

Anhang F: Weitergehende Untersuchungen zur Emissionsbilanzierung für Altbergbaustandorte und Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen

Leitlinie für die Bestandsaufnahme gefährlicher Stoffe

Weitergehende Untersuchungen zur Emissionsbilanzierung für Altbergbaustandorte und Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen

Arbeitspapier

von

Felix Tettenborn

Thomas Hillenbrand

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

basierend auf

Bajas, E. (2011): Schwermetalleinträge aus dem Altbergbau: Bilanzierung und Emissionsminderungsmaßnahmen. Masterarbeit

Februar 2014

Inhalt

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	III
TABELLENVERZEICHNIS.....	III
EINLEITUNG.....	4
ARBEITSINHALTE.....	4
ÜBERPRÜFUNG DES METHODISCHEN ANSATZES DER STOFFEINTRAGSMODELLIERUNG VON SCHWERMETALLEMISSIONEN AUS DEM ALTBERGBAU	5
METHODE	5
ERGEBNISSE UND DISKUSSION	7
ZUSAMMENFASSUNG DES VERGLEICHS.....	10
RELEVANZ VON ALTBERGBAUSTANDORTEN BZGL. SCHWERMETALLEINTRÄGE IN GEWÄSSER	12
MAßNAHMEN ZUR REDUKTION VON SCHWERMETALLEINTRÄGEN AUS DEM ALTBERGBAU.....	15
ZUSAMMENFASSUNG	17
QUELLEN	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metallfrachten für den Zeitraum 2000-2005 in Kinzig, Messstelle Kehl.....	8
Abbildung 2: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metallfrachten für den Zeitraum 2000-2005 in der Erft, Messstelle Eppinghoven	9
Abbildung 3: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metallfrachten für den Zeitraum 2000-2005 in der Triebisch	9
Abbildung 4: Anteil der verschiedenen Eintragspfade an den Schwermetallemissionen in die Oberflächengewässer Deutschlands zwischen 2003-2005 (Fuchs 2010).....	12
Abbildung 5: Mittlere Cd-Konzentrationen für die erfassten Bergbauwässer Deutschlands (AGA: Allgemeine Güteanforderung).....	13
Abbildung 6: Jahreswassermengen für die erfassten Altbergbaustandorte Deutschlands.....	13
Abbildung 7: Mittlere Cd- Jahresfrachten für die erfassten Bergbauwässer Deutschlands.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für den Vergleich berücksichtigte Altbergbaustollen	5
--	---

Einleitung

Im Rahmen des UBA Forschungsvorhabens 370967219, „Entwicklung europäischer Leitlinien für die Bestandsaufnahme der Emissionen, Einleitungen und Verluste gemäß Art.5(1) und 5(6) der Tochterrichtlinie zu prioritären Stoffen“, wurde der methodische Ansatz zur Erfassung der Einträge von Schwermetallen in Altbergbaugebieten für die Stoffeintragsmodellierung überprüft, die Relevanz von individuellen Altbergbaustandorten abgeschätzt, sowie Maßnahmen zur Reduktion von Schwermetalleinträgen aus dem Altbergbau in die Gewässer bewertet.

Arbeitsinhalte

Im Rahmen des UBA Forschungsvorhabens „Modellbasierte Quantifizierung und internetbasierte Visualisierung der Einträge prioritärer Stoffe in die Flussgebiete Deutschlands“ (*dokumentiert in Fuchs et al. 2009*) wurden die Einträge aus historischen Bergbauallasten aus der Literatur und zusätzlichen Recherchen zusammengestellt und mit den betroffenen Bundesländer abgestimmt. Für 57 von 123 Bergbauallasten konnten (Stand 2011) Schwermetalleinträge ermittelt, georeferenziert und in MoRE (ehem. MONERIS) aufgenommen werden. Abhängig von den in den Ländern vorliegenden Informationen waren die Daten zu Bergbauallasten sehr unterschiedlich. Einige Ländervertreter schätzen den Eintrag durch Bergbauallasten als eher diffus ein, wie bspw. im Harz: "im Prinzip ist das ganze Gebirge durchlöchert und müsste insgesamt als Einleitung angesehen werden" (Quelle unbekannt).

Zur Überprüfung der MoRE zugrundegelegten Methodik wurden in 3 ausgewählten Teileinzugsflussgebieten (Unterer Clara Stollen (Witticher Talbach), BaWü; Burgfeyer Stollen (Veybach/Erft), NRW; Rothschnberger Stollen (Triebisch), SN) mit Altbergbaustandorten die in MoRE vorliegenden Daten genutzt, um die Einträge zu berechnen. Diesen Emissionswerten wurden die verfügbaren Immissionswerte der in diesen Gebieten vorhandenen Oberflächengewässer gegenübergestellt, um zu zeigen, inwieweit diffuse Altbergbau-Einträge tatsächlich erfasst sind und wie groß ein eventuell fehlender Anteil durch Altbergbaueinträge sein kann.

Bezüglich Emissionsminderungsmaßnahmen wurden verschiedene Verfahren zur Reduktion von Schwermetalleinträgen aus Altbergbaustandorten miteinander verglichen. Zudem erfolgte ein Überschlag über die Relevanz individueller Altbergbaustandorte.

Die Arbeiten sind umfassend in *Bajas (2011)* dokumentiert.

Überprüfung des methodischen Ansatzes der Stoffeintragsmodellierung von Schwermetallemissionen aus dem Altbergbau

Methode

Für die in Tabelle 1 aufgeführten Stollen wurden Emissionsbilanzierungen für die Schwermetalle Cd, Ni, Pb und Hg durchgeführt.

Tabelle 1: Für den Vergleich berücksichtigte Altbergbaustollen

	Name	Modellgebiet	Größe Modellgebiet [km ²]	Gütemessstelle	Einzugsgebiet Pegel [km ²]	Namensgebendes Gewässer
A)	Unterer Clara Stollen (Witticher Talbach) Baden-Württemberg	20090	152	Kinzig bei Kehl	1066	Kinzig
B)	Burgfeyer Stollen (Veybach/Erf) Nordrhein- Westfalen	20745	310	Erf bei Eppinghoven	1536	Erf
C)	Rothschönberger Stollen (Triebisch) Sachsen	50264	143	Unterhalb der Stollen Einmündung	394	Triebisch

Die Frachtberechnung mittels MoRE wurde für den Zeitraum 1983-2005 in Jahresritten durchgeführt. Um den Einfluss der Hydrologie abzumindern, wurden aus den jährlichen berechneten Frachten Mittelwerte für fünfjährige Zeiträume gebildet und damit Emissionsschätzungen durchgeführt. Die Cd- und Hg-Frachten wurden dabei ohne Retention modelliert, für Ni und Pb wurde basierend auf *Wander et al. (2010)* und *Fuchs et al. (2002)* eine mittlere Retention von 51% bzw. 39% angesetzt.

Der Frachtberechnung mittels MoRE wurde eine Bilanzierung der Schwermetallfrachten in Flusssystemen auf Basis von Daten der Gewässergüteüberwachung gegenüber gestellt. Die gemessenen Konzentrationen und die dazu gehörigen Durchflussdaten wurden von der jeweils zuständigen Wasserbehörde übermittelt. Während die Durchflusswerte kontinuierlich aufgezeichnet wurden, lagen die Konzentrationsmessungen gebiets- und stoffabhängig mit unterschiedlichen Abständen (zweiwöchig bis viermal im Jahr) vor. Bei den Konzentrationsdaten wurden vor allem für Hg und Cd Werte unter der Bestimmungsgrenze gemessen; diese fließen mit dem halben Wert der BG in die Bilanzierung ein.

Für die Bilanzierung wurden verschiedene Berechnungsansätze verwendet:

- 1) Für die Zeitspannen zwischen die Messungen wurden die Stofffrachten interpoliert und anschließend für jedes Jahr die Jahresfracht berechnet. Extremwerte wurden mit in die Bilanzierung einbezogen, da außerordentliche Ereignisse (Starkregen etc.) aufgrund der weiten Messzeitabstände ohnehin nur zum Teil erfasst werden. Da die Abflussverhältnisse die berechneten Stofffrachten stark beeinflussen, sind teilweise hohe Schwankungen zwischen verschiedenen Jahresfrachten festzustellen.
- 2) Aus den jährlichen Konzentrationsmittelwerte und Abflussmittelwerten wurde die mittlere jährliche Stofffracht berechnet. Vor allem bei geringer Häufigkeit der Konzentrationsmessungen, bekommen Einzelmesswerte eine große Relevanz. Insofern bietet dieser Ansatz je nach Häufigkeit der Messungen eine gröbere oder bessere Abschätzung der Metallfrachten.
- 3) Entsprechend OSPAR (1996) wird die jährliche Fracht auf Basis von Tagesfrachten der jeweiligen Konzentrationsmesstage der Gütemessungen ermittelt, die mittels der täglichen Abflussmenge versus Abflussmenge der Tage der Gütemessung normiert wird. Hierdurch werden die erfassten Abflussereignisse gewichtet in die Frachtberechnung einbezogen und einzelne „Ausreißer“ etwas gemildert.

Nach *Hillenbrand & Marscheider-Weidemann (2002)* eignet sich der Ansatz nach OSPAR (1996) aufgrund der gegebenen unterschiedlichen Messhäufigkeiten (zwischen zwei mal im Monat und vierteljährlich) am besten für die Berechnung von Flussfracht bei unterschiedlicher Anzahl von Einzelmessungen.

Ergebnisse und Diskussion

Bei dem Vergleich der mittels MoRE modellierten und der auf Basis der Gewässergütedaten bilanzierten Metallfrachten wurden für die drei Flussgebiete keine einheitlichen Ergebnisse erzielt. Die für den Vergleich verwendeten bilanzierten Werte wurden entsprechend OSPAR (1996) ermittelt. Sie scheinen aufgrund der gegebenen unterschiedlichen Messhäufigkeiten (zwischen zwei mal im Monat und vierteljährlich) im Schnitt die Flussfracht am besten vergleichbar wieder zu geben.

Der Vergleich der Daten für die drei betrachteten Gebiete stellt sich im Einzelnen wie folgt dar:

- A) Bei dem Vergleich der modellierten zu den berechneten Metallfrachten der Kinzig (s. Abbildung 1) stimmen die Cd- und Pb- Frachten verhältnismäßig gut überein, während die Ni- Frachten überschätzt sind. Die Abweichungen können möglicherweise darauf zurückgeführt werden, dass der Standort der Gütemessstelle nicht mit dem Berechnungspunkt aus dem Modell übereinstimmt. Zu der räumlichen Entfernung kommt in diesem Fall eine Gewässerbaumaßnahme in Form des Kinzigdamms bei Biberach zum Tragen, die im Modell nicht explizit berücksichtigt ist. Der Damm befindet sich Flussabwärts des Unteren Clara Stollen und oberhalb der Gütemessstelle Kehl. Hier kann möglicherweise eine verstärkte Retention des Ni stattfinden, was bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden konnte. Da Cd ein eher mobiles Element ist, wird die im Wasser befindliche Cd- Fracht durch den Staudamm nicht im gleichen Maße beeinflusst wie bei Nickel. Die Ungenauigkeit bei Pb stammt möglicherweise aus der Unterschätzung des Pfades Altbergbau, da dieser Pfad bei der Modellierung in dem eng begrenztem Betrachtungsraum nicht hinterlegt war. Die Differenz beträgt 416 kg Pb/Jahr als Mittelwert für die Jahre 2000-2005.

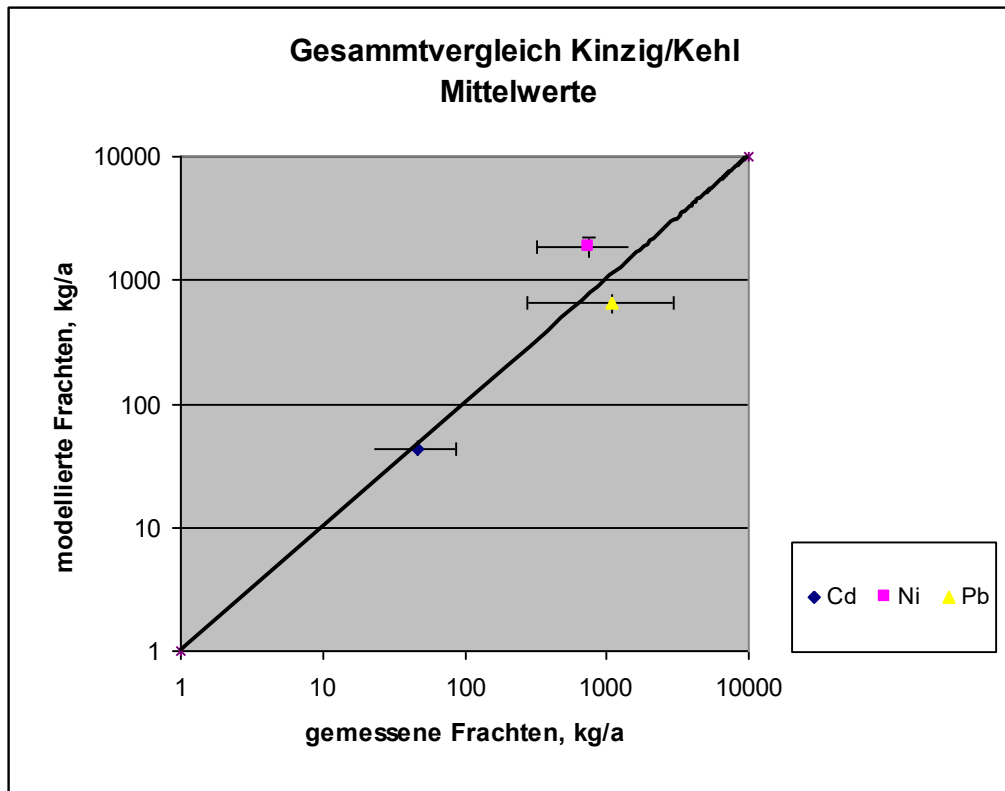


Abbildung 1: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metall-Frachten für den Zeitraum 2000-2005 in Kinzig, Messstelle Kehl

B) Der Burgfeyer Stollen entwässert in den Veybach bzw. in die Erft. Das Modellgebiet ist mit 310 km² deutlich größer als beim Unterer Clara Stollen. Aufgrund hoher Ni-Belastungen durch den Burgfeyer Stollen wurden bereits Kontaminationsminderungsmaßnahmen umgesetzt. Da für die Messstelle Eppinghoven keine Pegeldaten vorlagen, wurden die Abflussdaten der Messstation Neubrück zur Bilanzierung herangezogen.

Bei dem Vergleich der Mittelwertfrachten der vier betrachteten Metalle mit den jeweiligen modellierten Frachten ist eine starke Streuung vor allem bei Quecksilber erkennbar (s. Abbildung 2). Diese ist u.a. auf die starken Unsicherheiten der Gütedaten (geringe Anzahl der Messungen pro Jahr, sich ändernde Bestimmungsgrenzen: BG 2002 = 0,2µg/l; ansonsten BG < 0,03 µg/l) zurückzuführen. Die Ursache für eine Unterschätzung der modellierten Blei-Fracht liegt möglicherweise in einem zu hoch angesetztem Retentionsfaktor für dieses Gebiet. Die Erft ist auf ihrer Strecke über 100 km fast vollständig ausgebaut. Hierdurch ist eine Reduktion der gemessenen Fracht durch Adsorption an organisches Material und an Tonminerale vermindert.

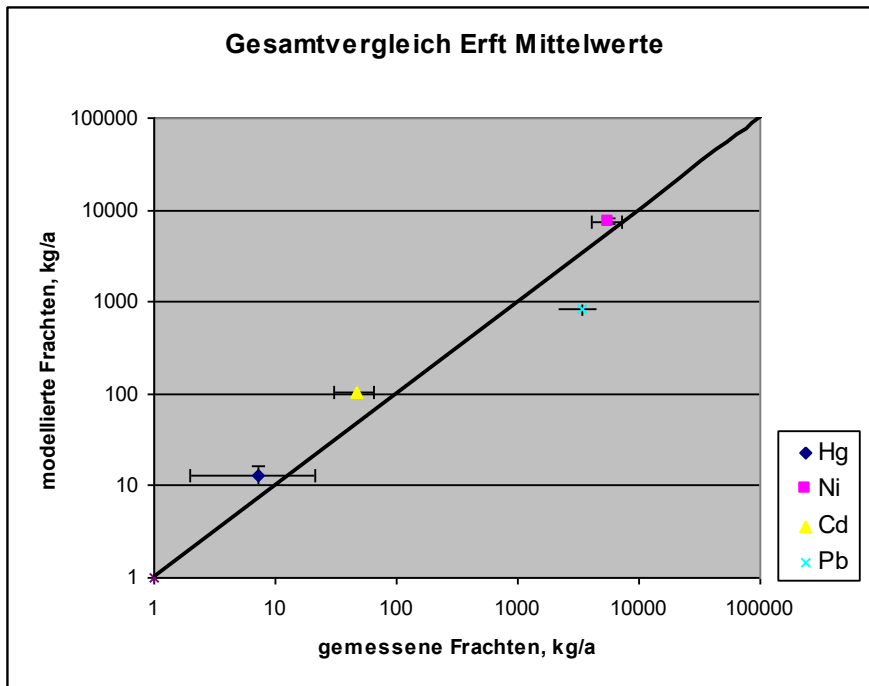


Abbildung 2: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metall-Frachten für den Zeitraum 2000-2005 in der Erft, Messstelle Eppinghoven

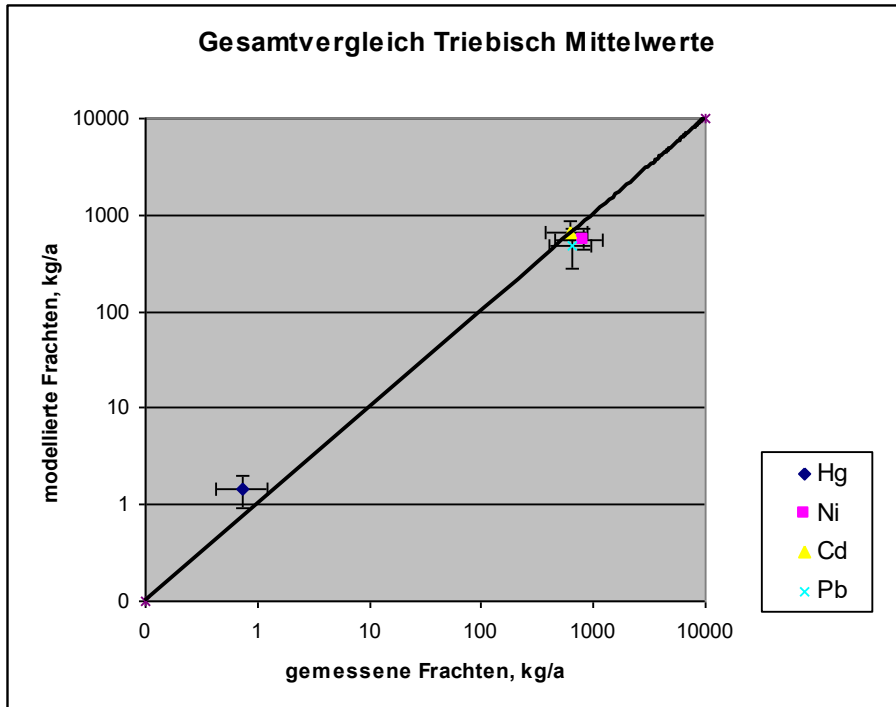


Abbildung 3: Gesamtvergleich zwischen berechneten und modellierten Metall-Frachten für den Zeitraum 2000-2005 in der Triebisch

C) Der Rothschönberger Stollen entwässert als zentraler Entwässerungsstollen des Freiburger Bergbaureviers in die Triebisch. Mit einer Länge von 50,9 km ist er der wichtigste und wasserreichste Stollen in Sachsen (*Degner 2003*). Das Modellgebiet erstreckt sich über eine Fläche von 143 km².

Die Durchflussdaten wurden an der Messstelle Munzig gemessen. Die Gütedaten die in den Flussfrachtberechnungen eingehen, stammen von einer Messstelle unterhalb der Einmündung des Rothschönberger Stollenwassers in der Triebisch.

Die modellierten Frachten stimmen bis auf Quecksilber recht gut mit den berechneten Metallfrachten überein (s. Abbildung 3). Die Abweichungen bei Quecksilber können möglicherweise auf die große Anzahl von Quecksilber-Messwerten unter der Bestimmungsgrenze zurückgeführt werden.

Zusammenfassung des Vergleichs

Bei dem Vergleich der modellierten und berechneten Metallfrachten für die drei Flussgebiete ergab sich keine einheitliche Systematik. Da die drei untersuchten Modellgebiete sich stark voneinander unterschieden, wäre für eine begründete statistische Aussage die Analyse weiterer Flussgebiete notwendig.

Gleichzeitig ist festzuhalten, dass die modellierten Frachten mit den gemessenen Frachten größenordnungsmäßig relativ gut übereinstimmen. Größere Differenzen ergaben sich bei Blei und Quecksilber. Blei wurde für alle drei betrachteten Gebiete unterschätzt. Bei Quecksilber sind die modellierten Frachten für die zwei Gebiete (für die Kinzig konnte nicht auf Quecksilber Messwerte zurückgegriffen werden) überschätzt.

Die gegebenen Abweichungen können verschiedene Gründe haben. Zum einen sind die gemessenen Flussfrachten mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Eine bedeutende Rolle spielt dabei die Qualität der Input-Daten. Während regelmäßig gemessene Abflussdaten zur Verfügung stehen, werden die Gütedaten nicht kontinuierlich gemessen. In manchen Gebieten erfolgten zweiwöchige Gütemessungen, in anderen dagegen nur vier bis sechs Messungen pro Jahr. Die erfassten Einzelproben spiegeln daher nur eine Momentaufnahme wieder. So können die Schwermetallkonzentrationen bei einem Hochwasserereignis sehr hoch sein, da die Metalle aus dem Sediment mobilisiert werden. Diese Frachten können einen erheblichen Einfluss auf die Jahresfrachten haben. Die zur Verfügung stehenden Konzentrationswerte zeigen jedoch, dass solche Ereignisse selten erfasst werden. Zu der Unsicherheit der gemessenen Frachten tra-

gen weiterhin die vielen Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze bei. Die Bestimmungsgrenzen sind in den verschiedenen Gebieten zum Teil unterschiedlich.

Eine andere Fehlerquelle der Immissionsmessungen entsteht durch die unterschiedliche Lage der Abfluss- und Gütemessstellen. Die örtlichen Gegebenheiten konnten zum Teil nicht exakt ermittelt werden. Als Inputdaten wurden ausschließlich die Veröffentlichungen der Länder- und Bundesbehörden genommen.

Bei den modellierten Daten sind relativ homogene Jahresfrachten im Vergleich zu den berechneten Jahresfrachten zu erkennen. Grund dafür ist, dass bei der Modellberechnung fünfjährige Mittelwerte genutzt werden, um den Einfluss der Hydrologie zu reduzieren. Allerdings beeinflussen die gemessenen Abflussdaten die berechneten Flussfrachten stark. Gleichzeitig wurden in MoRE auch die Altbergbaueinträge als konstant über den gesamten Zeitraum angenommen. Es ist anzunehmen, dass in der Realität auch hier die Hydrologie eine Rolle spielt, was zu weiteren Unterschieden zwischen den modellierten und berechneten Frachten führt. Die im Modell den Altbergbaustandorten zugeordneten Emissionen sind punktförmigen Quellen zugeordnet. Diffuse Einträge, beispielsweise aus Haldensickerwasser, Oberflächenabfluss, kontaminiertem Grundwasser und luftbürtigen Depositionen auf die Gewässeroberfläche in Altbergbaugebieten können möglicherweise ebenfalls zu Einträgen in Oberflächengewässer führen, aber nur bedingt im Modell erfasst werden.

Ein metallspezifischer Retentionsfaktor wurde im Modell einheitlich für alle Flussgebiete abgeschätzt. Dieser kann die reale flussseitige Retention der Gebiete mit ihren lokalspezifischen Merkmalen allerdings nur bedingt wieder spiegeln.

Das Modell ist als allgemeines Instrument zur Berechnung von Belastungen in Oberflächengewässer sehr gut geeignet. Größenordnungsmäßig scheinen auch Einträge aus spezifischen Eintragspfaden selbst in kleinen Flusseinzugsgebieten gut mit der Realität überein zu stimmen. Lokale Besonderheiten können jedoch im Detail zu Differenzen zwischen modellierten Werten und Messwerten führen. Für eine genaue quantitative Bestimmung der Flussfrachten bedarf es weiterer Analysen sowohl über die Morphologie des Flusses, Schwermetallgehalte in Flusssedimenten als auch über die Wasserbeschaffenheit und diffuse Eintragspfade.

Relevanz von Altbergbaustandorten bzgl. Schwermetalleinträge in Gewässer

Die in Deutschland erfassten Bergbaueinträge sind durch unterschiedliche Metallfrachten und Jahresabflussmengen charakterisiert. Wie Abbildung 4 zeigt, sind Cadmium-Emission aus historischen Bergbauaktivitäten mit 22 % am Gesamteintrag von 9,2 Tonnen Cd/a die bedeutendste Eintragsquelle für den betrachteten Zeitraum. Demnach würde eine Verminderung der Cd-Emissionen durch diesen Pfad die Oberflächengewässer deutlich entlasten.

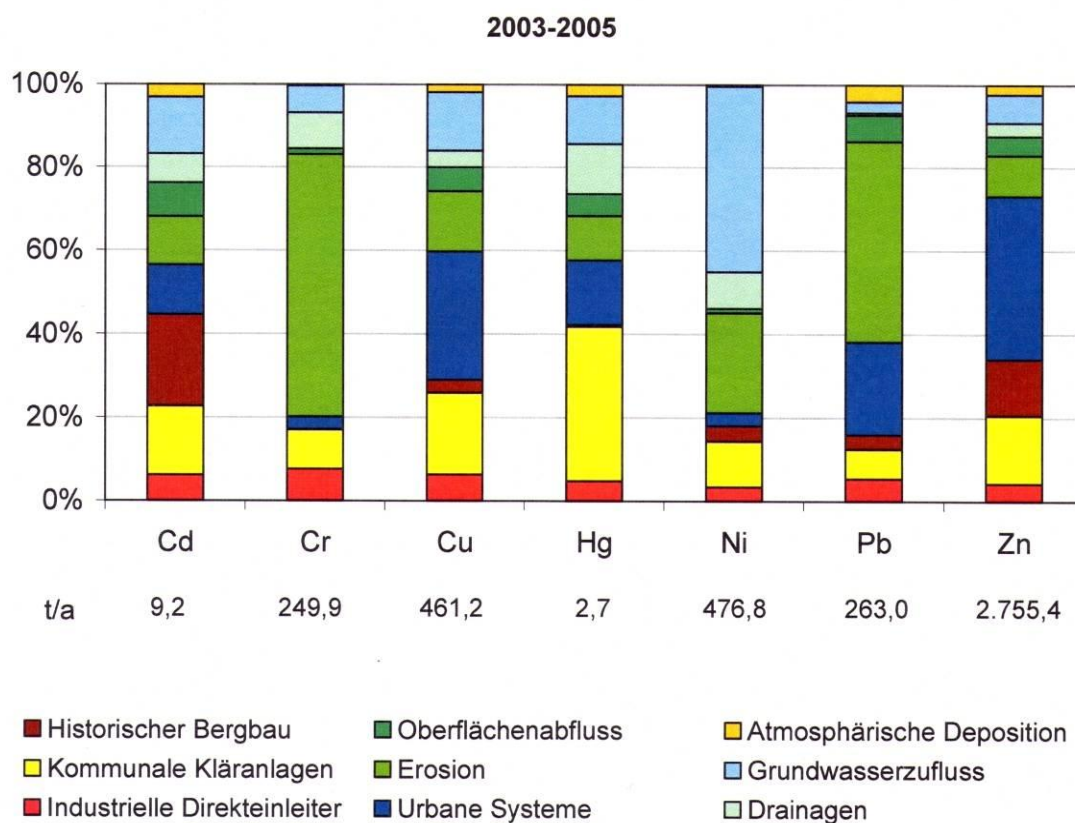


Abbildung 4: Anteil der verschiedenen Eintragspfade an den Schwermetallemissionen in die Oberflächengewässer Deutschlands zwischen 2003-2005 (Fuchs 2010)

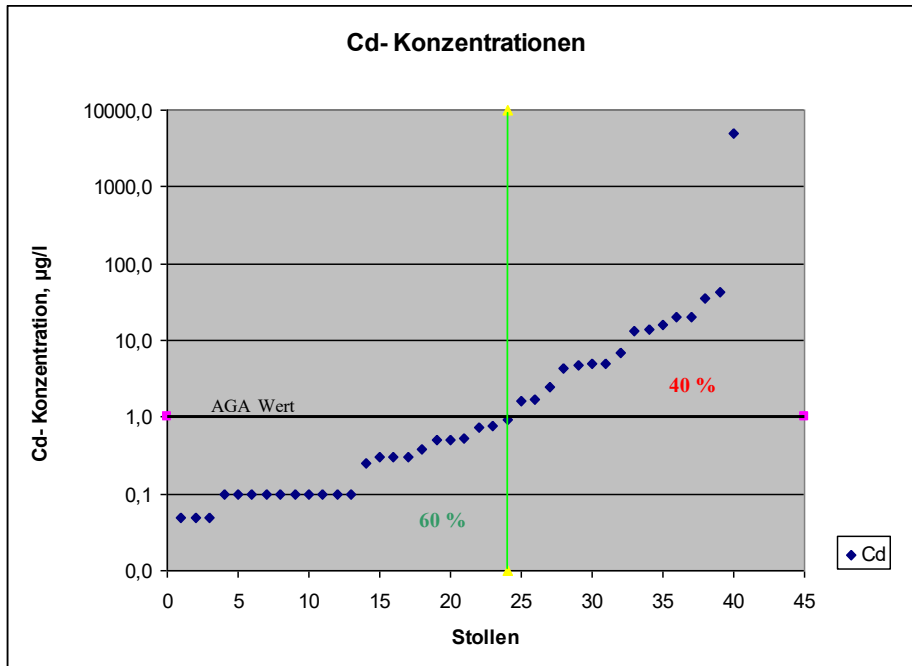


Abbildung 5: Mittlere Cd-Konzentrationen für die erfassten Bergbauwässer Deutschlands (AGA: Allgemeine Güteanforderung)

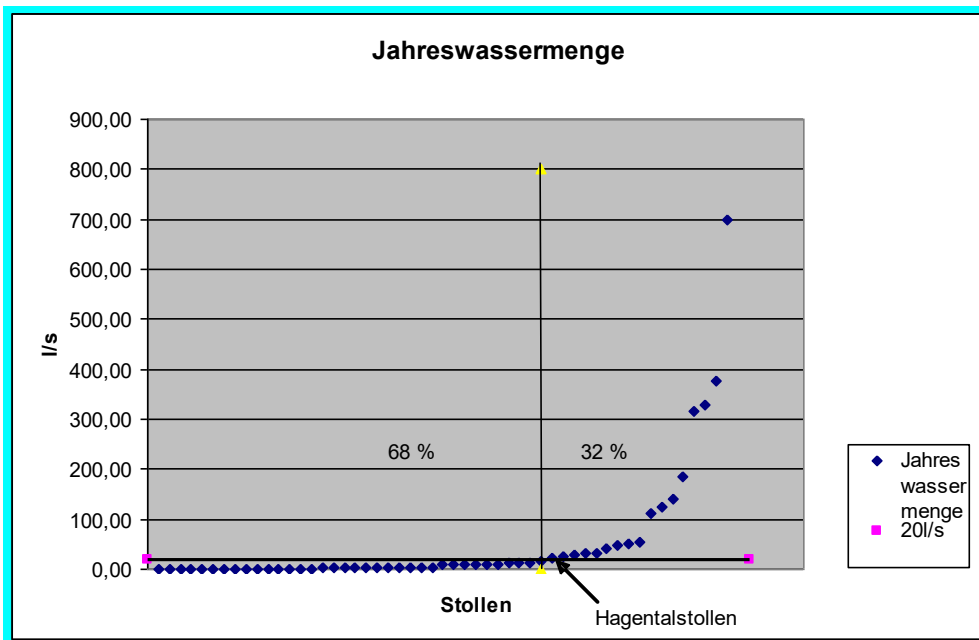


Abbildung 6: Jahreswassermengen für die erfassten Altbergbaustandorte Deutschlands

In den erfassten Grubenwässern Deutschlands wurden Cadmiumkonzentrationen zwischen 0,1 µg/l und 5,00 mg/l gemessen, 40 % der erfassten Stollenwässer haben Cd-Konzentrationen > 1 µg/l (AGA Wert) (Abbildung 5). Die Jahreswassermenge von 32% der Altbergbaustollen ist größer als 20 l/s (Abbildung 6).

Die sich aus Konzentration und Abflussmenge ergebenden mittleren Cadmium Jahresfrachten sind in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigt sich, dass rund 10% von 45 Altbergbaustandorten für mehr als 93% der Cadmiumeinträge verantwortlich sind. Vor allem die Elbe ist von hohen Cd-Einträgen aus dem Altbergbau betroffen. Durch eine Behandlung der sechs Altbergbaustandorte mit den höchsten Frachten könnten die Oberflächengewässer in Deutschland um fast 20% (1900 kg Cd/a) der Gesamt-Cadmium-Einträge entlastet werden.

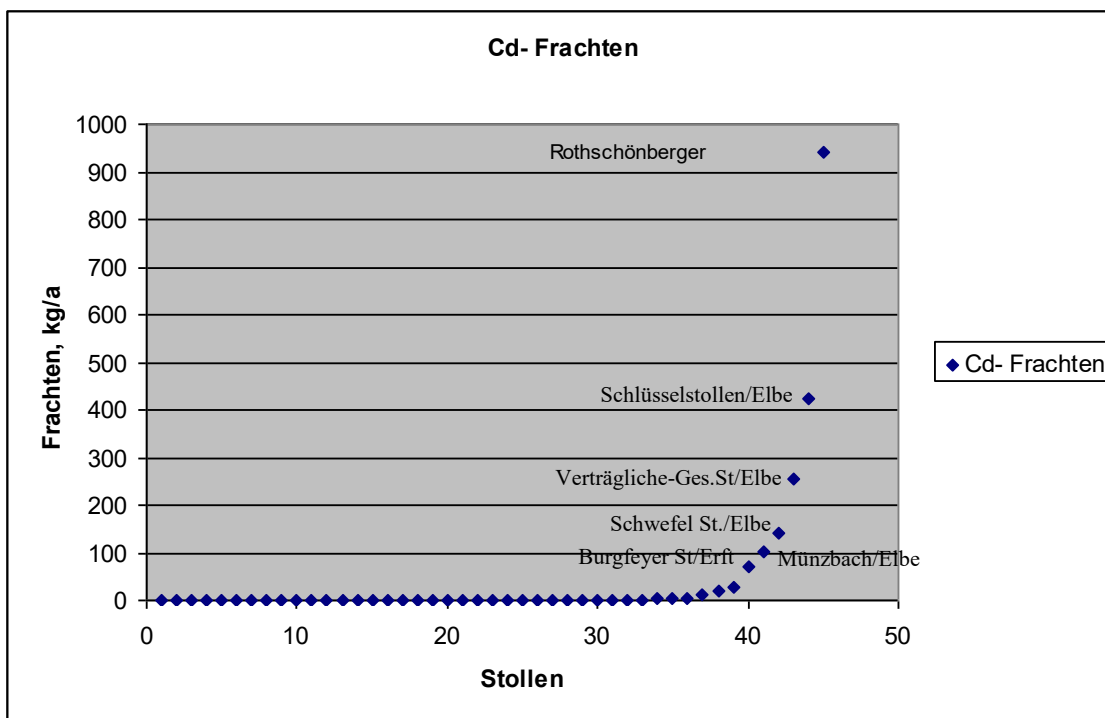


Abbildung 7: Mittlere Cd- Jahresfrachten für die erfassten Bergbauwässer Deutschlands

Auf Basis der zusammengetragenen Daten sind bei Nickel rund 10% von 37 Standorten für 97% der Einträge verantwortlich, bei Blei sind rund 5% von 38 Standorten für 94% der Einträge verantwortlich, bei Quecksilber sind 2 von 11 Standorten für 84% der Quecksilbereinträge in Gewässer verantwortlich.

Maßnahmen zur Reduktion von Schwermetalleinträgen aus dem Altbergbau

Eine Schwermetallelimination aus Grubenwässern kann je nach Beschaffenheit der Grubenwässer (Abflussmenge, Konzentrationen individueller Metalle, Gesamtkonzentration) auf unterschiedlichen Wegen stattfinden.

Sowohl aus ökologischer als auch aus finanzieller Sicht ist i.A. die Vorbeugung (At-Source Control) einer Verunreinigung die beste Variante. Diese Möglichkeit ist aber aufgrund lokaler Gegebenheiten und verschiedenartiger Aktivitäten nur bedingt einsetzbar.

Eine andere Maßnahmenkategorie ist die Migrationskontrolle, wobei die Verminderung der Menge ausgetragener Schadstoffe durch die Beeinflussung der Transferpfade erzielt wird. Diese Kategorien zählen zu der In-situ-Stabilisierung von Bergbaualllasten.

Die dritte Maßnahmenkategorie ist die Wasserfassung und -behandlung. Die Methoden dieser Kategorie zählen zu der On-site-Stabilisierung, und werden unter erheblichen finanziellen Mitteln eingesetzt. Ziel ist die Entfernung von Acidität und von Metallen aus dem Grubenwasser. Ferner wird die Elimination von Schwebstoffen angestrebt, um die Trübung des Wassers zu begrenzen. Es sind aktive (bspw. Ionenaustausch, biologische oder elektrochemische Verfahren) und passive Prozesse zu unterscheiden.

Aktive Prozesse zeichnen sich durch den Einsatz von Energiezufuhr (thermische, elektrische) und/oder Chemikalien und eine ständige Steuerung und Kontrolle des Prozesses aus. Aktive Systeme werden bei hohen Schadstoffkonzentrationen, bei großen Wassermengen, bei Flächenknappheit und bei strengen Einleitungsvorschriften eingesetzt. Von Vorteil sind eine ständige Überwachung des Prozesses und die Möglichkeit des schnellen Eingreifens in die Aufbereitung. Nachteilig sind die hohen Prozesskosten (Chemikalien, Personal, Energie), die Benutzung von z.T. gefährlichen Stoffen, Entstehung von Produkten, die entsorgt werden müssen, sowie der Eingriff in die Natur (Infrastrukturaufbau).

Passive Prozesse tragen zu einer Verbesserung der Wasserqualität ohne eine kontinuierliche Energie- oder Chemikalienzufuhr bei. Es werden nur natürlich verfügbare Energiequellen (Gravitation, mikrobielle Stoffwechselenergie, Photosynthese) genutzt. Bei passiven Verfahren wird zwischen chemischen und biologischen Systemen unterschieden:

Chemische passive Systeme basieren i.A. auf einer Karbonatlösung, die zu einer Anhebung des pH-Wertes der Lösung und somit zur Metallausfällung führt. Zu den passi-

ven Verfahren gehören Belüftung, aerobe Karbonatkanäle, anaerobe Karbonatkanäle und Großoberflächenfilter.

Biologische Verfahren basieren auf der Fähigkeit von Bakterien, Schadstoffe als Energiequelle zu nutzen, aber auch auf der Herstellung von Substanzen, die als Adsorbent für Metalle dienen können.

Das Prinzip der Behandlung von Grubenwässern in Feuchtgebieten beispielsweise ist dasselbe wie bei aktiven biologischen Reaktoren, allerdings ohne die genaue Steuerung der Prozessparameter. Sowohl natürliche als auch konstruierte Feuchtgebiete eignen sich zur Behandlung von Wässern, allerdings nur mit mittleren bis niedrigen Schadstoffkonzentrationen und gemäßigter Wasserzufuhr, da die mikrobiologischen Prozesse langsam ablaufen.

Für die Aufrechterhaltung der passiven Systeme ist eine seltene aber regelmäßige Instandhaltung nötig. Diese Verfahren sind naturnah und aus ökologischem Gesichtspunkt oftmals eine wünschenswerte Alternative. Die Akzeptanz für solche Methoden ist groß, da sie in der Regel ein angenehmes Erscheinungsbild darstellen und Lebensräume für zahlreiche Pflanzen und Tiere bieten.

Auch finanziell bieten die passiven Systeme meistens die günstigere Variante. Die laufenden Kosten sind gering, der Großteil der Kosten besteht i.A. in der Investition für Landerwerb, da ein großer Flächenbedarf i.A. für diese Systeme notwendig ist.

Nachteilig sind die geringe Leistungsfähigkeit bei hohen Schadstoffkonzentrationen, die hohen Investitionskosten (Gelände, Anlagenbau), die begrenzte Eingriffsmöglichkeit in den Prozess und die noch fehlende langjährige Erfahrung mit solchen Systemen.

Bei den meisten in Deutschland befindlichen Altbergbaustandorten sind passive Reinigungsmethoden sind für die Elimination von Cd, Ni, Hg und Pb anwendbar.

Auf Basis einer Kosten-Wirksamkeitsberechnung wurde von *Bajas (2011)* ermittelt, dass die Elimination von Cd und Gesamtmitteln mittels Ionentauscher ökonomisch die günstigste Variante für die Standorte Burgfeyer Stollen, Rothschnberger Stollen, Verträgliche Gesellschaft Stollen und Schlüsseltollen wäre. Andere Verfahren, wie beispielsweise eine alkalische Fällung oder RAPS („Reduction and Alkalinity Producing System“; eine Kombination von anoxischen Karbonatkanälen mit einer überlagernden Kompostschicht) würden nachgeschaltete Sedimentationsbecken benötigen, was die Gesamtkosten erhöhen würde. Für den Schwefel Stollen wäre nach den vorliegenden Berechnungen die alkalische Fällung die kostengünstigste Methode, sowohl für Cd als auch für die Gesamtmitteln.

Zusammenfassung

Die Schwermetallemissionen aus deutschen Altbergbau-Standorten sind hinsichtlich der Ablaufkonzentrationen und der Abflussmengen und damit auch bzgl. der resultierenden Frachten sehr unterschiedlich. Einige zeichnen sich durch große Abflüsse und vergleichsweise hohe Schwermetallkonzentrationen aus, die eine deutliche Verschlechterung der Gewässergüte des jeweils als Vorfluter genutzten Gewässers verursachen. 40% der erfassten Altbergbauwässer haben Metallkonzentrationen größer AGA (Allgemeine Güteanforderung). 32% der Standorte haben Abflüsse > 20 l/s. Beide Faktoren können zu hohen Schwermetallfrachten führen. Letztlich sorgen wenige Stollen mit hohen Konzentrationen oder Abflüssen für den Großteil der Schwermetalleinträge aus dem Altbergbau in die Gewässer. Ein „Übersehen“ einer solchen Quelle in Deutschland ist unwahrscheinlich, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die relevanten Quellen im Modellsystem MoRE erfasst sind.

Der Vergleich der verfügbaren Daten zu den Eintragsmengen und den im Gewässer nachgewiesenen Frachten für die drei Modellgebiete Kinzig, Erft und Triebisch hat zu keinem eindeutigen Ergebnis geführt. Blei wurde im Modell für zwei Gebiete unterschätzt, für die Kinzig stimmten gemessene und modellierte Frachten miteinander überein. Nickel wurde in zwei Fällen über-, im Falle der Triebisch unterschätzt. Die Cadmiumfrachten waren für zwei Gebiete übereinstimmend und im Falle der Erft überschätzt, Quecksilber dagegen für die beiden Gebiete mit vorhandenen Messwerten überschätzt.

Die aktuell (unvollständig) erfassten Kontaminationen sind auf punktuelle Einleitungen in diesen Altbergbau-Regionen begrenzt. Die aus diffusen oder nicht erfassten Quellen stammenden Kontaminationen könnten ein bedeutender zusätzlicher Eintragspfad für Schwermetalle aus dem Bereich Altbergbau sein. Allerdings gibt es für eine genauere Quantifizierung bislang keine ausreichenden Messdaten. Mit der Quantifizierung und Lokalisierung der Emissionen können Maßnahmen zur Minderung der Kontamination eingeleitet werden.

Für eine mögliche Cadmiumentlastung der deutschen Gewässer um 20 % (ca. 1900 kg/a) durch eine Ablaufreinigung der sechs am meisten kontaminierenden Altbergbaustollen Deutschlands wurden sowohl aktive als auch passive Verfahren betrachtet und hinsichtlich finanzieller, technischer und ökologischer Parameter untersucht. Hierbei bestätigte sich, dass passive Systeme alleine zur Reinigung von Grubenwässern mit hohen Schwermetallkonzentrationen und Abflüssen ungeeignet sind. Der Bedarf an hierfür benötigter Fläche wäre zu groß. Daher müssten aktive Verfahren mit passiven Reinigungssystemen kombiniert werden.