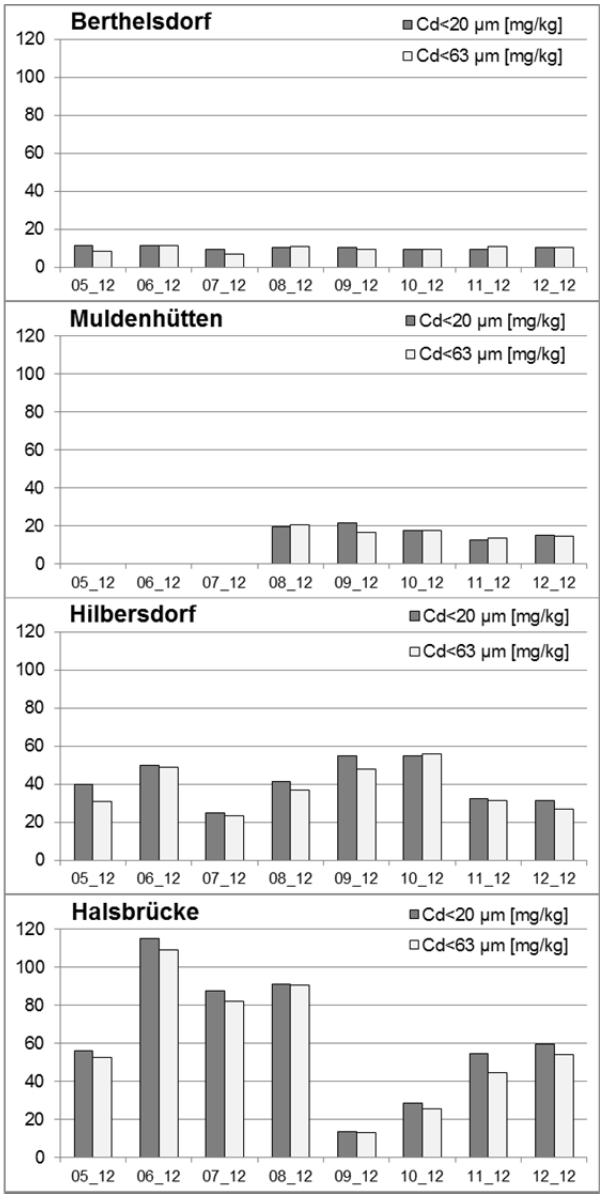
Jahr	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1992	50…84 72	3,0…7,8 5,1	51…113 100	85…164 120	<8 <8	33…61 44	85…140 120	287…760 470
2010	32…74 53	2,7…9,2 6,2	20…85 42	38…203 95	0,14…0,91 0,47	23…57 42	50…160 86	155…839 540

Mittlere Elementkonzentrationen (Min…Max, Mittelwert) in den oberen Sedimenten der Zschopau im Zu- und Ablauf der TS Kriebstein, Input: Ringethal 2000-2008 (OBF35200), Output: Kriebethal 2002-2007 (OBF35250), Daten: LfULG, Fraktion <20 µm, Angaben in mg/kg

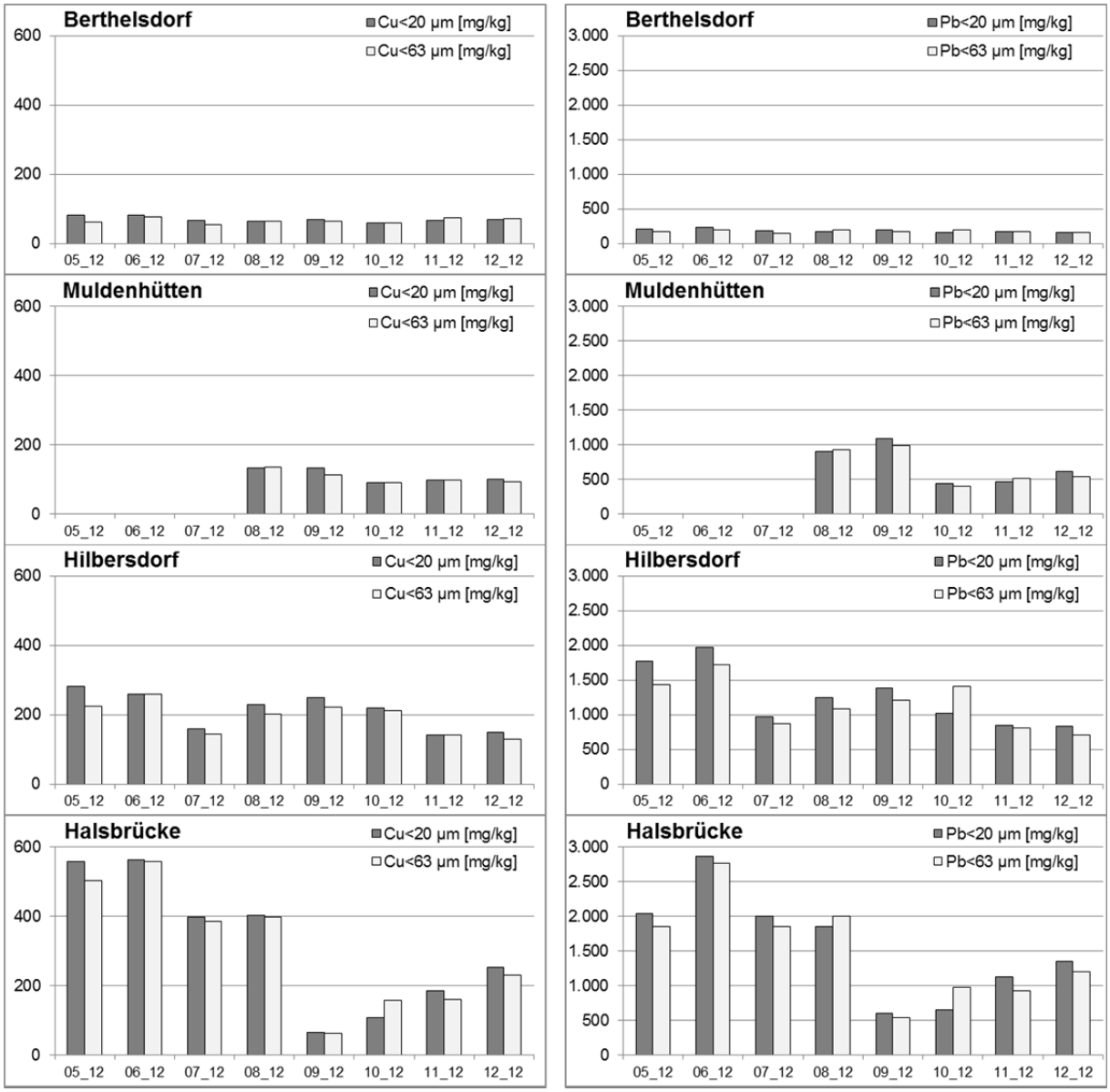
As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Ringethal							
55…230 130	4,2…18 9,0	56…300 100	77…230 130	0,29…1,6 0,73	56…110 79	130…440 250	430...1400 880
Kriebethal							
79…260 150	3,5…9,9 6,5	55…88 72	58…170 110	0,30…1,6 0,54	52…79 64	120…370 230	510…740 620

Anlage 74: Mittlere As- und Cd-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, Angaben in mg/kg

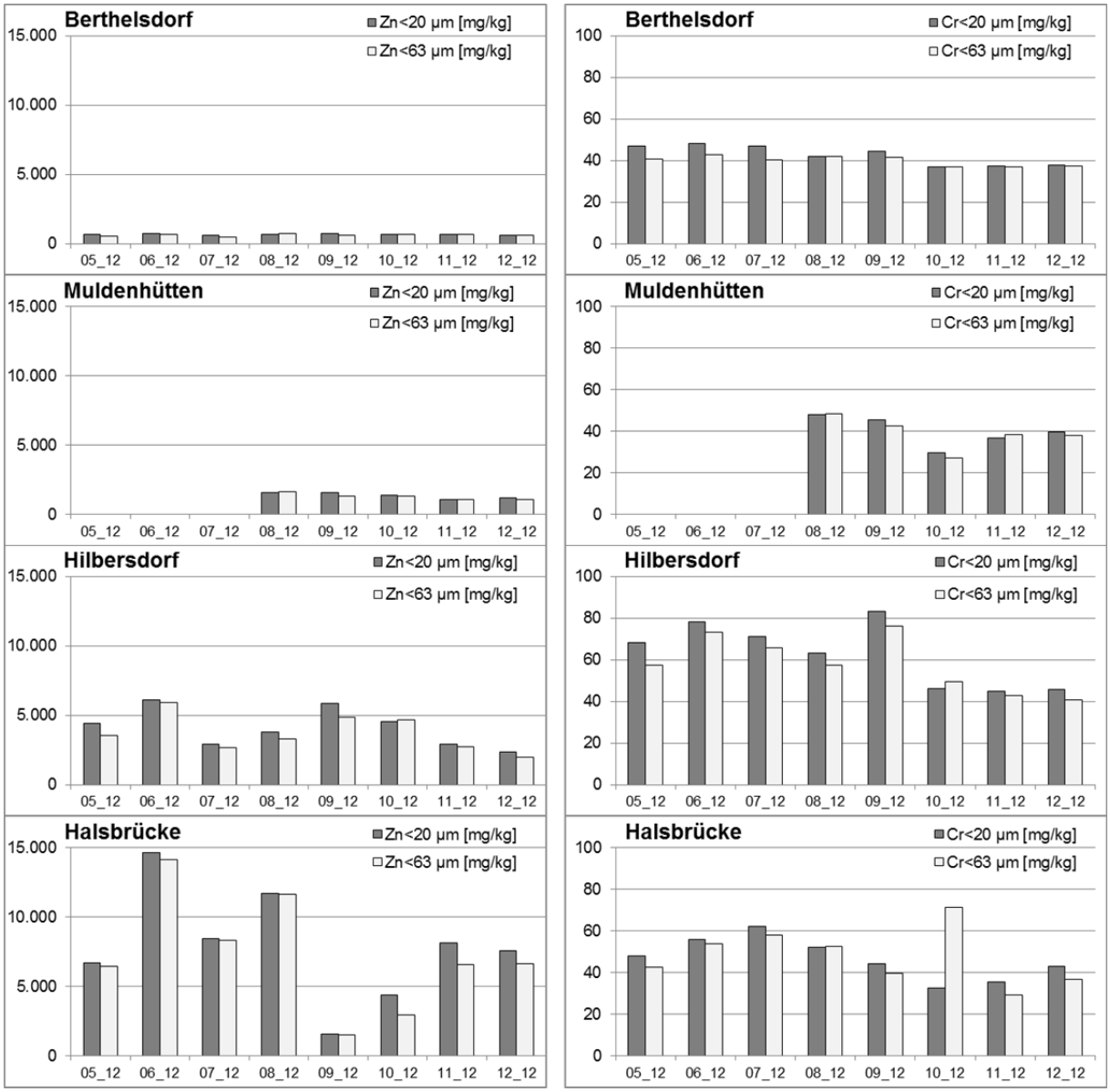




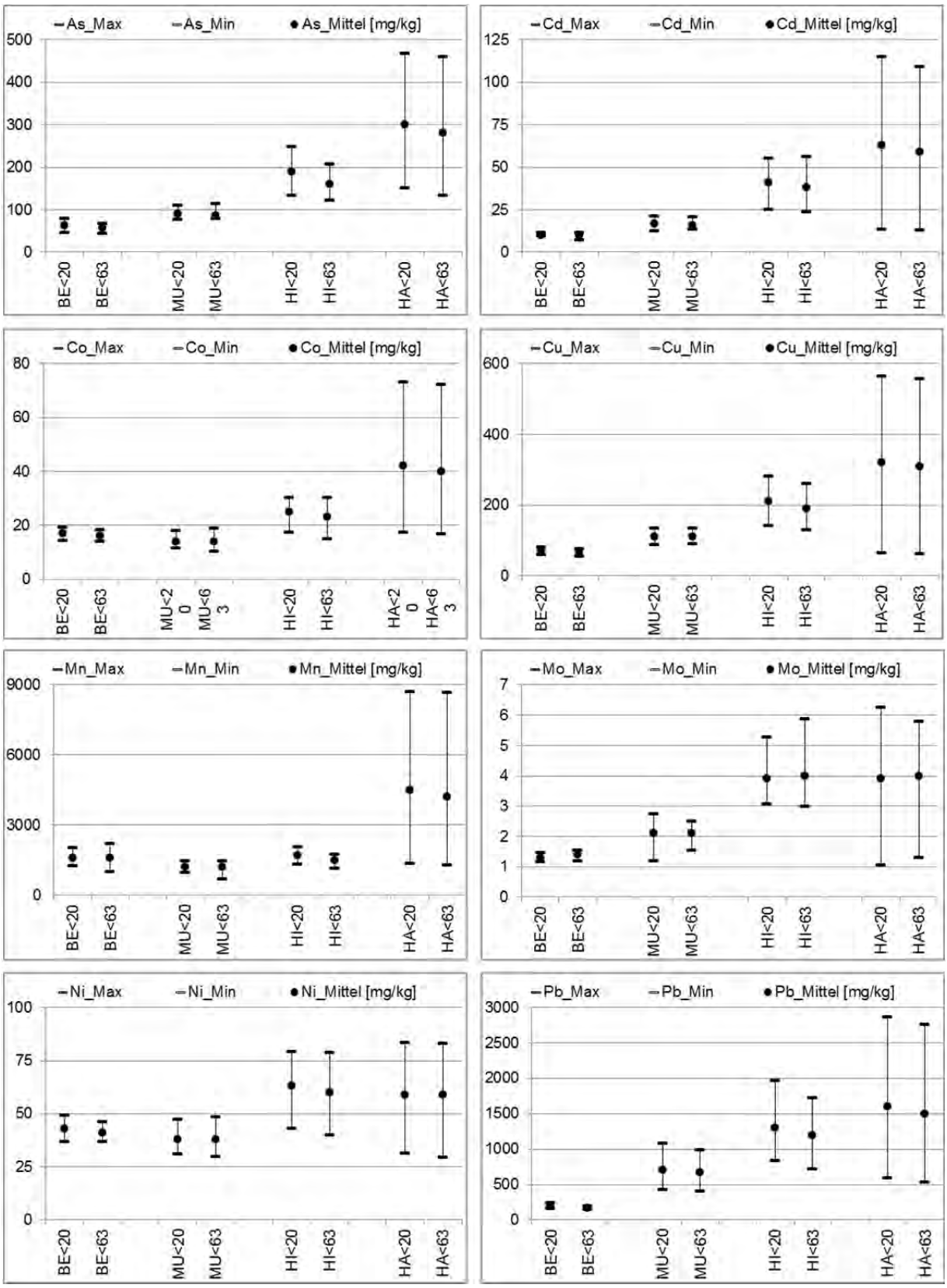
Anlage 75: Mittlere Cu- und Pb-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, Angaben in mg/kg



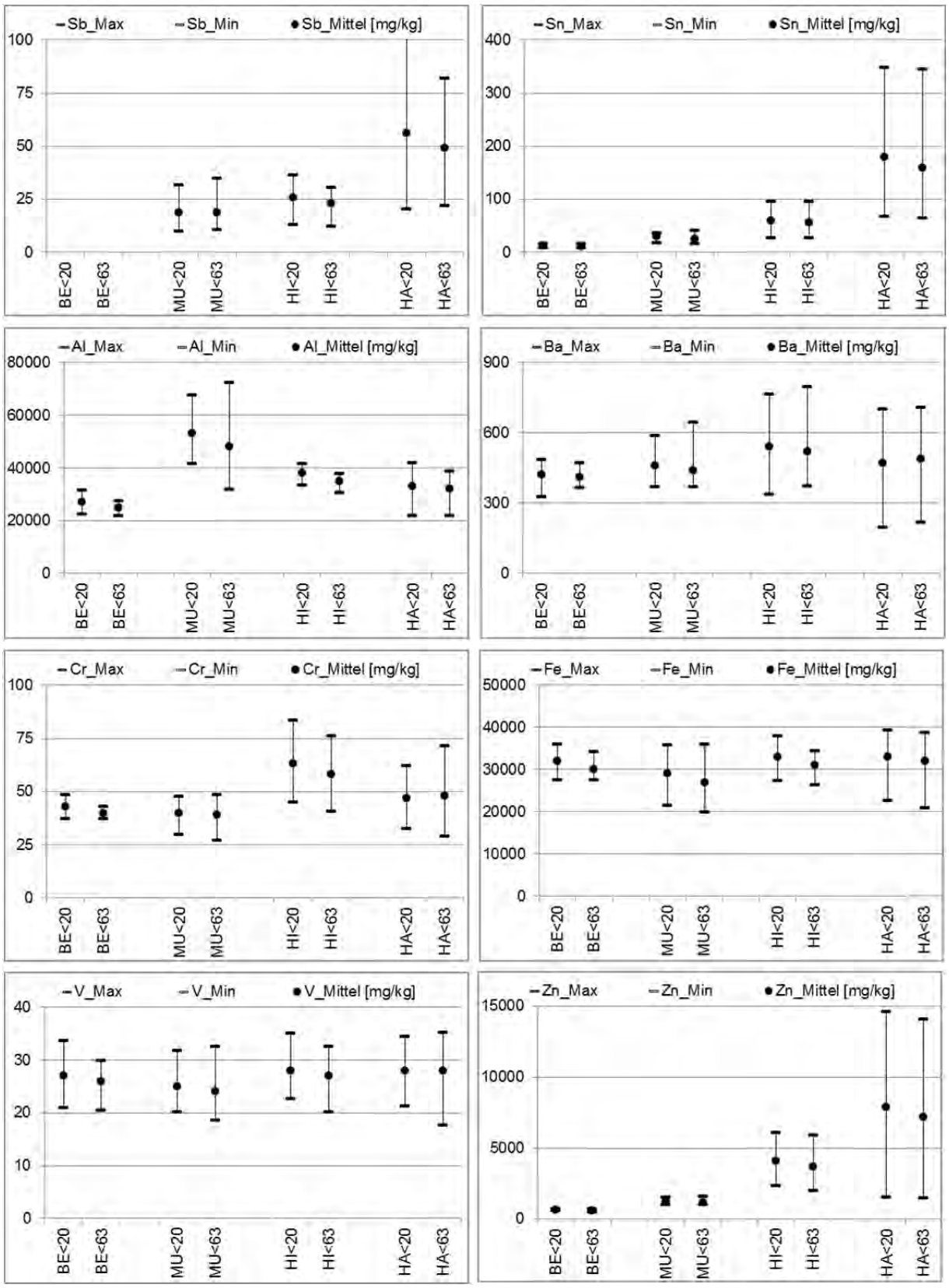
Anlage 76: Mittlere Zn- und Cr-Konzentrationen (Fraktion <20 µm/<63 µm) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, Angaben in mg/kg



Anlage 77: Mittlere Elementgehalte (As, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm/<63 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, Angaben in mg/kg



Anlage 78: Mittlere Elementgehalte (Sb, Sn, Al, Ba, Cr, Fe, V, Zn) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm/<63 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg im Zeitraum von April bis Dezember 2012, Angaben in mg/kg



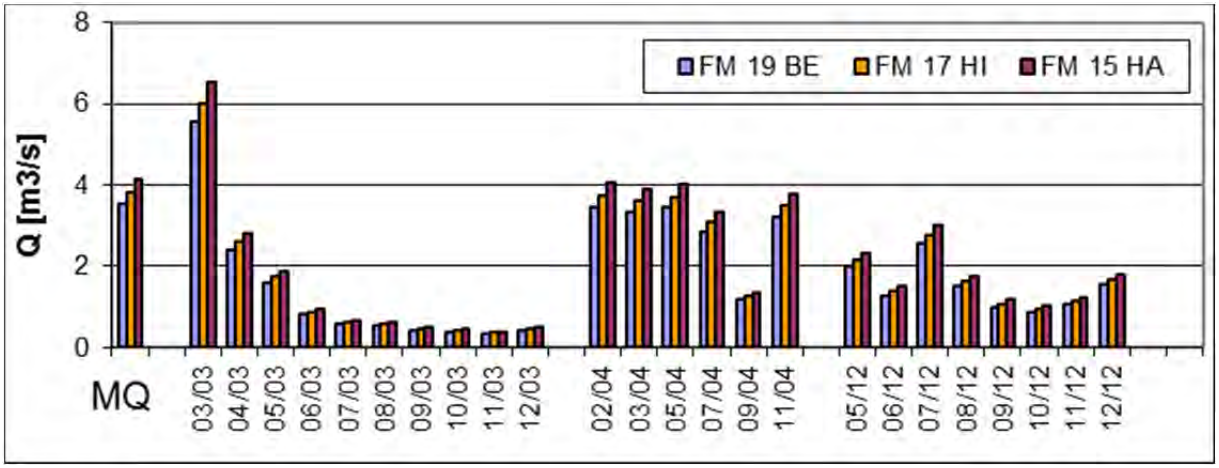
Anlage 79: Kleinräumige Änderungen in den Elementgehalten der Schwebstoffe der Freiberger Mulde im Abschnitt Muldenhütten oberhalb (oh.) und unterhalb (uh.) der Zyklopenmauer (rechtsseitig), Fraktion <63 µm, Angaben in mg/kg

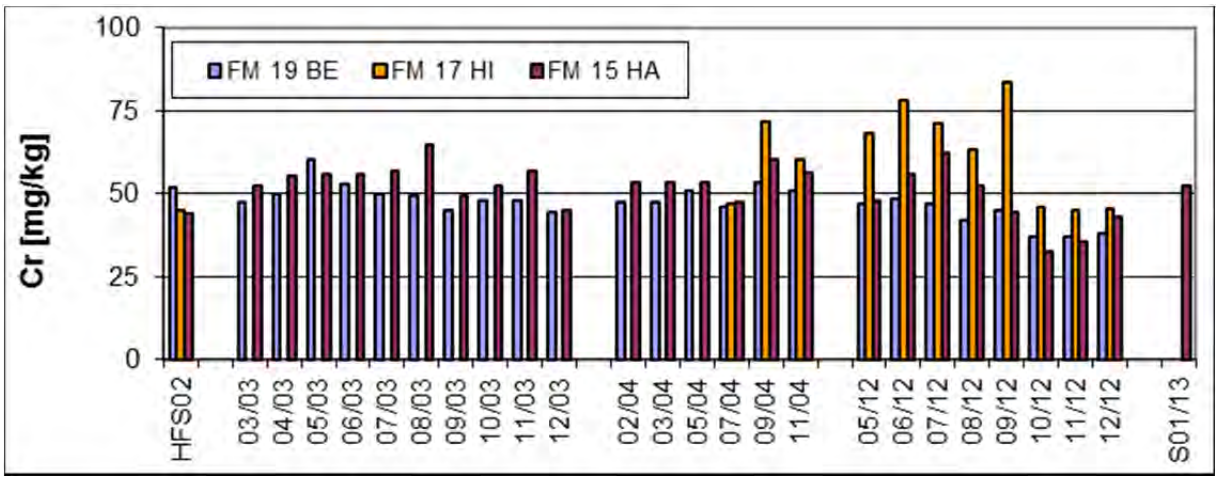
	Ag	**Al**	**As**	**Ba**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Fe**	**Hg**
MU2 oh.	2,21	45.200	98,8	572	17,1	17,2	50,0	165	30.500	<4
MU2 uh.	3,73	39.400	163	582	39,5	24,3	83,7	289	33.700	<4
MU3 oh.	1,39	35.700	85,2	474	14,8	17,0	46,4	128	30.900	<4
MU3 uh.	1,81	35.400	133	430	33,2	21,2	57,4	259	32.000	9,36

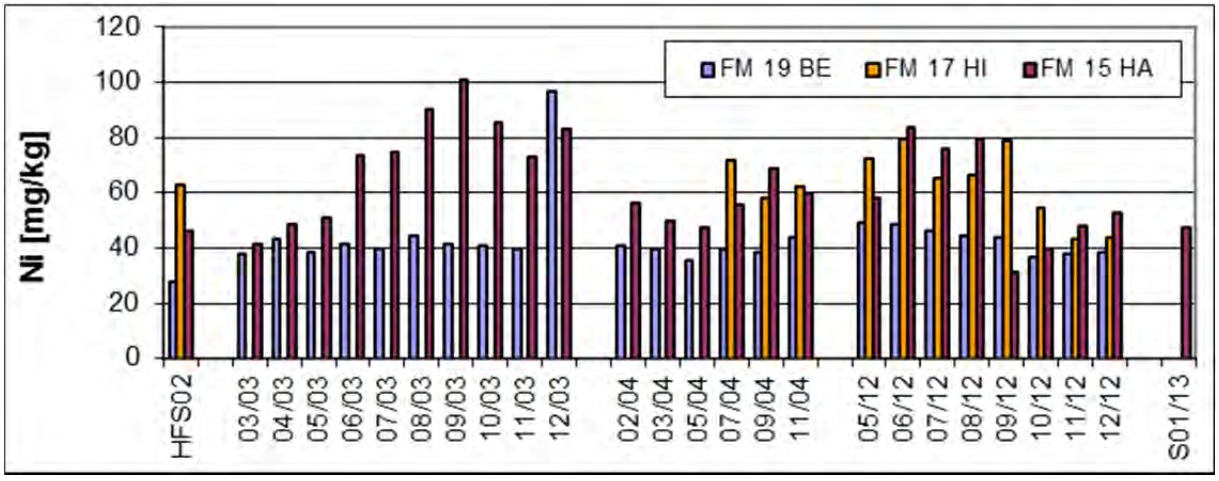
	Mn	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Sb**	**Se**	**Sn**	**Tl**	**V**	**Zn**
MU2 oh.	1.230	3,22	51,3	1.100	22,0	<10	27,8	<10	25,2	1.500
MU2 uh.	1.330	7,14	79,4	1.820	34,4	<10	96,0	<10	31,2	5.440
MU3 oh.	869	2,49	47,7	816	18,4	<10	18,0	<10	24,5	1.040
MU3 uh.	1.080	3,91	59,8	890	16,8	<10	27,6	<10	25,8	2.780

Zeitraum: MU2: 11.05.2012-06.07.2012, MU3: 06.07.2012-31.08.2012, Probenahme: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH

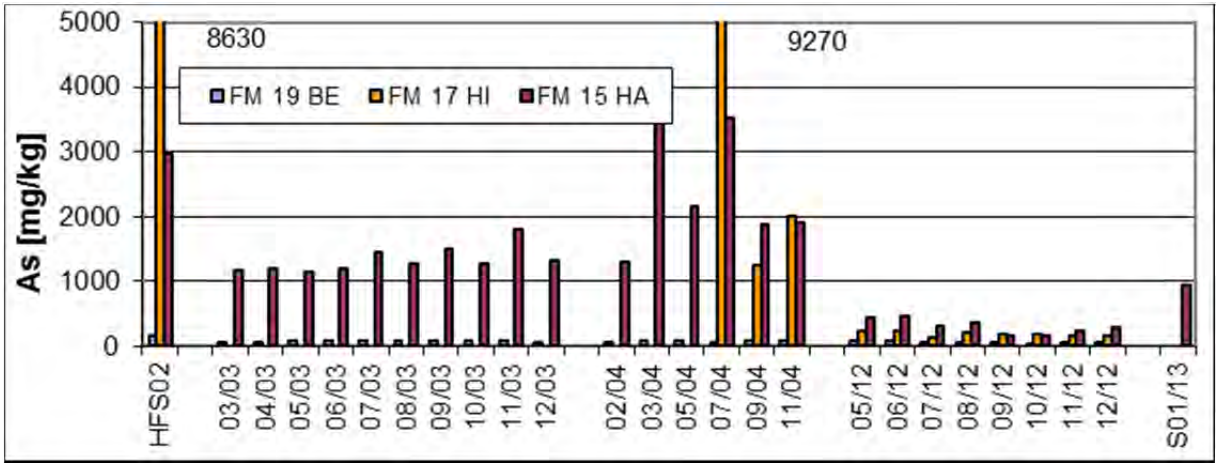
Anlage 80: Mittlere Durchflussmengen (Q) und mittlere Elementgehalte (Cr, Ni) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

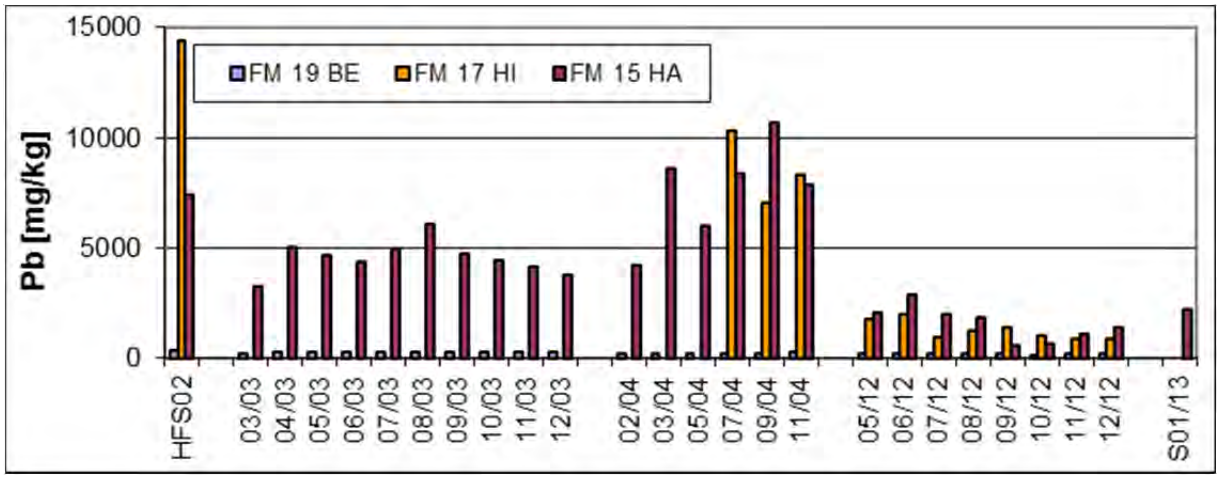


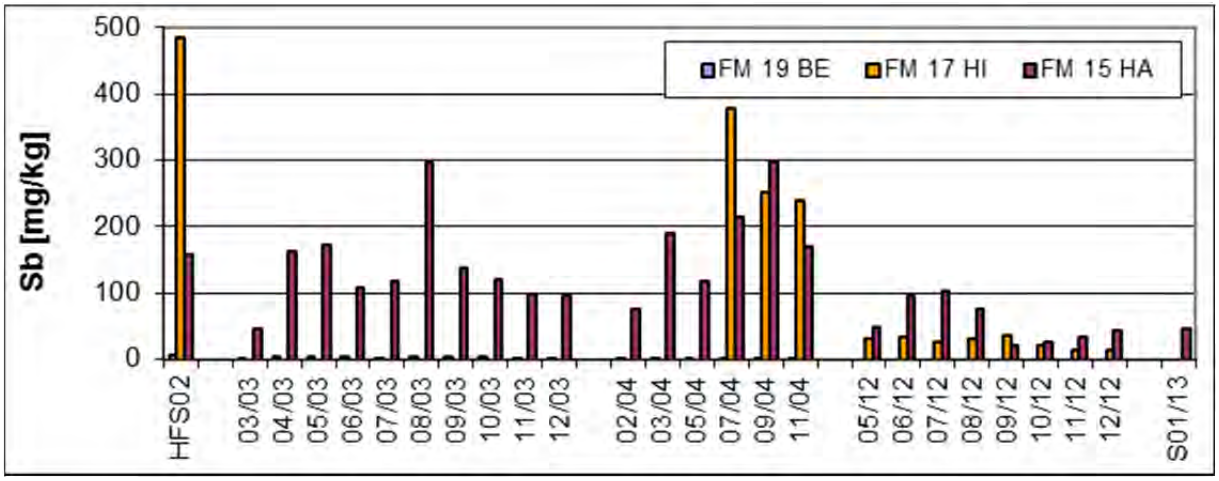




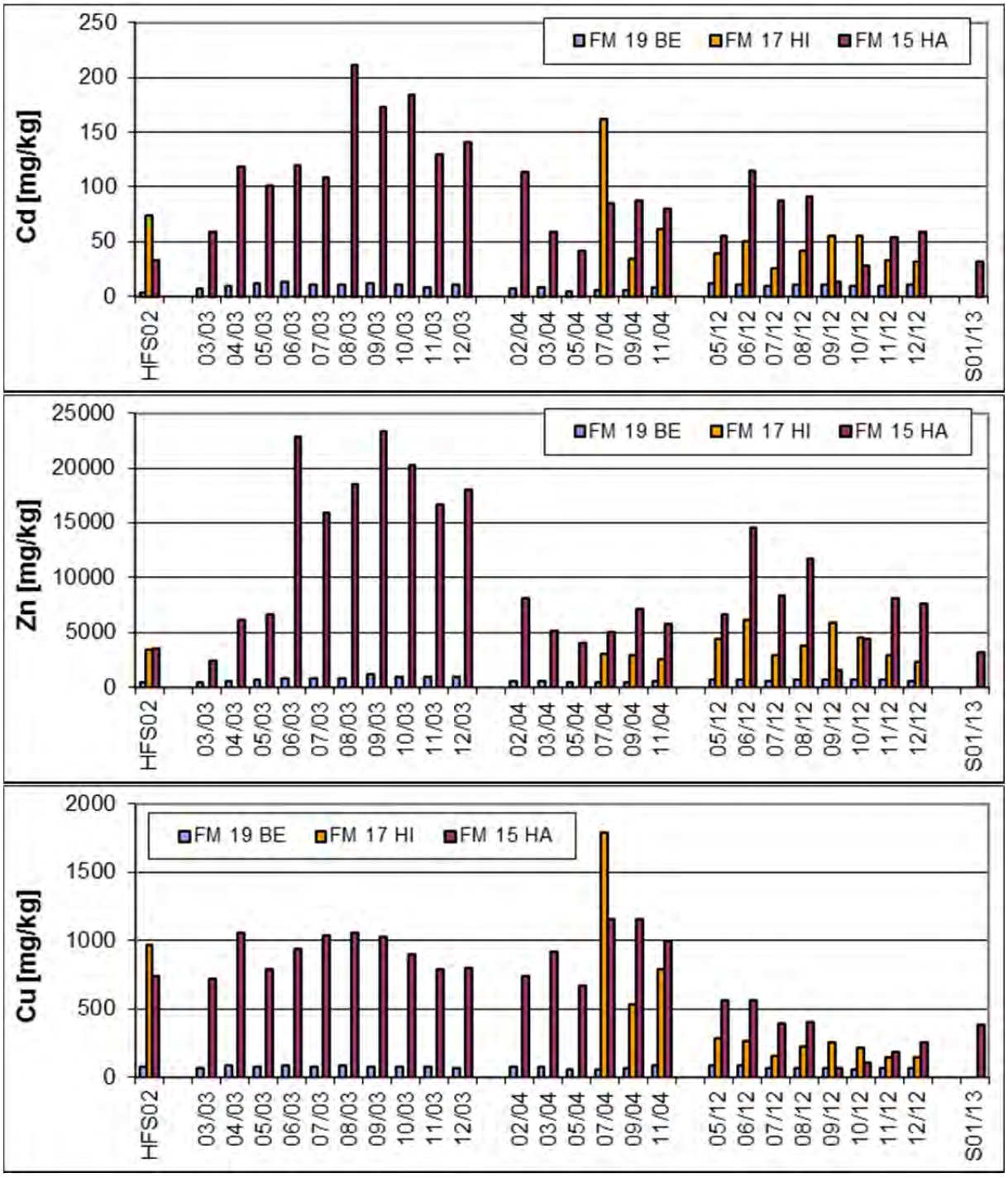
Anlage 81: Mittlere Elementgehalte (As, Pb, Sb) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)



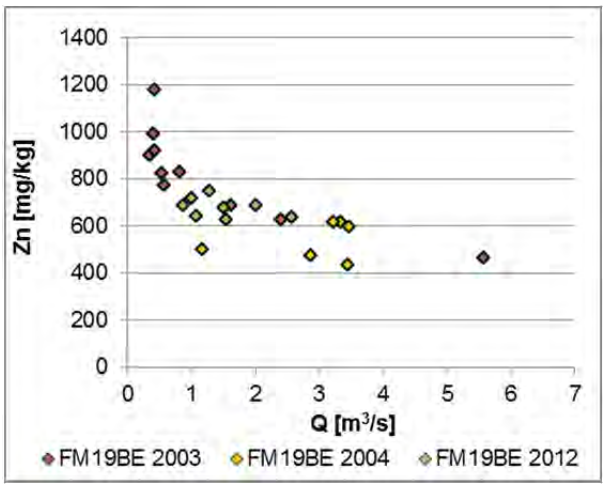


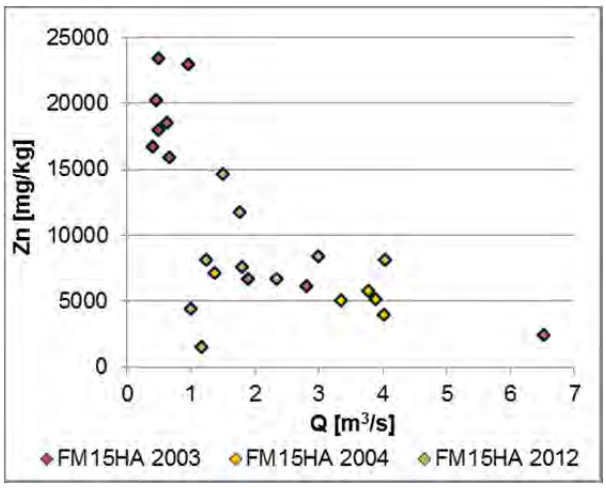


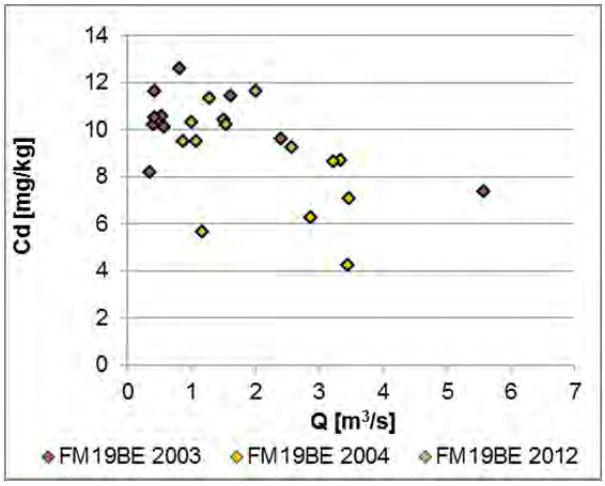
Anlage 82: Mittlere Elementgehalte (Cd, Zn, Cu) in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

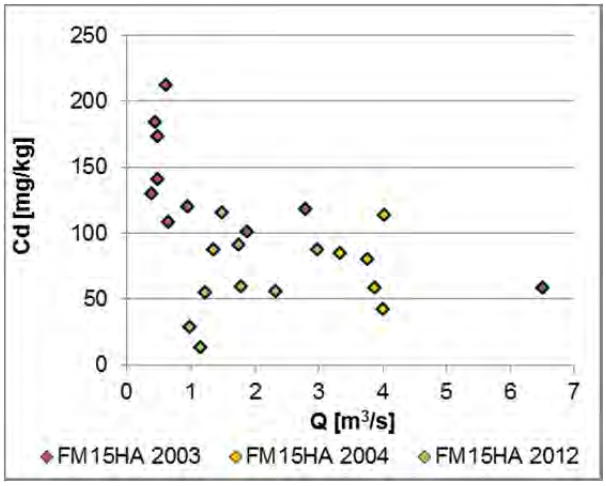


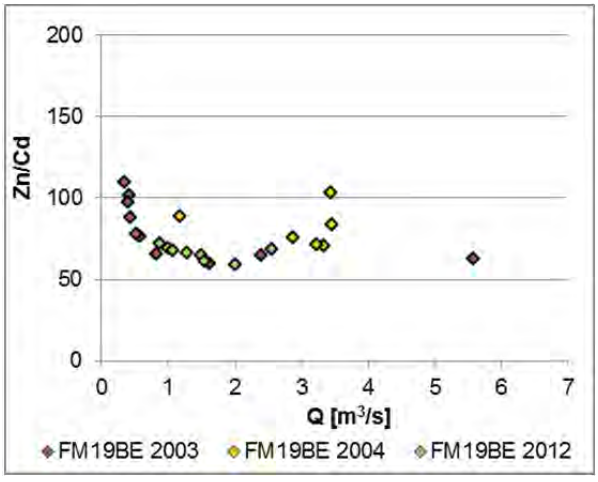
Anlage 83: Verhalten der Zn- und Cd-Konzentrationen in den Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) in Abhängigkeit von den jeweiligen mittleren Durchflussmengen

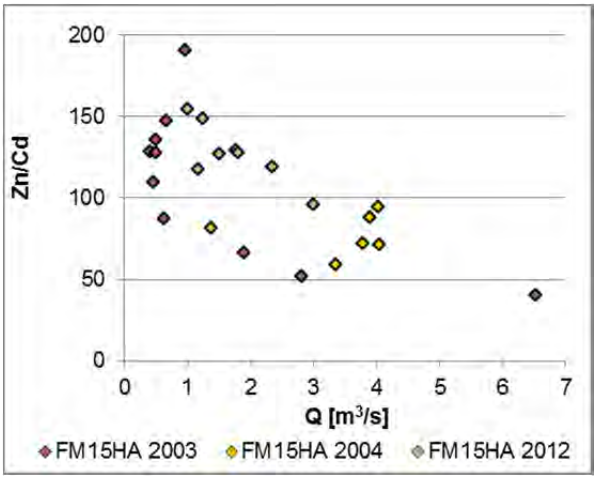




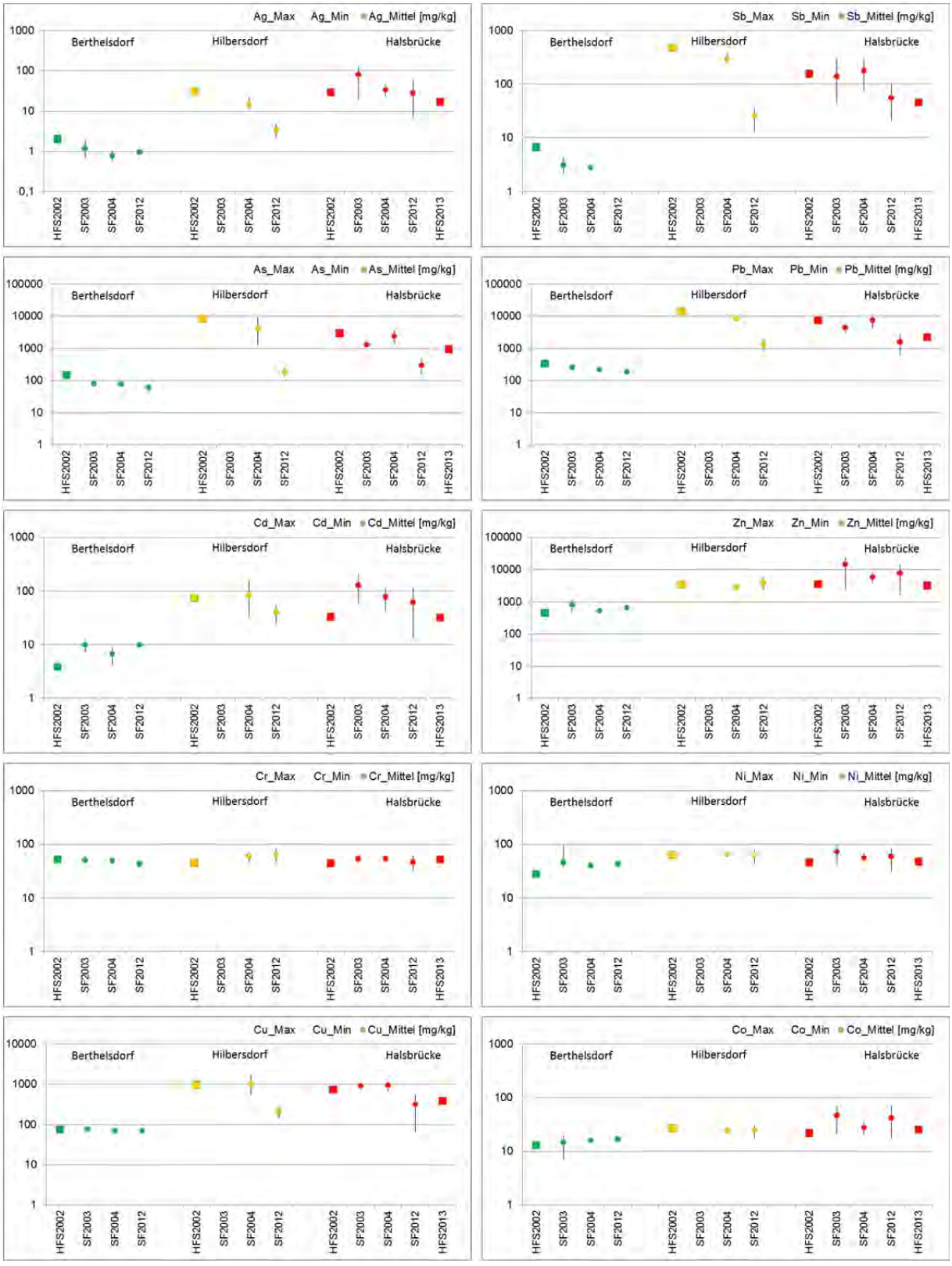




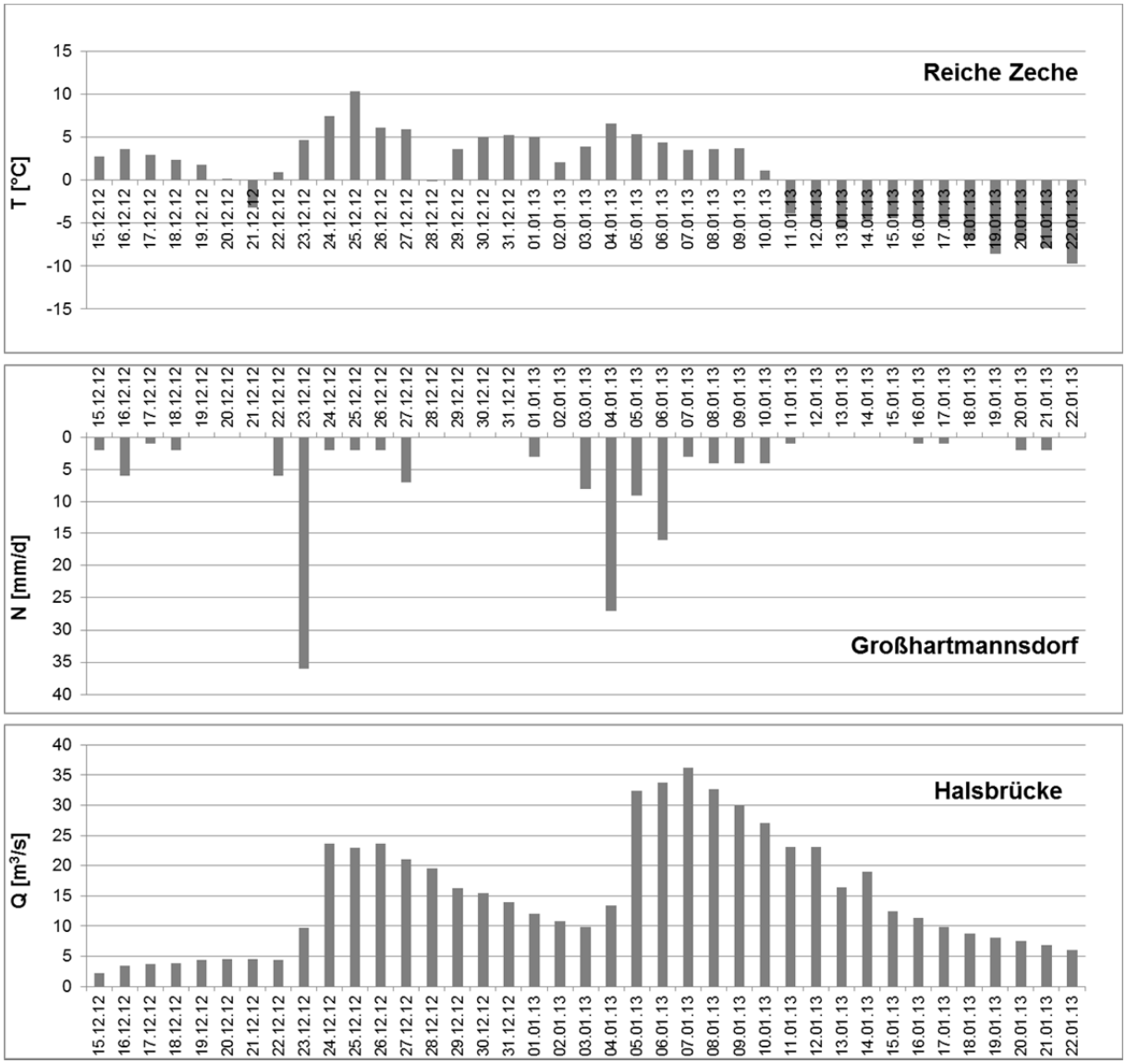




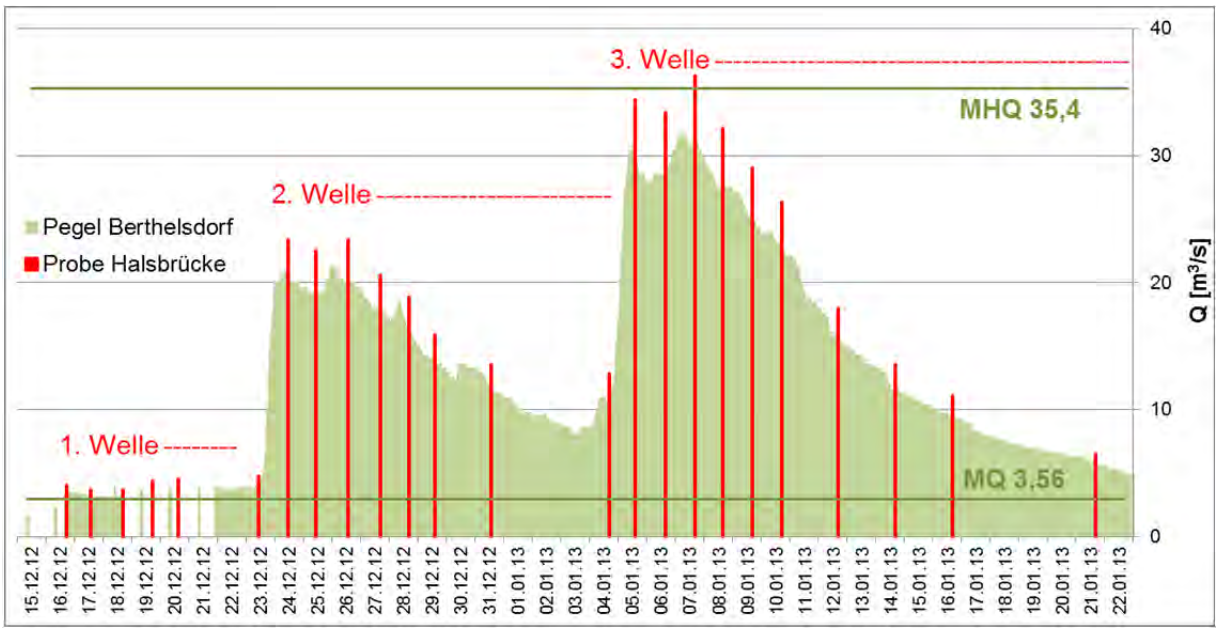
Anlage 84: Variationsbreite ausgewählter Elemente in den sedimentierten Schwebstoffen aus den Sedimentationsfallen (Fraktion <20 µm) im Belastungsabschnitt Freiberg in den Jahren 2003, 2004 und 2012 im Vergleich zu den Hochflutsedimenten im Herbst 2002 und Januar 2013 (Fraktion <20 µm)

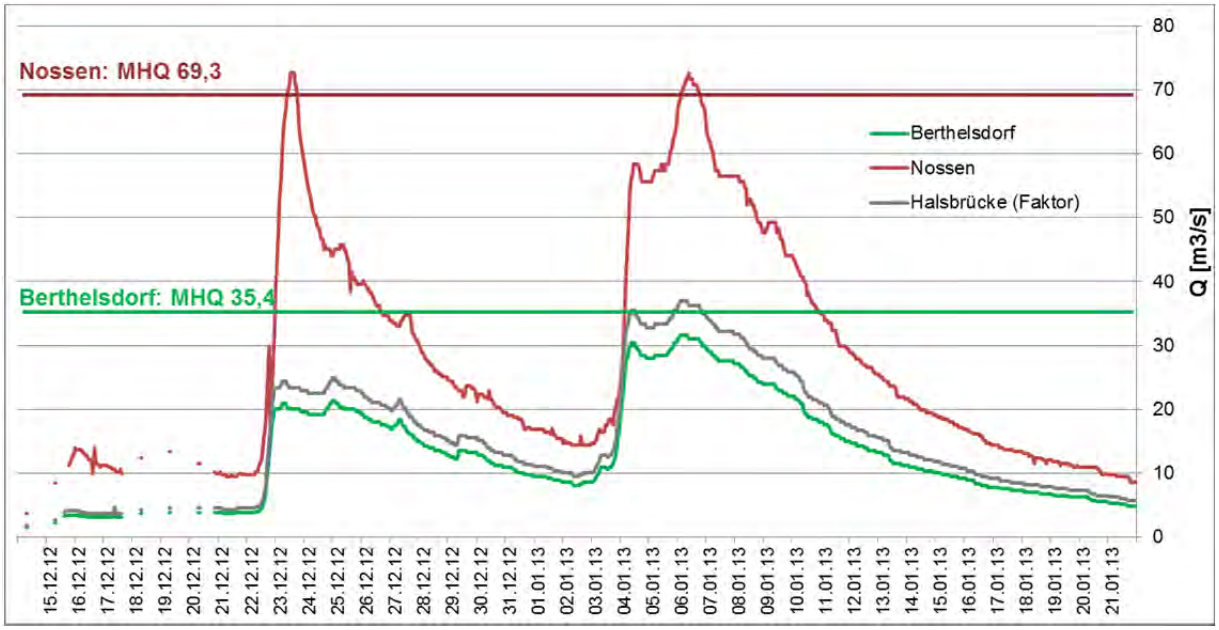


Anlage 85: Entwicklung der meteorologischen und hydrologischen Situation im Zeitraum vom 15.12.2012 bis 22.01.2013 im Gebiet der oberen bis mittleren Freiberger Mulde

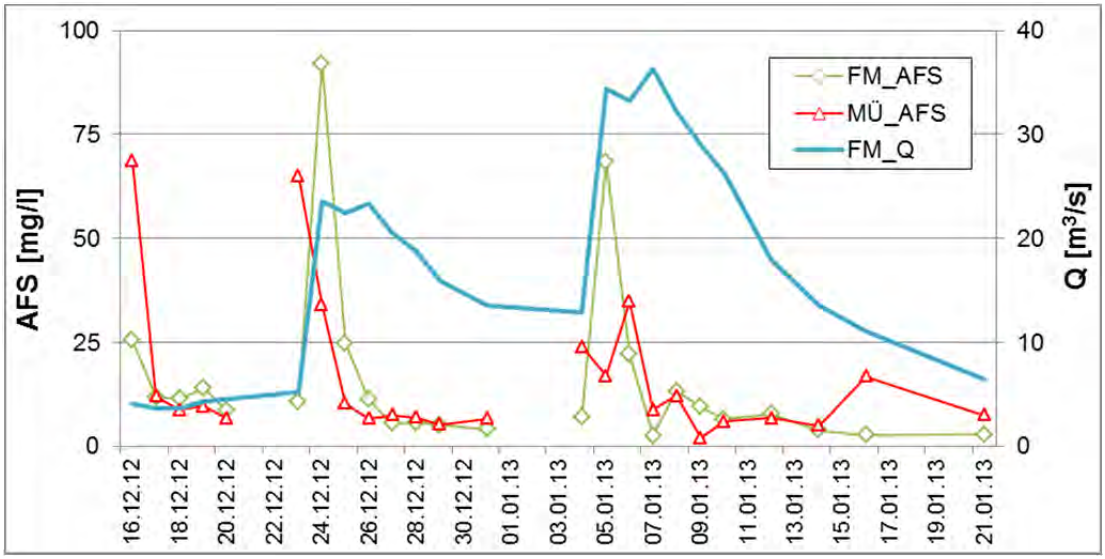


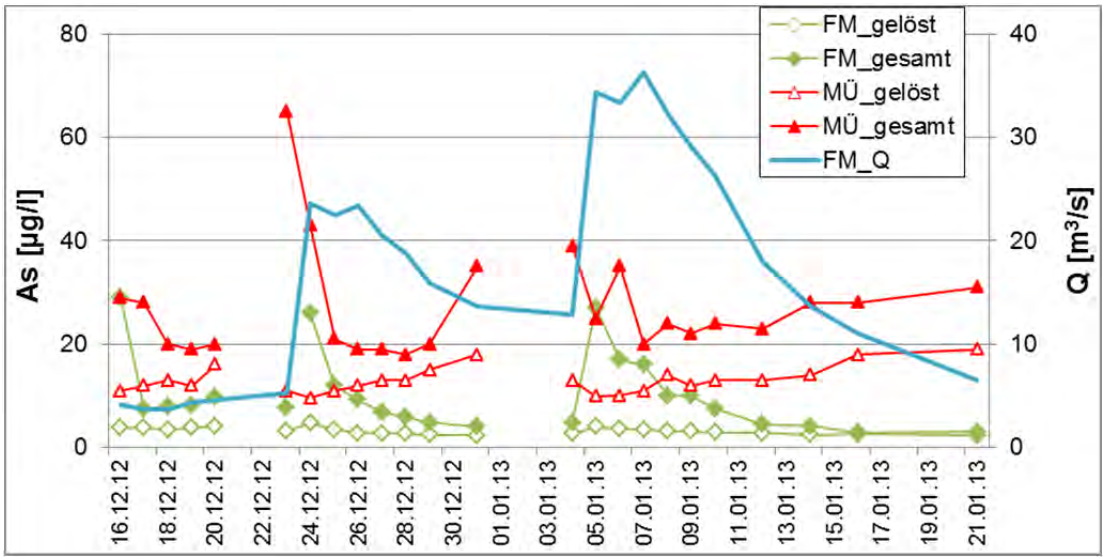
Anlage 86: Charakterisierung der Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 an den Pegeln Berthelsdorf und Nossen, Probenahmeschema am Punkt Halsbrücke und Bezug zu den hydrologischen Parametern

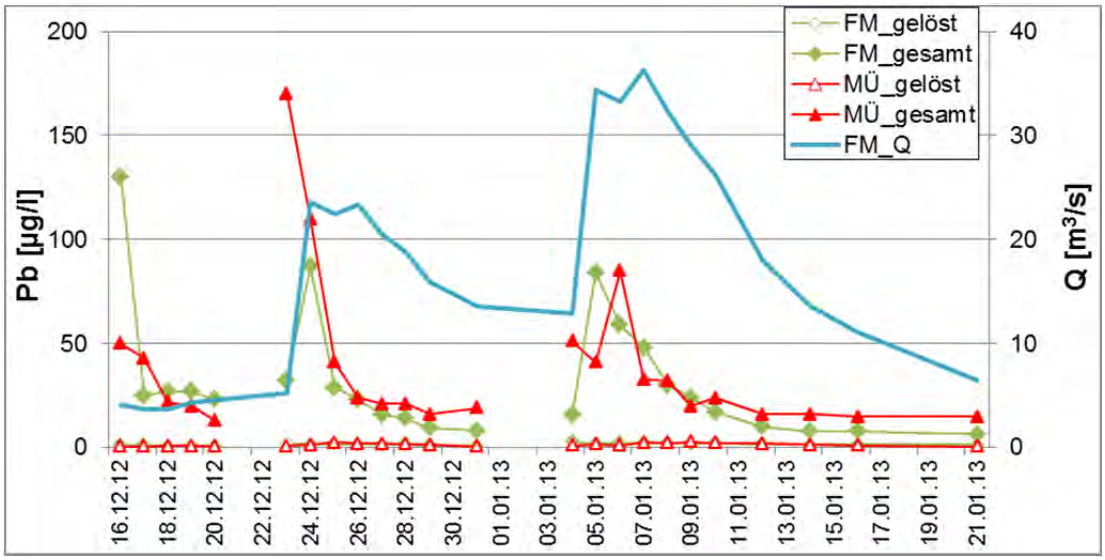




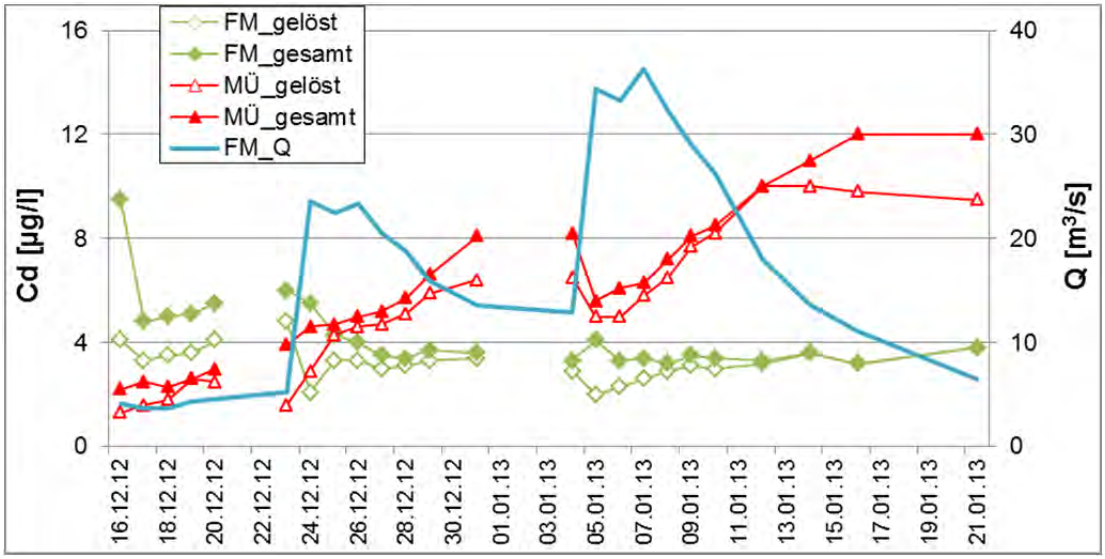
Anlage 87: Zeitlicher Verlauf der Schwebstoff-, As- und Pb-Konzentrationen in den drei Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke (FM) und im Münzbach/Mündung (MÜ) in Relation zum Durchfluss (Q) in der Freiberger Mulde

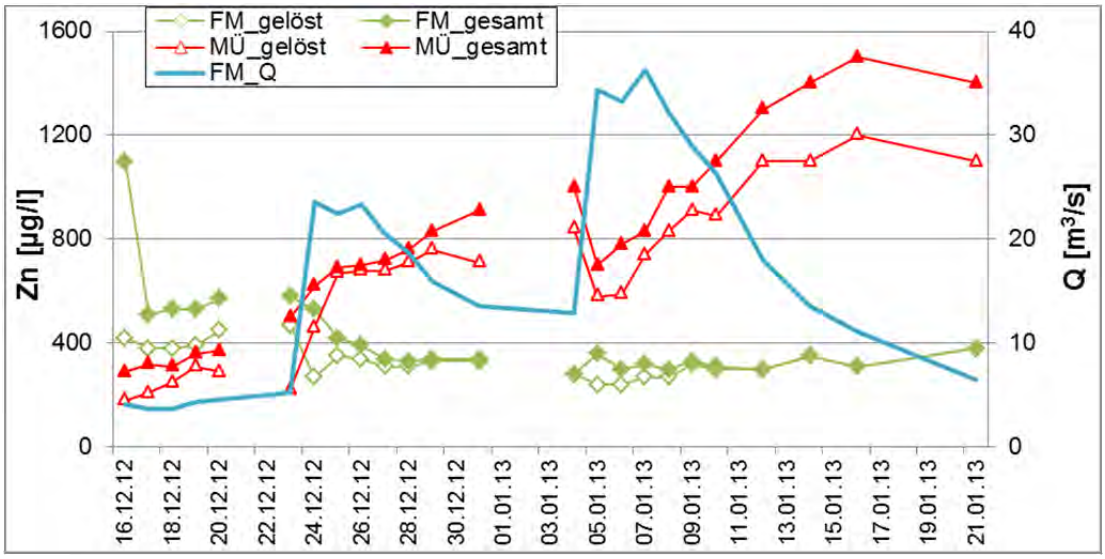


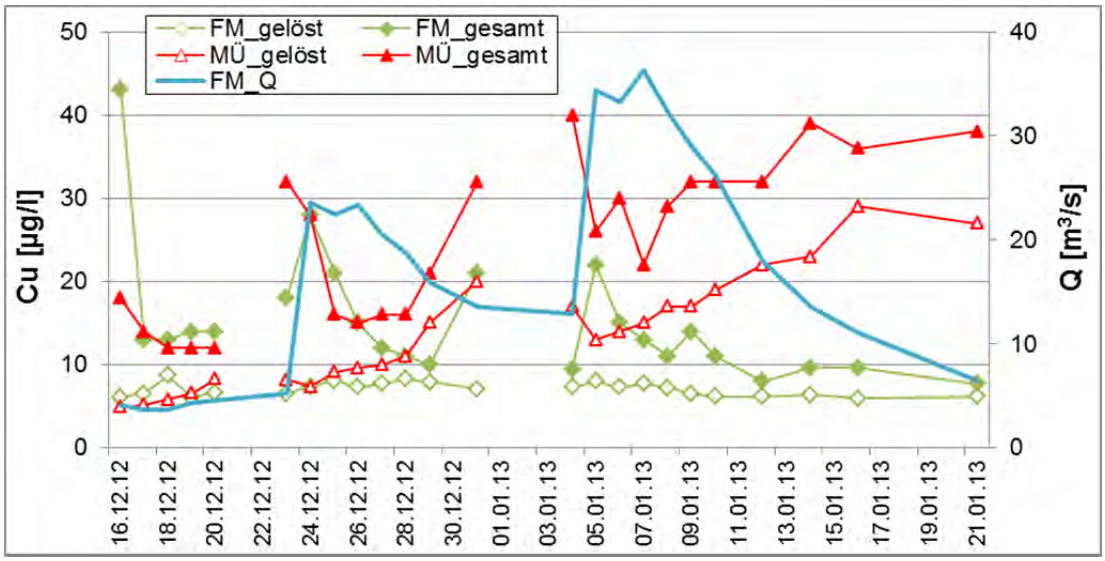




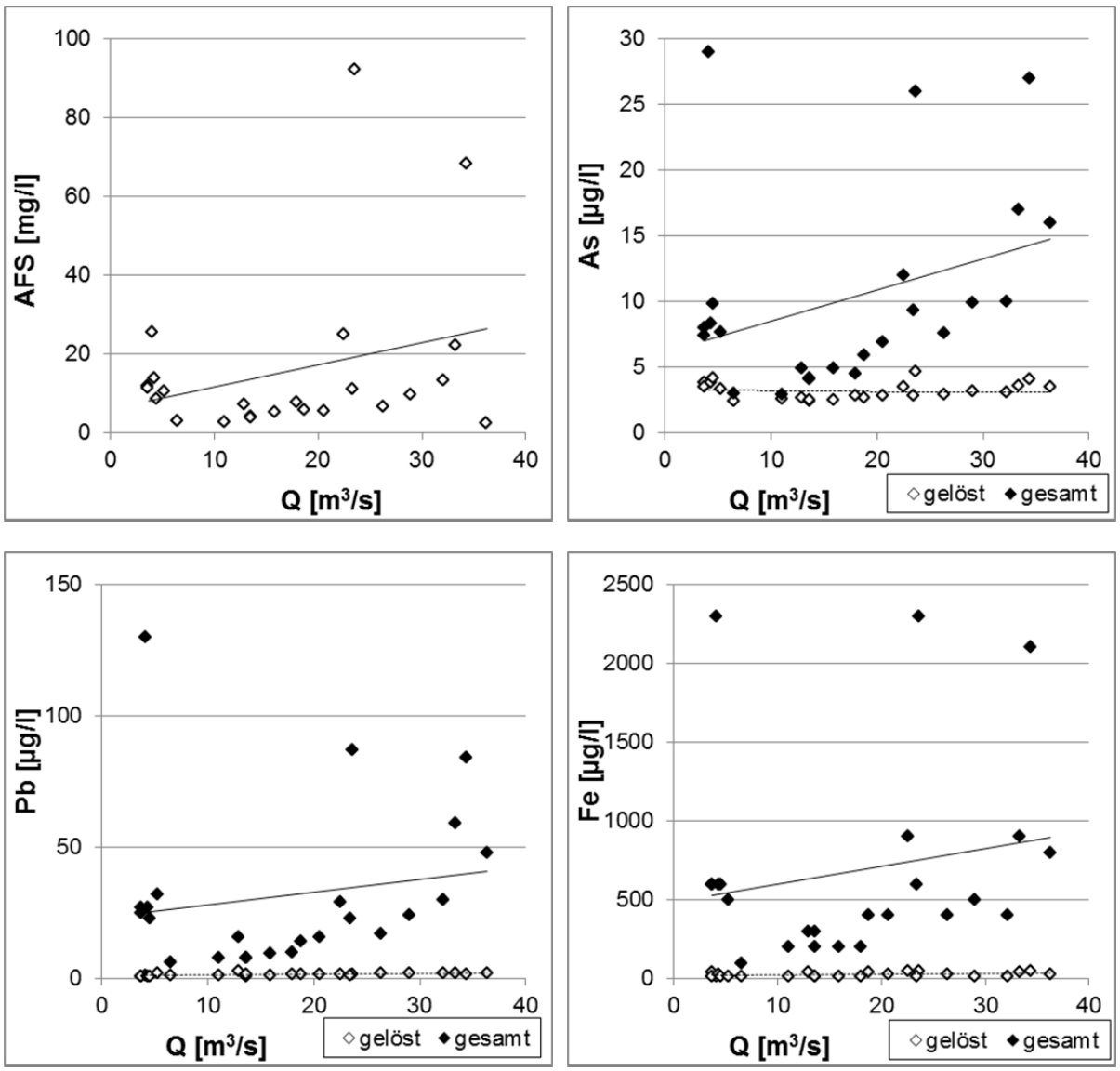
Anlage 88: Zeitlicher Verlauf der Cd-, Zn- und Cu-Konzentrationen in den drei Hochwasserwellen im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke (FM) und im Münzbach/Mündung (MÜ) in Relation zum Durchfluss (Q) in der Freiberger Mulde



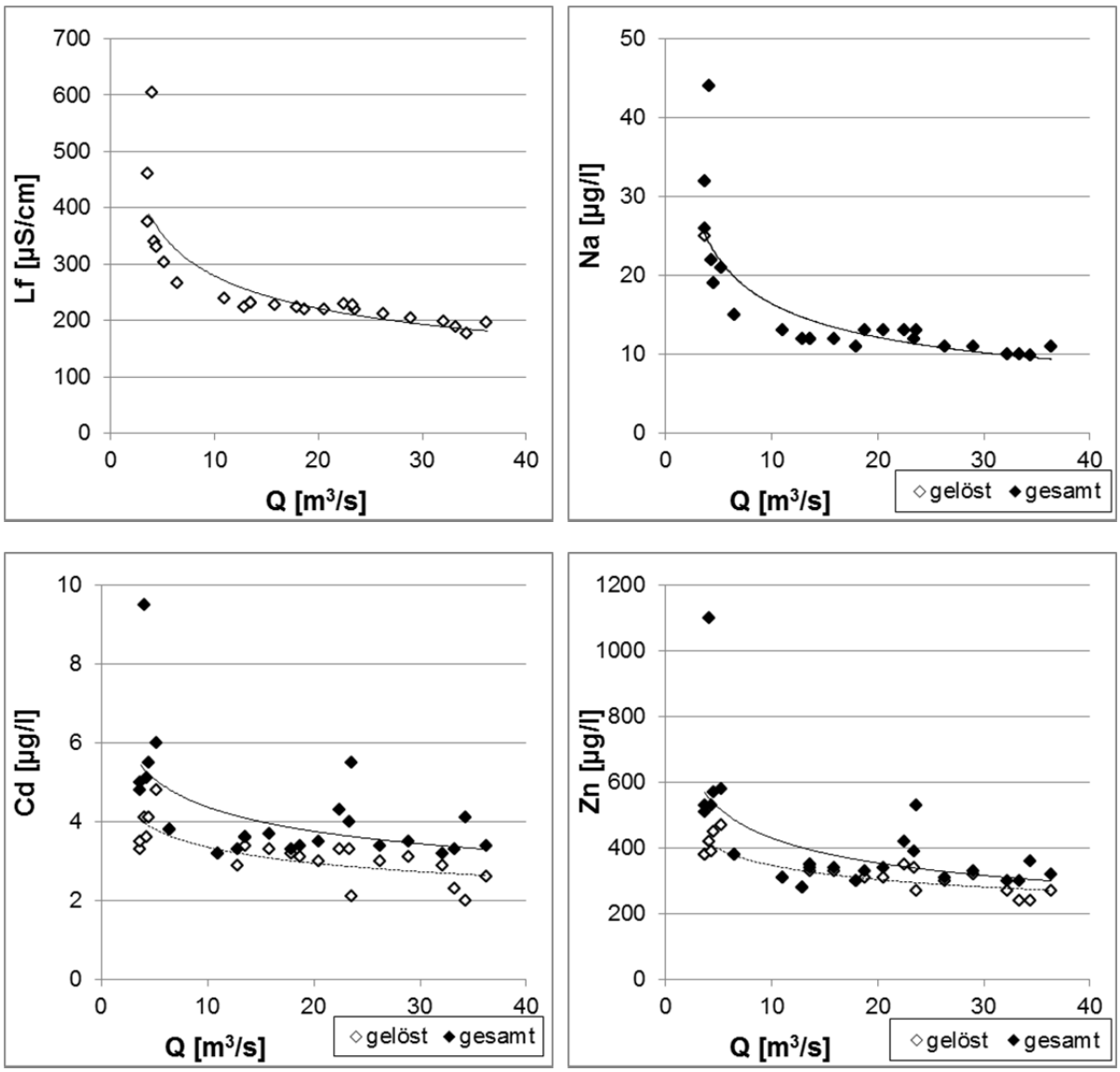




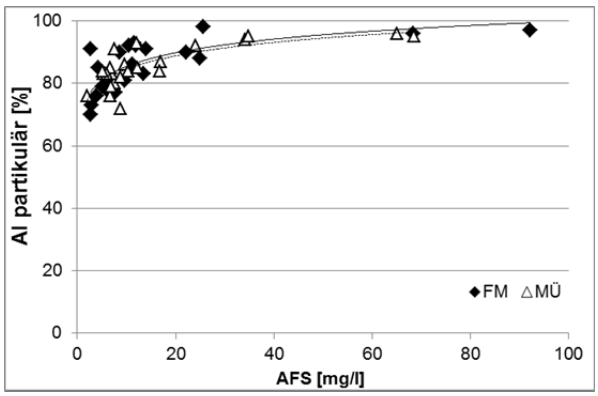
Anlage 89: Abhängigkeit der Schwebstoffmenge und der As-, Pb-, Zn und Fe-Gehalte von der Durchflussmenge (Q) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

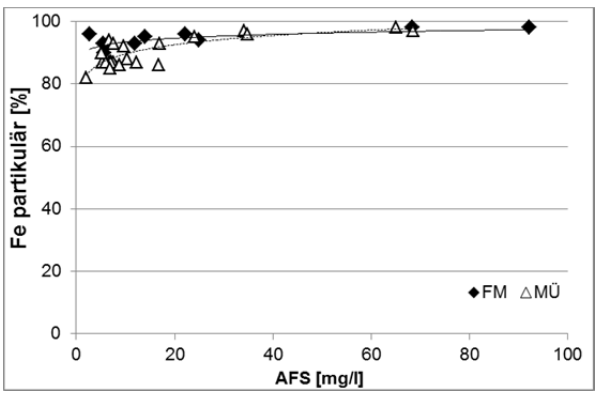


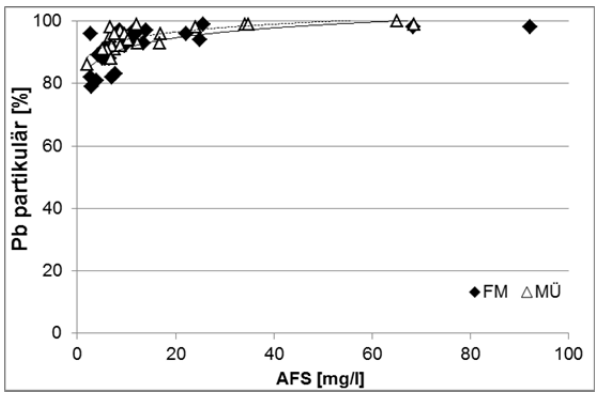
Anlage 90: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der Na-, Cd- und Zn-Gehalte von der Durchflussmenge (Q) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

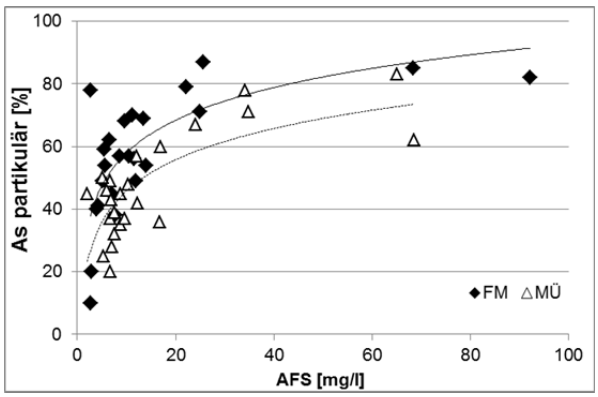


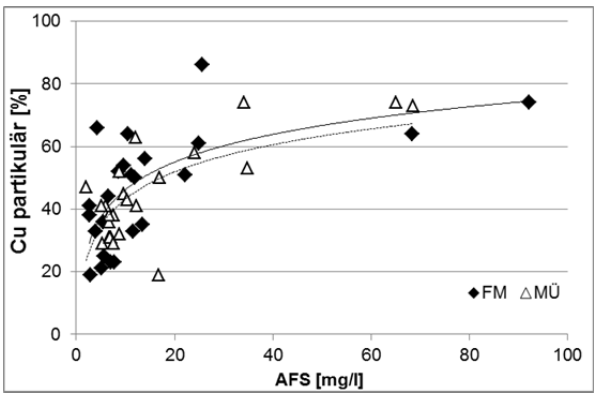
Anlage 91: Abhängigkeit der partikulären Elementanteile von der Schwebstoffmenge (AFS) während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke und im Münzbach/Mündung

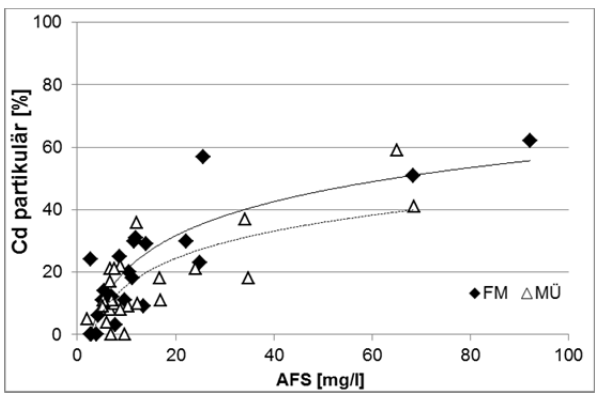


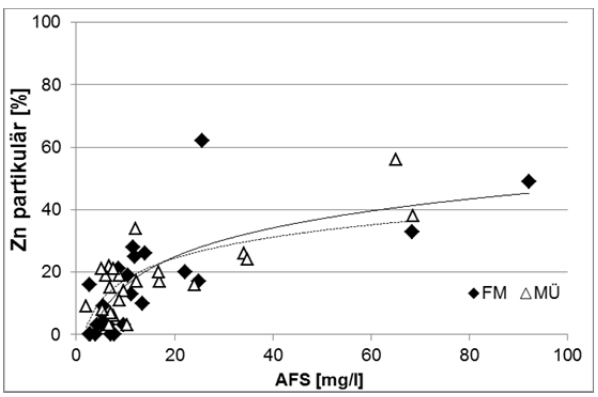




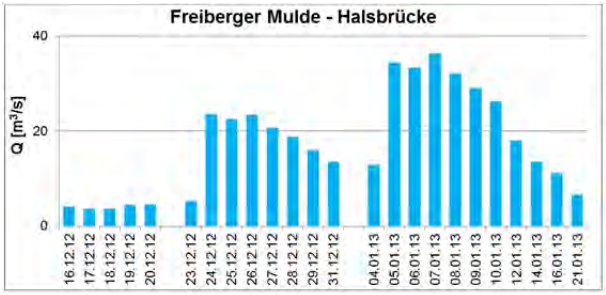


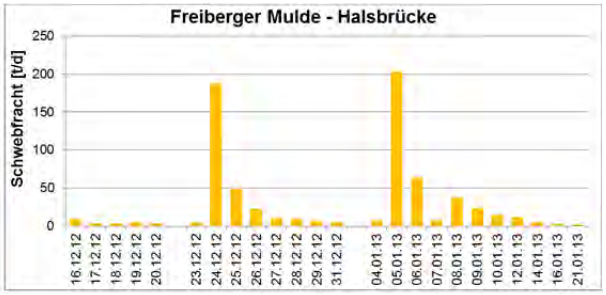


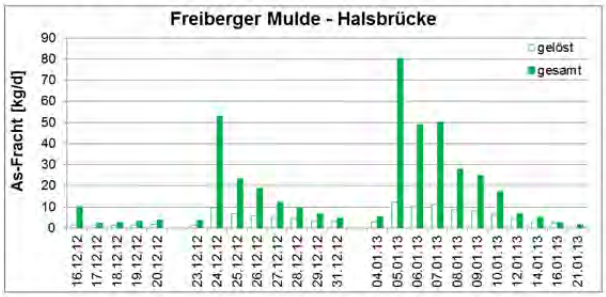


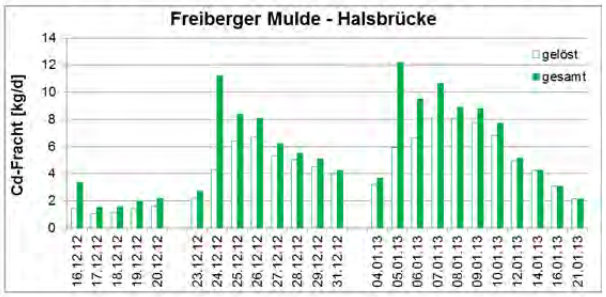


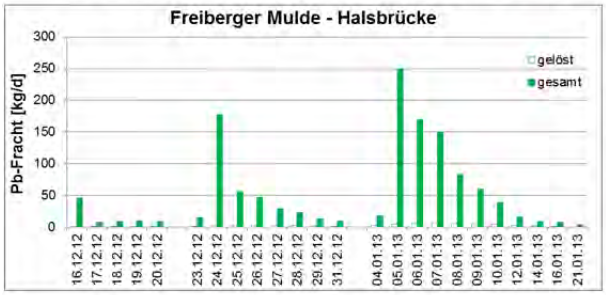
Anlage 92: Schwebstoff- und Elementfrachten während des Hochwassers im Zeitraum vom 16.12.2012 bis 21.01.2013 in der Freiberger Mulde/Halsbrücke

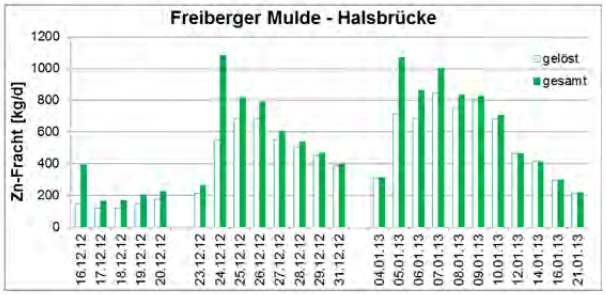


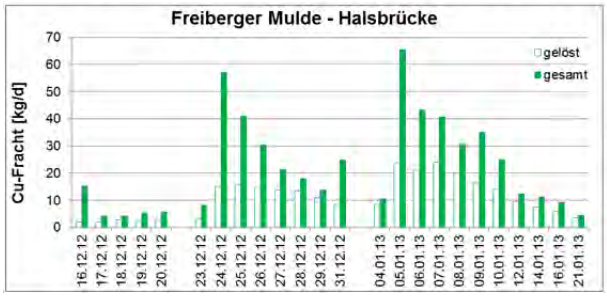


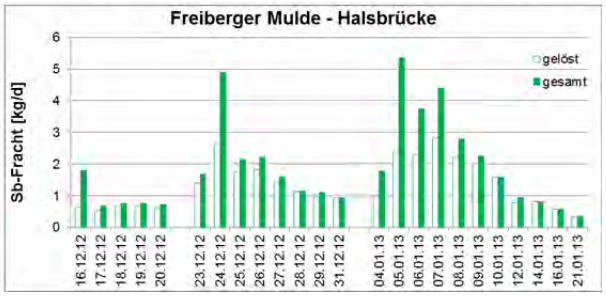




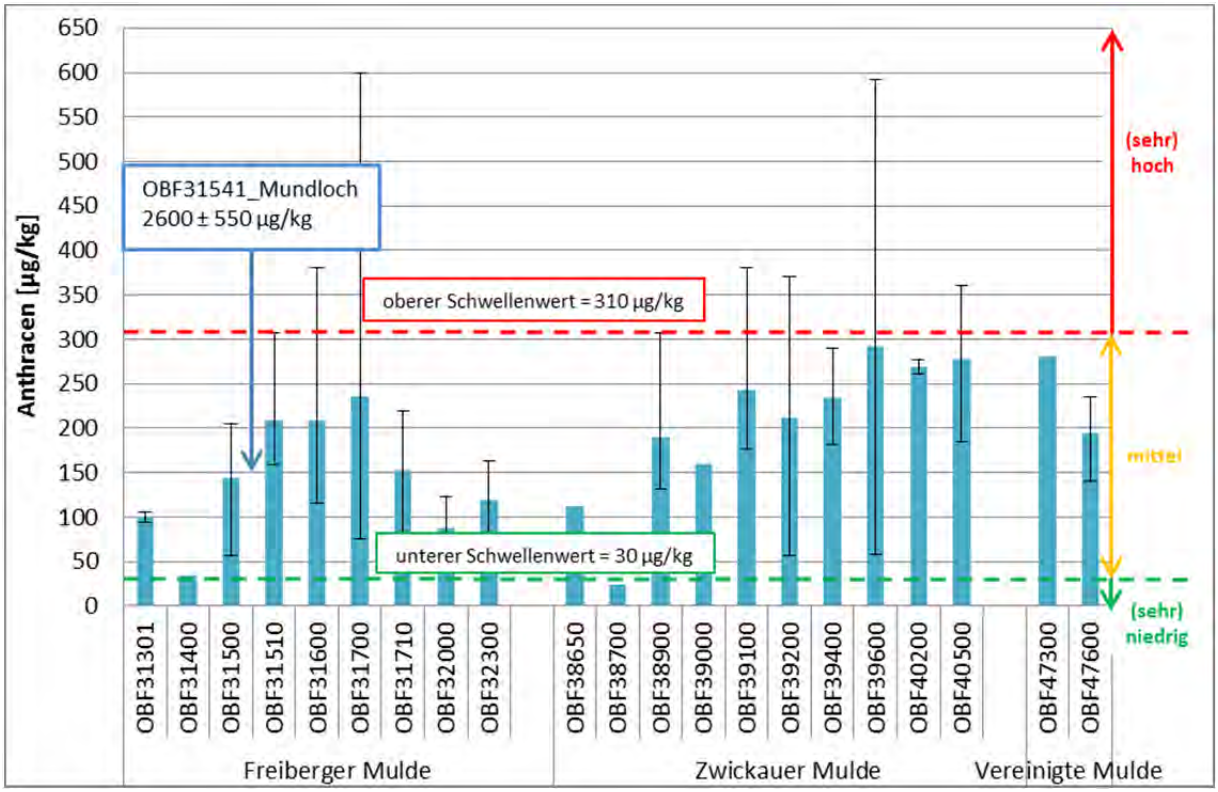


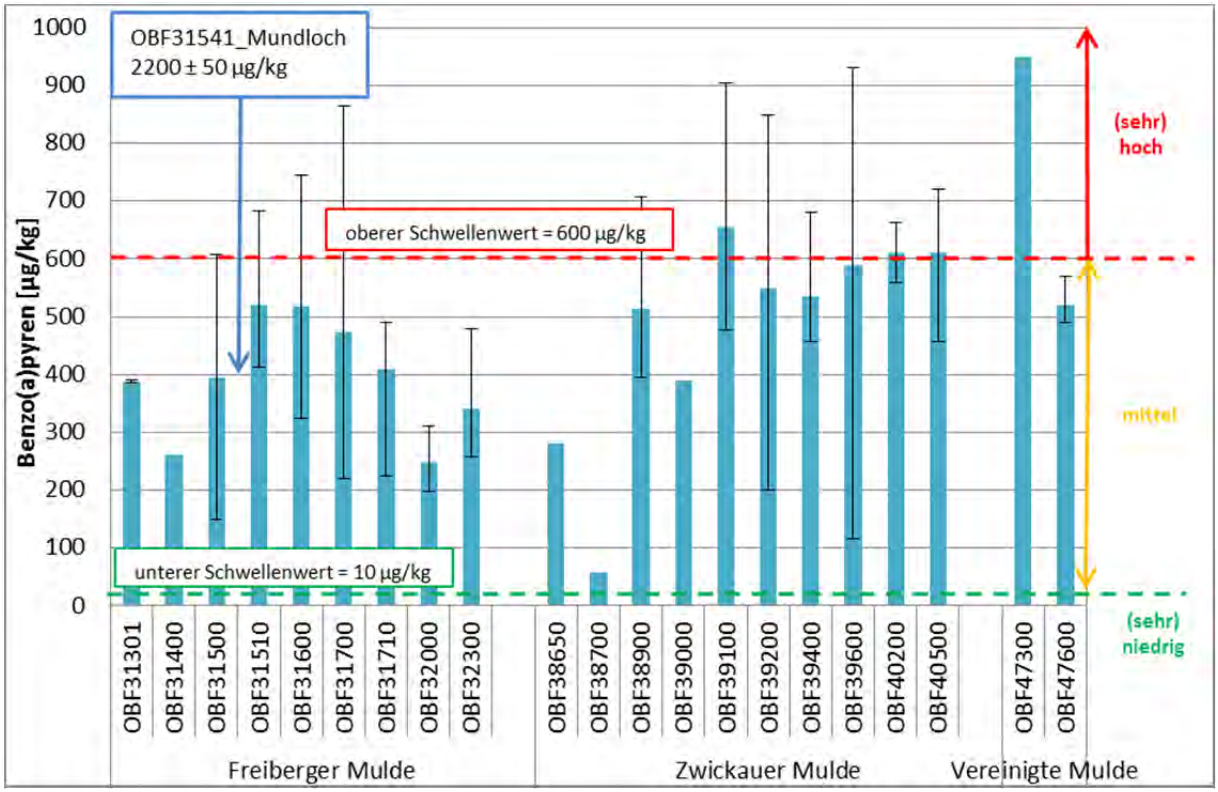




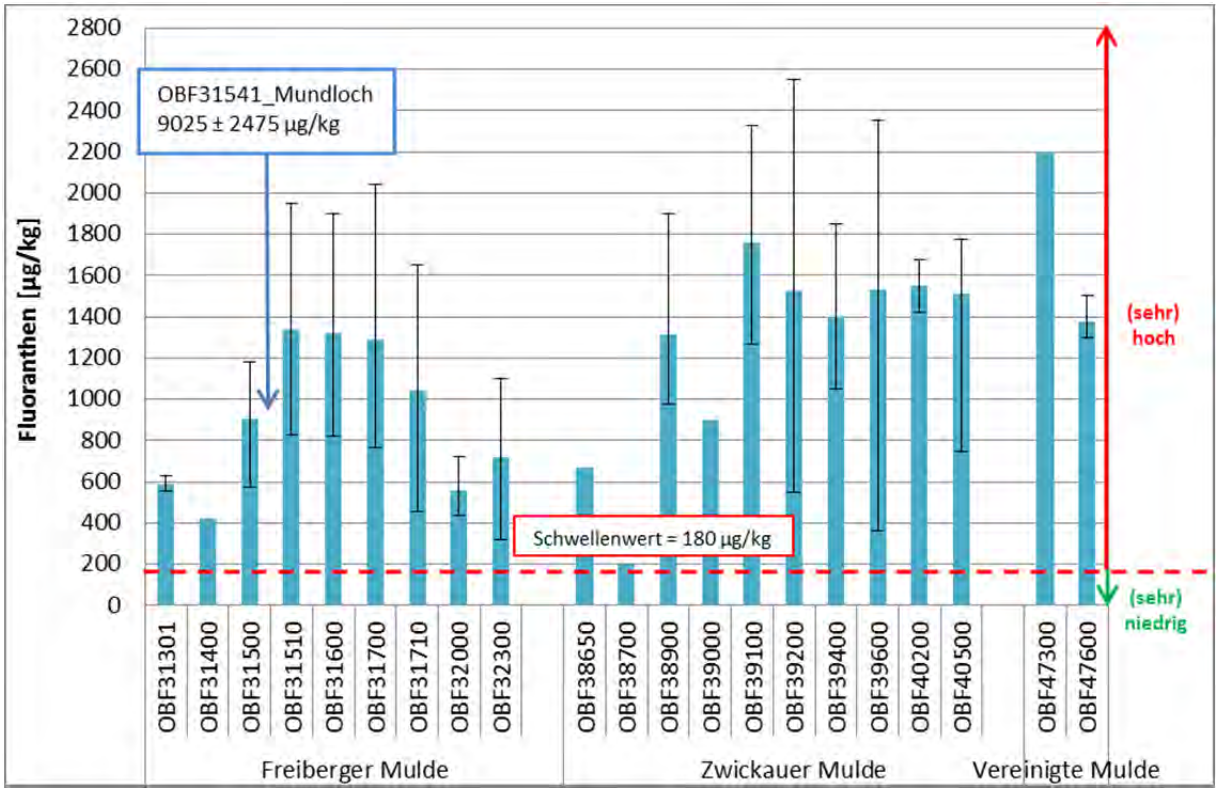


Anlage 93: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe Anthracen und Benzo(a)pyren in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

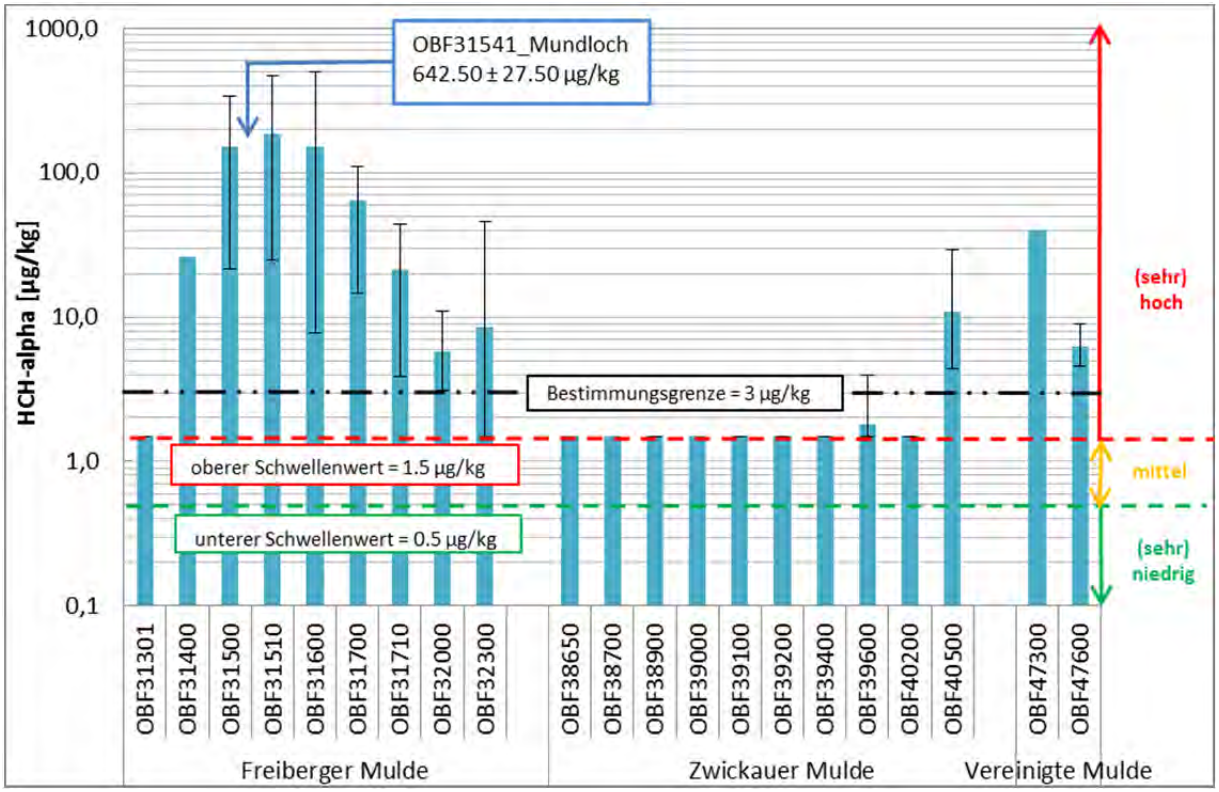


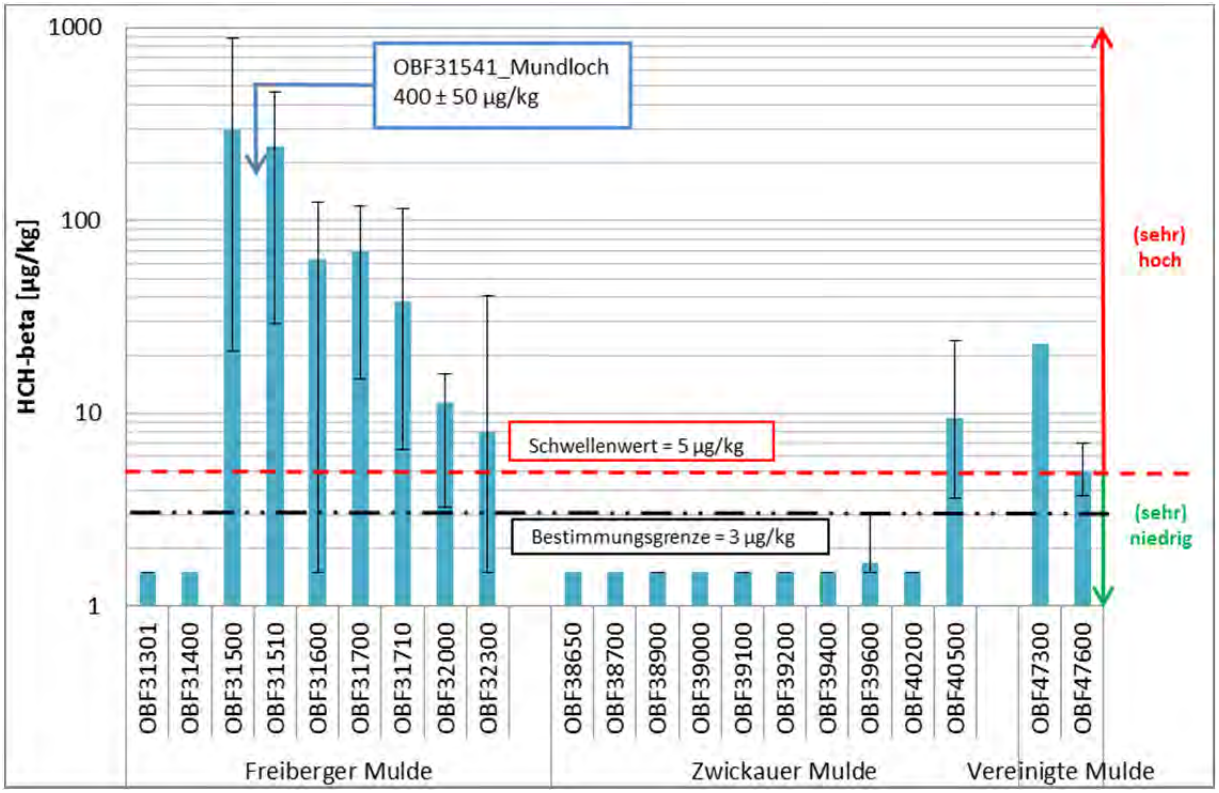


Anlage 94: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite des organischen Schadstoffs Fluoranthen in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG

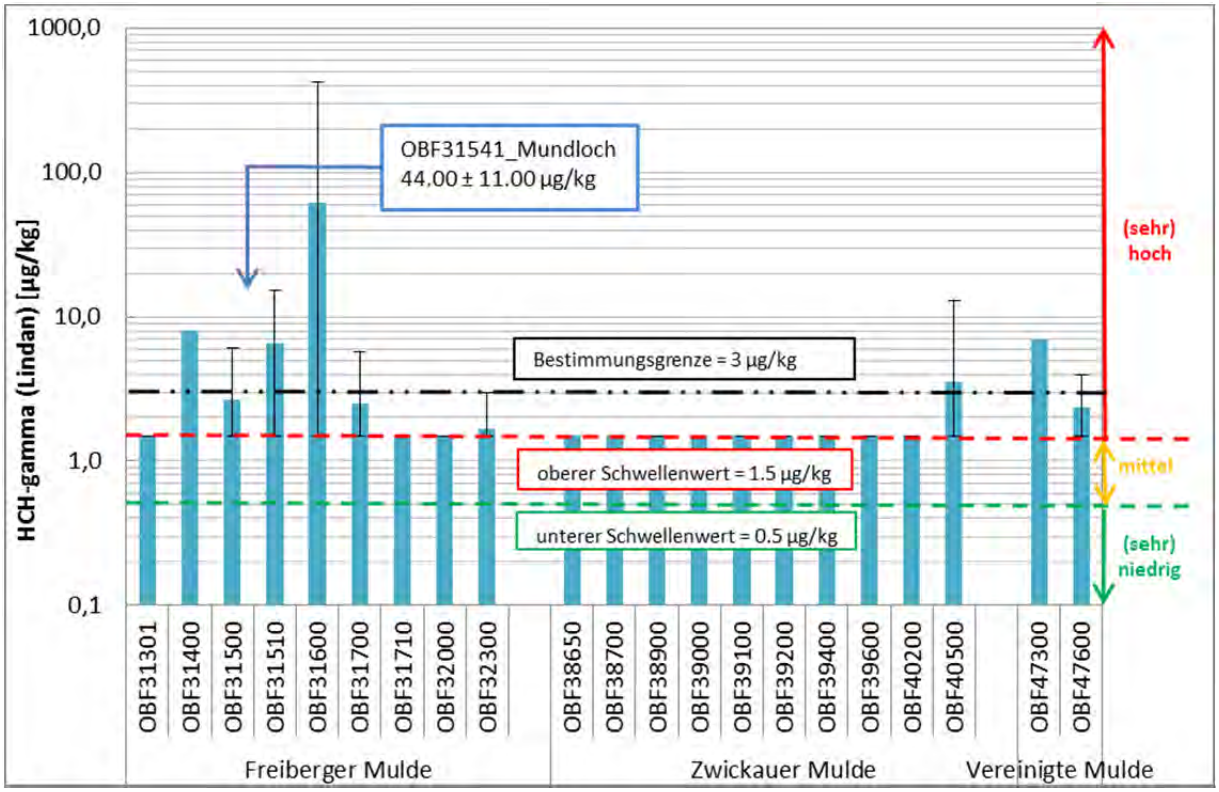


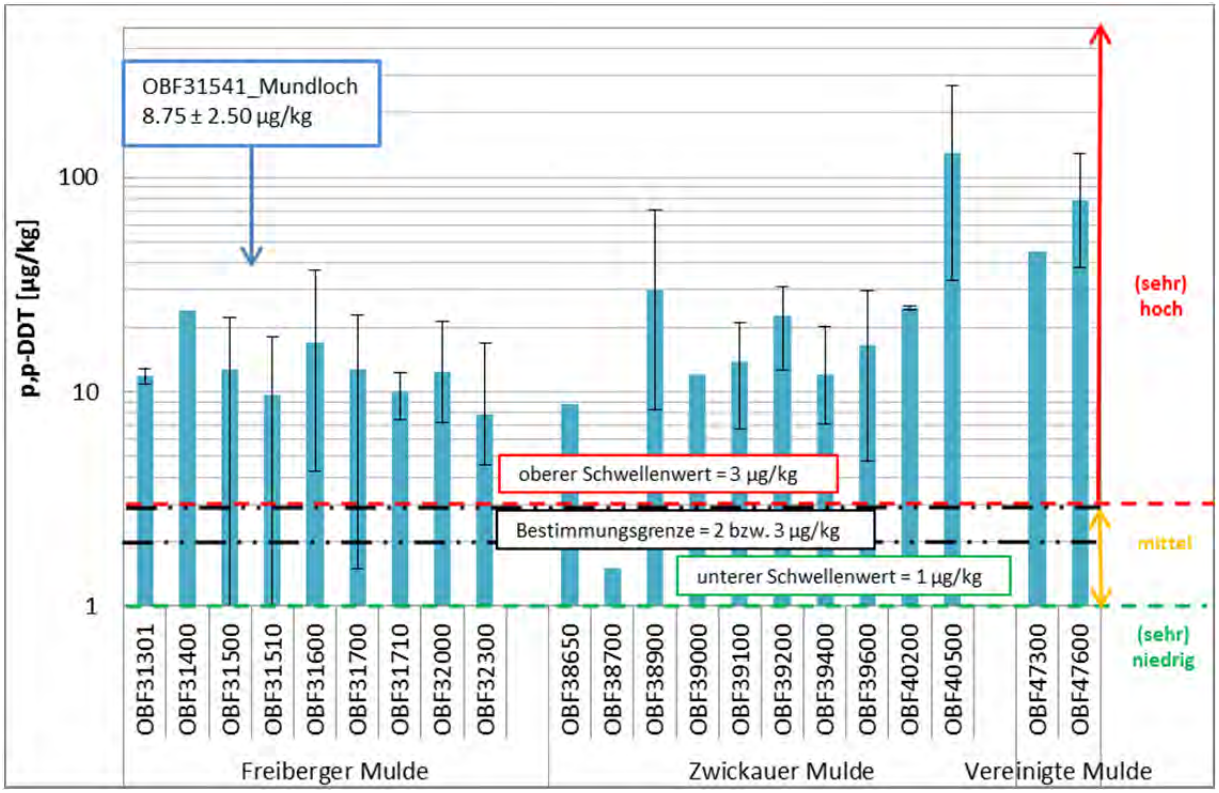
Anlage 95: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe α-HCH und β-HCH in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



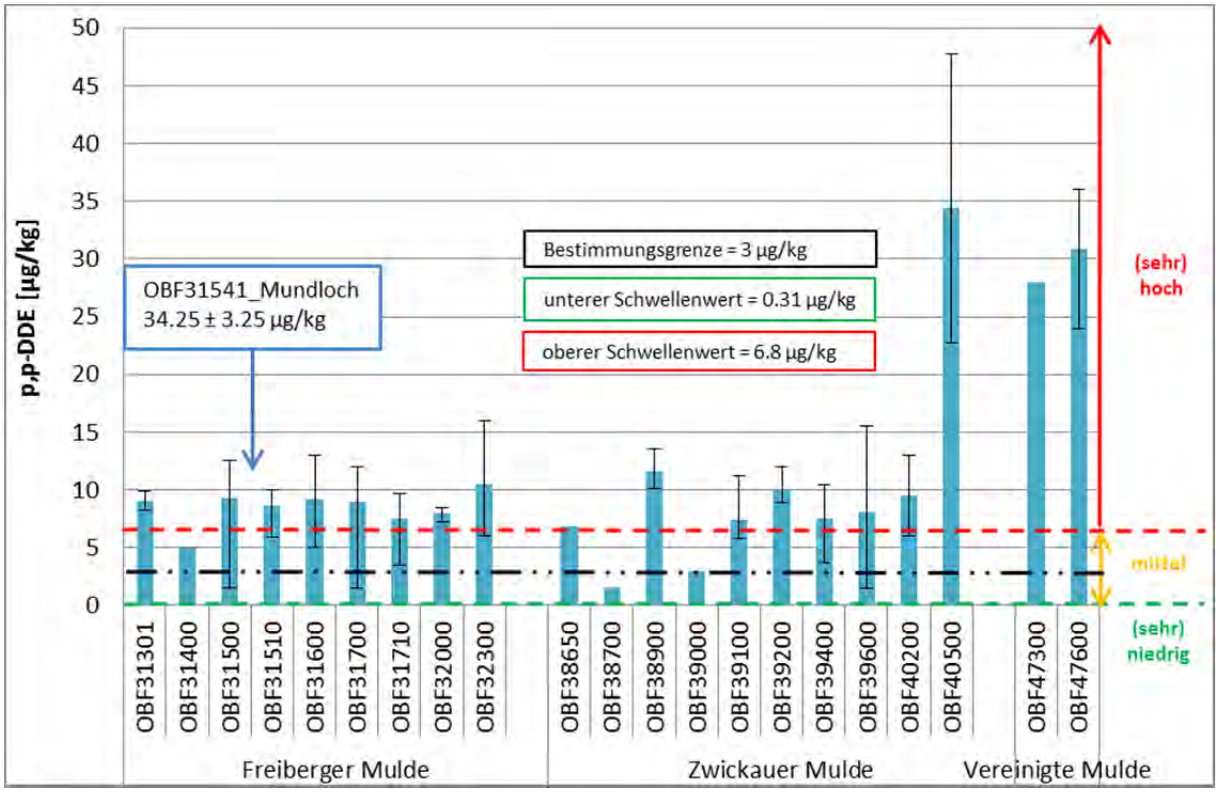


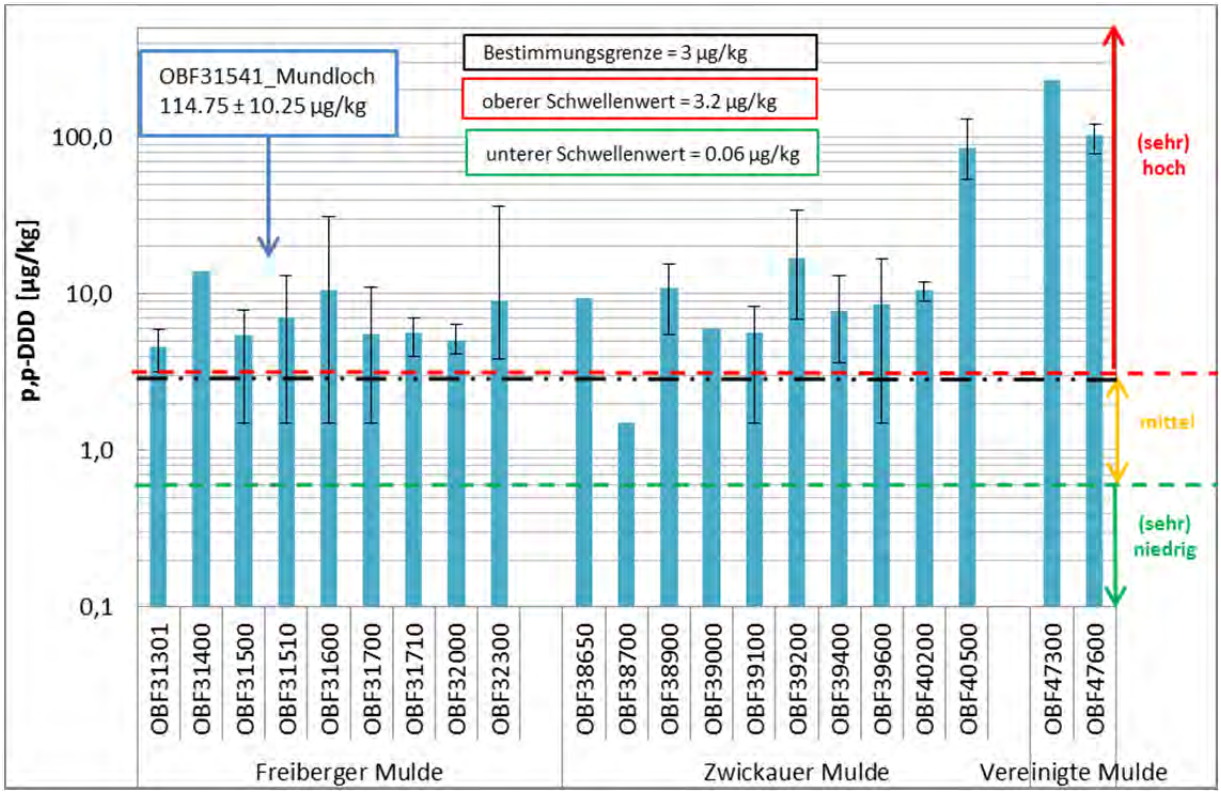
Anlage 96: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe γ-HCH und p,p-DDT in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



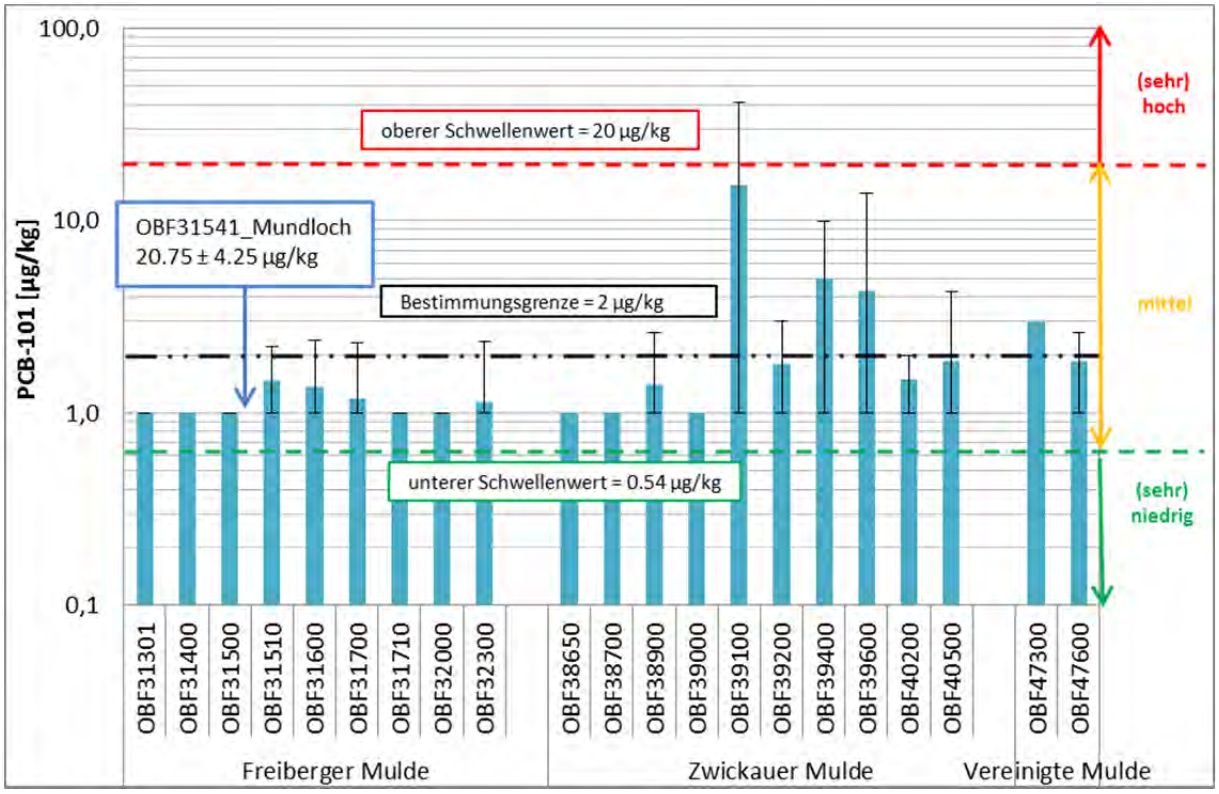


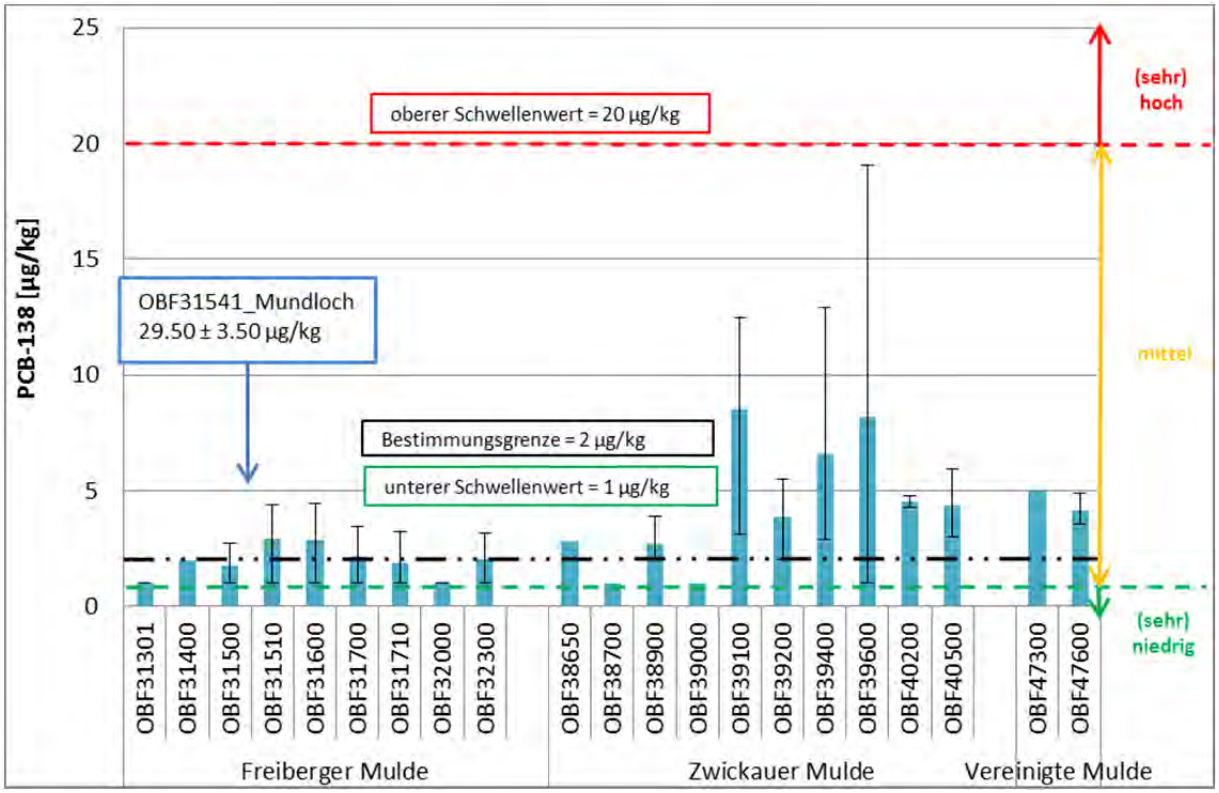
Anlage 97: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe p,p-DDE und p,p-DDD in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



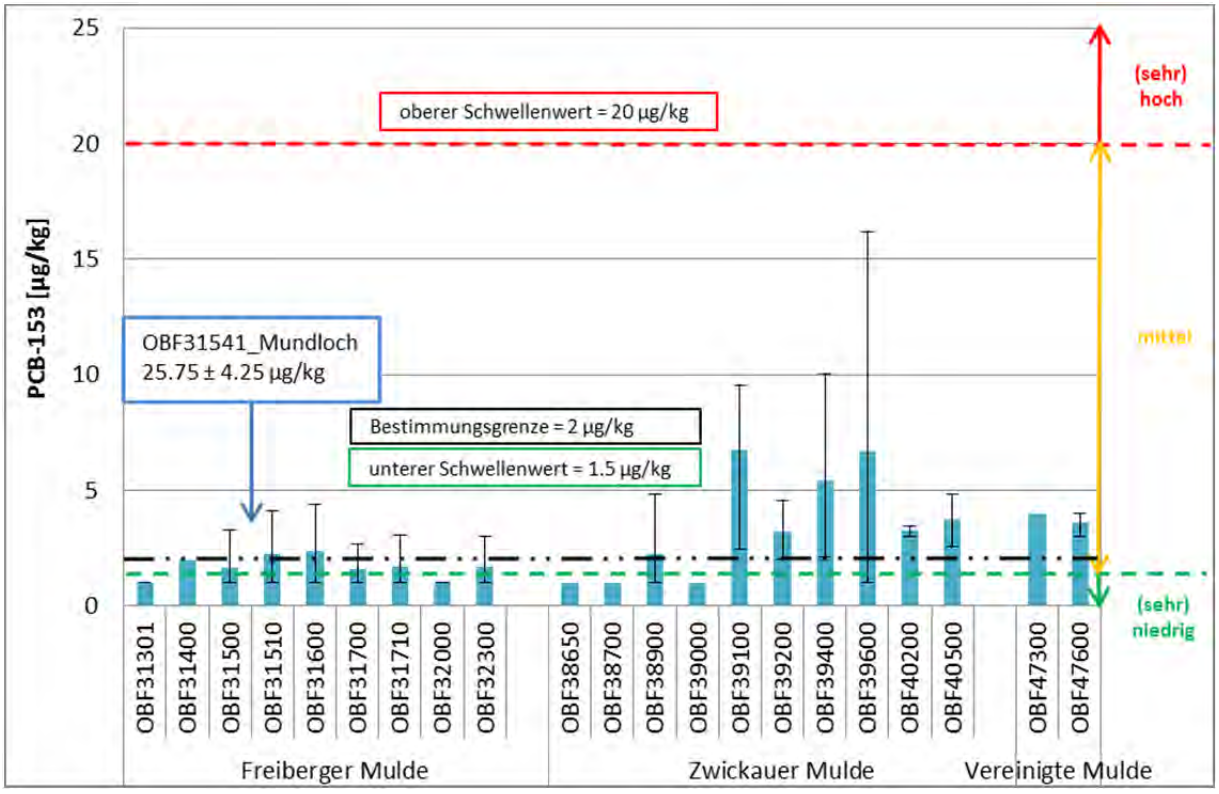


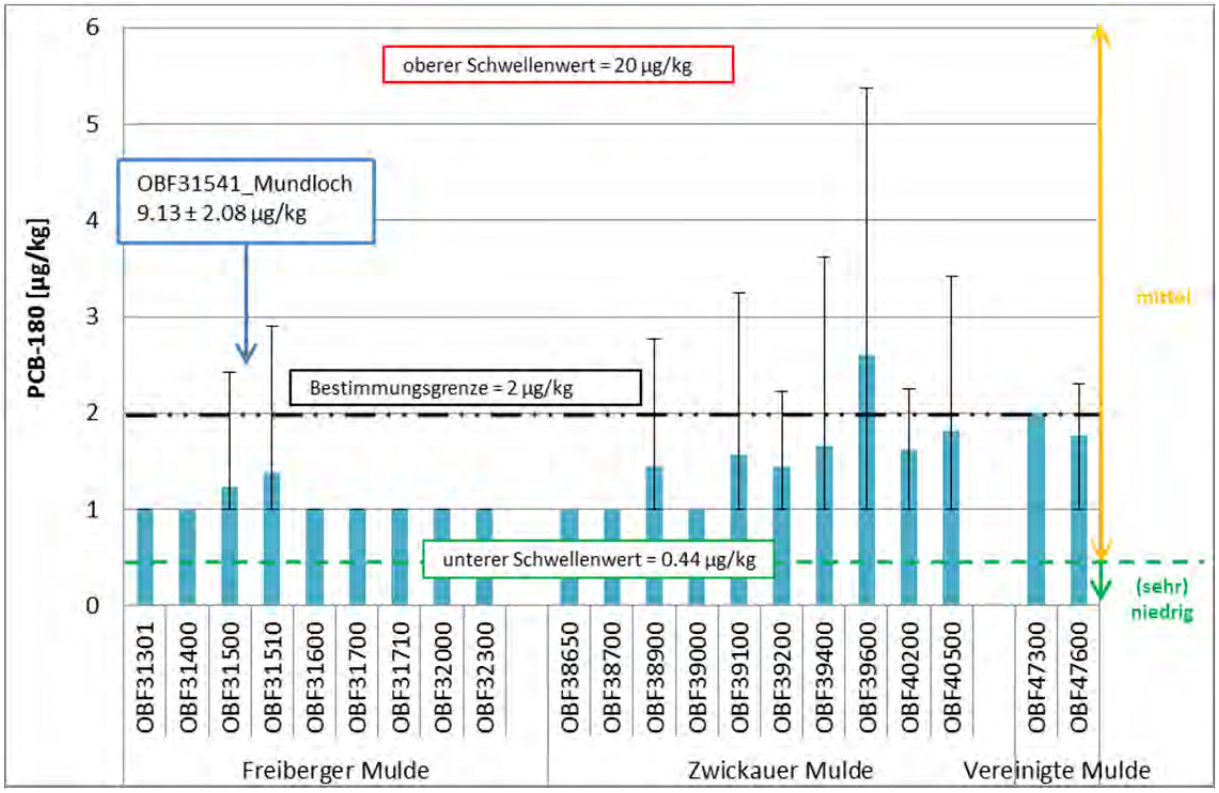
Anlage 98: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-101 und PCB-138 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



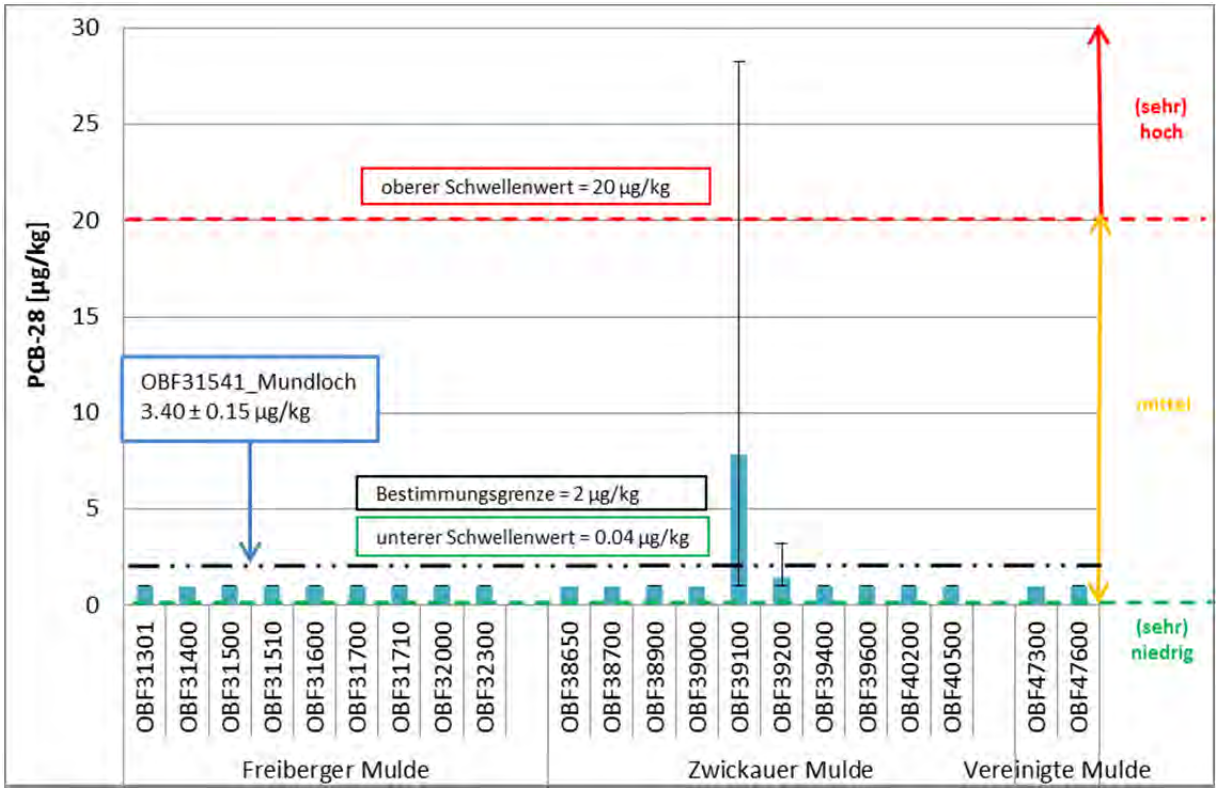


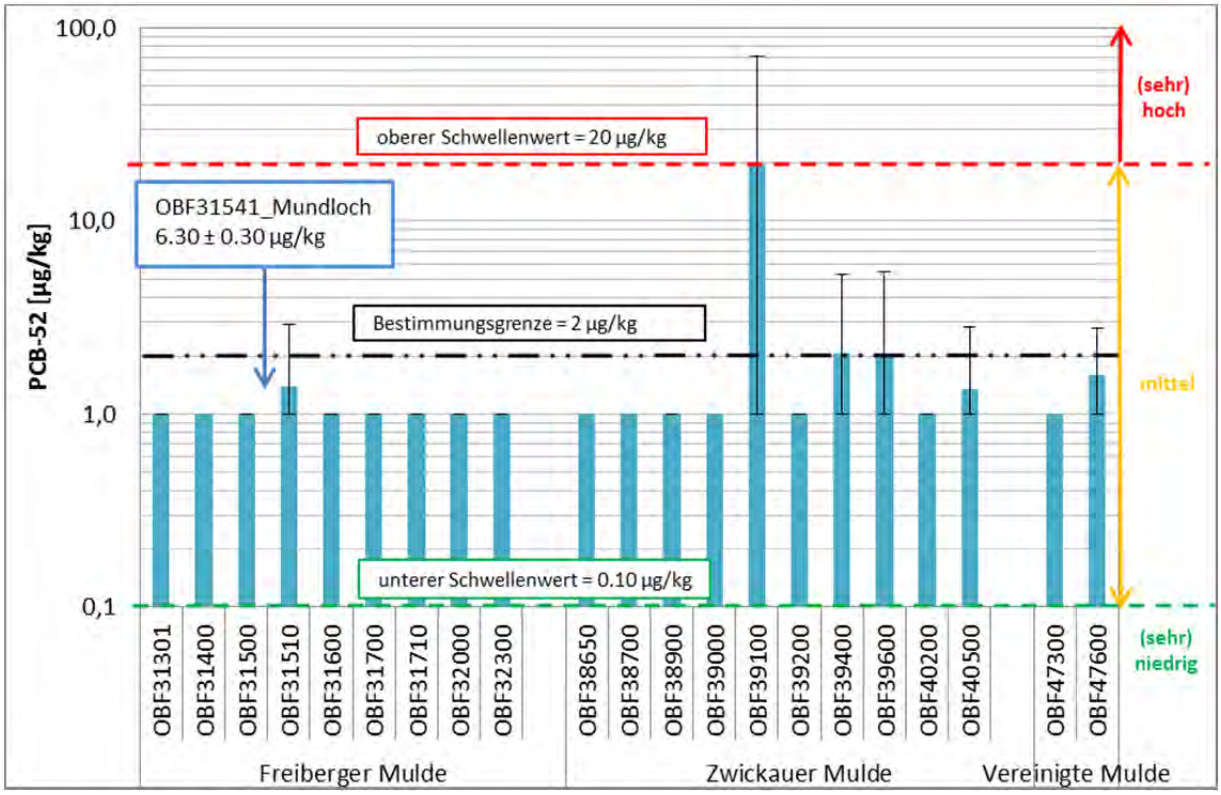
Anlage 99: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-153 und PCB-180 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



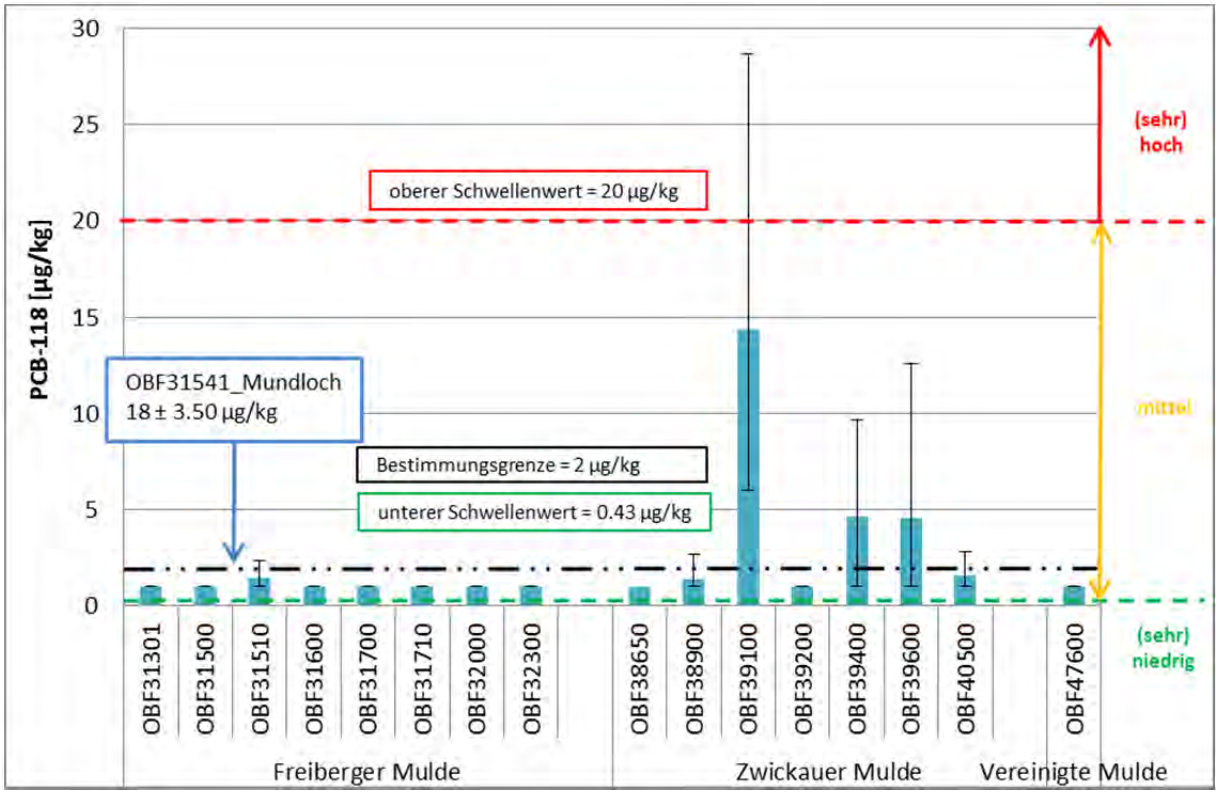


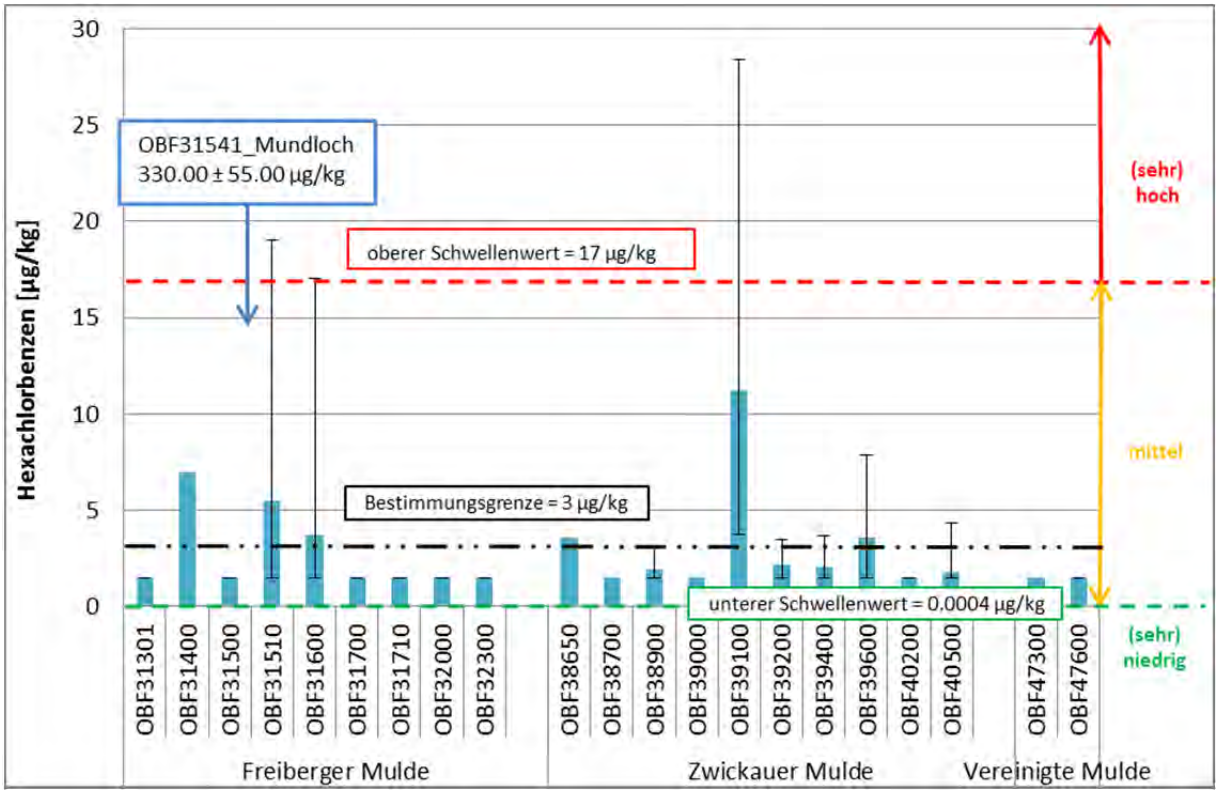
Anlage 100: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-28 und PCB-52 in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



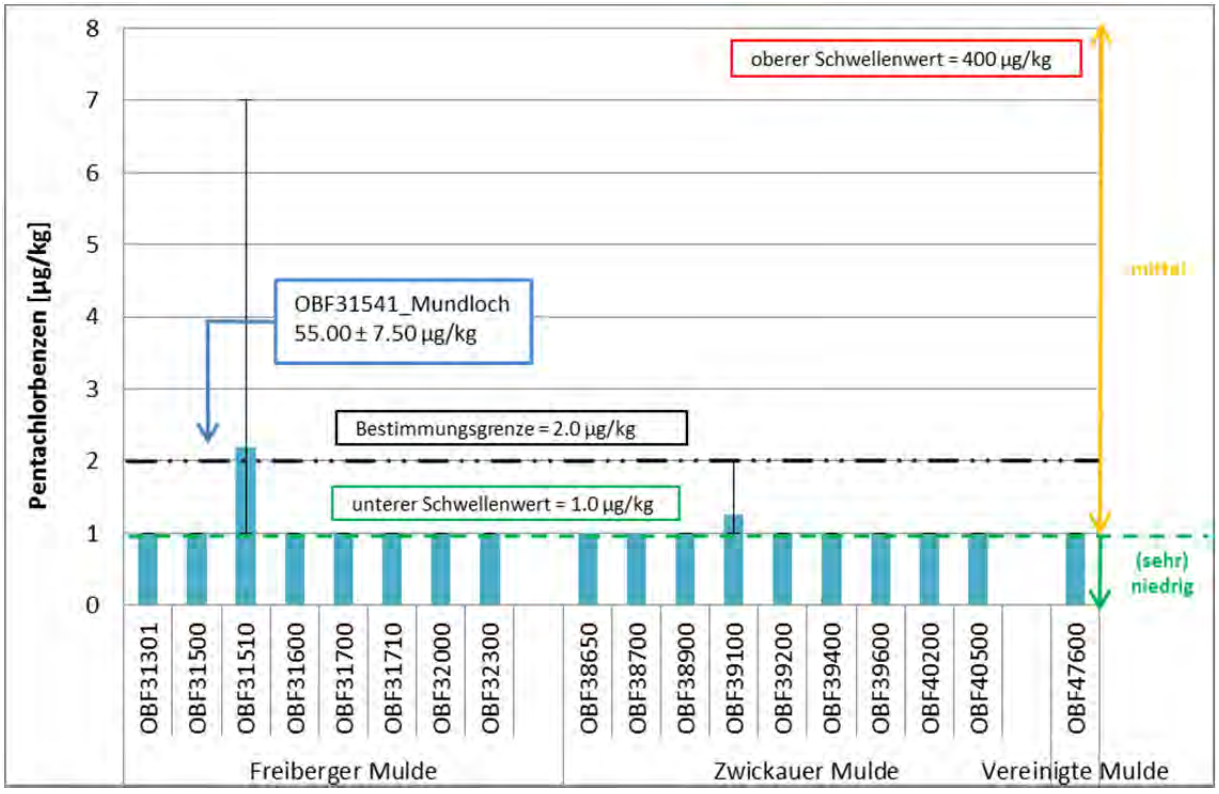


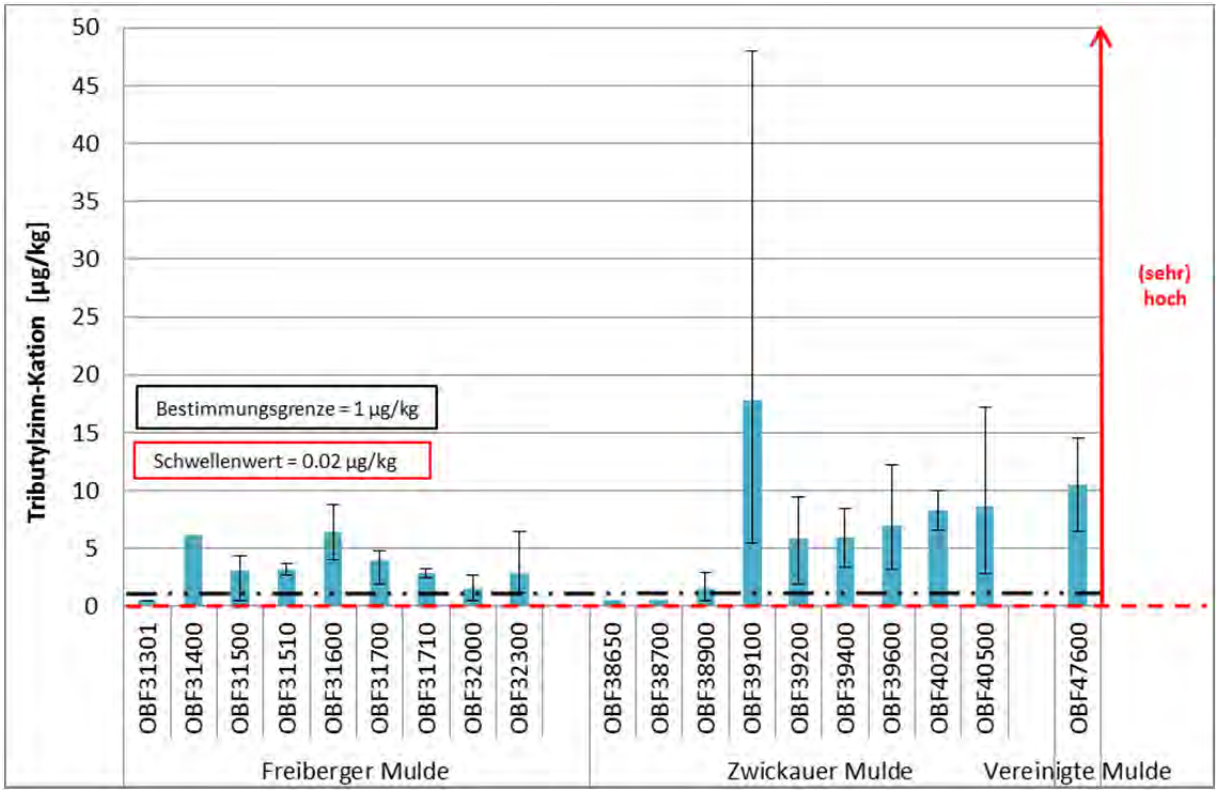
Anlage 101: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe PCB-118 und HCB in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG



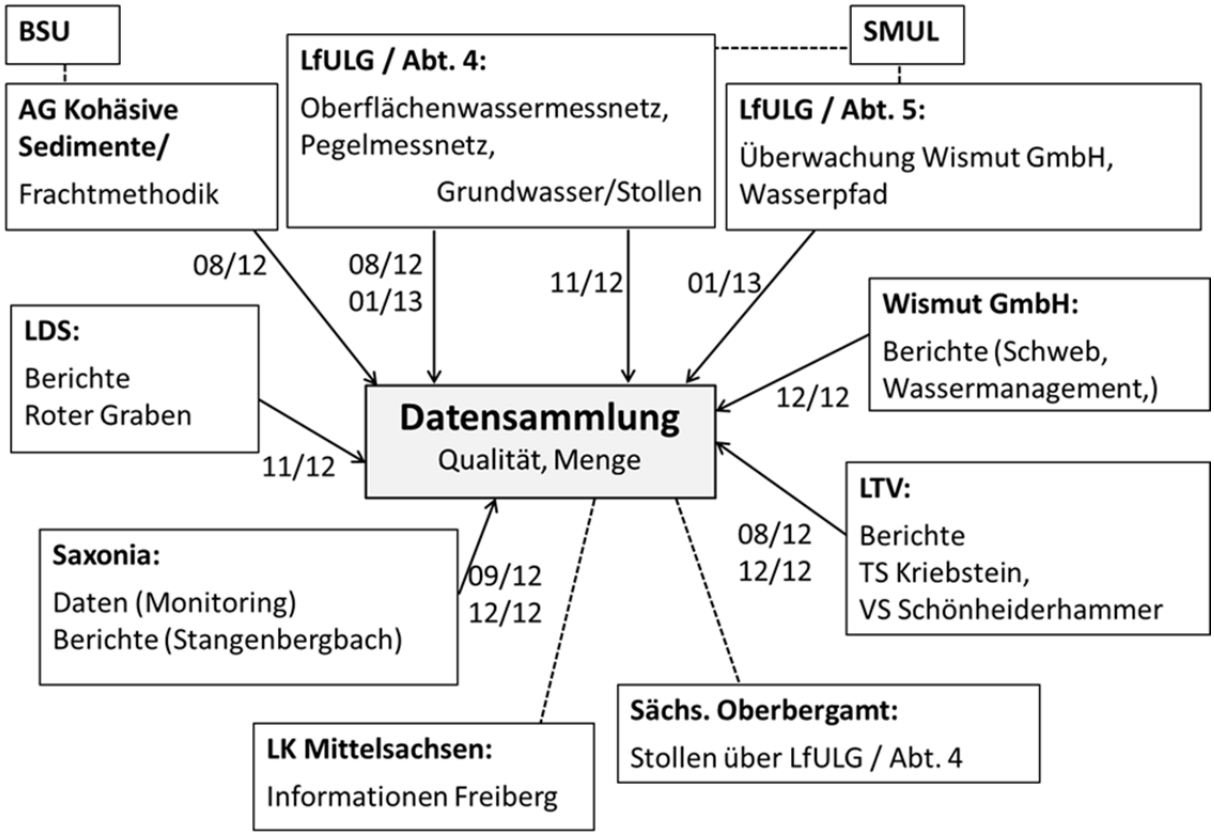


Anlage 102: Mittlere Gehalte und Schwankungsbreite der organischen Schadstoffe Pentachlorbenzen und TBT in Sedimenten der Mulde, Fraktion <2 mm, bezogen auf die an den Punkten jeweils verfügbaren Jahresmittelwerte mit Bezug zu den Schwellenwerten gemäß Schadstoff-/ Sedimentmanagementkonzept, Daten: LfULG





Anlage 103: Überblick über die beteiligten Institutionen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe, den zeitlichen Verlauf der Datenübergabe und die Menge der recherchierten Daten



Quelle	Charakteristik	Zeitraum	Format
LfULG/Abt. 4	715.950 Einzeldaten Oberflächenwassernetz der Mulde	1999-2011	Access
	50 punktbezogene Dateien Oberflächenwassernetz der Mulde - Altdaten	1996-1998	Excel
	35 punktbezogene Dateien Oberflächenwassernetz der Mulde - Altdaten	1991-1995	Excel
	11.630 Einzeldaten Grundwassermessnetz (Stollen)	2006-2011	Access
	25 punktbezogene Dateien aus dem Pegelmessnetz mit den mittleren Tagesdurchflussmengen	1927-2011	Excel
LfULG/Abt. 5	244.344 Einzeldaten ausgewählter Standorte Aue-Alberoda und Crossen der Wismut GmbH	1992-2012	Access
SAXONIA	20 punktbezogene Dateien der Messstellen, die aktuell noch im Monitoring-Programm sind	1993-2011	Excel
Wismut GmbH	Ergänzende Angaben zu den jährlichen Wassermengen an den Punktquellen der Standorte Aue-Alberoda und Crossen	1999-2011	Excel