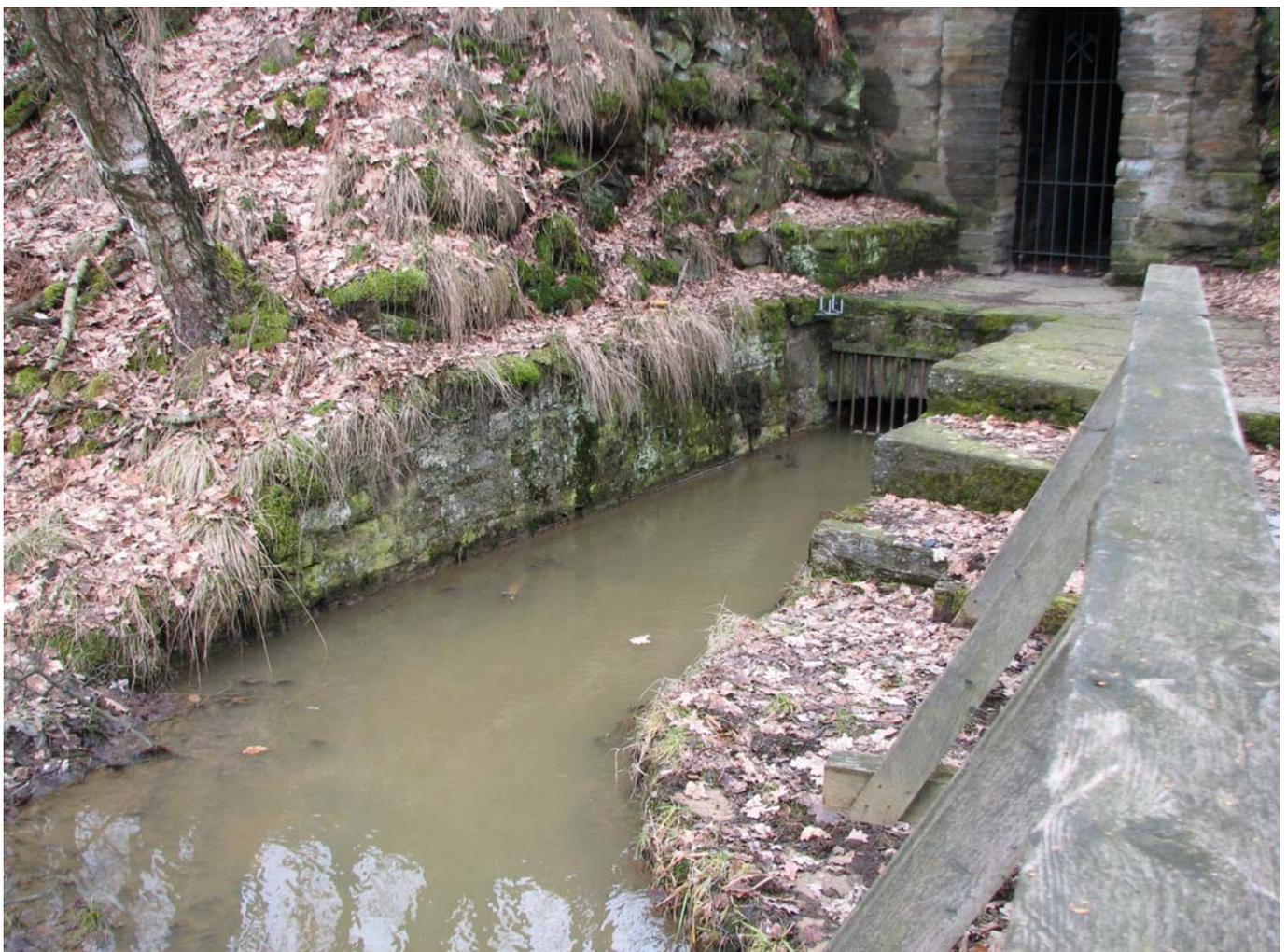


Bergbauschadstoffe

**Ursachenklärung und Maßnahmenplanung hinsichtlich technisch schwer
entfernbarer organischer oder anorganischer bergbaulicher Schadstoffe in
Oberflächen-Wasserkörpern vor dem Hintergrund der
Wasserrahmenrichtlinie**



Abschlussbericht zum Werkvertrag

„Ursachenklärung und Maßnahmenplanung hinsichtlich technisch schwer entfernbarer organischer oder anorganischer bergbaulicher Schadstoffe in Oberflächen-Wasserkörpern vor dem Hintergrund der Wasserrahmenrichtlinie“

Dipl.-Chem. Mirko Martin

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke

Bearbeitungszeitraum: 25.04.2016 – 30.04.2017

Inhaltsverzeichnis

1#	Hintergrund und Zielstellung	7#
2#	Anforderungen der WRRL und deren nationaler Umsetzung	8#
2.1#	Oberflächenwasser	8#
2.2#	Grundwasser	10#
2.3#	Orientierungswerte nach LAWA-RAKON	10#
2.3.1#	Sulfat	11#
2.3.2#	Eisen (Fe)	11#
3#	Technisch schwer entfernbare bergbauliche Schadstoffe	13#
3.1#	Überblick	13#
3.2#	Schwermetalle	14#
3.2.1#	Überblick über die Bergbauwässer	14#
3.2.2#	Schwermetallführung der (Metall-)Bergbauwässer	15#
3.2.3#	Schwermetallführung der Wässer des Kohle- sowie Steine- und Erden-Bergbaus	16#
3.2.4#	Verhalten der Schwermetalle im Grubenwasser	17#
3.3#	Bergbauchemikalien	18#
3.3.1#	Überblick	18#
3.3.2#	Recherche zu verfügbaren Analysenverfahren für potenzielle organische Bergbauschadstoffe	19#
3.4#	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	20#
3.4.1#	Überblick	20#
3.4.2#	Datenauswertung	21#
3.5#	Quecksilber	23#
3.6#	Sulfat	25#
3.6.1#	Sulfat als Komponente der Salzbelastung	25#
3.6.2#	Sulfat in den Bergbauwässern des Braunkohlentagebaus	25#
3.6.3#	Sulfat in den Stollnwässern des Erzgebirges	27#
3.7#	Fluorid	30#
4#	Bergbautypische Schadstoffkombinationen	31#
5#	OWK-Spezifische Betrachtung	32#
5.1#	OWK-Spezifische Zuordnung bergbautypischer Schadstoffkombinationen	32#
5.2#	Ansatz für eine Methodik zur Abgrenzung bergbaubeeinflusster OWK	37#
5.3#	Defizite	38#
6#	Maßnahmen und Verfahren	39#
6.1#	Charakterisierung der Maßnahmen und Verfahren hinsichtlich einzelner Komponenten	39#
6.2#	Charakterisierung der Maßnahmen und Verfahren hinsichtlich Schadstoffkombinationen	40#
6.2.1#	Schadstoffkombination Eisen - Sulfat	40#
6.2.2#	Schadstoffkombination Arsen - Uran	40#
6.2.3#	Wässer mit überwiegend Arsen	40#
6.2.4#	Schadstoffkombination Zink - Cadmium - (Nickel, Sulfat)	41#
6.2.5#	Schadstoffkombination Nickel (Zink - Cadmium)	41#

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fällungs-pH wichtiger Metalle aus verdünnten Lösungen (bezogen auf die Anforderungen gemäß Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift, aus Hartinger 1995)	17#
Abbildung 2: Median der Sulfatkonzentration im Längsprofil der Spree (Janneck et al. 2009)	26#
Abbildung 3: Forschungsansatz des INKA BB Teilprojektes 21	26#
Abbildung 4: Sulfatgehalt entlang der Freiburger Mulde (Mittelwerte 2015)	29#

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: UQN der OGewV (Auszug) unter Berücksichtigung der Neuregelungen	9#
Tabelle 2: Schwellenwerte der GrwV (Auszug der in dieser Studie betrachteten Parameter)	10#
Tabelle 3: Überblick über die in Sachsen relevanten Bergbausparten	13#
Tabelle 4: Überblick über die Bergbauwässer	14#
Tabelle 5: Charakterisierung von Bergbau und Erzaufbereitung am Beispiel der Lagerstätte Freiberg	15#
Tabelle 6: Charakterisierung der verschiedenen Typen von Resterzen	15#
Tabelle 7: Überblick über Stofffreisetzungen durch Kohle-, Steine- und Erdenbergbau	16#
Tabelle 8: Überblick über die ehemaligen Flotationsanlagen in Sachsen	18#
Tabelle 9: Überblick über die ehemals eingesetzten umweltrelevanten Flotationschemikalien	18#
Tabelle 10: Überblick über Analysenverfahren für Flotations-Sammler (Sihvonen 2012)	19#
Tabelle 11: Überblick über die 16 PAK gemäß EPA	20#
Tabelle 12: Auswertung der Stollnwasserdaten der BfUL hinsichtlich relevanter PAK	21#
Tabelle 13: Fließgewässer im EZG der Zwickauer Mulde mit Überschreitungen der UQN JD und ZHK (Datenbasis 2013-2015)	22#
Tabelle 14: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Stollnwässer des BfUL-Programms 2006-2015 (jeweils Mittelwert aus letztem Jahr, Angaben in mg/l)	27#
Tabelle 15: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Freiburger Mulde 2015 (Angaben in mg/l)	28#
Tabelle 16: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Freiburger Mulde 2015 (Angaben in mg/l)	30#
Tabelle 17: Statistische Auswertung der Fluoridgehalte der Fließgewässer mit Teil-EZG im Erzgebirge/Vogtland 2013-2015 (Angaben in mg/l)	30#
Tabelle 18: Schadstoffkombinationen mit Zuordnung zu den betreffenden Bergbausparten	31#
Tabelle 20: Zuordnung der recherchierten Bergbaubetriebe zu den OWK	32#
Tabelle 21: Verfahrensvergleich chemische, physikalische, biologische und naturnahe Prozesse und Bewertung	42#

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
EZG	Einzugsgebiet
GWK	Grundwasserkörper
HGW	Hintergrundwert
JD	Jahresdurchschnitt
Max	Maximum
Med	Median
Min	Minimum
MW	Mittelwert
n	Anzahl
OWK	Oberflächenwasserkörper
P90	90-Perzentil
SALKA	Sächsisches Altlastenkataster
UQN	Umweltqualitätsnorm
VwV	Verwaltungsvorschrift
ZHK	Zulässige Höchstkonzentration

1 Hintergrund und Zielstellung

In den Regionen mit aktivem Braunkohlenbergbau sowie in den Bergbaufolgelandschaften der Braunkohle ist der natürliche Wasserhaushalt stark beeinträchtigt. Nachteilige Auswirkungen sind großflächige und langfristige Veränderungen von Menge und Beschaffenheit sowohl des Grund- als auch des Oberflächenwassers der Bergbauregionen. Wesentliche Ursache ist die bergbaubedingte Grundwasserabsenkung und der damit verbundene Sauerstoffzutritt, der zur Verwitterung von Pyrit und anderen Sulfiden führt. Infolge dessen kommt es zu einer Versauerung der Kippen und zur Freisetzung großer Mengen an Sulfat, Eisen, Ammonium sowie weiteren Elementen wie Arsen, Aluminium und Mangan in die anstehenden Oberflächen- und Grundwasserkörper.

In den Wassergesetzen der EU und Deutschlands gibt es zwar für Sulfat und Eisen keine vorgegebenen Grenzwerte oder Qualitätsnormen, diese wirken sich jedoch bei Überschreitung bestimmter Konzentrationen negativ auf die aquatische Biozönose aus und ziehen je nach Konzentrationsniveau Nutzungseinschränkungen für Bergbaufolgeseeen, Fließgewässer und Grundwasser nach sich bis hin zu gravierenden ökologischen Auswirkungen insbesondere im Oberflächenwasser.

Neben den genannten Parametern gibt es weitere technisch schwer entfernbare bergbauliche Schadstoffe. Dies sind vor allem schwer abtrennbare Schwermetalle, insbesondere Cd und Ni. Daneben muss jedoch mit weiteren Schadstoffen gerechnet werden, die bisher nicht berücksichtigt wurden, z.B.:

- Fluorid
- Flotationsmittel (Xanthate, Styrolphosphonsäure, Ölsäure)
- PAK

Dabei sind sowohl der stillgelegte Bergbau und dessen Hinterlassenschaften als auch der aktive und künftig geplante zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund soll die Ursachenklärung und Maßnahmenplanung hinsichtlich dieser technisch schwer entfernbaren organischen oder anorganischen bergbaulichen Schadstoffe in Oberflächen-Wasserkörpern den Schwerpunkt der Studie bilden.

Hinsichtlich der Maßnahmenplanung liegt der Fokus auf innovativen Verfahren zur Abscheidung relevanter Schwermetalle bzw. organischer Verbindungen mit dem Zweck der Ableitung kostengünstiger Wasserreinigungsverfahren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Grundlage für die zielgerichtete und mengeneffiziente Anwendung von Gegenmaßnahmen bilden.

Darüber hinaus können die Rechercheergebnisse ggf. für die Schaffung der Voraussetzung einer Duldung erhöhter Gehalte bzw. zur Ableitung weniger strenger Umweltziele herangezogen werden.

Aus derzeitiger Sicht ist der wichtigste schwer entfernbare anorganische bergbauliche Schadstoff das Cadmium (prioritär gefährlicher Schadstoff, biologisch nicht abbaubar). Wesentlich ist wegen seiner Relevanz für die Trinkwassergewinnung auch Sulfat.

Aus Sicht der neuen OGewVO ergibt sich Handlungsbedarf insbesondere für Nickel (stark abgesenkte UQN 20 → 4 µg/l).

Alle drei sich daraus ergebenden Anforderungen machen innovative Ansätze zur Wasserreinigung nötig, da die konventionellen Verfahren ausgereizt bzw. zu teuer sind. Ansätze sind z.B. Membrantechnologien und Sorptionsverfahren.

2 Anforderungen der WRRL und deren nationaler Umsetzung

2.1 Oberflächenwasser

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die Anforderungen der EU-WRRL hinsichtlich relevanter organischer und anorganischer Schadstoffe.

Die im Jahr 2000 durch das Europäische Parlament verabschiedete Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (WRRL 2000) gibt die Rahmenbedingungen vor, um einen guten ökologischen und chemischen Zustand aller Gewässer Europas (Flüsse, Seen, Küstengewässer und Grundwasser) zu erreichen. Die Mitgliedsstaaten sind hierbei die Verpflichtung eingegangen, Oberflächenwasserkörper zu schützen, zu verbessern und zu sanieren, um bis 2015 diesen guten Zustand zu erreichen. Er wird durch biologische, hydromorphologische und chemisch-physikalische Qualitätskomponenten definiert.

In diesem Zusammenhang wurden in einer WRRL-Tochterraichtlinie Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik festgelegt. In Anhang X wurden 33 prioritäre Stoffe festgelegt, unter denen prioritäre gefährliche Stoffe besonders hervorgehoben werden, die toxisch, bioakkumulierend und persistent sind oder vergleichbaren Anlass zur Besorgnis geben. In diese letztgenannte Gruppe gehören neben Pestiziden auch Cadmium und Cadmiumverbindungen sowie Quecksilber und Quecksilberverbindungen. Die Einleitungen und Emissionen dieser Stoffe soll innerhalb der kommenden 20 Jahre weitgehend eingestellt werden, so dass sie langfristig nicht mehr in Gewässern und der Meeresumwelt auftreten.

Zur Umsetzung der EU WRRL für Sachsen wurde am 07.12.2004 die Sächsische Wasserrahmenrichtlinienverordnung (SächsWRRL-VO) erlassen: Diese wurde zwischenzeitlich durch die Oberflächengewässerverordnung abgelöst. Zusammen mit der Grundwasserverordnung legt sie die für Bewertungen erhobener Daten relevanten Umweltqualitätsnormen (UQN) fest. Die Einhaltung dieser Norm ist an Messstellen nachzuweisen, die die Belastungen der Oberflächenwasserkörper repräsentativ abbilden.

Für Sachsen galt nach Ablösung der SächsWRRLVO (2004) die „Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer“ vom 01.08.2010. Für Schwebstoffe bzw. schwebstoffbürtige Sedimente wurden für die Elemente As, Cr, Cu und Zn verbindliche Umweltqualitätsnormen (UQN) festgelegt. Weitere Normen sind für die Elemente Ag, Se, Tl, Ni und Pb sowie Cd und Hg enthalten

Änderungen im Entwurf der geänderten Oberflächengewässerverordnung

Am 12.08.2013 wurde die „RICHTLINIE 2013/39/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik“ verkündet. Diese Richtlinie wird im Entwurf der geänderten Oberflächengewässerverordnung, die am 20.06.2016 in Kraft trat, umgesetzt. Die im Rahmen dieser Studie relevanten Normen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: UQN der OGewV (Auszug) unter Berücksichtigung der Neuregelungen

Parameter	Wert	Einheit	Kompartiment	Bezug	Bemerkungen
UQN für flussgebietsspezifische Schadstoffe zur Beurteilung des ökologischen Zustands und des ökologischen Potenzials					
Arsen	40	mg/kg	Schweb/Sediment	JD	
Chrom	640	mg/kg	Schweb/Sediment	JD	
Kupfer	160	mg/kg	Schweb/Sediment	JD	
Zink	800	mg/kg	Schweb/Sediment	JD	
Selen	3	µg/l	gelöst	JD	
Silber	0,02	µg/l	gelöst	JD	
Thallium	0,2	µg/l	gelöst	JD	
UQN zur Beurteilung des chemischen Zustands – UQN prioritäre Stoffe					
Cadmium	≤0,08	µg/l	gelöst	JD	HKL 1 (<40 mg/l CaCO ₃)
	0,08	µg/l	gelöst	JD	HKL 2 (<50 mg/l CaCO ₃)
	0,09	µg/l	gelöst	JD	HKL 3 (<100 mg/l CaCO ₃)
	0,15	µg/l	gelöst	JD	HKL 4 (<200 mg/l CaCO ₃)
	0,25	µg/l	gelöst	JD	HKL 5 (≥200 mg/l CaCO ₃)
Cadmium	≤0,45	µg/l	gelöst	ZHK	HKL 1 (<40 mg/l CaCO ₃)
	0,45	µg/l	gelöst	ZHK	HKL 2 (<50 mg/l CaCO ₃)
	0,6	µg/l	gelöst	ZHK	HKL 3 (<100 mg/l CaCO ₃)
	0,9	µg/l	gelöst	ZHK	HKL 4 (<200 mg/l CaCO ₃)
	1,5	µg/l	gelöst	ZHK	HKL 5 (≥200 mg/l CaCO ₃)
Blei	1,2	µg/l	gelöst	JD	
	14	µg/l	gelöst	ZHK	
Quecksilber	0,07	µg/l	gelöst	ZHK	
Nickel	4	µg/l	gelöst	JD	
	34	µg/l	gelöst	ZHK	
Benzo(a)pyren	0,0017	µg/l	gesamt	JD	
	0,27	µg/l	gesamt	ZHK	
Benzo(b)fluoranthen	0,017	µg/l	gesamt	ZHK	
Benzo(k)fluoranthen	0,017	µg/l	gesamt	ZHK	
Benzo(ghi)perylen	0,0082	µg/l	gesamt	ZHK	

2.2 Grundwasser

OWK stehen gewöhnlich in Wechselwirkung mit dem Grundwasser. Daher können erhöhte Stoffkonzentrationen in GWK Auswirkungen auf das Oberflächenwasser haben. Die relevanten Schwellenwerte für das Grundwasser entsprechend GrWV sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Ein Schwellenwert ist die Konzentration eines Schadstoffes, einer Schadstoffgruppe oder der Wert eines Verschmutzungsindikators im Grundwasser, die zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt festgelegt wird (GrwV (2010)).

In Tabelle 2 werden die in der GrwV genannten Schwellenwerte aufgeführt.

Tabelle 2: Schwellenwerte der GrwV (Auszug der in dieser Studie betrachteten Parameter)

Parameter	Wert	Einheit	Bezug
Arsen	10	µg/l	MW
Cadmium	0,5	µg/l	MW
Blei	10	µg/l	MW
Quecksilber	0,2	µg/l	MW
Ammonium	0,5	mg/l	
Chlorid	250	mg/l	
Sulfat	240	mg/l	

Konkrete Werte für Organika werden in der GrwV nicht genannt.

Ein Schwellenwert gilt an einer Messstelle als eingehalten, wenn das arithmetische Mittel der im Zeitraum von einem Jahr gemessenen Konzentrationen an dieser Messstelle kleiner oder gleich dem Schwellenwert ist.

2.3 Orientierungswerte nach LAWA-RAKON

Durch den ständigen Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) wurde ein Arbeitspapier zu Hintergrund- und Orientierungswerten für physikalisch-chemische Qualitätskomponenten erarbeitet und 2015 veröffentlicht (LAWA-RAKON 2015), das nachfolgend kurz ausgewertet wird.

In dem Arbeitspapier wird hervorgehoben, **dass Orientierungswerte keine Grenzwerte oder Sanierungsziele sind**. „Unter einem Orientierungswert wird der Wert für einen physikalisch-chemischen Parameter verstanden, bei dessen Verletzung dieser Parameter eine Größenordnung annimmt, die in aller Regel keinen guten ökologischen Zustand des Gewässers mehr erlaubt, ohne dass es dazu noch eines weiteren Parameters mit Orientierungswertverletzung brauchen würde. Jeder physikalisch-chemische Parameter kann somit bei einer Verletzung seines Orientierungswertes zum limitierenden Faktor für die Zielerreichung werden. Ist der Orientierungswert dagegen eingehalten, bedeutet dies, dass der gute ökologische Zustand sehr wahrscheinlich nicht durch diesen Parameter verhindert wird. Der gute ökologische Zustand ist aber nur dann mit hinreichender Wahrscheinlichkeit gegeben, wenn

1. die Orientierungswerte aller allgemeinen physikalisch-chemischen Parameter eingehalten sind und
2. alle anderen Belastungen jedweder Art (stofflich, physikalisch, hydrologisch -hydraulisch, strukturell sowie hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit und Vernetzung) mindestens gering sind und
3. ein hinreichendes typspezifisches Besiedlungspotenzial vorhanden ist.“

Orientierungswerte in Bezug auf Fließgewässer werden angegeben für:

- Maximale Jahreswassertemperatur
- Sauerstoffgehalt
- Biochemischer Sauerstoffbedarf

- Salzgehalt (Chlorid und Sulfat)
- pH-Wert
- Eisen
- Ortho-Phosphat-P und Gesamtphosphor
- Ammonium-N und Ammoniak-N
- Nitrit-N

Von den genannten Parametern sind im Rahmen dieser Studie Sulfat und Eisen potenziell relevant.

2.3.1 Sulfat

In Fließgewässern treten sowohl natürlich als auch anthropogen erhöhte Konzentrationen auf. Ein natürlicher Sulfatgehalt wird verursacht durch

- den geogenen Hintergrund des Grundwassers, z.B. bei sulfathaltigen Nebengesteinen
- die Zersetzung organischen Materials
- atmosphärische Deposition.

Anthropogen erhöhte Sulfatgehalte werden u.a. verursacht durch

- Einleitungen aus Kläranlagen, industriellen oder landwirtschaftlichen Abwässern
- verkehrs- oder industriell bedingte luftgetragene Emissionen
- verstärkte Torfmineralisation im Einzugsgebiet aufgrund degradierender Moore

Besonders hohe anthropogene Sulfatbelastungen werden durch den Bergbau verursacht. Infolge des Bergbaus werden schwefelhaltige Mineralien dem Einfluss von Wasser und Luftsauerstoff ausgesetzt. Dadurch kommt es zu Oxidationsprozessen, in deren Folge Sulfid-Schwefel zu Sulfat-Schwefel oxidiert wird. Diese Prozesse werden durch schwefeloxidierende Bakterien stark beschleunigt. Aus überschüssigem Schwefel, z.B. im Pyrit FeS_2 , und Hydrolyse von Eisen(III)-Sulfaten wird Schwefelsäure gebildet, was zur Versauerung der Wässer führt (Acid Mine Drainage, AMD). Parallel werden durch die gebildete Schwefelsäure verschiedene Metalle aus dem Gestein herausgelöst, was zu weiteren Schadstoffbelastungen in Grund- und Oberflächenwässern führt.

In den Oberflächengewässern besteht die biozönotische Belastungswirkung erhöhter Sulfatkonzentrationen in erster Linie in eine Störung der Osmoregulation. Infolge dessen führt erhöhte Carbonathärte zu einer höheren Belastungstoleranz der aquatischen Organismen für Sulfat.

Als Orientierungswerte für Sulfat wurden im Mittelgebirge für silikatische Gewässertypen 75 mg/l und für karbonatische 220 mg/l festgelegt. Die erwartete höhere Empfindlichkeit silikatischer Gewässertypen gegenüber Sulfat konnte durch weitere Studien bestätigt werden.

- Im Tiefland wurde für die meisten Fließgewässertypen ein Orientierungswert von 200 mg/l festgelegt.
- Für silikatische und organische Fließgewässertypen spiegelt sich die größere Empfindlichkeit in einem Orientierungswert von 140 mg/l wider.
- Für basenarme organische Gewässer wurde der für Mittelgebirge abgeleitete Wert von 75 mg/l übernommen.

Naturgemäß kann ein Orientierungswert für Sulfat bei erhöhten Sulfatkonzentrationen nur dann angewandt werden, wenn diese anthropogen bedingt sind.

2.3.2 Eisen (Fe)

Da Eisen ein essentielles Spurenelement für Pflanzen und Tiere ist, tolerieren und regulieren Fließgewässerorganismen erhöhte Eisengehalte bis zu einem bestimmten Niveau. Bei zu hohen Eisenkonzentrationen kann die gesamte Lebensgemeinschaft auf verschiedene Art und Weise geschädigt werden:

- direkt schädigende Eisen(II)-Oxidationsprozesse an empfindlichen Organoberflächen (z.B. Kiemen)
- Beeinträchtigung des Lebensraums durch von Eisenerocker überzogene Oberflächen
- Beeinträchtigung des Sauerstoffhaushalts durch die Oxidation der Eisen(II)-Verbindungen (je mg zweiwertigen Eisens werden für die Oxidation 0,14 mg Sauerstoff verbraucht).

Typische Folgen höherer Eisenkonzentrationen sind zurückgehende Häufigkeiten und Artenvielfalt u. a. von Phytobenthos, Makrozoobenthos und Fischen.

Erhöhte Eisenkonzentrationen wirken sich auf den Phosphorhaushalt von Gewässern dahingehend aus, dass das als Pflanzennährstoff relevante Ortho-Phosphat adsorbiert bzw. ausgefällt wird, wodurch sich die trophischen Bedingungen verändern können.

Auf Grundlage von Projektergebnissen wurden seitens LAWA-RAKON für die Fließgewässertypgruppen im Mittelgebirge Orientierungswerte in Höhe von 0,7 mg/l Gesamteisen festgelegt, für die Tieflandgewässer ein Orientierungswert in Höhe von 1,8 mg/l Gesamteisen. Es gibt Hinweise, dass für bestimmte Gewässertypen niedrigere oder höhere Orientierungswerte angesetzt werden sollten, allerdings ist die Datenlage darüber nicht ausreichend.

3 Technisch schwer entfernbare bergbauliche Schadstoffe

3.1 Überblick

Der Terminus „schwer entfernbare Schadstoff“ ist nicht gesetzlich definiert und lässt sich in mehrere Richtungen interpretieren:

- aus verfahrenstechnischer Sicht schwer abtrennbare Stoffe, z.B. verschiedene Organika
 - Stoffe, bei denen die Erreichung von Grenzwerten bzw. UQN schwierig ist, z.B. Cadmium
 - Stoffe, die zwar technisch abgetrennt werden können, deren Entfernung aber hohe Kosten verursacht, z.B. Sulfat
- Im Rahmen dieser Studie wird der Terminus neben der technischen Machbarkeit insbesondere auf die Wirtschaftlichkeit bezogen.

Im Freistaat Sachsen sind folgende Bergbausparten relevant:

- Braunkohlenbergbau
- Steinkohlenbergbau
- Steine- und Erdenbergbau
- Kalkbergbau
- Spatbergbau (Flußspat, Schwerspat)
- Erzbergbau

In den Bergbausparten werden einerseits verschiedene Stoffe in den betrieblichen Abläufen eingesetzt und andererseits führt der Bergbau zur Freisetzung natürlich auftretender Komponenten aus Gesteinen und Vererzungen. Somit unterscheiden sich diese Stoffe wie folgt:

- Stoffe, die in den Bergbaubetrieb eingebracht werden (z.B. Chemikalien, Betriebsstoffe)
- Stoffe, die im Zuge des Bergbaubetriebs entstehen bzw. freigesetzt werden

Aus dieser Charakteristik ergibt sich, dass erstere vor allem während des Betriebes im Hinblick auf Schadstoffemissionen von Bedeutung sind, während letztere auch lange nach Beendigung des relevant sind (Grubenwässer, Sickerwässer). Bergbauchemikalien mit einer langfristigen Relevanz sind vor allem Flotationsmittel, die mit in die Tailings-Halden gelangen und von dort über Sickerwässer ausgetragen werden.

Einen Überblick über potenziell relevante Stoffe gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Überblick über die in Sachsen relevanten Bergbausparten

Bergbausparte	Betriebe	Wassertyp	relevante Schadstoffe (fett: schwer entfernbare)
Braunkohle aktiv	Tagebaubetrieb	Sümpfungswasser	Fe SO₄
	aktive Kippen	Sickerwasser	Fe SO₄
Braunkohle stillgelegt	stillgelegte Kippen	Sickerwasser	Fe, SO₄
	Grundwasseranstieg		Fe, SO₄

Bergbausparte	Betriebe	Wassertyp	relevante Schadstoffe (fett: schwer entfernbar)
Steinkohle stillgelegt	Halden	Sickerwasser	Cd, Ni, As
	Gruben	Grubenwasser	Cd, Ni, As, Zn, SO₄, U
Erzbergbau stillgelegt	Halden	Sickerwasser	Cd, Ni, As, Zn, SO₄, U
	IAA	Sickerwasser	Cd, Ni, As, Zn, SO₄, U, Fluorid Flotationsmittel
Spatbergbau stillgelegt	IAA	Sickerwasser	Fluorid Flotationsmittel
Spatbergbau aktiv	Gruben	Sümpfungswasser	Fluorid
Steine/Erden	Tagebaubetrieb	Sümpfungswasser	Cd, Ni
	Halden	Sickerwasser	Cd, Ni

Der Kenntnisstand über die Bergbauschadstoffe ist sehr unterschiedlich. Daher wird nachfolgend eine Charakterisierung dieser Stoffe bzw. Stoffgruppen sowie eine Einschätzung derer Relevanz für die OWK in Sachsen vorgenommen.

3.2 Schwermetalle

3.2.1 Überblick über die Bergbauwässer

Bergbauwässer fallen sowohl im aktiven Bergbau als auch im passiven an. **Tabelle 4** gibt einen Überblick.

Tabelle 4: Überblick über die Bergbauwässer

Bergbausparte	Betriebe	Wassertyp
Aktiver Bergbau		
Übertägiger Bergbau	Tagebaubetrieb	Sümpfungswasser
	aktive Kippen / Halden	Sickerwasser
Untertägiger Bergbau	Grubenbetrieb	Wasserhaltungswasser
	Halden	Sickerwasser
	Aufbereitung	Abwasser
	IAA	Sickerwasser
Stillgelegter Bergbau		
Übertägiger Bergbau	stillgelegte Kippen / Halden	Sickerwasser
	Grundwasseranstieg	Sickerwasser
Untertägiger Bergbau	Gruben	Grubenwasser, Stollenwasser
	Halden	Sickerwasser
	IAA	Sickerwasser

Es sei darauf hingewiesen, dass es zwischen diesen generellen Kategorien viele Querbeziehungen sowie auch weitere Einflussfaktoren gibt. So können Sümpfungswässer des aktiven Tagebaus durch Sickerwässer stillgelegter Kippen und Grubenwässer des stillgelegten Untertage-Bergbaus durch Haldensickerwässer oder sogar solche aus industriellen Altlasten beeinflusst werden.

3.2.2 Schwermetallführung der (Metall-)Bergbauwässer

Schwermetallausträge aus dem Bergbau rühren hauptsächlich von der Oxidation von Sulfiden her, vor allem wenn diese durch Bergbauaktivitäten der Einwirkung von Luft und Wasser zugänglich werden. Diese können entweder angereichert in einer Erzlagerstätte oder dispers im Nebengestein vorkommen. Letzteres betrifft z.B. Pyrit im Deckgebirge des Braunkohlenbergbaus oder feindisperse Sulfide in Gesteinen. Des Weiteren enthalten die Sulfide Nebenkomponenten, die zu Schwermetallausträgen beitragen können.

In Erzlagerstätten, die vom Bergbau aufgeschlossen wurden, spielen Reste der Erze für die Schwermetallfreisetzung eine besonders große Rolle. In Tabelle 5 wird dies am Beispiel der Lagerstätte Freiberg näher erläutert.

Tabelle 5: Charakterisierung von Bergbau und Erzaufbereitung am Beispiel der Lagerstätte Freiberg

Die Freiburger Ganglagerstätte enthält an Massenerzen die Sulfide	
■	Pyrit
■	Arsenopyrit
■	Galenit
■	Sphalerit mit ca. 0,6 % Cd
Diese Erze waren Ziel des Bergbaus und wurden untertage abgebaut, zur Oberfläche gefördert, dort aufbereitet (Gewinnung von Konzentraten von Sphalerit, Galenit, Pyrit und Arsenopyrit) und nachfolgend verhüttet. Alle diese Prozesse verliefen nicht mit 100 % iger Effizienz:	
■	Bei der bergmännischen Gewinnung in der Zeit vor 1913 erfolgte ein selektiver Abbau der damals nutzbaren Erze: Erze mit einem Mindest-Silbergehalt (geschätzt 0,04 %), bleireiche Erze sowie Zinkblende-Reicherz. Alle anderen Erze wurden nicht abgebaut und verblieben in der Lagerstätte.
■	In der Zeit ab 1945 erfolgte der Abbau nur, wenn die Erzgänge Mindestparameter erreichten: Mindestmächtigkeit 30 cm, Minimalgehalte von 2,3 % Pb und 2,7 % Zn. Gangpartien unterhalb dieser Minestanforderungen verblieben in der Grube.
■	In der Erzaufbereitung nach 1937 wurden Ausbringen von 80-92 % bei Pb, 66-85 % bei Zn und 40-60 % bei S erzielt. Das bedeutet, dass zeitweise 1/5 des Bleis, 1/3 des Zinks und mehr als die Hälfte des Schwefels in die Aufbereitungsabgänge gelangten.

Die genannte begrenzte Effizienz der Prozesse führt somit dazu, dass sowohl in der Grube als auch auf den Halden große Mengen Resterze verblieben, die bei Kontakt mit Sauerstoff du Wasser oxidiert werden und so Schwermetalle freisetzen können.

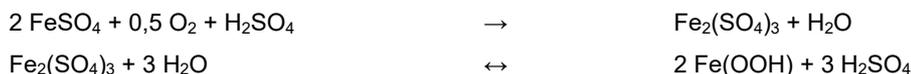
Tabelle 6: Charakterisierung der verschiedenen Typen von Resterzen

Resterztyp	Charakteristik
nicht abgebaut	<ul style="list-style-type: none"> – von Grubenbauen angeschnittene, aber nicht abgebaute Gangbereiche – Erzinhalt vollständig im Gang verblieben
Versatz	<ul style="list-style-type: none"> – von Grubenbauen angeschnittene Gangbereiche – Erze und Bereiche des Nebengesteins abgebaut – Abbauraum wieder verfüllt – große Resterzmengen im Versatz
Bergehalde	<ul style="list-style-type: none"> – über Tage aufgehaldet – grobkörniges Material aus Vortrieb und Abbau – Nebengesteinsfragmente – wechselnde Resterzmengen – infolge der Feinkörnigkeit und exponierten Lage der Verwitterung zugänglich – Sickerwässer gelangen unter Tage und führen zur Belastung der Grubenwässer
Spülhalde (Tailings)	<ul style="list-style-type: none"> – über Tage aufgehaldet – feinkörniges Material aus der Erzaufbereitung – wechselnde Mengen Resterz, abhängig von Effizienz der Aufbereitung
Hüttenindustrie -Altstandorte	<ul style="list-style-type: none"> – über Tage – Bodenverunreinigungen im Zuge des Hüttenbetriebs – dadurch Belastung des Grundwassers – Übertritt von Schwermetallen in die Grubenwässer
Hüttenindustrie - Schlacken- und Rückstandshalden	<ul style="list-style-type: none"> – über Tage aufgehaldet – variable Korngröße – infolge Verarbeitung von Fremderzen Elementspektrum nicht auf den Inhalt der Lagerstätte beschränkt

Unter atmosphärischen Bedingungen sind die Sulfide nicht stabil und werden oxidiert. Die wichtigsten Prozesse sind dabei:



Die letzten beiden Reaktionen verlaufen unter primärer Säurebildung. Im Weiteren bewirkt die Oxidation und anschließende Hydrolyse der Fe(III)-Verbindungen zusätzliche Säurefreisetzung unter Abscheidung schwer löslicher Eisenverbindungen:



Diese Prozesse führen zur Entstehung der typischen sauren und an gelöstem Eisen armen Sicker- und Grubenwässer. In der Folge können die sauren Wässer weitere geochemische Prozesse induzieren, z.B. die Mobilisierung von Aluminium aus Feldspat oder Eisen aus Glimmern.

Sowohl die Sulfidoxidation als auch die Oxidation Fe(II) → Fe(III) werden durch Mikroben (z.B. „Thiobacillus ferrooxidans“) extrem, bis zum Mehrtausendfachen, beschleunigt. Voraussetzung ist die Anwesenheit von Sauerstoff und Wasser.

3.2.3 Schwermetallführung der Wässer des Kohle- sowie Steine- und Erden-Bergbaus

Der umfangreichste Bergbau findet in Sachsen gegenwärtig auf Steine und Erden sowie Braunkohle statt. Historisch war darüber hinaus noch der Abbau von Steinkohle wesentlich. Diese Rohstoffe enthalten nur relativ geringe Mengen sulfidischer Minerale.

Große geförderte Materialmengen, Schüttung umfangreicher Halden und Kippen, große freiliegende Gesteinsflächen in den Tagebauen sowie Klüftigkeit (Festgestein) bzw. Porosität des Materials (Sand, Kies, Deckgebirge) führen jedoch dazu, dass signifikante Mengen Sulfide Luft und Wasser ausgesetzt werden. Diese werden oxidiert und die als Spurenelemente enthaltenen Schwermetalle freigesetzt. Dies betrifft z.B. Ni in Pyrrhotin (enthalten in Grauwacke und Diabas) und Zn/Cd im Nebengestein der Steinkohlenlagerstätten.

Die Oxidation von Pyrit, der dem Deckgebirge der Braunkohlenlagerstätten beibegemeint ist, führt zur Freisetzung großer Mengen an Sulfat und Fe. Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 2.3 und 3.6. Neben diesen beiden Komponenten werden jedoch auch Schwermetalle, z.B. Zn und Cd, die in Spuren enthalten sind, freigesetzt.

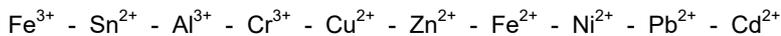
Tabelle 7: Überblick über Stofffreisetzungen durch Kohle-, Steine- und Erdenbergbau

Bergbauparte	typische freigesetzte Schwermetalle/Schadstoffe	Typische Beispiele	Weiterführende Angaben
Steinkohle (Zwickau, Oelsnitz, Freital)	Cd, Zn, Sulfat	Hegebach (DESN_54162)	-
Grauwacke (z.B. Lausitz)	Ni, Cd, Sulfat	Vincenzgraben (DESN_538134)	Glombitza 2016
Braunkohle (z.B. Lausitz)	Cd., Ni, Sulfat	Struga (DESN_582512)	Martin 2013
Kies/Sand	Cd	Pösgraben (DESN_566866)	Martin 2015

3.2.4 Verhalten der Schwermetalle im Grubenwasser

Nach der Oxidation der Sulfide gelangen die Schwermetalle in die Grubenwässer und verhalten sich dort gemäß ihrer geochemischen Charakteristik. Dieses Verhalten wird vor allem von pH und Redoxpotential des Wassers bestimmt. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über das Fällungsverhalten wichtiger Metalle anhand von Erfahrungen aus der Abwasserbehandlung.

Betrachtet man nur die Hydroxidfällung, so ergibt sich daraus folgende Fällungsreihe:



Infolge der sehr geringen Löslichkeit seines Sulfats ergibt sich bei Blei eine starke Verringerung der Mobilität. Bei Zink steht die Eigenschaft „Schadstoff“ nicht im Vordergrund, allerdings hat es wegen seiner höheren Konzentrationen eine Indikatorfunktion für Schwermetalle in den Wässern.

Aus den vorhergehenden Darlegungen ergibt sich, dass Zn, Fe(II), Ni und Cd die am schwersten entfernbaren Schwermetalle der Bergbauwässer unter natürlichen Bedingungen und bei der Wasseraufbereitung sind (Abbildung 1). Im Falle von Fe(II) wird dies allerdings durch die sehr leichte Oxidierbarkeit zu Fe(III) relativiert, da letzteres leicht abtrennbar ist.

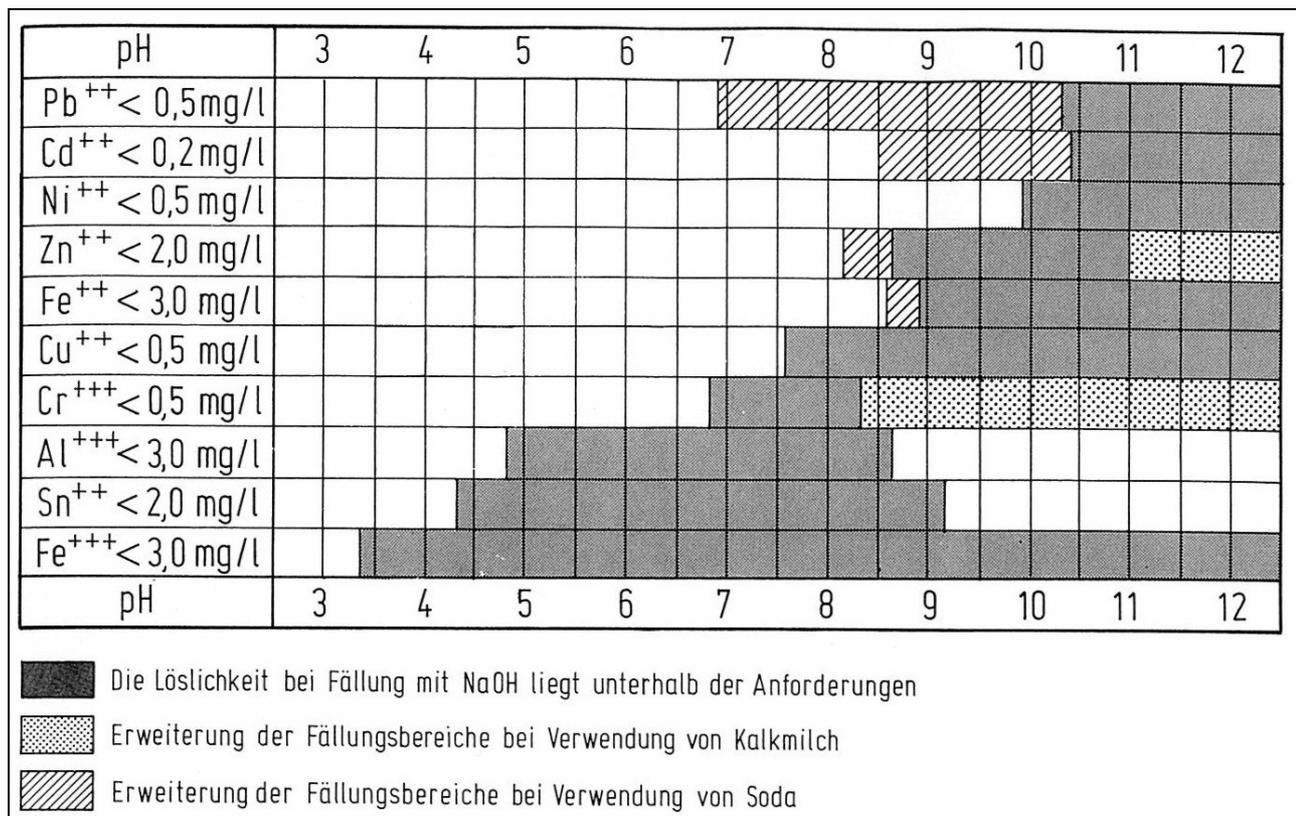


Abbildung 1: Fällungs-pH wichtiger Metalle aus verdünnten Lösungen (bezogen auf die Anforderungen gemäß Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift, aus Hartinger 1995)

Die vorangegangenen hydrogeochemischen Betrachtungen verdeutlichen, warum Cadmium ein so problematischer Schadstoff ist. Seine enge Bindung an Vererzungen machen es zum typischen und problematischsten Bergbauschadstoff.

Hydrogeochemie und Verfahren zur Abtrennung des Cadmiums aus Wässern wurden in Martin&Janneck (2010) ausführlich dargestellt.

Aus den Betrachtungen wird jedoch ebenfalls deutlich, dass Nickel ähnlich schwer aus Wässern abtrennbar ist. Die Absenkung von UQN für Nickel, wie in der neuen OGewV (2016) von 20 auf 4 µg/l, führt zu einer Steigerung der Bedeutung des Nickels als Schadstoff. Es ist zum einen ebenfalls eng an Vererzungen gebunden, findet sich aber zum anderen auch in Gesteinen, wie Granodiorit oder Diabas in geogen erhöhten Gehalten. Dies führt zur Freisetzung von nickel nicht nur in Verbindung mit dem Erzbergbau wie im Falle des Cadmiums, sondern auch im Zuge des Steine- und Erdenbergbaus. Anhaltspunkte dafür fanden sich in den Studien zu geogenen Hintergrundkonzentrationen in den EZG Schwarze Elster-Spree und Weiße Elster (Martin 2013 und Martin 2015)

3.3 Bergbauchemikalien

3.3.1 Überblick

Bergbauchemikalien sind chemische Verbindungen, die in Bergbau und Aufbereitung für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Die größten Mengen werden dabei in der Aufbereitung von Erzen und Industrieminerale eingesetzt, vor allem in der Flotation. Die Stoffe werden teilweise an der Oberfläche von Erz- und Gangartmineralen adsorbiert und verändern deren Oberflächeneigenschaften. Dies ermöglicht die Anreicherung der Wertkomponenten durch Flotation.

Bei der Flotation wird die Oberfläche der Wertminerale (z.B. Sulfide, Flußspat) durch Sorption organischer Substanzen hydrophobiert. Parallel wird ein Schäumer zugegeben und Luft eingeleitet, wobei ein Schaum entsteht. An diesen Schaum lagern sich die hydrophobierten Partikel an, schwimmen auf und werden abgetrennt.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die im Gebiet von Sachsen ehemals betriebenen Flotationsanlagen.

Tabelle 8: Überblick über die ehemaligen Flotationsanlagen in Sachsen

Aufbereitungsanlage	Ort	Produkte	Tailings-Halden
Aufbereitung Davidschacht	Freiberg	Blei-Konzentrat (Galenit) Zink-Konzentrat (Sphalerit) Arsenkonzentrat (Arsenopyrit) Schwefelkonzentrat (Pyrit)	Spülhalde Davidschacht Spülhalde Hammerberg
Aufbereitung Beihilfe	Halsbrücke	Blei-Konzentrat (Galenit) Zink-Konzentrat (Sphalerit)	Spülhalde Beihilfe Spülhalde Isaak Spülhalde Münzbachtal
Aufbereitung Sauberg	Ehrenfriedersdorf	Zinnkonzentrat (Kassiterit) Arsenkonzentrat (Arsenopyrit)	Spülhalde 1 Spülhalde 2
Aufbereitung Zinnerz Altenberg	Altenberg	Zinnkonzentrat (Kassiterit)	Spülhalde Schwarzwassertal Spülhalde Tiefenbach Spülhalde Bielatal
Zentralaufbereitung Lengenfeld	Lengenfeld	Flußspat-Konzentrat (Fluorit) Schwerspat-Konzentrat (Baryt)	IAA Lengenfeld

In den Anlagen wurden verschiedene Reagenzien eingesetzt, einen Überblick gibt Tabelle 9

Tabelle 9: Überblick über die ehemals eingesetzten umweltrelevanten Flotationschemikalien

Aufbereitungsanlage	Ort	Eingesetzte Chemikalien
Aufbereitung Davidschacht	Freiberg	Na- und K-Xanthogenate, Butylxanthogenat
Aufbereitung Beihilfe	Halsbrücke	Na- und K-Xanthogenate, Butylxanthogenat
Aufbereitung Sauberg	Ehrenfriedersdorf	Xanthogenate (Sulfidflotation)
Aufbereitung Zinnerz Altenberg	Altenberg	bis 1973: - Toluol- <i>o</i> -Arsonsäure (Sammler in Kassiteritflotation) - Xylenol (Schäumer) ab 1973: - Styrolphosphonsäure (Sammler in Kassiteritflotation) - Oktandiol (Schäumer) - Natriumsilikofluorid (Regler in Kassiteritflotation) - Xanthogenate (Sammler in Sulfidflotation)
Zentralaufbereitung Lengenfeld	Lengenfeld	- Olein (\approx Ölsäure) (Sammler in Fluorit- und Barytflotation) - Xanthogenat (Sammler in Sulfidflotation) - Oktandiol (Schäumer) - Quebracho (Drücker für Carbonate)

Der Kenntnisstand zum Verhalten dieser Chemikalien in der Umwelt ist als sehr gering einzuschätzen. Aus diesem Grunde ist eine Bewertung der Ökotoxikologie relevanter Verbindungen notwendig, z.B. in einer Studie des Umweltbundesamtes.

3.3.2 Recherche zu verfügbaren Analyseverfahren für potenzielle organische Bergbauschadstoffe

Während die Analytik für PAK etabliert und standardisiert (z.B. DIN 38407-39 (2011) und DIN EN ISO 17993 (2004)) ist und in der Umweltüberwachung weitläufig angewandt wird, befindet sich die Analytik organischer Bergbauschadstoffe überwiegend in der Labor-Erprobung und ist eher auf Aspekte der Prozesssteuerung in den Flotationsanlagen als auf Umweltaspekte ausgerichtet. **Tabelle 10** gibt einen Überblick dazu.

Analysenverfahren wie UV/VIS-Spektrometrie, Titration oder FTIR-Spektrometrie ermöglichen die Bestimmung von Stoffgruppen in Form von Summenparametern. Die Bestimmung einzelner Stoffe ist durch chromatographische Methoden möglich.

Tabelle 10: Überblick über Analyseverfahren für Flotations-Sammler (Sihvonen 2012)

Verfahren	Analyte	Probenvorbereitung	Analysenzeit (min)	Detection	Empfindlichkeit (mg/l)	
HPLC und Umkehrphasen-HPLC	Xanthate	Derivatisierung	10-20	UV	0,005	parallele Bestimmung vieler Verbindungen gleichzeitig möglich Derivatisierung führt zu komplexeren Matrices
Ionen-Wechselwirkungs-HPLC	Xanthate + Oxidationsprodukte, DTP und DTPI	Filtration	8-16	UV	0,017 - 0,1	parallele Bestimmung vieler Verbindungen gleichzeitig möglich
Kapillarzonen-Elektrophorese	Xanthate	Filtration	15	UV	0,01 - 0,04	parallele Bestimmung vieler Verbindungen gleichzeitig möglich
Voltammetrie	Ethylxanthat, Diethyl-DTP, Diphenyl-DTP	N ₂ -Spülung, pH-Anpassung	10	-	0,002	Messung ist schnell, Probenvorbereitung ist Zeitaufwendig, ergibt Summe der enthaltenen Verbindungen
Xanthat selektive Elektrode	Xanthate	keine	-	-	1,58	schnell, keine Probenvorbereitung, verschiedene Elektroden für verschiedene Komponenten notwendig
UV/VIS-Spektrophotometrie	alle	Entfernung UV-absorbierender Partikel	0,5	-	0,2	schnell, ergibt Summe der enthaltenen Verbindungen

Einen Überblick über die Literatur zur Analytik von Flotationschemikalien findet sich in Anlage 2. Die Analytik solcher Verbindungen im Ultra-Spurenbereich, wie sie für die Umweltüberwachung notwendig ist, ist nicht Stand der Technik und erfordert weitergehende Methodenentwicklungen.

3.4 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

3.4.1 Überblick

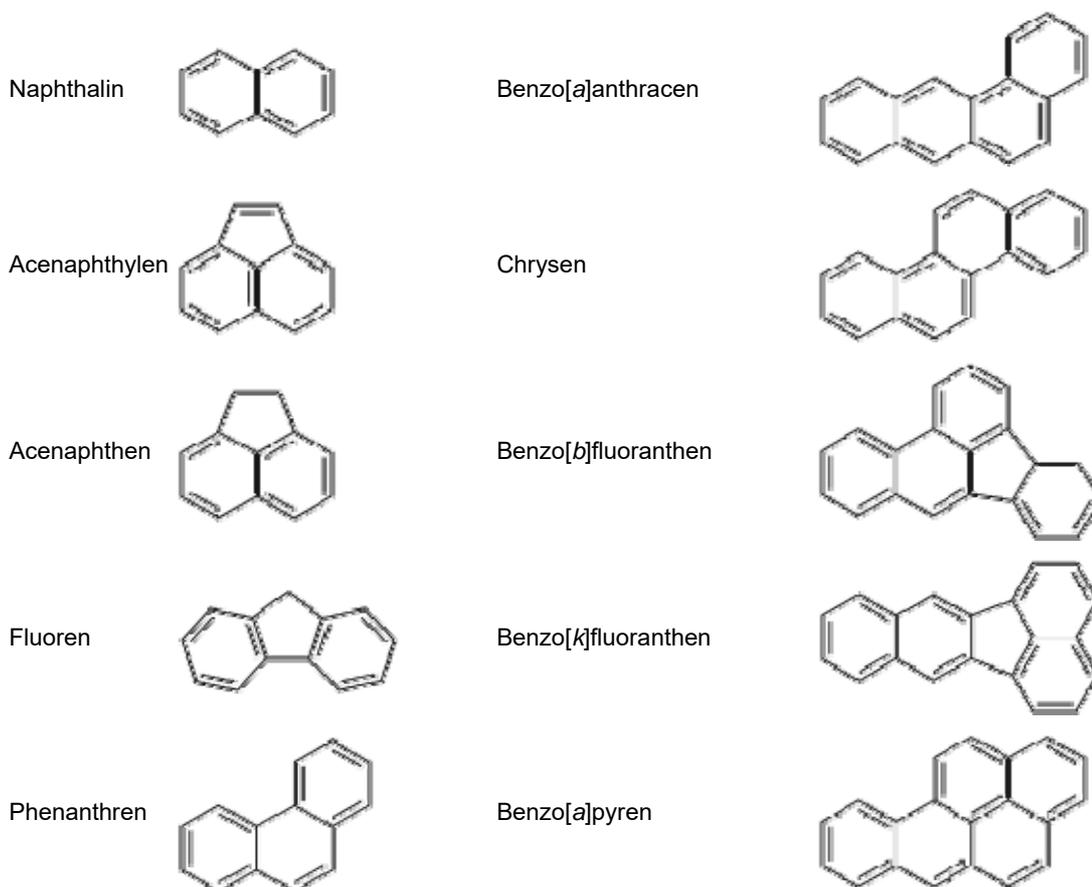
Im Zuge der Datenauswertungen zu den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen für Sachsen war seitens des LfULG festgestellt worden, dass in den Fließgewässern häufig Überschreitungen der UQN bei Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) auftreten. Da diese Stoffe potenziell einen Bergbaubezug haben könnten, sollte im Rahmen der aktuellen Studie geprüft werden, ob die PAK als „Bergbauschadstoffe“ anzusehen sind.

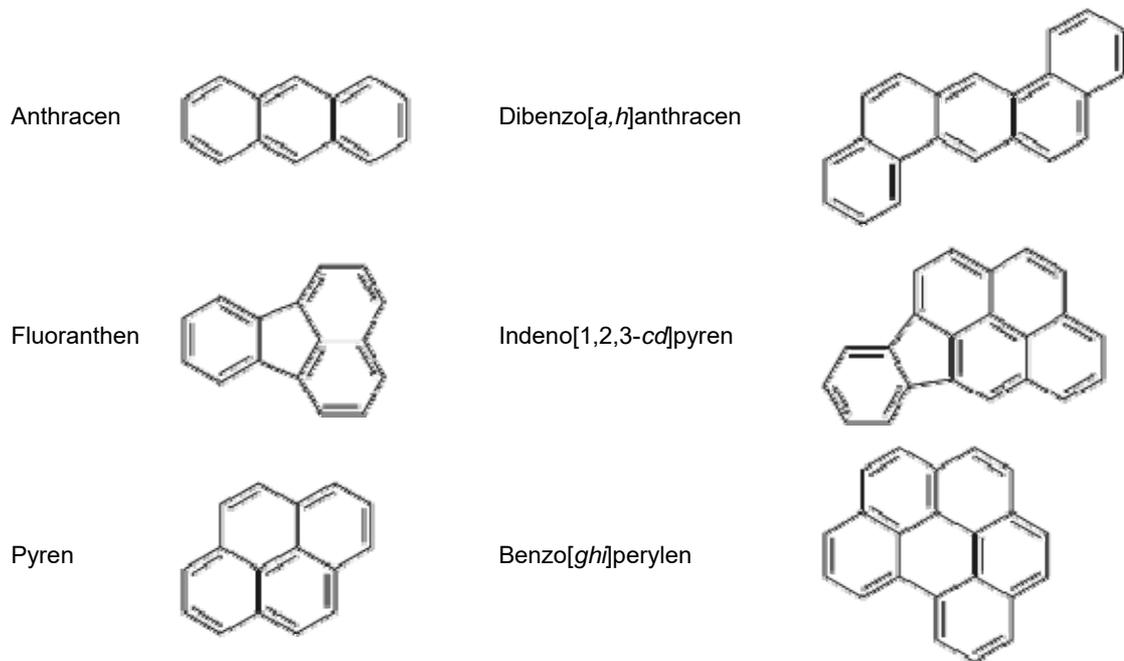
PAK sind organische Verbindungen, die aus zwei bis sieben Ringen von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebaut sind. Das Ringsystem führt zu einer speziellen Anordnung der Elektronen, die in der Chemie „aromatisch“ genannt wird und die für die besonderen chemischen Eigenschaften dieser Stoffgruppe verantwortlich ist.

Die Ringsysteme können statt der Wasserstoffatome verschiedene Seitenketten tragen. Deshalb ist diese Stoffgruppe sehr groß und umfasst geschätzte 10.000 Verbindungen. Die einfachste solche Verbindung ist Naphthalin, bei dem zwei Benzolringe über eine gemeinsame Bindung anelliert sind („kondensierte Ringsysteme“). Die einzelnen Verbindungen haben häufig sehr ähnliche Eigenschaften. PAK treten auf Grund der Art ihrer Entstehung fast immer als Gemische auf. PAK sind bei Raumtemperatur fest und die Eigenschaften der einzelnen PAK hängen von der Zahl der Kohlenwasserstoff-Ringe ab: Allgemein sind PAK lipophil, das bedeutet in Wasser schlecht, aber in Fetten oder Ölen gut löslich. Mit zunehmender Zahl von Ringen nimmt diese Tendenz zu, d.h. je mehr Ringe vorhanden sind desto fettlöslicher ist die Substanz und desto besser reichert sie sich im Fettgewebe von Organismen an (UBA (2016)).

Um zu einer Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen und Bewertungen zu kommen, wurden durch die amerikanische Bundesumweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) aus der Vielzahl von PAK-Einzelverbindungen 16 Substanzen in die Liste der „Priority Pollutants“ aufgenommen. Diese sind in **Tabelle 11** aufgeführt.

Tabelle 11: Überblick über die 16 PAK gemäß EPA





PAK entstehen überwiegend durch anthropogene Prozesse, vor allem bei der Pyrolyse organischen Materials. Dies betrifft insbesondere die Herstellung von Koks und Gas aus Steinkohle (Gaswerke, Kokereien) sowie Feuerungen. Damit ergibt sich, dass Quellen für PAK auch Altstandorte sein können, vor allem Standorte ehemaliger Gaswerke, die in fast jedem größeren Ort vorhanden waren. Bei der Sanierung solcher Standorte können kurzzeitig erhöhte PAK-Austräge vorkommen.

Gemäß UBA (2016) gelangen PAK aus Kläranlagen und vielen diffusen Quellen in die Fließgewässer. Gemäß Untersuchungen durch das Umweltbundesamt (Fuchs et al. 2010) haben die atmosphärischen Einträge die größte Bedeutung. Neben der direkten Ablagerung auf Gewässeroberflächen werden auch Ablagerungen, die zunächst auf städtische Böden erfolgen, durch Erosion und Oberflächenabfluss in Gewässer gespült. Mehr als 80 Prozent der PAK-Einträge in Gewässer werden somit durch atmosphärische Ablagerung beeinflusst.

3.4.2 Datenauswertung

Um die Relevanz der PAK für Bergbauwässer herauszuarbeiten, wurden Gütedaten der im BfUL-Programm gemessenen Stollnwässer (als Auszug dankenswerter Weise durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellt) ausgewertet. Dabei erfolgte eine Beschränkung auf die in der OGewV mit UQN belegten PAK. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Auswertung der Stollnwasserdaten der BfUL hinsichtlich relevanter PAK

MKZ	Name	Gewässer		Benzo(b)- fluoranthen (ng/l)	Benzo(k)- fluoranthen (ng/l)	Benzo(a)pyren (ng/l)		Benzo(ghi)- perylene (ng/l)
–				MW	MW	Max	MW	MW
OBF12780	Rothschönberger Stolln	Triebisch	2008	<1	<1	<1	<1	<1
OBF31541	Hüttenrösche Morgenstern	Freiberger Mulde	2006- 2008	2,0	1,2	2,0	1,2	1,2
OBF33090	Friedrich Erbstolln	Bobritzsch	2008	<1	<1	<1	<1	<1
OBF33603	Neuer Segen Gottes oder Sieben Planeten Stolln	Große Striegis	2008	<1	<1	<1	<1	<1
OBF33650	Thelersberger Stolln bei Linda	Große Striegis	2008	<1	<1	1,0	<1	<1
OBF34390	Tiefer Hauptstolln Geyer	Geyerbach	2008	<1	<1	<1	<1	<1

MKZ	Name	Gewässer		Benzo(b)- fluoranthen (ng/l)	Benzo(k)- fluoranthen (ng/l)	Benzo(a)pyren (ng/l)	Benzo(ghi)- perylene (ng/l)
OBF36794	Tiefer Sauberger Stolln	Wilisch	2008	<1	<1	<1	<1
OBF38190	Walfischstolln Pobershau	Rote Pockau	2008	<1	<1	1,0	<1
OBF40710	Glück Auf Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2008	<1	<1	<1	<1
OBF40711	Friedrich August Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2008	<1	<1	<1	<1
OBF40712	Stolln 146	Johgst. Schwarzwasser	2008	<1	<1	<1	<1
OBF40901	Treue Freundschaft Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2008	<1	<1	<1	<1
UQN				17	17	1,7	270

Die Auswertung zeigt zunächst, dass die Datenbasis bei den PAK in Stollwässern sehr klein ist. In den Stollwässern treten danach keine UQN-Überschreitungen auf. Die Messwerte liegen fast vollständig unter der Bestimmungsgrenze. Messbare Gehalte finden sich lediglich im Wasser der Hüttenrösche Morgenstern. Diese verläuft einerseits unter Teilen von Muldenhütten und andererseits unter einer Mülldeponie, so dass die PAK-Gehalte sich eher von Industrie und Altablagerungen ableiten lassen. PAK spielen daher in den Stollwässern als Bergbauschadstoffe keine Rolle.

PAK können theoretisch auch im Zusammenhang mit dem Steinkohlenbergbau freigesetzt werden, so dass z.B. das ehemalige Revier Zwickau-Oelsnitz als Quelle in Frage kommt. Zur Prüfung dieses Sachverhalts wurden die Gütedaten der im BfUL-Programm untersuchten Messstellen im EZG der Zwickauer Mulde ausgewertet, wobei eine Beschränkung auf den Zeitraum 2013-2015 erfolgte. Die Ergebnisse sind im Detail in Anlage 2 dargestellt. Die relevanten Daten mit Überschreitungen von UQN werden in **Tabelle 13** wiedergegeben.

Tabelle 13: Fließgewässer im EZG der Zwickauer Mulde mit Überschreitungen der UQN JD und ZHK (Datenbasis 2013-2015)

Gewässer	MKZ	Name	Benzo(b)fluor- anthen	Benzo(k)fluor- anthen	Benzo(a)pyren	Benzo(ghi)- perylene
			(Max)	(Max)	(Max)	(MW)
Sosabach	OBF40660	Mündung	5	4	7	2,1
Zschorlaubach	OBF40670	Neudörfel/Aue	71	41	63	15,8
Schwarzwasser	OBF41202	uh. Niederpfannenstiel	65	36	59	6,1
Schlemabach	OBF42000	Mündung	25	15	28	7,1
Rödelbach	OBF42200	oh. Kirchberg/ Bärenwalde	13	8	17	4,7
Crinitzer Wasser	OBF42210	oh. TS Wolfersgrün	5	3	4	2,3
Rödelbach	OBF42300	Mündung	10	6	11	4,0
Lungwitzbach	OBF42950	Str. am Lungwitzbach	93	51	72	20,3
Langenberger Bach	OBF43400	Langenchursdorf	9	6	11	4,3

Gewässer	MKZ	Name	Benzo(b)fluor-anthen	Benzo(k)fluor-anthen	Benzo(a)pyren	Benzo(ghi)-perylen	
Frohnbach	OBF43600	Ortsausgang Niederfrohna	8	6	7	3,4	4
Brauselochbach	OBF43800	uh. Burgstädt	24	14	23	3,9	12
Zwönitz	OBF44000	uh. Zwönitz	32	18	26	3,3	17
Zwönitz	OBF44030	Dorfchemnitz	75	43	87	25,3	71
Zwönitz	OBF44040	Thalheim, Bahnhofstr.	11	7	13	3,8	9
Zwönitz	OBF44050	20m oh. ZKA	13	7	12	3,0	6
Zwönitz	OBF44100	Thalheim	16	9	16	2,2	7
Gornsdorfer Bach	OBF44101	vor Mündung	18	10	24	4,5	14
Zwönitz	OBF44150	Straßenbrücke Abzweig Adorf	30	17	26	5,8	15
Zwönitz	OBF44200	Kemtau	20	11	19	5,5	9
Zwönitz	OBF44400	Mdg. Altchemnitz 1	110	70	110	11,2	85
Chemnitz	OBF44700	vor KA Glösa	60	36	61	6,5	31
Chemnitz	OBF45000	Göritzchain	100	47	78	4,4	46
Würschnitz	OBF45400	Mdg. Altchemnitz	10	6	9	3,3	5
Kappelbach	OBF45900	Mündung / Pfortensteg	20	14	28	3,2	14
Kappelbach	OBF45902	Barbarossastraße	10	6	8	2,5	10
Kappelbach	OBF45903	Pornitzstraße	7	4	6	1,8	7
Röllinghainer B.	OBF46300	Markersdorf	26	14	21	5,4	10

Die Auswertung zeigt, dass UQN-Überschreitungen im gesamten EZG der Zwickauer Mulde, besonders in der Zwönitz - Würschnitz - Chemnitz, auftreten. In diesem Gebiet ist kaum Bergbau betrieben worden. Damit lassen sich die PAK-Gehalte eher den Industriezentren zuordnen. Als Quellen kommen dabei neben Feuerungen auch Altstandorte, z.B. die in jedem größeren Ort vorhandenen ehemaligen Gaswerkstandorte, in Betracht.

In den direkt in den ehemaligen Steinkohlen-Bergbaugebieten gelegenen Flüssen, wie Reinsdorfer Bach, Pöhlauer Bach, Auerbacher Bach oder Planitzbach wurden keine UQN-Überschreitungen festgestellt.

Die häufigsten UQN-Überschreitungen finden sich bei Benzo(a)pyren. Dies ist auch darin begründet, dass die UQN-JD mit 1,7 ng/l sehr niedrig angesetzt ist und im Bereich der Bestimmungsgrenze der Analytik (1 ng/l) liegt.

3.5 Quecksilber

Neben den PAK (siehe vorangehendes Kapitel) war im Zuge der Datenauswertungen zu den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen für Sachsen seitens des LfULG festgestellt worden, dass in den Fließgewässern ebenfalls häufig Überschreitungen der UQN bei Quecksilber auftreten, die damit ubiquitär zu einer schlechteren Bewertung des Chemischen Zustandes beitragen.

Da Quecksilber potenziell einen Bergbaubezug haben könnte und ein „schwer entfernbarer Schadstoff“ ist, sollte im Rahmen der aktuellen Studie geprüft werden, ob dieses als „Bergbauschadstoff“ anzusehen ist.

Quecksilber ist in den in Mineralisierungen/Vererzungen des Erzgebirge/Vogtlandes kaum vertreten. Es gibt lediglich 3 Standorte mit geringfügiger Hg-Mineralisation (Zinnober) sind Bockwa und Hartenstein/Erzg. sowie Erlbach/Vogtland. Diese Vorkommen sind mehrfach bergmännisch untersucht worden, es kam jedoch nie zu nennenswertem Bergbau. Weitere geringe Zinnober-Vorkommen wurden in einigen Schwermineralfraktionen von Bachsedimenten (z.B. Mobendorf) festgestellt.

Der Clarke der oberen kontinentalen Kruste liegt bei: 0,06 mg/kg (Pälchen et al. 2009). Die mittleren Hg-Gehalte der Gesteine in Sachsen liegen meist unter diesem Wert. Geringfügig höhere Gehalte treten lediglich auf in

Grundmöränen des Quartär:	0,1 mg/kg
Tonen des Quartär:	0,16 mg/kg
Basaltoiden des Tertiär:	0,1 mg/kg
älteren Graniten (Granite fluorarm):	0,07mg/kg
Tonschiefern, Grauwacken des Ordovizium-Unterkarben:	0,08 mg/kg

Damit legen auch diese erhöhten Werte im Bereich des Clarke.

Die geringen Gehalte der petrochemischen Einheiten zusammen mit dem fast völligen Fehlen des Hg in den Mineralisationen/Vererzungen zeigen, dass Hg in Sachsen kein "Bergbauschadstoff" ist.

Hinsichtlich der Quelle in den Fließgewässern zeigt sich in den Bewertungen der Oberflächenwasserkörper in den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen für Sachsen zunächst eine Auffällige Parallelität zwischen Hg und PAK. Beide sind als relativ leicht flüchtig und infolge Sorption in den Sedimenten als persistent in den Fließgewässern zu bezeichnen. Damit könnte ein großflächiger Eintrag über den Luftpfad in Frage kommen. Dieser könnte auf die ausgedehnte Anwendung von Kohlefeuerungen in der Zeit vor der politischen Wende zurückzuführen sein.

Eine andere Erklärung der erhöhten Gehalte könnte darin begründet liegen, dass bereits die Hg Konzentrationen der Gesteine im Bereich des Clarke bei der Verwitterung zu Hg-Gehalten in Wasser /Sediment führen, die die UQN überschreiten. Dies würde auf einen geogenen Hintergrund hindeuten.

3.6 Sulfat

3.6.1 Sulfat als Komponente der Salzbelastung

In den Methoden der „Biologischen Wasseruntersuchung 2“ (Tümping & Friedrich, 1999) wird unter Salzgehalt die Summe aller gelösten Ionen des Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- und CO_3^{2-} verstanden. Sulfat ist bei natürlichen gewässertypspezifischen Konzentrationen kein Schadstoff, sondern ein Ion mit essentieller Bedeutung für aquatische Lebewesen. Die biologische Indikation der durch Salzgehalt hervorgerufenen ökologischen Bedingungen beruht auf der "biologischen Wirkung des Salzgehaltes". Diese ergibt sich aus dem Zusammenwirken unterschiedlicher Ionenkombinationen (Ionenwirkung) und der Gesamtkonzentration mit ihrer osmotischen Wirkung (Osmoregulation) (Ziemann, 1971). Sulfat spielt daher als Komponente der Salzbelastung eine wichtige Rolle. Die meisten aquatischen Organismen sind an einen bestimmten Salzgehalt im Wasser angepasst und haben unterschiedliche Mechanismen entwickelt, auf Veränderungen der Salzbelastung zu reagieren (Haupttypen z.B. Osmokonformer oder Osmoregulierer). Daher unterscheidet sich die Toleranz einzelner Arten gegenüber Sulfat sehr. Eine Verallgemeinerung kann hier nicht getroffen werden, allerdings steigt mit zunehmender Wasserhärte die Toleranz gegenüber Sulfat (LAWA 2015). Eine Wechselwirkung mit Chlorid wird ebenfalls diskutiert (Koenzen et al. 2016). Daher sollten für optimale Ionen- und Osmoregulation die absoluten Konzentrationen und die relativen Konzentrationsverhältnisse der Ionen zueinander nahe den natürlichen Bedingungen liegen. Organismen, die silikatische Gewässertypen bevorzugen, besitzen eine geringere Regulationsfähigkeit als Organismen, die karbonatische Gewässertypen bevorzugen. In silikatischen Gewässertypen kann daher eine empfindlicher auf zusätzliche Ionenbelastungen reagierende Biozönose erwartet werden (Koenzen et al. 2016). Die Rahmenkonzeption Monitoring der LAWA (LAWA 2015) bezieht sich daher bei der Ableitung von Orientierungswerten für Sulfat und Chlorid in Fließgewässern konsequent auf die Fließgewässertypen (siehe Abschnitt 2.3).

Neben der Wirkung des Sulfates als Komponente der Salzbelastung werden von einigen Autoren (Kleeberg et al. 2014) weitere gewässerökologische Effekte genannt, z.B. die Re-Eutrophierung durch verstärkte Freisetzung von Phosphat. Hierfür werden reduktive Prozesse Sediment-Wasser-Grenzfläche verantwortlich gemacht, wo es durch Eisen- und Sulfatreduktion zur Freisetzung von an Eisenhydroxid gebundenem Phosphor kommen soll. Das Ausmaß dieses Effektes für das Spreegebiet bleibt jedoch unklar.

3.6.2 Sulfat in den Bergbauwässern des Braunkohlentagebaus

Sulfat kann in Fließgewässern wie bereits erwähnt sowohl aus natürlichen als auch aus anthropogenen Quellen stammen. In den Bereichen des Braunkohlenbergbaus ist die Verwitterung von Sulfiden (Pyrit und Markasit) der dominierende Prozess für die Freisetzung von Sulfat. Im Gegensatz zum Eisen, welches ebenfalls bei der Verwitterung freigesetzt wird, ist Sulfat in einem weiten Redoxbereich stabil und unterliegt keinen hydrolytischen Reaktionen. In der Folge davon hat Sulfat eine hohe Mobilität und gelangt aus Braunkohlenkippen ins Grundwasser und von dort zumeist auf diffussem Wege in Seen und Fließgewässer. Eine nicht unerhebliche Bedeutung für die Sulfatbelastung des Grund- und Oberflächenwassers haben auch ehemalige Vernässungsgebiete und anmoorige Böden im Bereich der bergbaubedingten großflächigen Grundwasserabsenkungen außerhalb der eigentlichen Tagebaue. Durch den langsam stattfindenden Grundwasserwiederanstieg nach Beendigung des Braunkohlenbergbaus werden auch hier große Mengen an Sulfat freigesetzt, die aus der Verwitterung der in den anmoorigen Böden enthaltenen Sulfide während der Zeit der Grundwasserabsenkung stammen. Neben diesen bergbaubedingten Grundwasserabsenkungen trugen auch großflächige Moorentwässerungen zur landwirtschaftlichen Nutzung zum Anstieg der Sulfatkonzentrationen bei (Gelbricht et al. 2016). Hinzu kommt, dass eine Sulfatentfernung aus den Wässern des aktiven Bergbaus beim derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar ist, weshalb die vorhandenen Grubenwasserbehandlungsanlagen nicht auf die Entfernung von Sulfat ausgelegt sind. Daher treten in nahezu allen Fließgewässern, die durch die aktiven bzw. ehemaligen Braunkohleabbaugebiete der Lausitz und Mitteldeutschlands fließen, anthropogen erhöhte Sulfatkonzentrationen auf.

In der Lausitz stellt die Spree als wichtiger Vorfluter des Bergbaureviers einen wichtigen Schwerpunkt der Sulfatbelastung dar. Mit Eintritt der Spree in das Bergbauggebiet steigen die Sulfatgehalte drastisch an.

Die in Abbildung 2 gezeigten Werte aus dem Zeitraum 2003 bis 2007 sind nach einer neueren Studie des IGB nach wie vor aktuell (Gelbricht et al. 2016) und führen in Berlin zeitweilig zu Sulfatkonzentrationen > 250 mg/L. Dies führt zu Schwierigkeiten bzw. zu Nutzungseinschränkungen bei der Verwendung von Uferfiltrat zur Aufbereitung von Trinkwasser.

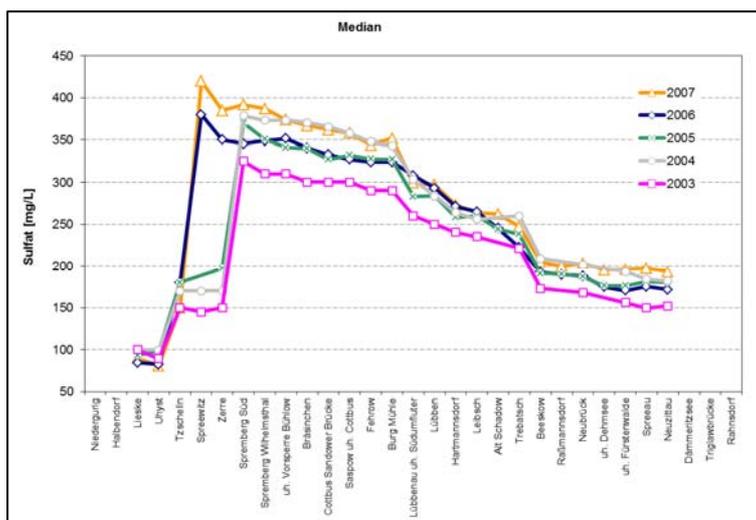


Abbildung 2: Median der Sulfatkonzentration im Längsprofil der Spree (Janneck et al. 2009)

Als Alternative zu fehlenden wirtschaftlich effizienten Verfahren zur Sulfatentfernung werden (auch international) Methoden der Salzfrachtsteuerung angewendet um im Zusammenhang mit anderen wasserwirtschaftlichen Maßnahmen wie z. B. der Sicherung des ökologischen Mindestabflusses zumindest Spitzen der Salzbelastung abzufachen. Im Lausitzer Revier wird derzeit versucht, über ein komplexes System der Wassermengen- und Gütesteuerung mit Nutzung von sulfatarmem Wasser aus Talsperren und Speicherbecken die Sulfatkonzentration nicht weiter ansteigen zu lassen. Grundlage dafür sind Arbeiten, die im Rahmen des Innovationsnetzwerks Klimaanpassung Region Brandenburg/Berlin (INKA BB, 2016) durchgeführt wurden.

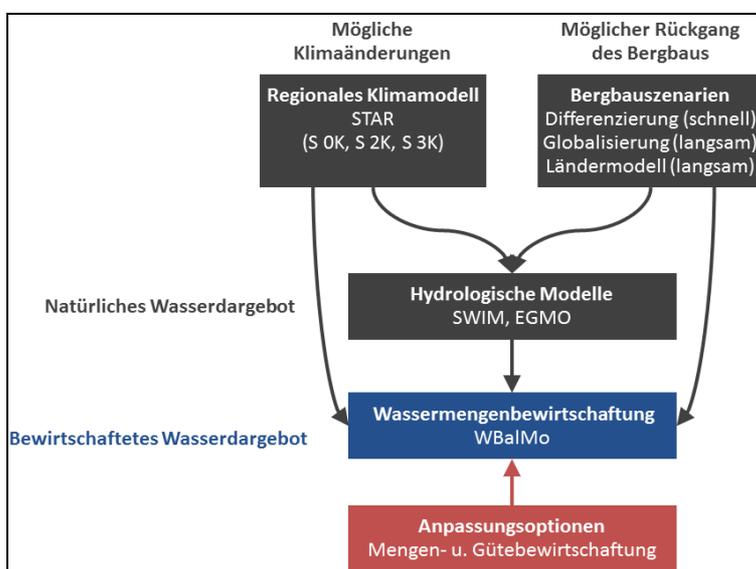


Abbildung 3: Forschungsansatz des INKA BB Teilprojektes 21

Im Teilprojekt 21 dieses Netzwerkes wurde eine Kopplung des Langzeitbewirtschaftungsmodelles WBalMo (Mengenbewirtschaftung) und des Gütesteuermodells (GSM) Spree über eine spezielle Schnittstelle miteinander gekoppelt. Dieser Ansatz ermöglicht die Rückkopplung zwischen der Güte- und Mengenbewirtschaftung und erlaubt so eine kombinierte Optimierung beider Kriterien. Abbildung 3 zeigt die insgesamt verwendeten Modellkomponenten. Über die Praxistauglichkeit der

verwendeten Anpassungsoptionen zur Steuerung der Sulfatkonzentrationen standen bisher noch keine Veröffentlichungen zur Verfügung.

3.6.3 Sulfat in den Stollnwässern des Erzgebirges

Die Oxidation von Sulfiden führt auch in den vom Erzbau betroffenen Gebieten zu potenziellen Sulfateinträgen in die Gewässer. Um zu einer Einschätzung dieses Sachverhaltes zu kommen, wurden die BfUL-Daten der Stollnwässer im Erzgebirge einer Auswertung unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Stollnwässer des BfUL-Programms 2006-2015 (jeweils Mittelwert aus letztem Jahr, Angaben in mg/l)

OWK	MKZ_	Name	Gewässer	Jahr	Anzahl	Min	Max	MW	Med	90
DESN_53714-2	OBF05001	Tiefer Zwiesler Erbstolln	Gottleuba	2015	4	43	50	47	46,5	50
DESN_537186	OBF07950	St. Erasmus Stolln	Brießnitzbach	2014	4	47	82	64	64	82
DESN_537184	OBF08350	Neuer Biela Stolln	Biela	2015	4	68	78	71	69	78
DESN_5371822	OBF08380	Tiefer Bünaustolln	Heerwasser	2013	4	18	28	22	21	28
DESN_5371822	OBF08391	Tiefer Hilfe Gottes Stolln	Heerwasser	2015	4	18	19	19	18,5	19
DESN_537182	OBF08440	Zwitterstocks Tiefer Erbstolln	Rotes Wasser	2012	4	17	20	18	18	20
DESN_5-1	OBF12205	Neuer König David Hilfsstolln	Elbe	2009	2	380	400	390	390	400
DESN_53732-2	OBF12780	Rothschönberger Stolln, vor Einmdg. in die Triebisch	Triebisch	2015	11	250	270	256	260	260
DESN_542-3	OBF31521	Tiefer Lorenz Gegentrum Stolln	Freiberger Mulde	2009	1	69	69	69	69	69
DESN_542-3	OBF31541	Mundloch Hüttenrösche Morgenstern	Freiberger Mulde	2010	4	140	200	183	195	200
DESN_542-4	OBF31714	Tiefer Wolf Stolln	Freiberger Mulde	2013	4	140	150	145	145	150
DESN_542-4	OBF31806	Adam Stolln, Segen Gottes Erbstolln	Freiberger Mulde	2009	2	230	430	330	330	430
DESN_542-3	OBF33010	Kgl.-Vertr.-Ges.-Stolln	Roter Graben	2015	12	190	360	257	250	340
DESN_542-3	OBF33020	Hauptstolln-Umbruch	Roter Graben	2015	12	200	250	234	235	250
DESN_5422-1	OBF33080	(Tiefer) Friedrich Christoph Erbstolln	Bobritzsch	2015	3	53	67	60	61	67
DESN_5422-1	OBF33090	Friedrich Erbstolln	Bobritzsch	2012	4	15	17	16	16	17
DESN_5424-1	OBF33603	Neuer Segen Gottes oder Sieben Planeten Stolln	Große Striegis	2012	4	39	94	76	85,5	94
DESN_5424-1	OBF33650	Thelersberger Stolln bei Linda, Mundloch	Große Striegis	2012	2	71	100	86	85,5	100
DESN_542614	OBF34390	Tiefer Hauptstolln Geyer, Mundloch	Geyerbach	2014	6	20	22	21	21	22
DESN_5426-2	OBF34599	Tropper Stolln	Zschopau	2014	5	68	110	85	78	110
DESN_542612	OBF35391	Tiefer Erbstolln	Rote Pfütze	2012	4	53	58	55	55	58
DESN_54262	OBF35802	Tiefer St. Christoph Stolln, (Tiefer) Junger Andreas Stolln	Sehma	2014	6	74	89	83	83	89
DESN_54266	OBF36794	Tiefer Sauberger Stolln, Mündung	Wilisch	2014	6	60	89	73	72,5	89
DESN_542662	OBF36803	(Tiefer) König Dänemark Stolln	Jahnsbach	2015	4	120	130	125	125	130
DESN_5426822	OBF37404	Tiefer Heilige Dreifaltigkeit Stolln	Seiffener Bach	2015	4	27	30	29	28,5	30
DESN_5426864	OBF38101	Königlich Weistaubner Tiefer Erbstolln	Rote Pockau	2014	1	60	60	60	60	60

OWK	MKZ_	Name	Gewässer	Jahr	Anzahl	Min	Max	MW	Med	90
DESN_5426864	OBF38190	Walfischstolln Pobershau, Mundloch	Rote Pockau	2014	6	35	38	37	36,5	38
DESN_54-2	OBF38701	Stolln Jägersgrün	Zwickauer Mulde	2015	4	29	32	30	30	32
DESN_54116	OBF40641	Eibenstocker Communstolln	Kleine Bockau	2014	6	9	10	10	10	10
DESN_54116	OBF40642	Tiefer Riesenberger Stolln	Neudecker Bach	2015	4	11	12	12	11,5	12
DESN_54118-2	OBF40672	Unterer Troster Stolln	Zschorlaubach	2014	4	25	26	26	25,5	26
DESN_5412-2	OBF40710	Glück Auf Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2014	6	49	56	51	49	56
DESN_5412-2	OBF40711	Friedrich August Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2014	6	51	60	55	54	60
DESN_5412-2	OBF40712	Stolln 146	Johgst. Schwarzwasser	2014	6	89	120	110	115	120
DESN_5412-2	OBF40801	Roter und Weißer Löwe	Pöhlwasser	2014	6	21	26	25	25	26
DESN_5412-3	OBF40901	Treue Freundschaft Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2014	6	66	76	71	72	76
DESN_5412-3	OBF40901	Treue Freundschaft Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2012	4	73	77	74	73,5	77
DESN_5412-3	OBF40901	Treue Freundschaft Stolln	Johgst. Schwarzwasser	2010	6	71	85	75	72	85
DESN_5412892	OBF41301	Frisch Glück Stolln	Oswaldbach	2015	4	33	44	40	42	44
DESN_54134	OBF42001	Marcus Semmler Stolln	Schlema	2014	6	70	82	78	78	82
DESN_5416-1	OBF42733	Lampertusstolln	Goldbach	2015	4	91	120	106	105,5	120
DESN_532342	OBF47001	Wasserlösungsstolln zum Maischacht (Haupttagesrampe)	Brunndöbra	2014	6	23	26	24	24	26
DESN_532342	OBF47001	Wasserlösungsstolln zum Maischacht (Haupttagesrampe)	Brunndöbra	2012	4	26	29	28	27,5	29
DESN_532342	OBF47003	Mühleither Stolln (Dynamostolln)	Flößgraben	2012	4	18	19	19	18,5	19
DESN_566138	OBF49999	Brüder Einigkeit Stolln	Triebelbach	2012	4	290	300	293	290	300

fett: Werte > RAKON-Orientierungswert von 75 mg/l; **fett unterstrichen:** Werte > Grenzwert der TVO (240 mg/l)

Es zeigt sich, dass in den Stollnwässern eine Reihe starker Überschreitungen des RAKON-Orientierungswertes von 75 mg/l auftritt. Einige Werte überschreiten den Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TVO). Der höchste Wert wurde im Neuen König David Hilfsstolln unterhalb Scharfenberg gemessen.

Erhöhte Sulfatgehalte foinden sich auch in einigen Stollwässern des (weiteren) Freiburger Revier s (Hüttenrösche Morgenstern, Tiefer Wolf Stolln, Adam Stolln, Segen Gottes Erbstolln, Hauptstolln Umbruch und Verträgliche-Gesellschaft-Stolln.

Zur Einordnung dieser Werte werden die Sulfatgehalte der Freiburger Mulde herangezogen (Auswertung in Tabelle 15).

Tabelle 15: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Freiburger Mulde 2015 (Angaben in mg/l)

MKZ_	NAME	Anzahl	Min	Max	MW	Med	90
OBF31301	Brücke am Katzenstein	12	23	29	25,7	25,5	27,9
OBF31500	Muldenhütten	12	28	59	39,8	35,0	53,4
OBF31510	Hilbersdorf	12	30	78	48,7	40,0	72,1
OBF31600	Halsbrücke 1	12	32	86	54,3	50,0	80,6

MKZ_	NAME	Anzahl	Min	Max	MW	Med	90
OBF31700	Obergruna	12	37	94	60,9	61,0	74,5
OBF31710	uh. Siebenlehn	6	36	63	53,3	55,5	62,5
OBF31800	Nossen - Altzella	6	37	66	55,7	58,5	65,0
OBF31900	uh. Roßwein	6	45	80	61,3	61,5	76,0
OBF31950	Niederstriegis	12	39	78	58,8	60,5	70,4
OBF32000	uh. Döbeln	12	40	87	61,8	62,0	73,7
OBF32010	Döbeln, Brücke B 169	12	40	85	61,1	61,5	71,6
OBF32200	Leisnig	5	34	55	44,8	42,0	55,0
OBF32300	Mdg. in Erlin	21	34	55	46,0	46,0	54,0

Ein Längsprofil der Sulfatgehalte in der Freiburger Mulde ist in Abbildung 4 dargestellt.

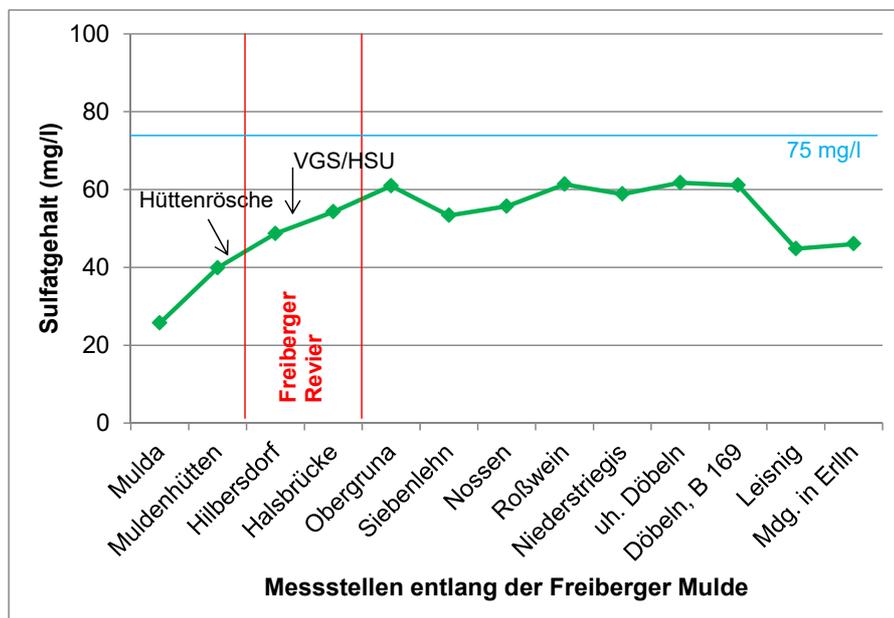


Abbildung 4: Sulfatgehalt entlang der Freiburger Mulde (Mittelwerte 2015)

Die Ergebnisse zeigen moderate Sulfatgehalte, die durchweg unterhalb des RAKON-Orientierungswertes liegen. Im Längsprofil zeigen sich niedrige Werte im Oberlauf der Freiburger Mulde, die infolge Bergbau- und Siedlungseinfluss stetig ansteigen und ab Siebenlehn ein konstantes Niveau von ca. 60 mg/l erreichen. Der Rückgang der Sulfatgehalte unterhalb Döbeln ist durch den Zufluss der Zschopau, die aus einem vom Bergbau und auch der Besiedlung weniger stark beeinflussten EZG kommt, bedingt.

Die stärker sulfathaltigen Stollnwässer werden daher durch die Freiburger Mulde hinreichend verdünnt, so dass Sulfat als Bergbauschadstoff im Erzgebirge nur eine geringe Rolle spielt.

3.7 Fluorid

Fluorid steht nicht im Zentrum der „Bergbauschadstoffe“. Aufgrund seiner Ökotoxizität wurde jedoch ein Geringfügigkeitsschwellenwert zur Beurteilung von lokal begrenzten Grundwasserverunreinigungen von **0,75 mg/l** festgelegt (LAWA 2004). Da für Oberflächenwasserkörper keine UQN festgelegt ist, wurde dieser Wert zur Beurteilung der Fluoridkonzentration in den Fließgewässern herangezogen.

Fluorhaltige Mineralisationen treten im Erzgebirge/Vogtland häufig und auch in größerer Intensität auf. Es sind dies vor allem

- die endogen-epigenetische Zinnlagerstätten mit Fluorit, Topas und Glimmer als Haupt-Fluorminerale
- die Fluorit-Quarz-, Hämatit-Baryt- und Baryt-Fluorit-Assoziation mit Fluorit (CaF₂) als Haupt-Fluormineral

Die wichtigsten fluorhaltigen Minerale sind demnach

- Fluorit CaF₂
- Topas Al₂[(F,OH)₂]SiO₄
- Glimmer, z.B. Biotit K(Mg,Fe²⁺)₃[(OH,F)₂](Al,Fe³⁺)Si₃O₁₀

Fluor tritt darüber hinaus in einer Vielzahl von Mineralen als Nebenkompente auf. Die „fluorreichen Granite“ zeichnen sich durch allgemein erhöhte F-Gehalte von im Mittel 7.800 mg/kg aus.

Fluormineralisationen konzentrieren sich demnach auf die Oberläufe der Flüsse im Süden Sachsens, vor allem im Erzgebirge-Vogtland (Tabelle 16).

Tabelle 16: Statistische Auswertung der Sulfatgehalte der Freiburger Mulde 2015 (Angaben in mg/l)

Flußsystem	Relevante Lagerstätten
Weißer Elster	Fluorit-Bergbauegebiet Schönbrunn-Bösenbrunn-Wiedersberg
Zwickauer Mulde	Zinnerzlagerstätten oberes Vogtland (Gottesberg, Fluorit-Baryt-Lagerstätten Brunndöbra-Schneckenstein)
Freiberger Mulde	Fluorit-Baryt-Lagerstätten oberes Mittleres Erzgebirge (Niederschlag, Bärenstein, Marienberg) Zinnerzlagerstätten des Mittleren Erzgebirges (Ehrenfriedersdorf, Geyer)
Elbe	Zinnerzlagerstätten des Osterzgebirges (Altenberg, Zinnwald)

Um zu einer Einschätzung der Fluoridgehalte in den Fließgewässern und des Bergbaueinflusses zu kommen, wurden die BfUL-Daten der Fließgewässer im Erzgebirge einer Auswertung unterzogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 und Anlage 2 zusammengestellt.

Tabelle 17: Statistische Auswertung der Fluoridgehalte der Fließgewässer mit Teil-EZG im Erzgebirge/Vogtland 2013-2015 (Angaben in mg/l)

Flußsystem	n	Min	Max	MW	Med
EZG Weiße Elster	163	<0,05	1,5	0,18	0,14
EZG Zwickauer Mulde	145	0,06	1,46	0,15	0,14
EZG Freiburger Mulde	174	0,06	2,47	0,26	0,18
Elbe	204	<0,05	8,06	0,37	0,20

Bei Betrachtung der Mittelwerte zeigt sich von West nach Ost eine ansteigende Tendenz. Dies ist insbesondere auf die größere Häufigkeit fluorreicher Gesteine (Granite) im Osterzgebirge zurückzuführen.

Anlage 2 gibt einen detaillierteren Überblick über die Fluoridgehalte an einzelnen Messstellen mit mittleren Konzentrationen >0,75 mg/l (GFS).

4 Bergbautypische Schadstoffkombinationen

Charakteristische Mineralisationen

Tabelle 18: Schadstoffkombinationen mit Zuordnung zu den betreffenden Bergbausparten

Bergbausparte	Typische Mineralisation	relevante Schadstoffe	Charakteristik
Zinnerzbergbau	Quarz, Topas, Glimmer, Feldspat, Fluorit, Kassiterit, Wolframit, Arsenopyrit, Pyrit	Arsen (-Fluorid)	Austrag von As, Fe und Fluorid über Entwässerungsstollen und Haldensickerwässer
Buntmetallbergbau	Quarz, Ca-Fe-Mg-Carbonate, Baryt, Fluorit, Galenit, Sphalerit,	Zink-Cadmium (-Sulfat)	Austrag von As, Fe und Fluorid über Entwässerungsstollen und Haldensickerwässer
Uranbergbau	Quarz, Ca-Fe-Mg-Carbonate Baryt, Uranpecherz, ged. Arsen, ged. Wismut, Co-Ni-Arsenide, Löllingit, Pyrit, Arsenopyrit	Uran-Arsen	Austrag über Stollnwässer und Haldensickerwässer einschließlich IAA (Spülhalden)
Abbau basischer Gesteine (z.B. Grauwacke)	Feldspat, Amphibole, Chlorit, Pyrrhotin, Pyrit	Nickel-Cadmium (Kupfer-Zink)	Austrag über Ablauf der Wasserhaltung und Haldensickerwässer
Braunkohlenbergbau	Pyrit	Eisen-Sulfat (Zink, Cadmium, Nickel)	Austrag von Fe und SO ₄ über Grundwasseraustritte, Sumpfungswässer und Haldensickerwässer
Steinkohlenbergbau	Schichtsilikate, Quarz, Pyrit, Sphalerit	Nickel-Cadmium (Kupfer-Zink), Sulfat	Austrag über Haldensickerwässer und ggf. austretende Grundwässer

Schadstoffkombinationen lassen sich vor allem für anorganische Komponenten ableiten.

5 OWK-Spezifische Betrachtung

Nachfolgend wird eine OWK-Spezifische Betrachtung der Bergbaubeeinflussung im EZG der Zwickauer Mulde vorgenommen. Dabei wurden die OWK herangezogen, die im Rahmen der Bewirtschaftungspläne der Oberflächenwasserkörper in Sachsen bewertet wurden.

5.1 OWK-Spezifische Zuordnung bergbautypischer Schadstoffkombinationen

Nachfolgend wird eine Zuordnung von Bergbauaktivitäten zu OWK vorgenommen. Dies kann im Rahmen dieser Studie jedoch nur beispielhaft erfolgen. Am deutlichsten wäre dies im EZG der oberen Freiburger Mulde möglich. Für dieses EZG wurden in der Vergangenheit bereits umfangreiche Auswertungen vorgenommen. Daher wurde als Beispiel das EZG der Zwickauer Mulde gewählt. Für dieses EZG wurden die wesentlichen Bergbaubetriebe recherchiert und den OWK zugeordnet (Tabelle 19).

Tabelle 19: Zuordnung der recherchierten Bergbaubetriebe zu den OWK

ID-Nr. des OWK	Name des OWK	Bergbau	wesentliche Schadkomponenten der Mineralisationen	Bewertung nach OGewV 2011 (Datengrundlage 2009-2014)					
				Ökologischer Zustand/Potenzial	Überschrittene UQN flussgebietspezifische Schadstoffe nach Anlage 5 OGewV	Chemischer Zustand	Überschrittene UQN prioritäre Stoffe nach Anlage 7 OGewV	Überschrittene UQN prioritäre Stoffe nach Anlage 7 OGewV	OWK mit natürlicher Hintergrundkonzentration (Chemie)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sächsische Fließgewässer-Wasserkörper									
DESN_54194	Aubach	-		4		3	Hg		
DESN_541322	Aubach	Dachschieferbergbau Affalter-Gablenz Erkundungsrevier "Zeller Berg" der "Wismut"	Zn, Cd, Ni	3		3	Hg		H
DESN_54198	Auenbach	-		3		3	Hg		
DESN 541176	Bockauer Dorfbach	Sn-S-Bergbaugebiet zw. Bockau und Lauter Pb-Bergbau in Bockau Ag-Co-U-Bergbau Oberdorf Bockau	As, U	3	Cu,Zn	3	Hg	Cd	
DESN_54178	Brauselochbach	-		4		4	Hg		
DESN_5418-3	Chemnitz-1	-		4	As	4	Hg		
DESN_5418-4	Chemnitz-2	-		4	Zn	4	Hg	Ni	
DESN_54146-1	Crinitzer Wasser-1	Granitbruch Obercrinitz	Cd, Ni	3		4	Hg		H
DESN_54146-2	Crinitzer Wasser-2	-		3		3	Hg		H
DESN_541942	Crossener Bach	-		5		4	Hg	Ni	
DESN_54158	Dorfbach Oberschindmaas	Sandgrube Dennheritz-Kalthausen	Cd, Ni	5	As	4	Hg	Ni	
DESN_541792	Elsbach	Kiesgrube Lunzenau-Biesig	Cd, Ni	5		4	Hg		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN_54192	Erlbach	geringer Sb-Bergbau bei Seelitz Sandgrube Biesern	Ni	3		3	Hg		
DESN_541956	Erlsbach	-		5		3	Hg		
DESN_54118-1	Filzbach	Bi-Co-U-Bergbaugebiet Neustädte, SW-Teil (Wolfgangmaßen, Pucher, Siebenschlehn) Fe-Bergbaugebiet Schwalbner Flügel Granitbruch Zschorlau	U, As, Ni	3		3	Hg		H
DESN_541922	Frankenauer Bach	-		5		3	Hg	Ni	
DESN_541952	Frelsbach	Steinbrüche Rochlitzer Berg (kleiner Anteil)		4		3	Hg	Ni	
DESN_5412848	Friedrichsbach	Neue Silberhoffnung Segen Gottes („Giftzeche“) Schurfgebiet "Wismut"	As, Cu, Zn, Cd	3		3	Hg		H
DESN_54176-1	Frohnbach-1	-		5		4	Hg	Ni	
DESN_54176-2	Frohnbach-2	-		5	Zn	4	Hg		
DESN_5418932	Gablentzbach	Dachschieferbergbau südlich Gablenz	Zn, Cd, Ni	3		4	Hg		
DESN_541822	Gablentzbach	Dachschieferbergbau südlich Gablenz	Zn, Cd, Ni	5		4	Hg		
DESN 541814	Gornsdorfer Bach	Pb-Zn-Bergbau Rabenholz bei Jahnsbach Schacht 395	As, Zn, Cd	4	As,Cu, Zn	4	Hg	Ni,Cd	
DESN 54116	Große Bockau	Fe-Bergbaugebiet Oberwidenthal - Rehhübel Fe-Bergbaugebiet Riesenberg Sn-Bergbaugebiet Carlsfeld Schurfgebiet "Waldschänke" der "Wismut" Sn-Bergbaugebiet Auersberg	As	3		3	Hg	Ni	
DESN_54128-1	Große Mittweida-1	Kalkbergbau an der kleinen Mittweida		2		3	Hg		H
DESN 54128-2	Große Mittweida-2	Altbergbau Obermittweida Kalkbergbau Oberscheibe Fe-Bergbau Oberscheibe Kalkbergbau Pöckelwald	As	3		4	Hg	Ni	
DESN 54128-3	Große Mittweida-3	U-Bergbau Raschau-Grünstädtel (Lagerstätte August) Cu-, As-, S-Bergbau am Raschauer Knochen	As, U, Cu, Ni	4	Cu,Zn	3	Hg	Ni	H
DESN_54112	Große Pyra	Sn-Bergbaugebiet Morgenröthe	As	4		3	Hg		H
DESN_54172	Grumbach	- (=Callenberger Bach)		4		4	Hg		
DESN 54162	Hegebach	Steinkohlenbergbau-revier Oelsnitz-Hohndorf (Südwestlicher Teil)	Zn, Cd, Ni	5	Zn	4	Hg	Ni,Cd	
DESN_54174	Hernsdorf-Bräunsdorfer Bach	Altbergbaugebiet Ullersberg	As, Cu	5		3	Hg	Ni	
DESN_5414614	Hirschfelder Wasser	-		3		3	Hg		H
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN_54146142	Irfersgrüner Bach	-		3		3	Hg		H
DESN_541776	Johannesbach	-		4		3	Hg		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN_541892	Kappelbach	kein Bergbau, fließt durch Chemnitz		5	As,Zn, Cu	4	Hg		
DESN 541116	Kleine Pyra	Gottesberg (Sn, U) Teil von Schneckenstein (U) Mühleithen (Sn) IAA Schneckenstein und Gottesberg	As, U, Ni	4	As,Cu, Zn	3	Hg	Cd	
DESN_541992	Kohlbach	- (bei Colditz)		5		3	Hg	Cd	
DESN_5418982	Königshainer Bach	kein Bergbau, fließt in den Wiederbach		5		4	Hg		
DESN_541744	Langenberger Bach	ehem. Nickelbergbauggebiet Callenberg (ehem. Tagebaue Callenber-Nord II, Kiefernberg)	Ni	4		4	Hg		
DESN_541824	Leukersdorfer Bach	-		5		3	Hg	Ni	
DESN 5416-1	Lungwitzbach-1	Steinkohlenbergbau-revier Oelsnitz-Hohndorf (nördlicher Teil)	Zn, Cd, Ni	5	Zn	4	Hg	Ni,Cd	
DESN 5416-2	Lungwitzbach-2	Steinkohlenbergbau-revier Oelsnitz-Hohndorf (nördlicher Teil)	Zn, Cd, Ni	4	As,Zn	4	Hg	Ni,Cd	
DESN_54132	Lößnitzbach	Dachschieferabbau Lößnitz-Affalter Revier Zeller Berg (Nordteil) der "Wismut"	Zn, Cd, Ni	4		4	Hg		H
DESN 541552	Marienthaler Bach	Steinkohlenbergbau Zwickau, nordwestlicher Teil	Zn, Cd, Ni	5		4	Hg	Ni,Cd	
DESN_54-1	Mulde-1	U-Bergbauggebiet Schneckenstein (westlicher Teil) Fe-Bergbau Hammerbrücke Schurfgebiet Friedrichsgrün ("Wismut")	As, U, Ni	3		3	Hg		
DESN 54-2	Mulde-2	Sn-Bergbau Schönheide Granitsteinbrüche an der Talsperre Eibenstock	As	4	As	4	Hg		H
DESN 54-3	Mulde-3	Sn-Bergbau Gerstenberg und Grün (östlicher Teil) Steinbrüche Wolfsgrün, Blauenthal und Fahsel Fe-Bergbau Neidhardtthal Fe-Bergbau Spitzleithe Schurfgebiet Albernau ("Wismut") W-Bergbau Zschorlau (östlicher Teil) Sn-Bergbau Bockau Wasserüberleitung Adolph Beyer Stolln aus OWK Bockauer Dorfbach Steinbrüche Auerhammer	As, U, Ni	4	Cu,Zn	4	Hg		H
DESN 54-4	Mulde-4	U-Bergbau Niederschlema Kalkbergbau Wildenfels-Grünau Hg-Bergbau Hartenstein Steinkohlenbergbau Zwickau östlicher Zentralteil (Bockwa, Pöhlau) Kissandgruben Auerbach, Reinsdorf	As, U, Zn, Cd, Ni	4	As,Zn	4	Hg	Ni	H
DESN 54-5	Mulde-5	IAA Oberrothenbach ("Wismut") Aufbereitung und Halde Crossen ("Wismut")	As, U, Ni	4	As,Cu, Zn	4	Hg		H
DESN 54-6	Mulde-6	Steinbrüche Rochlitzer Berg Sandgrube Penna Kiessandtagebaue Sermuth	Zn, Cd, Ni	3	As,Zn	4	Hg	Cd	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN_5417762	Mühlaubach	Steinbruch Elzing (Granulit) ehem. Ratsbruch Harmannsdorf	Zn, Cd, Ni	4		4	Hg		
DESN 54156	Mülsenbach	Steinkohle Zwickau, östlichster Teil (Pöhlau) Kiesgrube Niedermülsen	Zn, Cd, Ni	5		4	Hg	Ni	
DESN 5412892	Oswaldbach	Altbergbaugebiete Waschleithe, Graul, Gelbe Birke	Zn, Cd, Cu, As	3	Cu,Zn	4	Hg		H
DESN 541532	Planitzbach	Steinkohle Zwickau südwestlicher Teil	Zn, Cd, Ni	5	Zn	3	Hg	Cd	
DESN_541894	Pleißebach	kein Bergbau, fließt durch Chemnitz		5		3	Hg		
DESN_54148	Plotzbach	-		4		3	Hg	Ni	
DESN_541284-1	Pöhlwasser-1	U-Bergbau Zweibach ("Wismut") U-Bergbau Kaffberg (Tellerhäuser alt) Sn- und Pb/Zn-Bergbau Kaffberg U-Bergbau Ehrenzipfel Fe-Sn-Bergbau Burkhardtsleithe Zlaty Kopec - Zn, Sn, Fe über Zlaty Potok Zlaty Kopec - U über Zlaty Potok	As, U, Zn, Cd	3		3	Hg		H
DESN_541284-2	Pöhlwasser-2	Bergbauggebiet Rittersgrün (Fe) Grube Pöhlau - Globenstein Grube Tellerhäuser (Anbindung über Stolln Pöhlau) U-Bergbau Lagerstätte Unruhe, Halbe Meile ("Wismut") Vordere Kohlun, Forstwald U-Bergbau Lagerstätte Gottesseggen, Unterrittersgrün U-Bergbau Lagerstätte Oktober, Erla-Crandorf	As, U, Zn, Cd	3		3	Hg		H
DESN 54152	Reinsdorfer Bach	Steinkohle Zwickau, östlicher Teil	As, Zn, Cd	5	Zn	4	Hg	Cd	
DESN_54115734	Rähmerbach	Sn-Bergbau am Ellbogen Wismut-Schurfgebiet am Dönitzbach Sn-Bergbau Dönitzbach	As	4		3	Hg		H
DESN 5414-1	Rödelbach-1	mehrere Steinbrüche bei Kirchberg (Granit, Kontaktfels)	As, Zn, Cd	3		4	Hg	Ni	
DESN_5414-2	Rödelbach-2	Bergbauggebiet Hoher Forst Wolframgrube Hartmannsdorf	As	3		4	Hg		
DESN 54166	Rödlitzbach	Steinkohlenbergbau-revier Oelsnitz-Hohndorf (westlicher Teil)	Zn, Cd, Ni	4	Zn	4	Hg	Cd	
DESN_5418972	Röllingshainer Bach	-		4		4	Hg		
DESN 54134	Schlema	Uranbergbauggebiet Schlema ("Wismut") Bi-Co-Ni-U-Ag-Bergbauggebiet Neustädtel Schneeberg	As, U, Ni	4	As,Cu, Zn	4	Hg		H
DESN_54196	Schwarzbach	Kiesgrube Leupahn		4		3	Hg		
DESN 541286	Schwarzbach	Bergbau Elterlein (Cu-Ag, Pyrit) Kalkbergbau Schwarzbach- Langenberg-Raschau Bi-Co-U-Bergbau Graul bei SZB Fe-Bergbau Schwarzbach, Langenberg Pyrit-As-Bergbau am Raschauer Knochen Fe-Bergbau Wildenau	As, Zn, Cd, Cu	3	Cu,Zn	3	Hg		H

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN 5412-2	Schwarzwasser-1	U-Bergbau Lagerstätte Johanngeorgenstadt U-Bergbau Lagerstätte Juni, Rabenberg U-Bergbau Lagerstätte Neuoberhaus U-Bergbau Lagerstätte Seifenbach U-Bergbau Lagerstätte Bermsgrün U-Bergbau Lagerstätte Weißer Hirsch (Antonsthal) U-Bergbau Lagerstätte Tannebaum (September) U-Bergbau Lagerstätte Mai (Antonsthal) Lagerstätte Breitenbrunn (Margarethe) Fe-Sn-As-S-Bergbau Breitenbrunn Sn-Bergbau Steinheidel Sn-Bergbau Rabenberg	As, U, Zn, Cd, Ni	3	Zn	3	Hg		H
DESN 5412-3	Schwarzwasser-2	Schurfreviere Schloßwald, Neuwelt, Bernsbach, Henneberg, Lauter, Freibad (Hakenkrümme) und Zeller Berg Ost As-Bergbau Kuttengrund W-Bergbau Lauter Steinbruch Niederpfannenstiel; !Treue Freundschaft Stolln	As, Zn, Cd, U	3	Cu,Zn	4	Hg		
DESN_541174	Sosabach	Fe-Bergbaugebiete Märzenberg, Stinkenbach Sn-Bergbau SO bis NW Sosa	As	3		4	Hg		H
DESN_54124	Steinbach	U-Bergbau Himmelfahrt Sn-Bergbau Rote Grube Fe/Mn-Bergbau Riesenberg-Steinbach-Henneberg U-Bergbau Johanngeorgenstadt-Neustadt	U, As, Ni	3		3	Hg		H
DESN_541898	Wiederbach	kein Bergbau (Wiederau, entwässert zur Chemnitz)		4		4	Hg		
DESN_5418922	Wiesenbach	-		5		4	Hg		
DESN_54138	Wildenfeser Bach	Kalkbergbau Wildenfels (nördlicher Teil)		4		4	Hg		
DESN_54114-1	Wilzsch-1	Sn-Bergbau Carsfeld (südwestlicher Teil)	As	4		3	Hg		
DESN_54114-2	Wilzsch-2	-		3		3	Hg		H
DESN 54182-1	Würschnitz-1	Steinkohlenbergbau revier Oelsnitz-Lugau (südlicher Teil)	Zn, Cd, Ni	4		3	Hg	Ni	
DESN_54182-2	Würschnitz-2	Porphyrtuffbruch Leukersdorf Lehmgruben Neukirchen		4		4	Hg		
DESN 54118-2	Zschorlaubach	Bi-Co-Ni-U-Ag-bergbau Türkschacht W-Bergbau Zschorlau (Westteil)	As, U, Zn, Ni	3	As,Cu, Zn	3	Hg	Ni	
DESN 5418-1	Zwönitz-1	As-Bergbaugebiet Wille Gottes, Thalheim	As	4	As	4	Hg	Ni,Cd	
DESN 5418-2	Zwönitz-2	Altbergbau Winterleithe und Burgstädtel	As, Cu, Zn, Cd	3	As,Zn	4	Hg	Ni,Cd	
Sächsische Standgewässer-Wasserkörper									
DESN_060	Talsperre Eibenstock	Sn-Bergbau Gerstenberg und Grün (westlicher Teil)	As	2		3	Hg		H

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESN_068	Talsperre Muldenberg	-		2		3	Hg		H

Wasserkörper mit sächsischen Anteilen in Zuständigkeit der Tschechischen Republik *

CZXX_OHL_1390	Blatenský potok/Breitenbach od pramene po tok Cerna	U-Bergbau Potucky Sn-Bergbau Horny Blatna	As	2		3			
CZXX_OHL_1380	Cerná od pramene po státní hranici	Bi-Co-Ni-U- und Sn-Bergbau Oberlauf Schwarzwasser (CZ)	As, U, Zn, Cd	3		3			

fett, unterstrichen: OWK mit wahrscheinlichem Bergbaueinfluss

Dabei wurden die OWK, bei denen ein Einfluss des Bergbaus wahrscheinlich ist, markiert. Sehr deutlich zeichnet sich der Einfluss des Steinkohlenbergbaus, wahrscheinlich infolge zufließender Haldensickerwässer ab. Auch der Einfluss der Bergbaugebiete Schlema und Johanngeorgenstadt wird deutlich.

5.2 Ansatz für eine Methodik zur Abgrenzung bergbaubeeinflusster OWK

Anhand der Erkenntnisse aus dem vorangehenden Abschnitt soll ein methodischer Ansatz für die Erkennung „bergbaubeeinflusster OWK“ entwickelt werden.

Der hydrochemische Stoffbestand der Fließgewässer ist eine Kombination verschiedener Einflussfaktoren, u.a.:

- geogener Hintergrund
- Stollnwässer
- Haldensickerwässer (Bergehalten, Hüttenhalden, Industrielle Absetzanlagen)
- Industrie- und Kommunalabwässer
- Sickerwässer aus Altlasten bzw. Altstandorten
- Grundwasserzuflüsse

Das Hauptproblem bei der Erkennung bergbaubeeinflusster OWK ist daher die Abgrenzung des „Bergbaueinflusses“ von den anderen relevanten Einflüssen. Damit weist die Aufgabe große Parallelen zur Ableitung der geogenen Hintergrundwerte von anthropogenen Belastungen auf. Die Methodik dazu wurde u.a. in Greif&Klemm (2006), (2009a), (2009b) und (2010) sowie Martin (2013) und (2015) entwickelt bzw. angewandt.

Diese Methodik besteht zunächst in einer sorgfältigen Bergbauanalyse (aktueller und Altbergbau) mit einer Auflösung, die eine Zuordnung zu einzelnen Wassergütemessstellen erlaubt (Fließgewässerabschnitte). Dabei werden, soweit die betreffenden Daten verfügbar sind, alle Parameter ermittelt, die eine Einschätzung der Relevanz der Bergbauobjekte hinsichtlich einer Beeinflussung der OWK ermöglichen, u.a.:

- vorhandene Mineralisationen und Vererzungen
- Größe des Bergbauobjektes (Förderzahlen, Flächen, Haldengrößen u.a.)
- vorhandene Halden und IAA
- Elementinventar und vorhandene Erz-, Gangart- und Nebengesteinsminerale
- Voreinschätzung der Mobilisierungsbedingungen
- hydrologische und hydraulische Verhältnisse, Wasseraustritte
- Zuordnung zu den einzelnen Fließgewässern und den jeweiligen OWK

Für das EZG des Schwarzwassers wurde dies bereits durchgeführt (Martin in: Greif&Klemm 2010).

Parallel zur Altbergbauanalyse erfolgt eine Recherche und Zusammenfassung der Fließgewässerdaten über einen hinreichenden Zeitraum, so dass einerseits statistisch gesicherte Werte berechnet werden und andererseits eine möglichst große Messstellenanzahl einbezogen werden kann. Dabei werden sowohl die Wasser- als auch die Schwebstoff/Sediment-Daten einbezogen. Anschließend erfolgt eine Gruppierung der Daten für geeignete Teil-EZG. Aus den Daten werden die Mittelwerte für die gewählten Teil-EZG berechnet. Anhand eines Vergleichs der Mittelwerte an den einzelnen Messstellen mit den Mittelwerten in den Teil-EZG werden Messstellen und OWK mit erhöhten Stoffkonzentrationen erkannt.

Im Anschluss werden OWK eliminiert, für die andere Belastungsquellen mit Sicherheit bekannt sind, u.a.:

- Altlasten
- Altstandorte
- bestehende Industrie

In die Betrachtungen sollten Wechselwirkungen mit dem Grundwasser einbezogen werden. Dies kann durch Auswertung der Daten der relevanten GWK erfolgen. Außerdem ist es notwendig, relevante Sanierungsarbeiten im jeweiligen EZG zu recherchieren und zu bewerten, da diese einerseits zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen, andererseits zu kurzzeitig stärkerer Freisetzung führen können.

Als weiterer Faktor müssen Wasserüberleitungen mit betrachtet werden. Im Falle des Rothschönberger Stollns z.B. werden Grubenwässer in großem Umfang in ein anderes EZG (von der Freiburger Mulde zur Triebisch/Elbe) übergeleitet. Bei Einbeziehung größerer Fließgewässer ist auch die Verfrachtung zu abstromigen OWK mit zu betrachten.

5.3 Defizite

Im Zuge der Bearbeitung dieser Studie stellten sich vier Defizite als wesentlich heraus:

- Aus dem Monitoringprogramm ist ein umfangreicher analytischer Datenbestand mit sehr guter Qualität verfügbar. Allerdings ist der Turnus für kleinere Fließgewässer zu unregelmäßig.
- Zusätzliche Parameter, insbesondere organische, sollten stärker und häufiger einbezogen werden, um eine genauere Bewertung vornehmen zu können..
- Das größte Defizit besteht hinsichtlich einer detaillierten Auswertung der Daten, insbesondere hinsichtlich des Bergbaueinflusses. Hier könnten wertvolle zusätzliche Erkenntnisse zum Anteil der Bergbaubeeinflussung und zur Verfrachtung der eingetragenen Komponenten gewonnen werden.
- Zur genaueren Bewertbarkeit der Schadstoffeinträge und Abgrenzung des Bergbaueinflusses sollten die Stofffrachten mit betrachtet werden. Dies wäre, wenn auch mit verringerter Genauigkeit, durch routinemäßige Berechnung der Durchflussmengen anhand der Teil-EZG-Größen möglich.

6 Maßnahmen und Verfahren

6.1 Charakterisierung der Maßnahmen und Verfahren hinsichtlich einzelner Komponenten

Eine umfassende Beschreibung der Verfahren zur Behandlung bergbaubeeinflusster Wässer erfolgte im Rahmen des Projektes Vodamin, Teilprojekt 14 (Glombitza et al. 2013), In dieser Studie werden Arbeitsweise, Einsatzgebiete und Kosten betrachtet. Daher wird hier auf eine Wiederholung verzichtet und nur ein Überblick hinsichtlich der Schadstoffkombinationen gegeben. Eine Übersicht über die relevanten Technologien gibt Tabelle 20.

Bei der Wahl von geeigneten Technologien und Verfahren zur Entfernung technisch schwer entfernbare organischer oder anorganischer bergbaulicher Schadstoffe in Oberflächen-Wasserkörpern muss jeder Standort separat und individuell betrachtet werden.

Unabhängig vom zu entfernenden Schadstoff können zunächst erstmal die folgenden vier Fälle unterschieden werden:

- Große Wassermengen und geringe Konzentrationen
- Kleine Wassermengen und geringe Konzentrationen
- Kleine Wassermengen und hohe Konzentrationen
- Große Wassermengen und hohe Konzentrationen

Es gibt kein universell einsetzbares Verfahren zur Behandlung bzw. Entfernung von technisch schwer entfernbaren organischen oder anorganischen bergbaulichen Schadstoffen.

Die Behandlungstechnologien unterscheiden generell zwischen aktiven und passiven Behandlungstechnologien/Verfahren. Bei den aktiven Technologien sind Pumpen und andere technische Apparate im Einsatz und es werden Chemikalien eingesetzt. Bei den passiven Technologien werden größtenteils natürliche Prozesse nachgeahmt und auf den Einsatz von Pumpentechnik sowie Chemikaliendosierung verzichtet. Für konkrete Anwendungsfälle existieren Mischformen der Technologien.

Passive Technologien kommen eher zum Einsatz, wenn es um kleine Wassermengen mit geringen Konzentrationen zu entfernender Schadstoffe geht. Für hohe Konzentrationen reicht oft die Reinigungsleistung nicht aus und für große Wassermengen ist häufig der Platzbedarf für die zu errichtenden Behandlungsanlagen zu groß.

Aktive Technologien können prinzipiell in allen Anwendungsfällen zum Einsatz kommen, wobei auch Mischformen mit einer vorgeschalteten aktiven Vorreinigung und einer nachgeschalteten passiven Endreinigung zum Einsatz kommen.

Unter die aktiven Technologien werden die folgenden Verfahren gezählt:

- Fällungsprozesse
- Membranverfahren
- Ionenaustauscher
- Adsorption
- Elektrochemische Verfahren
- Biotechnologische Verfahren
- Inlake-Behandlungen
- Vakuumverdampfung

Bei geeigneten Geländeformationen ist es denkbar, dass ein Teil der notwendigen Pumpentechnik und –energie durch die Nutzung eines Durchflusses im freien Gefälle durch die Anlage eingespart wird. Ebenso denkbar, zumindest für kleinere Wassermengen, ist die Verwendung von gekapselten System, die nach dem Prinzip einer Heberleitung funktionieren.

Die passiven Technologien werden im Wesentlichen in aerobe und anaerobe Wetlands sowie naturnahe Absetzräume unterschieden. Eine Ausführliche Beschreibung der Wetland-Technologie einschließlich Bewertung von Eignung und Einsatzmöglichkeiten und Kosten erfolgte in der Studie Glombitza et al. 2016.

Eine Übersicht über mögliche Behandlungstechnologien und ihre Eignung für die Entfernung der unterschiedlichen, betrachteten Stoffe gibt Tabelle 20.

6.2 Charakterisierung der Maßnahmen und Verfahren hinsichtlich Schadstoffkombinationen

6.2.1 Schadstoffkombination Eisen - Sulfat

Diese Kombination an Schadstoffen tritt vor allem in Gebieten mit bestehendem bzw. historischem Braunkohlenbergbau auf, wo in den Sumpfungswässern neben hohen Fe(II)-Gehalten gleichzeitig hohe Sulfatkonzentrationen auftreten. Die Entfernung des Eisens erfolgt über eine pH-Wertanhebung mit gleichzeitiger Belüftung zur Oxidation des zweiwertigen Eisens. Als preiswertes Neutralisationsmittel wird in den meisten Fällen Kalkhydrat eingesetzt. Dieses sogenannte Kalkfällverfahren ist das weltweit am häufigsten genutzte Standardverfahren zur Neutralisation von sauren Bergbauwässern mit Ausfällung von Eisenhydroxid. Gleichzeitig werden weitere Metalle und Metalloide mit ausgefällt. Sulfat kann durch dieses Verfahren nur teilweise entfernt werden, was durch die Löslichkeit Gips von bedingt ist, wobei Sulfatrestkonzentrationen < 2000 mg/L erreichbar sind. Allerdings funktioniert die Gipsfällung nur aus sauren Bergbauwässern, die relativ geringe Gehalte an Neutralsalzen (Na^+ und Mg^{2+}) aufweisen. Bei Anwesenheit von Mg^{2+} muss dieses durch einstellen eines sehr hohen pH-Wertes (pH 9-10) als $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gefällt werden. Die Gipsfällung kann dann bei Anwesenheit von in einer zweiten Fällungsphase durchgeführt werden.

Sulfat-Konzentrationen < 2000 mg/L bilden den Anteil an Sulfat, der als schwer entfernbar zu bezeichnen ist. Für diesen Konzentrationsbereich sind eine ganze Reihe physikalischer, chemischer, biologischer und naturnaher Verfahren zur Sulfatentfernung aus Bergbauwässern bekannt. Eine erste Monographie zu dieser Problematik wurde von dem International Network for Acid Prevention veröffentlicht (INAP, 2003). Eine neuere Zusammenstellung und Bewertung von Sulfatabtrennungsverfahren findet sich in einer von der Vattenfall Europe Mining (VEM) in Auftrag gegebenen Studie aus dem Jahre 2008 (Janneck et al., 2008). Eine Übersicht zur Eignung einzelner Verfahren zur Sulfatabtrennung wird in Tabelle 20 gegeben.

6.2.2 Schadstoffkombination Arsen - Uran

Die Kombination Arsen - Uran tritt vor allem in den Gebieten des ehemaligen Uranbergbaus im Erzgebirge, vor allem in den Revieren Schlema, Jaohanngeorgenstadt und Pöhla auf. Arsen und Uran stellen jedoch keine „schwer entfernbaren Schadstoffe“ dar, da eine Reihe geeigneter Verfahren existieren und in Schlema und Pöhla Wasserbehandlungsanlagen betrieben werden.

6.2.3 Wässer mit überwiegend Arsen

Arsen tritt häufig in Bergbauwässern auf, vor allem in solchen des Zinnerz-, Uranerz- und Buntmetallbergbaus. Es stellt jedoch keinen „schwer entfernbaren Schadstoff“ dar. Die beiden Verfahren

- Kopräzipitation mit Fe(III)-Verbindungen im Zuge der Kalkfällung
- Sorption an Fe(III)-Verbindungen

stehen Optionen zur Verfügung, die eine Reinigung der Wässer bis zu sehr niedrigen Konzentrationen erlauben.

6.2.4 Schadstoffkombination Zink - Cadmium - (Nickel, Sulfat)

Wässer mit erhöhten Gehalten an Zink und Cadmium, häufig auch Nickel und Sulfat finden sich besonders im ehemaligen Freiburger Bergbaurevier. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Belastung der Freiburger Mulde und Elbe liegt eine Reihe von Studien vor, in denen die Technologien zur Behandlung dieser Wässer ausführlich beschrieben und bewertet werden (z.B. Martin et al. 2010). Die zweiwertigen Metalle Zn, Cd und Ni sind dabei technisch besonders schwer entfernbar.

6.2.5 Schadstoffkombination Nickel (Zink - Cadmium)

Schadstoffkombinationen mit vorherrschendem Nickel finden sich vor allem in Wässern, die durch den Festgesteinsabbau beeinflusst sind. Besonders groß sind dabei der Grauwacke- und der Diabas-Abbau. Dabei sind sowohl Wasserhaltungswässer der Steinbrüche als auch Sickerwässer der Abraumhalden von Bedeutung. Nähere Ausführungen finden sich in Martin 2013 und Martin 2015.

Zur Reinigung solcher Wässer sind Hydrolyse-Fällungsverfahren unter Zusatz von Carbonat, die Nachbehandlung mittels Kalkfiltern und Selektiv-Ionenaustauscher besonders geeignet. Wegen der relativ kleinen Wassermengen kommen grundsätzlich auch naturnahe Verfahren, wie Wetlands in Frage (Glombitza 2013).

Tabelle 20: Verfahrensvergleich chemische, physikalische, biologische und naturnahe Prozesse und Bewertung

Prozess	Bezeichnung	Sulfat	Fe	Cd	Ni	As	Zn	U	Organika	Bemerkung
Chemische und Fällungsprozesse										
Kalk	Kalkstein/Kalk	o	x	x	x	x	x	o	-	für Cd, Zn und Ni Kombination mit Na ₂ CO ₃ -Fällung vorteilhaft
Bariumverbindungen	Bariumsulfat	x	-	-	-	-	-	-	-	spezifisches Fällungsmittel für Radium-Nuklide, meist in Kombination mit As-U-Abtrennung eingesetzt
Aluminiumverbindungen	Savmin	x	x	x	x	x	x	-	-	Verfahren zur Sulfatabtrennung, Schwermetalle werden parallel abgetrennt,
	CESR/ Walhalla	x	x	x	x	x	x	-	-	
Physikalische Prozesse										
Membranen	Umkehrosmose	x	x	x	x	x	x	x	o	Konzentratbehandlung notwendig
	Nanofiltration	x	x	x	x	x	x	x	o	
Ionenaustauscher	Selektivaustauscher	x	x	x	x	o	x	x	o	Regenerierung kann ggf. extern erfolgen, Konzentratbehandlung ist notwendig
	Gyp-Cix	x	-	-	-	-	-	-	o	
	Carix	x	-	-	-	-	-	-	o	
Adsorption	Aktivkohle	-	-	-	-	-	-	-	x	Standardverfahren zur Abtrennung organischer Verbindungen, Sorptionsmittel muss nach Beladung entsorgt werden.
	Adsorptionsmittel auf Eisenbasis	-	-	-	-	x	-	-	-	Besondere Eignung zur Abtrennung von As, beladenes Sorptionsmittel muss entsorgt werden
Elektrolyse	Rodosan	x	-	-	-	-	-	-	-	
	Elektrodialyse	x	x	x	x		x	x	-	
Vakuumverdampfung		x	x	x	x	x	x	x	o	universell zur Wasserreinigung einsetzbar, Verdampfungsrückstand muss behandelt/entsorgt werden, relativ kostspielig durch hohen Energiebedarf

Prozess	Bezeichnung	Sulfat	Fe	Cd	Ni	As	Zn	U	Organika	Bemerkung
Biologische Prozesse										
Sulfatreduktion	Paques Thiomet	x	-	-	-	-	-	-	-	Nutzung der Sulfidogenese zur Abtrennung von Metallen
	Paques Thiopaq	x	-	-	-	-	-	-	-	
	HLSR (Hochleistungs- sulfatreduktion)	x	x	x	x	x	x	x	x	
Eisenhydroxisulfat	mikrobiologische	x	x	-	-	-	-	-	-	
naturnahe Prozesse										
Wetlands		x	x	x	x	x	x	x	x	jahreszeitliche Schwankung der Abtrennleistung, niedrige spezifische Abtrennleistung, daher hoher Flächenbedarf
Naturnahe Absetzräume		o	x	o	o	o	o	o	o	
In-lake- Behandlung		o	x	o	x	x	x	x	-	
Infiltration	z.B. Kippen- infiltration	x	x	o	o	o	o	o	o	

Eignung der Prozesse

- x sehr gut geeignet
- o bedingt geeignet
- nicht geeignet

Um unter der Vielzahl der Verfahren das richtige Verfahren oder die richtige Verfahrenskombination auszuwählen, sind in jedem Fall Versuche zur Wasserreinigung im Labor- und/oder Pilotmaßstab für den konkreten Anwendungsfall notwendig.

Dabei ist zwar die Ermittlung der Reinigungsleistung das primäre Ziel der Untersuchungen, aber nahezu ebenso wichtig im Hinblick auf einen späteren großtechnischen Betrieb sind die Ermittlungen von Chemikalienverbrauchsmengen, Energieverbräuchen und von Entsorgungsmengen.

Je nach gewählter Technologie fallen dabei unterschiedliche Stoffe zur Entsorgung an:

- Schlämme aus der Fällung
 - Zur Entwässerung und Entsorgung
- Beladene Adsorptionsmittel
 - Zur Entsorgung
- Beladene Ionenaustauscherharze
 - Zur Regeneration und Wiederverwendung
 - Zur Entsorgung
- Konzentrate aus der Membranfiltration
 - Zur Entsorgung
 - Zur Behandlung (z.B. Fällung) inkl. Schlamm Entsorgung
 - Zur Eindampfung

Anlage 1: Statistische Auswertung der PAK-Konzentrationen im EZG Zwickauer Mulde 2013-2015

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Benzo(b)fluoranthen (UQN-ZHK 0,017 µg/l 17 ng/l)								
Rote Mulde	OBF38640	Zufluss TS Muldenberg	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rählerbach	OBF38901	oh. VB Rählerbach	4	<1	2	<1	<1	1,7
Reinsdorfer Bach	OBF39403	Oberhohndorf, Kieshalde	4	<1	<1	<1	<1	<1
Mühlgraben	OBF39702	Mühlgraben vor Mündung in Zwick. Mulde	4	<1	4	1,2	<1	3,0
Callenberger Bach	OBF39801	oh. Elisenteich	4	<1	5	1,8	<1	3,8
Erlsbach	OBF40301	Mündung	7	<1	4	1,3	<1	2,8
Schwarzbach	OBF40302	B 107	4	<1	<1	<1	<1	<1
Weißbach	OBF40303	uh. TS Königsfeld, Mdg.	7	<1	<1	<1	<1	<1
Erlsbach	OBF40304	uh. Doberenz	7	<1	2	1,2	1,0	2,0
Kohlbach	OBF40451	Am Teichhaus	4	<1	1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40600	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40601	u. Kanal Automobilguss GmbH	4	<1	1	<1	<1	<1
Kleine Pyra	OBF40610	Jägersgrün	3	<1	<1	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40628	Brücke Morgenrötherstr.	8	<1	3	<1	<1	1,3
Wilzsch	OBF40629	alte Bahnbrücke	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40630	Wilzschhaus uh. Carlsf.	8	<1	5	<1	<1	2,2
Wilzsch	OBF40631	oh. TS	7	<1	<1	<1	<1	<1
Große Bockau	OBF40650	Blauenthal, Mdg.	8	<1	3	<1	<1	<1
Sosabach	OBF40660	Mündung	4	<1	5	1,8	1,1	4,1
Zschorlaubach	OBF40670	Neudörfel/Aue	4	<1	71	17,9	<1	49,9
Filzbach	OBF40675	Zufluss Filzteich 1, Filzbach	10	<1	3	<1	<1	1,2
Johgst. Schwarzwasser	OBF40701	oh. Bahnhof	4	<1	<1	<1	<1	<1
Breitenbach	OBF40703	Wittigsthal	4	<1	<1	<1	<1	<1
Steinbach	OBF40803	Mdg. Strbrücke uh. Krankenhaus Erlabrunn	4	<1	2	<1	<1	1,4
Johgst. Schwarzwasser	OBF40900	oh. Schwarzenberg	10	<1	4	1,2	<1	3,1
Johgst. Schwarzwasser	OBF41202	uh. Niederpfannenstiel	22	<1	65	6,3	1,0	6,6
Große Mittweida	OBF41500	Dietrichsmühle	4	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Kleine Mittweida	OBF41503	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Große Mittweida	OBF41700	Mündung	16	<1	6	1,4	<1	3,5
Pöhlwasser	OBF41710	oh. Ehrenzipfel	8	<1	<1	<1	<1	<1
Pöhlwasser	OBF41800	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Friedrichsbach	OBF41811	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<15	<1	<1
Schlemabach	OBF42000	Mündung	4	<1	25	6,6	<1	17,8
Rödelbach	OBF42200	oh. Kirchberg/ Bärenwalde	6	<1	13	4,2	2,5	9,5
Hirschfelder Wasser	OBF42202	uh. Hirschfeld	4	<1	2	1,1	1,1	2,0
Crinitzer Wasser	OBF42210	oh. TS Wolfersgrün	4	<1	5	3,1	3,5	4,7
Rödelbach	OBF42300	Mündung	6	1	10	3,7	3,0	7,0
Lungwitzbach	OBF42800	uh. Hermsdorf / Bernsdorf	4	<1	1	<1	<1	1,0
Lungwitzbach	OBF42900	uh. St. Egidien	4	<1	2	<1	<1	1,6
Lungwitzbach	OBF42950	Str. am Lungwitzbach	4	<1	93	25,0	3,5	66,9
Lungwitzbach	OBF43000	Mündung	8	<1	5	1,4	<1	2,9
Hegebach	OBF43100	Gersdorf	4	<1	1	<1	<1	<1
Rödlitzbach	OBF43200	Rüsdorf	8	<1	3	<1	<1	2,3
Langenberger Bach	OBF43400	Langenchursdorf	4	2	9	4,3	3,0	7,5
Frohnbach	OBF43501	oh. Einleitung Fa Schießler	4	1	3	2,3	2,5	3,0
Frohnbach	OBF43600	Ortsausgang Niederfrohna	4	<1	8	3,8	3,5	7,1
Brauselochbach	OBF43800	uh. Burgstädt	8	<1	24	4,1	1,3	10,0
Erlbach	OBF43900	Mdg. in Biesern	4	<1	3	<1	<1	2,3
Frankenauer Bach	OBF43902	Mündung	4	<1	4	1,3	<1	3,0
Zwönitz	OBF44000	uh. Zwönitz	12	<1	32	4,2	<1	7,6
Zwönitz	OBF44030	Dorfchemnitz	4	<1	75	21,8	6,0	55,5
Zwönitz	OBF44040	Thalheim, Bahnhofstr.	4	<1	11	3,3	1,1	8,3
Zwönitz	OBF44050	20m oh. ZKA	12	<1	13	3,7	2,5	10,3
Zwönitz	OBF44100	Thalheim	22	<1	16	2,4	1,0	4,0
Gornsdorfer Bach	OBF44101	vor Mündung	6	<1	18	3,7	1,0	9,5
Zwönitz	OBF44150	Straßenbrücke Abzweig Adorf	12	<1	30	6,5	2,0	21,0
Zwönitz	OBF44200	Kemtau	4	2	20	6,8	2,5	14,9

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Zwönitz	OBF44400	Mdg. Altchemnitz 1	20	<1	110	11,2	2,0	20,6
Chemnitz	OBF44700	vor KA Glösa	22	<1	60	6,2	3,0	9,8
Königshainer Bach	OBF44902	Wiederau	6	<1	3	<1	<1	2,0
Wiederbach	OBF44903	Mündung	6	<1	2	<1	<1	1,3
Königshainer Bach	OBF44904	Königshain	6	<1	3	1,1	<1	2,5
Chemnitz	OBF45000	Göritzhein	36	<1	100	5,1	1,5	7,0
Chemnitz	OBF45010	Göritzhein, Brücke	4	<1	3	1,6	1,5	2,7
Würschnitz	OBF45100	Neuwürschnitz	4	<1	<1	<1	<1	<1
Würschnitz	OBF45400	Mdg. Altchemnitz 2	4	<1	10	3,9	2,5	8,2
Oberer Querenbach	OBF45510	Mündung	7	<1	3	<1	<1	1,8
Zufluss Gablenzbach	OBF45511	uh. Sportplatz	7	<1	<1	<1	<1	<1
Unterer Querenbach	OBF45520	Brücke oh. Teiche	7	<1	1	<1	<1	<1
Oberdorfer Bach	OBF45530	oh. Oberdorf	7	<1	<1	<1	<1	<1
Gablenzbach	OBF45600	Mdg. / uh. KA Niederdorf	13	<1	6	1,1	<1	2,0
Kappelbach	OBF45900	Mündung / Pfortensteg	14	<1	20	2,9	2,0	3,7
Kappelbach	OBF45902	Barbarossastraße	6	<1	10	2,9	1,3	7,0
Kappelbach	OBF45903	Pornitzstraße	6	<1	7	2,0	<1	5,5
Pleißebach	OBF46100	Beyerstraße	4	<1	4	1,8	1,3	3,4
Röllinghainer Bach	OBF46300	Markersdorf	4	<1	26	7,2	1,3	18,8
Aubach	OBF46600	Mündung Döhlen	4	<1	<1	<1	<1	<1
Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Benzo(k)fluoranthen (UQN-ZHK 0,017 µg/l 17 ng/l)								
Rote Mulde	OBF38640	Zufluss TS Muldenberg	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rähmerbach	OBF38901	oh. VB Rähmersbach	4	<1	1	<1	<1	<1
Reinsdorfer Bach	OBF39403	Oberhohndorf, Kieshalde	4	<1	<1	<1	<1	<1
Mühlgraben	OBF39702	Mühlgraben vor Mündung in Zwick. Mulde	4	<1	2	<1	<1	1,4
Callenberger Bach	OBF39801	oh. Elisenteich	4	<1	4	1,2	<1	3,0
Erlsbach	OBF40301	Mündung	7	<1	2	<1	<1	1,4
Schwarzbach	OBF40302	B 107	4	<1	<1	<1	<1	<1
Weißbach	OBF40303	uh. TS Königsfeld, Mdg.	7	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Erlsbach	OBF40304	uh. Doberenz	7	<1	1	<1	<1	1,0
Kohlbach	OBF40451	Am Teichhaus	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40600	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40601	u. Kanal Automobilguss GmbH	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Pyra	OBF40610	Jägersgrün	3	<1	<1	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40628	Brücke Morgenrötherstr.	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40629	alte Bahnbrücke	8	<1	1	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40630	Wilzschhaus uh. Carlsf.	8	<1	3	<1	<1	1,3
Wilzsch	OBF40631	oh. TS	7	<1	<1	<1	<1	<1
Große Bockau	OBF40650	Blauenthal, Mdg.	8	<1	2	<1	<1	<1
Sosabach	OBF40660	Mündung	4	<1	4	1,3	<1	3,1
Zschorlaubach	OBF40670	Neudörfel/Aue	4	<1	<u>41</u>	10,3	<1	28,7
Filzbach	OBF40675	Zufluss Filzteich 1, Filzbach	10	<1	2	<1	<1	<1
Johgst. Schwarzwasser	OBF40701	oh. Bahnhof	4	<1	<1	<1	<1	<1
Breitenbach	OBF40703	Wittigsthal	4	<1	<1	<1	<1	<1
Steinbach	OBF40803	Mdg. Strbrücke uh. Krankenhaus Erlabrunn	4	<1	1	<1	<1	<1
Johgst. Schwarzwasser	OBF40900	oh. Schwarzenberg	10	<1	3	<1	<1	2,1
Johgst. Schwarzwasser	OBF41202	uh. Niederpfannenstiel	22	<1	<u>36</u>	3,8	<1	5,6
Große Mittweida	OBF41500	Dietrichsmühle	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Mittweida	OBF41503	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Große Mittweida	OBF41700	Mündung	16	<1	3	<1	<1	2,0
Pöhlwasser	OBF41710	oh. Ehrenzipfel	8	<1	<1	<1	<1	<1
Pöhlwasser	OBF41800	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Friedrichsbach	OBF41811	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Schlemabach	OBF42000	Mündung	4	<1	15	3,9	<1	10,7
Rödelbach	OBF42200	oh. Kirchberg/Bärenwalde	6	<1	8	2,5	1,3	6,0
Hirschfelder Wasser	OBF42202	uh. Hirschfeld	4	<1	1	<1	<1	1,0
Crinitzer Wasser	OBF42210	oh. TS Wolfersgrün	4	<1	3	2,0	2,5	3,0
Rödelbach	OBF42300	Mündung	6	<1	6	2,2	1,5	4,5
Lungwitzbach	OBF42800	uh. Hermsdorf /	4	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
		Bernsdorf						
Lungwitzbach	OBF42900	uh. St. Egidien	4	<1	1	<1	<1	<1
Lungwitzbach	OBF42950	Str. am Lungwitzbach	4	<1	<u>51</u>	13,9	2,3	36,9
Lungwitzbach	OBF43000	Mündung	8	<1	4	<1	<1	1,9
Hegebach	OBF43100	Gersdorf	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rödlitzbach	OBF43200	Rüsdorf	8	<1	2	<1	<1	1,3
Langenberger Bach	OBF43400	Langenchursdorf	4	1	6	2,8	2,0	5,1
Frohnbach	OBF43501	oh. Einleitung Fa Schießler	4	<1	2	1,4	1,5	2,0
Frohnbach	OBF43600	Ortsausgang Niederfrohna	4	<1	6	2,7	2,3	5,4
Brauselochbach	OBF43800	uh. Burgstädt	8	<1	14	2,3	<1	5,6
Erlbach	OBF43900	Mdg. in Biesern	4	<1	2	<1	<1	1,4
Frankenauer Bach	OBF43902	Mündung	4	<1	3	<1	<1	2,1
Zwönitz	OBF44000	uh. Zwönitz	12	<1	<u>18</u>	2,4	<1	4,8
Zwönitz	OBF44030	Dorfchemnitz	4	<1	<u>43</u>	12,5	3,5	31,9
Zwönitz	OBF44040	Thalheim, Bahnhofstr.	4	<1	7	2,1	<1	5,2
Zwönitz	OBF44050	20m oh. ZKA	12	<1	7	2,2	1,5	5,7
Zwönitz	OBF44100	Thalheim	22	<1	9	1,2	<1	2,0
Gornsdorfer Bach	OBF44101	vor Mündung	6	<1	10	2,0	<1	5,3
Zwönitz	OBF44150	Straßenbrücke Abzweig Adorf	12	<1	17	3,9	1,3	11,7
Zwönitz	OBF44200	Kemtau	4	1	11	4,0	2,0	8,3
Zwönitz	OBF44400	Mdg. Altchemnitz 1	20	<1	<u>70</u>	6,8	1,0	12,2
Chemnitz	OBF44700	vor KA Glösa	22	<1	<u>36</u>	3,7	2,0	6,8
Königshainer Bach	OBF44902	Wiederau	6	<1	<1	<1	<1	<1
Wiederbach	OBF44903	Mündung	6	<1	1	<1	<1	<1
Königshainer Bach	OBF44904	Königshain	6	<1	2	<1	<1	1,5
Chemnitz	OBF45000	Göritzhein	36	<1	<u>47</u>	2,7	<1	4,0
Chemnitz	OBF45010	Göritzhein, Brücke	4	<1	2	1,0	<1	1,7
Würschnitz	OBF45100	Neuwürschnitz	4	<1	<1	<1	<1	<1
Würschnitz	OBF45400	Mdg. Altchemnitz 2	4	<1	6	2,3	1,3	4,8
Oberer Querenbach	OBF45510	Mündung	7	<1	2	<1	<1	1,1
Zufluss Gablenzbach	OBF45511	uh. Sportplatz	7	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Unterer Querenbach	OBF45520	Brücke oh. Teiche	7	<1	<1	<1	<1	<1
Oberdorfer Bach	OBF45530	oh. Oberdorf	7	<1	<1	<1	<1	<1
Gablenzbach	OBF45600	Mdg. / uh. KA Niederdorf	13	<1	3	<1	<1	1,0
Kappelbach	OBF45900	Mündung / Pfortensteg	14	<1	14	1,8	<1	2,0
Kappelbach	OBF45902	Barbarossastraße	6	<1	6	1,6	<1	4,0
Kappelbach	OBF45903	Pornitzstraße	6	<1	4	1,1	<1	3,0
Pleißebach	OBF46100	Beyerstraße	4	<1	2	<1	<1	1,7
Röllinghainer Bach	OBF46300	Markersdorf	4	<1	14	3,8	<1	1<1
Aubach	OBF46600	Mündung Döhlen	4	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Benzo(a)pyren (UQN-JD 0,0017 µg/l = 1,7 ng/l; UQN-ZHK 0,27 µg/l = 270 ng/l)								
Rote Mulde	OBF38640	Zufluss TS Muldenberg	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rähmerbach	OBF38901	oh. VB Rähmersbach	4	<1	2	<1	<1	1,7
Reinsdorfer Bach	OBF39403	Oberhohndorf, Kieshalde	4	<1	<1	<1	<1	<1
Mühlgraben	OBF39702	Mühlgraben vor Mündung in Zwick. Mulde	4	<1	5	1,4	<1	3,7
Callenberger Bach	OBF39801	oh. Elisenteich	4	<1	3	<1	<1	2,3
Erlsbach	OBF40301	Mündung	7	<1	5	1,3	<1	3,2
Schwarzbach	OBF40302	B 107	4	<1	<1	<1	<1	<1
Weißbach	OBF40303	uh. TS Königsfeld, Mdg.	7	<1	<1	<1	<1	<1
Erlsbach	OBF40304	uh. Doberenz	7	<1	2	<1	<1	2,0
Kohlbach	OBF40451	Am Teichhaus	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40600	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40601	u. Kanal Automobilguss GmbH	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Pyra	OBF40610	Jägersgrün	3	<1	<1	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40628	Brücke Morgenrötherstr.	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40629	alte Bahnbrücke	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40630	Wilzschhaus uh. Carlsf.	8	<1	5	<1	<1	1,9
Wilzsch	OBF40631	oh. TS	7	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Große Bockau	OBF40650	Blauenthal, Mdg.	8	<1	2	<1	<1	<1
Sosabach	OBF40660	Mündung	4	<1	7	<u>2,1</u>	<1	5,2
Zschorlaubach	OBF40670	Neudörfel/Aue	4	<1	63	<u>15,8</u>	<1	44,1
Filzbach	OBF40675	Zufluss Filzteich 1, Filzbach	10	<1	3	<1	<1	<1
Johgst. Schwarzwasser	OBF40701	oh. Bahnhof	4	<1	<1	<1	<1	<1
Breitenbach	OBF40703	Wittigsthal	4	<1	<1	<1	<1	<1
Steinbach	OBF40803	Mdg. Strbrücke uh. Krankenhaus Erlabrunn	4	<1	2	<1	<1	1,4
Johgst. Schwarzwasser	OBF40900	oh. Schwarzenberg	10	<1	5	1,2	<1	2,3
Johgst. Schwarzwasser	OBF41202	uh. Niederpfannenstiel	22	<1	59	<u>6,1</u>	<1	7,5
Große Mittweida	OBF41500	Dietrichsmühle	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Mittweida	OBF41503	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Große Mittweida	OBF41700	Mündung	16	<1	7	1,3	<1	3,5
Pöhlwasser	OBF41710	oh. Ehrenzipfel	8	<1	<1	<1	<1	<1
Pöhlwasser	OBF41800	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Friedrichsbach	OBF41811	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Schlemabach	OBF42000	Mündung	4	<1	28	<u>7,1</u>	<1	19,6
Rödelbach	OBF42200	oh. Kirchberg/Bärenwalde	6	<1	17	<u>4,7</u>	2,0	12,0
Hirschfelder Wasser	OBF42202	uh. Hirschfeld	4	<1	2	1,1	1,1	2,0
Crinitzer Wasser	OBF42210	oh. TS Wolfersgrün	4	<1	4	<u>2,3</u>	2,5	3,7
Rödelbach	OBF42300	Mündung	6	1	11	<u>4,0</u>	3,0	8,0
Lungwitzbach	OBF42800	uh. Hermsdorf / Bernsdorf	4	<1	<1	<1	<1	<1
Lungwitzbach	OBF42900	uh. St. Egidien	4	<1	3	<1	<1	2,1
Lungwitzbach	OBF42950	Str. am Lungwitzbach	4	<1	72	<u>20,3</u>	4,5	52,8
Lungwitzbach	OBF43000	Mündung	8	<1	4	<1	<1	1,9
Hegebach	OBF43100	Gersdorf	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rödlitzbach	OBF43200	Rüsdorf	8	<1	4	<1	<1	2,6
Langenberger Bach	OBF43400	Langenchursdorf	4	1	11	<u>4,3</u>	2,5	8,9
Frohnbach	OBF43501	oh. Einleitung Fa Schießler	4	<1	4	1,7	1,3	3,4
Frohnbach	OBF43600	Ortsausgang Niederfrohna	4	<1	7	<u>3,4</u>	3,3	6,7
Brauselochbach	OBF43800	uh. Burgstädt	8	<1	23	<u>3,9</u>	1,1	9,0

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Erlbach	OBF43900	Mdg. in Biesern	4	<1	2	<1	<1	1,4
Frankenauer Bach	OBF43902	Mündung	4	<1	2	<1	<1	1,4
Zwönitz	OBF44000	uh. Zwönitz	12	<1	26	<u>3.3</u>	<1	7,6
Zwönitz	OBF44030	Dorfchemnitz	4	<1	87	<u>25.3</u>	7,0	64,5
Zwönitz	OBF44040	Thalheim, Bahnhofstr.	4	<1	13	<u>3.8</u>	1,1	9,7
Zwönitz	OBF44050	20m oh. ZKA	12	<1	12	<u>3.0</u>	2,0	8,5
Zwönitz	OBF44100	Thalheim	22	<1	16	<u>2.2</u>	<1	4,9
Gornsdorfer Bach	OBF44101	vor Mündung	6	<1	24	<u>4.5</u>	<1	12,5
Zwönitz	OBF44150	Straßenbrücke Abzweig Adorf	12	<1	26	<u>5.8</u>	1,3	20,3
Zwönitz	OBF44200	Kemtau	4	<1	19	<u>5.5</u>	1,3	13,9
Zwönitz	OBF44400	Mdg. Altchemnitz 1	20	<1	110	<u>11.2</u>	2,0	19,4
Chemnitz	OBF44700	vor KA Glösa	22	<1	61	<u>6.5</u>	3,0	9,9
Königshainer Bach	OBF44902	Wiederau	6	<1	<1	<1	<1	<1
Wiederbach	OBF44903	Mündung	6	<1	1	<1	<1	<1
Königshainer Bach	OBF44904	Königshain	6	<1	3	<1	<1	1,8
Chemnitz	OBF45000	Göritzshain	36	<1	78	<u>4.4</u>	1,0	6,5
Chemnitz	OBF45010	Göritzshain, Brücke	4	<1	2	<u>1.2</u>	1,3	2,0
Würschnitz	OBF45100	Neuwürschnitz	4	<1	<1	<1	<1	<1
Würschnitz	OBF45400	Mdg. Altchemnitz 2	4	<1	9	<u>3.3</u>	2,1	7,5
Oberer Querenbach	OBF45510	Mündung	7	<1	2	<1	<1	<1
Zufluss Gablenzbach	OBF45511	uh. Sportplatz	7	<1	<1	<1	<1	<1
Unterer Querenbach	OBF45520	Brücke oh. Teiche	7	<1	1	<1	<1	<1
Oberdorfer Bach	OBF45530	oh. Oberdorf	7	<1	<1	<1	<1	<1
Gablenzbach	OBF45600	Mdg. / uh. KA Niederdorf	13	<1	6	<1	<1	2,0
Kappelbach	OBF45900	Mündung / Pfortensteg	14	<1	28	<u>3.2</u>	1,0	4,1
Kappelbach	OBF45902	Barbarossastraße	6	<1	8	<u>2.5</u>	1,5	6,0
Kappelbach	OBF45903	Pornitzstraße	6	<1	6	<u>1.8</u>	<1	5,0
Pleißebach	OBF46100	Beyerstraße	4	<1	3	1,2	<1	2,4
Röllinghainer Bach	OBF46300	Markersdorf	4	<1	21	<u>5.4</u>	<1	14,9
Aubach	OBF46600	Mündung Döhlen	4	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Benzo(ghi)perylen (UQN-ZHK 0,0082 µg/l = 8,2 ng/l)								
Rote Mulde	OBF38640	Zufluss TS Muldenberg	4	<1	<1	<1	<1	<1
Rählerbach	OBF38901	oh. VB Rähmersbach	4	<1	1	<1	<1	<1
Reinsdorfer Bach	OBF39403	Oberhohndorf, Kieshalde	4	<1	<1	<1	<1	<1
Mühlgraben	OBF39702	Mühlgraben vor Mündung in Zwick. Mulde	4	<1	3	<1	<1	2,3
Callenberger Bach	OBF39801	oh. Elisenteich	4	<1	2	<1	<1	1,6
Erlsbach	OBF40301	Mündung	7	<1	3	<1	<1	1,5
Schwarzbach	OBF40302	B 107	4	<1	<1	<1	<1	<1
Weißbach	OBF40303	uh. TS Königsfeld, Mdg.	7	<1	<1	<1	<1	<1
Erlsbach	OBF40304	uh. Doberenz	7	<1	2	<1	<1	2,0
Kohlbach	OBF40451	Am Teichhaus	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40600	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Dorfbach Schönheide	OBF40601	u. Kanal Automobilguss GmbH	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Pyra	OBF40610	Jägersgrün	3	<1	<1	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40628	Brücke Morgenrötherstr.	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40629	alte Bahnbrücke	8	<1	2	<1	<1	<1
Wilzsch	OBF40630	Wilzschhaus uh. Carlsf.	8	<1	4	<1	<1	1,3
Wilzsch	OBF40631	oh. TS	7	<1	<1	<1	<1	<1
Große Bockau	OBF40650	Blauenthal, Mdg.	8	<1	2	<1	<1	<1
Sosabach	OBF40660	Mündung	4	<1	3	1,1	<1	2,4
Zschorlaubach	OBF40670	Neudörfel/Aue	4	<1	50	12,6	<1	35,0
Filzbach	OBF40675	Zufluss Filzteich 1, Filzbach	10	<1	2	<1	<1	<1
Johgst. Schwarzwasser	OBF40701	oh. Bahnhof	4	<1	<1	<1	<1	<1
Breitenbach	OBF40703	Wittigsthal	4	<1	<1	<1	<1	<1
Steinbach	OBF40803	Mdg. Strbrücke uh. Krankenhaus Erlabrunn	4	<1	<1	<1	<1	<1
Johgst. Schwarzwasser	OBF40900	oh. Schwarzenberg	10	<1	2	<1	<1	2,0
Johgst. Schwarzwasser	OBF41202	uh. Niederpfannenstiel	22	<1	42	4,3	<1	4,7
Große Mittweida	OBF41500	Dietrichsmühle	4	<1	<1	<1	<1	<1
Kleine Mittweida	OBF41503	oh. Entnahme	8	<1	<1	<1	<1	<1

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
		Rohwasser						
Große Mittweida	OBF41700	Mündung	16	<1	4	<1	<1	2,0
Pöhlwasser	OBF41710	oh. Ehrenzipfel	8	<1	<1	<1	<1	<1
Pöhlwasser	OBF41800	Mündung	4	<1	<1	<1	<1	<1
Friedrichsbach	OBF41811	oh. Entnahme Rohwasser	8	<1	<1	<1	<1	<1
Schlemabach	OBF42000	Mündung	4	<1	17	4,4	<1	12,1
Rödelbach	OBF42200	oh. Kirchberg/ Bärenwalde	6	<1	11	3,2	2,0	7,5
Hirschfelder Wasser	OBF42202	uh. Hirschfeld	4	<1	2	1,1	1,1	2,0
Crinitzer Wasser	OBF42210	oh. TS Wolfersgrün	4	<1	3	2,0	2,5	3,0
Rödelbach	OBF42300	Mündung	6	<1	8	2,7	2,0	5,5
Lungwitzbach	OBF42800	uh. Hermsdorf / Bernsdorf	4	<1	<1	<1	<1	<1
Lungwitzbach	OBF42900	uh. St. Egidien	4	<1	2	<1	<1	1,4
Lungwitzbach	OBF42950	Str. am Lungwitzbach	4	<1	62	17,2	3,3	45,2
Lungwitzbach	OBF43000	Mündung	8	<1	2	<1	<1	1,3
Hegebach	OBF43100	Gersdorf	4	<1	3	<1	<1	2,1
Rödlitzbach	OBF43200	Rüsdorf	8	<1	2	<1	<1	1,3
Langenberger Bach	OBF43400	Langenchursdorf	4	<1	6	2,6	2,0	5,1
Frohnbach	OBF43501	oh. Einleitung Fa Schießer	4	<1	2	1,3	1,5	2,0
Frohnbach	OBF43600	Ortsausgang Niederfrohna	4	<1	4	1,7	1,3	3,4
Brauselochbach	OBF43800	uh. Burgstädt	8	<1	12	2,3	1,1	5,0
Erlbach	OBF43900	Mdg. in Biesern	4	<1	1	<1	<1	<1
Frankenauer Bach	OBF43902	Mündung	4	<1	2	<1	<1	1,4
Zwönitz	OBF44000	uh. Zwönitz	12	<1	17	2,1	<1	3,8
Zwönitz	OBF44030	Dorfchemnitz	4	<1	71	20,0	4,5	51,8
Zwönitz	OBF44040	Thalheim, Bahnhofstr.	4	<1	9	2,8	1,1	6,9
Zwönitz	OBF44050	20m oh. ZKA	12	<1	6	1,9	<1	5,7
Zwönitz	OBF44100	Thalheim	22	<1	7	1,3	<1	2,9
Gornsdorfer Bach	OBF44101	vor Mündung	6	<1	14	2,6	<1	7,5
Zwönitz	OBF44150	Straßenbrücke Abzweig Adorf	12	<1	15	3,3	1,3	9,8
Zwönitz	OBF44200	Kemtau	4	<1	9	2,9	1,0	6,6
Zwönitz	OBF44400	Mdg. Altchemnitz 1	20	<1	85	7,6	2,0	11,8

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (ng/l)	Max (ng/l)	MW (ng/l)	Med (ng/l)	P90 (ng/l)
Chemnitz	OBF44700	vor KA Glösa	22	<1	31	3,9	2,0	6,0
Königshainer Bach	OBF44902	Wiederau	6	<1	<1	<1	<1	<1
Wiederbach	OBF44903	Mündung	6	<1	<1	<1	<1	<1
Königshainer Bach	OBF44904	Königshain	6	<1	2	<1	<1	1,3
Chemnitz	OBF45000	Göritzhein	36	<1	46	2,7	<1	4,5
Chemnitz	OBF45010	Göritzhein, Brücke	4	<1	2	1,2	1,3	2,0
Würschnitz	OBF45100	Neuwürschnitz	4	<1	<1	<1	<1	<1
Würschnitz	OBF45400	Mdg. Altchemnitz 2	4	<1	5	1,9	1,3	4,1
Oberer Querenbach	OBF45510	Mündung	7	<1	2	<1	<1	<1
Zufluss Gablenzbach	OBF45511	uh. Sportplatz	7	<1	<1	<1	<1	<1
Unterer Querenbach	OBF45520	Brücke oh. Teiche	7	<1	<1	<1	<1	<1
Oberdorfer Bach	OBF45530	oh. Oberdorf	7	<1	<1	<1	<1	<1
Gablenzbach	OBF45600	Mdg. / uh. KA Niederdorf	13	<1	4	<1	<1	1,0
Kappelbach	OBF45900	Mündung / Pfortensteg	14	<1	14	2,0	1,0	3,7
Kappelbach	OBF45902	Barbarossastraße	6	<1	10	2,5	<1	6,5
Kappelbach	OBF45903	Pornitzstraße	6	<1	7	1,8	<1	5,0
Pleißebach	OBF46100	Beyerstraße	4	<1	2	<1	<1	1,7
Röllinghainer Bach	OBF46300	Markersdorf	4	<1	10	2,7	<1	7,2
Aubach	OBF46600	Mündung Döhlen	4	<1	<1	<1	<1	<1

Anlage 2: Statistische Auswertung der Fluorid-Konzentrationen der BfUL-Daten 2013-2015

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (mg/l)	Max (mg/l)	MW (mg/l)	Med (mg/l)	P90 (mg/l)
<u>EZG Weiße Elster</u>								
-	-	-	-	-	-	-	-	-
<u>EZG Zwickauer Mulde</u>								
Dorfbach Oberschindmaas	OBF39601	uh. Niederschindmaas	12	0,3	2,6	1,46	1,6	2,19
<u>EZG Freiburger Mulde</u>								
<u>Stollnwässer</u>								
Zschopau	OBF34599	Tropper Stolln	5	1,4	1,9	1,56	1,4	1,82
Sehma	OBF35802	Tiefer St. Christoph Stolln, (Tiefer) Junger Andreas Stolln	6	1,5	2	1,75	1,7	1,95
Wilisch	OBF36794	Tiefer Sauberger Stolln, Mündung	17	2	3,1	2,47	2,4	2,92
Jahnsbach	OBF36803	(Tiefer) König Dänemark Stolln	4	0,9	1,9	1,40	1,4	1,75
Seiffener Bach	OBF37404	Tiefer Heilige Dreifaltigkeit Stolln	4	0,9	1,1	0,98	0,95	1,07
Rote Pockau	OBF38190	Walfischstolln Pobershau, Mundloch	6	1,1	1,3	1,23	1,25	1,3
<u>Flüsse</u>								
Hüttenbach	OBF31540	vor Mdg.	8	0,3	1,2	0,80	0,85	1,06
Wilisch	OBF36795	Ehrenfriedersdorf, Herolder Strasse (Ortsausgang)	1	2,1	2,1	2,10	2,1	2,1
<u>EZG Elbe</u>								
<u>Stollnwässer</u>								
Gottleuba	OBF05001	Tiefer Zwiesler Erbstolln	4	1,1	1,3	1,23	1,25	1,3
Aschergraben	OBF08380	Tiefer Bünaustolln	4	0,5	1,8	1,30	1,45	1,71
Aschergraben	OBF08390	Hilfe Gottes Stolln	1	2,6	2,6	2,60	2,6	2,6
Heerwasser	OBF08391	Tiefer Hilfe Gottes Stolln	14	2,3	2,9	2,53	2,5	2,7
Biela bei Bärenstein	OBF08350	Neuer Bielastolln	10	5,7	11	8,06	8,15	9,11
Triebisch	OBF12780	Rothschönberger Stolln, vor Einmdg. in die Triebisch	22	1,5	1,8	1,65	1,65	1,7

Gewässer	MKZ_	NAME	n	Min (mg/l)	Max (mg/l)	MW (mg/l)	Med (mg/l)	P90 (mg/l)
Müglitz	OBF08100	oh. Dohna	4	0,6	1	0,80	0,8	0,97
Müglitz	OBF08110	Straßenbr. Dippoldisw. Str.	32	0,6	1,3	0,89	0,85	1,29
Biela bei Bärenstein	OBF08300	Mündung	18	1,2	5,1	2,75	2,45	4
Biela bei Bärenstein	OBF08301	Bärenstein	4	1,2	4,3	2,53	2,3	3,94
Kleine Biela	OBF08360	Vor Mündung in Große Biela	18	1,8	7,7	4,74	4,3	7,53
Rotes Wasser	OBF08400	Mündung	6	0,8	1,3	1,03	1	1,25
Tiefenbach	OBF08401	uh. Tiefenbachhalde	12	0,7	2,9	1,65	1,4	2,65
Pöbelbach	OBF10601	Brücke Waldweg, oh. Zufluss	12	0,7	0,9	0,78	0,8	0,8
Hüttengrundbach	OBF11213	Mündung	4	0,7	1,1	0,93	0,95	1,07
Triebisch	OBF12800	uh. Rothschönberger Stolln	12	0,6	1,3	0,98	0,95	1,2
Triebisch	OBF12900	Miltitz - Roitzschen	13	0,5	1,2	0,93	0,9	1,2

Anlage 3: Literaturzusammenstellung zur Analytik von Flotationschemikalien

Literatur zur Analytik von Flotationschemikalien (Auswahl)

F. Hao, K.J. Davey, W.J. Bruckard, and J.T. Woodcock (2008): Online analysis for xanthate in laboratory flotation pulps with a UV monitor. *International Journal of Mineral Processing*, 89(1–4); 71 – 75

M.H. Jones and J.T. Woodcock. (1986): Dixanthogen determination in flotation liquors by solvent extraction and ultraviolet spectrometry. *Analytical Chemistry*, 58(3); 588–591

S. Luukkanen, P. Parvinen, M. Miettinen, P. Stén, S. Lähteenmäki, and A. Tuikka (2003): Monitoring the composition of water of flotation slurries with an on-line analyser. *Minerals Engineering*, 16(11); 1075 – 1079

A.J. Vreugdenhil, J.A. Finch, I.S. Butler, and I. Paquin (1999): Analysis of alkylxanthate collectors on sulphide minerals and flotation products by headspace analysis gas-phase infrared spectroscopy (hagis). *Minerals Engineering*, 12(7); 745 – 756

H. Eggers and H. Rüssel (1983): Liquid chromatography of xanthate complexes. *Chromatographia*, 17; 486–490

C. Zhou, A. Bahr, and G. Schwedt (1990): Separation and determination of xanthates in mixtures as dixanthogens by normal-phase HPLC on a diol-phase. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 338; 908–911

C. Zhou, A. Bahr, and G. Schwedt. Studies on the HPLC determination of xanthates via copper(I) xanthates and dixanthogens (1989): *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 334; 527–533

F.P. Hao, E. Silvester, and G. David Senior (2000): Spectroscopic characterization of ethyl xanthate oxidation products and analysis by ion interaction chromatography. *Analytical Chemistry*, 72(20); 4836–4845

D. E. Barnes and C. Pohlandt-Watson (1993): Separation and determination of the sulph-hydril flotation collectors using ion-interaction chromatography. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 345; 36–42

A. K. Malik and W. Faubel (2000): Capillary electrophoretic determination of dithiocarbamates and ethyl xanthate. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 367; 211–214

F. Hissner, B. Daus, J. Mattusch, and K. Heinig (1999): Determination of flotation reagents used in tin-mining by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 853(1–2); 497 – 502

A.J. Vreugdenhil, S.H.R. Brienne, I.S. Butler, J.A. Finch, and R.D. Markwell (1997): Infrared spectroscopic determination of the gas-phase thermal decomposition products of metal-ethyldithiocarbonate complexes. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 53(12); 2139 – 2151

A. López Valdivieso, A.A. Sánchez López, and S. Song (2005): On the cathodic reaction coupled with the oxidation of xanthates at the pyrite/aqueous solution interface. *International Journal of Mineral Processing*, 77(3); 154 – 164

J.O. Leppinen (1990): FTIR and flotation investigation of the adsorption of ethyl xanthate on activated and non-activated sulfide minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 30(3–4); 245 – 263

M. Trudgett (2005): The ultra-trace levels analysis of xanthates by high performance liquid chromatography. Master's thesis, University of Western Sydney

Z. Sun and W. Forsling (1997): The degradation kinetics of ethyl-xanthate as a function of pH in aqueous solution. *Minerals Engineering*, 10(4); 389 – 400

A.J. Vreugdenhil, S.H.R. Brienne, R.D. Markwell, I.S. Butler, and J.A. Finch (1997): Headspace analysis gas-phase infrared spectroscopy, a study of xanthate decomposition on mineral surfaces. *Journal of Molecular Structure*, 405(1); 67 – 77

J.G. Eckhardt, K. Stetzenbach, M.F. Burke, and J.L. Moyers (1978): Studies on the separation of xanthate related compounds using high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatographic Science*, 16(11); 510–513

A. Ivaska and J. Leppinen (1986): Determination of trace amounts of the flotation collectors ethyl xanthate and diethyl dithiophosphate in aqueous solutions by cathodic stripping voltammetry. *Talanta*, 33(10); 801 – 806

J. Leppinen and S. Vahtila (1986): Differential pulse polarographic determination of thiol flotation collectors and sulphide in waters. *Talanta*, 33(10); 795 – 799

O. M. Zakharova and M. S. Zakharov (2003): Determination of potassium xanthate in aqueous solutions by cathodic stripping voltammetry at a silver electrode. *Journal of Analytical Chemistry*, 58; 573–576

J. Bugajski and H. Gamsjäger (1987): A new xanthate ion-specific electrode. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 327; 362–363

W. J. Cabrera, E. S. Maldonado, and H. E. Ríos (2001): Effect of dodecyl alcohol on the potentiometric response of an isopropyl xanthate ion-selective electrode. *Journal of Colloid and Interface Science*, 237(1); 76 – 79

N. Huang, A. Mao, D. Wang, B. Li, and S. Sun (1998): On-line determination of remained xanthate concentration in pulp. *Journal of Central South University of Technology*, 5; 11–13

Y. Nagaosa and T. Mizuyuki (1995): Determination of Cu(II) and Ni(II) as chelates with butyl xanthate by liquid chromatography with electrochemical and spectrophotometric detection. *Analytica Chimica Acta*, 311(2); 225 – 229

K. W. Weissmahr, C. L. Houghton, and D. L. Sedlak (1998): Analysis of the dithiocarbamate fungicides ziram, maneb, and zineb and the flotation agent ethylxanthogenate by ion-pair reversed-phase HPLC. *Analytical Chemistry*, 70(22); 4800–4804

V. R. A. Thibon, K. D. Bartle, D. J. Abbott, and K. A. McCormack (1999): Analysis of zinc dialkyl dithiophosphates by nonaqueous capillary electrophoresis and application to lubricants. *Journal of Microcolumn Separations*, 11(1); 71–80

P. Stén, P. Parvinen, M. Miettinen, S. Luukkanen, V. Kaskiniemi, and J. Aaltonen (2003): On-line analysis of flotation process waters at Siilinjärvi (Finland) apatite concentrating plant. *Minerals Engineering*, 16(3); 229 – 236

Literaturverzeichnis

WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327 vom 22.12.2000

WRRL (2006): Richtlinie 2006/11/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 betreffend die Verschmutzung infolge der Ableitung bestimmter gefährlicher Stoffe in die Gewässer der Gemeinschaft, Amtsblatt der Europäischen Union L 64 vom 04.03.2006

WRRL (2008): Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG, Amtsblatt der Europäischen Union L 348 vom 24.12.2000

OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV) vom 20. Juli 2011; BGBl. S. 1429 ff.

WRRL (2013): Richtlinie 2013/39/EU Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der Europäischen Union L 226/1 vom 24.08.2013

OGewV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV) vom 20. Juni 2016; BGBl. S. 1373 ff.

GrwV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV), 9. November 2010, BGBl. I S. 1513 ff.

LAWA-RAKON (2015): Bund/Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) - Ständiger Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ - RaKon Teil B Arbeitspapier II: Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Qualitätskomponenten zur unterstützenden Bewertung von Wasserkörpern entsprechend EG-WRRL. Stand 09.01.2015

Hartinger, L. (1995): Handbuch der Abwasser- und Recyclingtechnik für die metall-verarbeitende Industrie. 2. Auflage, ISBN 3-446-15615-1

Glombitza, F.; Janneck, E. (2016): Kenntnisstandsanalyse und Stand des Wissens und der Technik bei der Reinigung von Wässern durch aerobe oder anaerobe Wetlands unter Einbeziehung der Nutzung von Mikroorganismen und unter Betrachtung möglicher Maßnahmen zur Reaktionsbeschleunigung. Studie der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Martin, M. (2013): Hintergrundkonzentrationen - Betrachtungen für ausgewählte Oberflächenwasserkörper in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster. Studie der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Martin, M. (2015): Abschätzung von Hintergrundkonzentrationen für Schwermetalle im Einzugsgebiet der Weißen Elster. Studie der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Sihvonen, T. (2012): Determination of collector chemicals from flotation process waters using capillary electrophoresis. Masterarbeit, Lappeenranta University of Technology, 2012

DIN 38407-39 (2011): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 39: Bestimmung ausgewählter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) - Verfahren mittels Gaschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (GC-MS) (F 39)

- DIN EN ISO 17993 (2004): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von 15 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Wasser durch HPLC mit Fluoreszenzdetektion nach Flüssig-Flüssig-Extraktion
- UBA (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe - Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar?, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2016
- Pälchen, W. (Hrsg.) (2009): Geologie von Sachsen II, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Fuchs, S., Scherer, U., Wander, R., Behrend, H., Venohr, M., Opitz, D., Hillenbrand, T., Marscheider-Weidemann, F., Götz, T. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS
- Tümping, U.v. & Friedrich (Hrsg) (1999): Biologische Gewässeruntersuchung, Methoden der biologischen Wasseruntersuchung 2, Gustav Fischer Verlag Jena, ISBN 3-437-35170-2
- Ziemann, H. (1971): Die Wirkung des Salzgehaltes auf die Diatomeenflora als Grundlage für eine biologische Analyse und Klassifikation der Binnengewässer. *Limnologica* (Berlin) 8, 505 – 525
- Koenzen, U.; Döbbelt-Grüne, S.; Sondermann, M.; Modrak, P.; Hamer, H. (2016): Bewertung des Vorhabens „Gewässerausbau Cottbuser See, Teilvorhaben 2 – Herstellung des Cottbuser Sees“ gemäß der EGWRRL, Anhang 10: Wirkzusammenhänge zwischen Allgemeinen physikalisch-chemischen Parametern (ACP) und Biologischen Qualitätskomponenten
- LAWA (2015): Rahmenkonzeption Monitoring Teil B Arbeitspapier II: Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Qualitätskomponenten zur unterstützenden Bewertung von Wasserkörpern entsprechend EG-WRRL
- Gelbrecht, J.; Cabezas, A.; Hupfer, M.; Zak, D. (2016): Sulfatbelastung der Spree - Ursachen, Wirkungen und aktuelle Erkenntnisse (IGB Dossier), Hrsg: Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
- Kleeberg, A. (2014): Eintrag und Wirkung von Sulfat in Oberflächengewässern (Kap. V-1.2.5), Handbuch Angewandte Limnologie (Hrsg. Hupfer, M., Calmano, W., Fischer, H., Klapper, H.), Wiley VCH, 1–34.
- Janneck, E.; Glombitza, F.; Martin, M., Kahnt, R. (2009): Durchführung von speziellen Untersuchungen bezüglich Sulfat im brandenburgischen Einzugsgebiet der Spree unter den Bedingungen des Sanierungs- und des aktiven Bergbaus. Studie der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg.
- INKA BB (2016): Schlussbericht des Innovationsnetzwerkes Klimaanpassung Region Brandenburg/Berlin (INKA BB), FKZ: 01LR0803A - 01LR0803M, verfügbar unter URL: <http://www.inka-bb.de/> [abgerufen 28.11.2016]
- INAP (2003): Treatment of Sulphate in Mine Effluents; LORAX Environmental,
- Janneck, E.; Glombitza, F.; Kahnt, R. (2008): Machbarkeitsstudie zur Reduzierung der Sulfateinträge, unveröffentlichte Studie im Auftrag der Vattenfall Europe Mining AG
- LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Düsseldorf 2004
- Martin, M.; Janneck, E. (2010): Fortschreibung von Grundlagendaten und Untersuchung ausgewählter Sachverhalte der Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplanung zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen, Teil: Vorstudie – selektiver Rückhalt von Cadmium. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke
- Greif, A.; Klemm, W. (2010): Oberflächenwassergenaue Ableitung von Referenzwerten geogener Hintergrundbelastungen für Schwermetalle und Arsen in der Wasserphase sowie im schwebstoffbürtigen Sediment sächsischer Fließgewässer im Einzugsgebiet des Erzgebirges/Vogtlandes. Schriftenreihe des LfULG, Heft 10/2010
- Martin, M. (2013): „Fortschreibung von Grundlagendaten und Untersuchung ausgewählter Sachverhalte der Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplanung zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen, Teil: Hintergrundkonzentrationen - Betrachtungen für

ausgewählte Oberflächenwasserkörper in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster“. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke

Martin, M. (2015): Abschätzung von Hintergrundkonzentrationen für Schwermetalle im EZG Weiße Elster. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke

Greif, A.; Klemm, W. (2006): Ableitung von Referenzwerten geogener Hintergrundbelastungen für Schwermetalle in der Wasserphase sowie im schwebstoffbürtigen Sediment sächsischer Fließgewässer. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, TU Bergakademie Freiberg

Greif, A.; Klemm, W. (2009a): Oberflächenwassergenaue Ableitung von Referenzwerten geogener Hintergrundbelastungen für Schwermetalle und Arsen in der Wasserphase sowie im schwebstoffbürtigen Sediment sächsischer Fließgewässer im Einzugsgebiet des Erzgebirges/Vogtlandes. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, TU Bergakademie Freiberg

Greif, A.; Klemm, W. (2009b): Fortschreibung von Grundlagendaten und Untersuchung ausgewählter Sachverhalte der Maßnahmen- und Bewirtschaftungsplanung zur Reduzierung von Schadstoffeinträgen, Teil: Hintergrundwerte für die Rote und die Wilde Weißeritz. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie Dresden, TU Bergakademie Freiberg

Glombitza, F.; Aabel, T.; Schaffrath, M.; Janneck, E. (2013): Wirtschaftlicher Maßnahmevergleich verschiedener Verfahren zur Fassung, Ableitung und Reinigung von bergbaulich kontaminierten Grundwässern. Abschlussbericht Projekt Vodamin TP 14, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Mirko Martin
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Telefon: + 49 3731 369-296
Telefax: + 49 3731 369-200
E-Mail: m.martin@geosfreiberg.de

Redaktion:

Referat 46 / Bergbaufolgen
Ansprechpartner Herr Sander
Telefon: + 49 351 8928-4600
Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: Frank.Sander@smul.sachsen.de

Fotos:

Mirko Martin
Redaktionsschluss:
30.04.2017

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung. Die PDF-Datei ist im Internet unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg> verfügbar.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung