

## **Landesanstalt für Altlastenfreistellung**

### **4011 GVV: Frachtreduzierung Schlüsselstollen**

#### **Bericht zum Arbeitspaket B: Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen**

Auftraggeber: Landesanstalt für Altlastenfreistellung  
des Landes Sachsen-Anhalt  
Maxim-Gorki-Straße 10  
D-39108 Magdeburg

Erstellt durch:

Plejades GmbH – Independent Experts

PLEJADES Projekt-Team  
Hegelstraße 39  
39104 Magdeburg

LAF Kennzeichen: LAF/GVV Schlüsselstollen  
Plejades Projekt-Nr.: 07-26  
Überarbeitete Berichtsfassung März 2014

Magdeburg, 28. September 2013

## INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung.....	3
1. Veranlassung und Überblick .....	4
1.1. Veranlassung, Aufgabenstellung .....	4
1.2. Anforderungen aus der Wasserrahmenrichtlinie .....	5
1.3. Schadstoffgehalte und Frachten .....	6
1.4. Zusammenfassende Beschreibung des hydraulischen Gesamtsystems .....	6
2. Beschreibung und Bewertung möglicher Maßnahmen .....	9
2.1. Screening der möglichen Maßnahmen .....	9
2.2. Kurzbeschreibung und Bewertung der Maßnahmen .....	10
2.3. Vergleichende Gegenüberstellung der Maßnahmen .....	20
2.4. Ableitung eines optimierten Vorgehens für die Umsetzung einer technischen Lösung.....	25
3. Schlussfolgerungen und Ausblick .....	26

## TABELLEN

Tabelle 1: Vergleichende Gegenüberstellung der Hauptkriterien .....	21
Tabelle 2: Vergleichende Gegenüberstellung hinsichtlich Zusatzkriterien.....	22

## ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Struktogramm der Maßnahmen zur Frachtreduzierung Schlüsselstollen .....	9
--	---

### Anlagen

Anlage 1	Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen
----------	--

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Projektstudie ist die Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den Schadstofftransport in der Saale/Elbe sowie die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen und die Prognose der regionalen und überregionalen Auswirkungen auf den Zustand der Gewässer.

Im Bericht zum Arbeitspaket A erfolgte die Zusammenstellung und Auswertung der vorhandenen Literatur und der Untersuchungsergebnisse zu Abflüssen und chemischer Analytik bei GVV, LHW und UFZ sowie die qualitative und quantitative Abschätzung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf die Saale und die Elbe. Auf Grund der ermittelten und prognostizierten Schadstofffrachten wurde gefolgert, dass technisch realisierbare und verhältnismäßige Maßnahmen zur Frachtreduzierung des Schlüsselstollens geprüft werden sollten, die eine effektive Verbesserung der Gewässerqualität in der Saale bewirken können. Dieses erfolgte im Arbeitspaket B, dessen Ergebnisse der vorliegende Bericht beschreibt.

Im Ergebnis ist aus fachtechnischer Sicht nach aktuellem Kenntnisstand davon auszugehen, dass auch mit erheblichen technischen und finanziellen Mitteln weder kurzfristig noch mittelfristig ein „guter chemischer Zustand“ bzw. die „Umweltqualitätsnormen (UQN) für Oberflächengewässer“ für die Schlenze und die Saale erreicht werden können. Die Ursache hierfür wird durch die äußerst schwierige Randbedingung gesetzt, bei der auf Dauer durch natürliche Gleichgewichtsprozesse bei der vorhandenen anthropogenen Überprägung geogene Schadstoffe ausgewaschen werden, deren passive oder aktive Beseitigung eine „ewige Maßnahme“ mit unerwünschten Nebenwirkungen (Energiebedarf, Abfallentstehung) und Kosten impliziert.

Eine beschränkte Möglichkeit, die UQN der Schlenze kurzfristig einzuhalten, wäre die direkte Anbindung des Schlüsselstollens mittels einer Rohrleitung an die Saale. Dabei müssten die damit verbundenen Nachteile durch den Eingriff in den naturräumlichen Bestand und die hydrologische Gesamtsituation (zeitweises Trockenfallen der Schlenze) in Kauf genommen werden, wobei keine Verbesserung für die Saale und Unterlieger zu erwarten sind. Diese Maßnahme wird daher nicht empfohlen.

Im Ergebnis wird weiter festgestellt, dass derzeit die Verringerung des Feststofftransportes in Verbindung mit einer chemischen In-situ-Immobilisierung durch Verschluss von Schächten und Reduktion der aktiven Sauerstoffzufuhr die einzige technisch und wirtschaftlich verhältnismäßige Variante für eine mittelfristige aktive Zustandsverbesserung darstellt, welche realistisch und aussichtsreich umsetzbar ist.

## 1. Veranlassung und Überblick

### 1.1. Veranlassung, Aufgabenstellung

Das ehemalige Mansfelder Kupferschieferrevier entwässert bis heute über den Schlüsselstollen über die Schlenze und die Saale in die Elbe. Als tiefster noch aktiver Wasserlösungsstollen leitet dieser die mit Abstand größten Wassermengen aus der Mansfelder Mulde und somit relevante, weitestgehend geogen verursachte und anthropogen überprägte Schwermetall- und Salzfrachten in die Vorflut.

Auf der Grundlage der im Bearbeitungskonzept „Frachtreduzierung Schlüsselstollen“ formulierten Ziele sollen Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstofffrachten geprüft und hinsichtlich ihrer großräumigen Wirkungen auf die Oberflächenwasserkörper der Saale und der Elbe bewertet werden.

Für die konkrete Bearbeitung wurden in Abstimmung mit dem Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU), dem Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt (LAF) und dem Gutachter Plejades Independent Experts (Plejades) in der weiteren Bearbeitung die nachfolgenden Einordnungen und Abgrenzungen festgelegt:

1. Die Maßnahmenkonzepte der Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben mbH (GVV) für die Abschlussbetriebspläne wurden im Sinne des Bergrechtes (Abwehr von Gefahren für Mensch, Umwelt und Sachgüter Dritter) entwickelt und zugelassen. Eine Überprüfung mit Blick auf Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und die Oberflächengewässerverordnung (OgewV) ist sinnvoll.

Es sollen u. a. die Grundlagen für eine Frachtabschätzung geschaffen werden. Von Interesse ist dabei eine Abschätzung der regionalen und großräumigen Auswirkungen der Maßnahmen ("Wirkungsprognose") auf der Grundlage nachvollziehbarer einfacher Bilanzierungen.

2. Prognosen zur Stoffverfrachtung in Saale und Elbe erfolgen auf der Grundlage bereits vorhandener Daten; es werden hierzu keine neuen Daten im Rahmen der vorliegenden Bewertung ermittelt.
3. Im Ergebnis ist eine Formulierung für die Beschreibung der vorhandenen Gewässerbelastung zu finden, welche sowohl die hohen natürlichen (geogen bedingten) Hintergrundgehalte als auch den Einfluss des Jahrhunderte währenden Bergbaus berücksichtigt.
4. Die Bewertung im Rahmen der Projektstudie beschränkt sich auf mögliche Maßnahmen im Bereich des Schlüsselstollens mit Bewertung der Wirkung auf nachfolgende Gewässer. Mögliche Maßnahmen außerhalb des Projektbereiches „GVV“ (wie z. B. Bewirtschaftung der Staustufen) werden im Bericht benannt, jedoch nicht analog den Maßnahmen innerhalb des Zuständigkeitsbereiches der GVV bewertet.

Im Rahmen des Projektes "Frachtreduzierung Schlüsselstollen" sollen daher folgende Schwerpunkte bearbeitet werden:

- Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den Schadstofftransport in der Schlenze/ Saale/Elbe,
- Überprüfung und Bewertung der grundsätzlichen Möglichkeiten zur Frachtreduzierung unter Berücksichtigung der laufenden und bereits geplanten Maßnahmen zum bergbaulichen Abschluss in der Mansfelder Mulde,
- Wirkungsabschätzung der Maßnahmen und Prognose der regionalen und überregionalen Auswirkungen auf den Gewässerzustand.

Der Schlüsselstollen befindet sich in der Zuständigkeit der GVV mbH Sondershausen, die für die Maßnahmen zur Verwahrung stillgelegter Bergbaubetriebe in Sachsen-Anhalt durch das Land Sachsen-Anhalt, vertreten durch die LAF in Magdeburg, freigestellt ist.

Entsprechend der Festlegung der Besprechung vom 29.05.2012 [PLEJADES (2013a)] sind getrennte Berichte für die beiden Arbeitspakete: "Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den partikelgebundenen Schadstofftransport in der Saale/Elbe" (Arbeitspaket A) und "Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen" (Arbeitspaket B) vorzulegen.

## **1.2. Anforderungen aus der Wasserrahmenrichtlinie**

Mit dem Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurden weitreichende Neuregelungen für den Gewässerschutz in Europa geschaffen, welche in nationales Recht umgesetzt wurden (WHG). Ziel dieser Regelungen ist das Erreichen eines guten Zustandes bis 2015 für möglichst viele Wasserkörper (Oberflächen- und Grundwasserkörper). Verlängerungen dieser Frist sind unter entsprechenden Bedingungen bis 2027 möglich. Weitere Regelungen hierzu sind in der „Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer“ (Oberflächengewässerverordnung – OgewV [OgewV (2011)]) enthalten.

Aus Untersuchungen zur Erfassung der Qualität der Elbe und ihres Einzugsgebietes ist bekannt, dass insbesondere einige ihrer Nebenflüsse in ihrer Qualität so beeinträchtigt sind, dass ein Erreichen des guten Zustandes bis 2015 in Frage gestellt ist. Ursache hierfür ist die Verfrachtung der relevanten Schadstoffe, sowohl in gelöster als auch zum Teil in partikulärer Form. Dabei stammen die relevanten Schadstoffe zu einem wesentlichen Teil aus ehemaligen Lagerstätten und der Bergbauindustrie bzw. aus den bergbaulich bedingten Veränderungen der geogenen Gegebenheiten.

Mit Inkrafttreten der Oberflächengewässerverordnung - OgewV vom 20. Juni 2011 finden bei der Bewertung der Umweltqualitätsnormen auch natürliche Hintergrundkonzentrationen entsprechende Berücksichtigung. Danach kann für einen Schadstoff nach Anlage 5 oder 7, bei welchem die natürliche Hintergrundkonzentration im zu beurteilenden Oberflächenwasserkörper die Umweltqualitätsnorm überschreitet, die zuständige Behörde eine abweichende Umweltqualitätsnorm unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration für diesen Oberflächenwasserkörper festlegen.

### 1.3. Schadstoffgehalte und Frachten

Der Schlüsselstollen spielt die dominierende Rolle beim Stoffaustrag aus den Grubenbauen des Kupferschieferabbaus im Mansfelder Land. Mit einem Anteil von etwa etwa 89 % am Abfluss aus der Mansfelder Mulde beträgt sein Anteil an der NaCl-Fracht 99,9 %. Der hohe Gehalt von durchschnittlich ca. 25-28 g/l NaCl im Wasser des Schlüsselstollens bewirkt trotz des deutlich geringeren Abflusses im Vergleich zur Saale, dass dieser bis zu 15 % der NaCl-Fracht der Saale (bei Groß Rosenberg) und bis zu knapp 10 % der NaCl-Fracht der Elbe (bei Magdeburg) beiträgt. Die ermittelte durchschnittliche NaCl-Fracht des Schlüsselstollens schwankte im Beobachtungsraum je nach Gehalten und Abflussmengen zwischen rd. 200 000 t/a (2000-2003) und 530 000 t/a (2010-2011)).

Auch für die Metallfrachten ist der Schlüsselstollen die dominierende Schadstoffquelle im Abfluss der Mansfelder Mulde. So werden etwa 87 % des Arsengehalts und 99 % des Zinkgehalts über den Schlüsselstollen in die Vorflut Schlenze abgeführt.

Der Einfluss der Schadstofffrachten des Schlüsselstollensystems auf die Wasserqualität der Saale ist differenzierter zu betrachten. So bringen die Schwermetalle Zink, Blei, Kupfer, Cadmium, Nickel und Uran signifikante Frachtanteile in gelöster Form (Zn > 100 kg /Tag, übrige genannte Metalle < 0,5 kg/Tag), wogegen Arsen und Chrom hier völlig unspezifisch bleiben und Quecksilber im Bereich bzw. unterhalb der Bestimmungsgrenzen detektiert wird. Bei der schwebstoffgebundenen Fracht des Schlüsselstollens bringt nur Blei signifikante Frachtanteile. Zink und Kupfer bringen Frachten von weniger als 1000 g/Tag, Arsen, Nickel und Chrom im Bereich von 10 g/Tag und Cadmium kleiner als 1 g/Tag. Quecksilber bleibt im Bereich der Bestimmungsgrenze.

Insgesamt wird somit über den Schlüsselstollen eine erhebliche Schadstofffracht in gelöster und partikulärer Form ausgetragen. Dadurch treten in der Schlenze Überschreitungen der JD-UQN für Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, und As auf. Ebenfalls wird die ZHK-UQN für Cadmium überschritten.

Die Saale wird durch den Eintrag von Cd und Zink beeinträchtigt. Zudem erfolgt eine Beeinträchtigung der Gewässergüte durch gelöstes Salz (NaCl) geogenen Ursprungs (Zechsteinabfolgen), das durch den anthropogenen Bergbau verstärkt mobilisiert wurde / wird.

In der Elbe resultiert keine signifikante zusätzliche Beeinflussung der Gewässergüte durch Austräge aus dem Schlüsselstollen.

Die Bedeutung des Schlüsselstollensystems als Schadstoffeintragsquelle in die unterliegenden Gewässer ist mit den vorliegenden Untersuchungen belegt und quantifiziert. Insbesondere für Zn und Cd trägt dieser Schadstoffeintrag zur Überschreitung der JD-UQN der OgewV in der Saale bei.

Die detaillierte Zusammenstellung ist im Berichtsteil A enthalten [PLEJADES (2013a)].

### 1.4. Zusammenfassende Beschreibung des hydraulischen Gesamtsystems

Nach über 800 Jahren Kupferschieferbergbau bis fast 1000 m Tiefe und ca. 1000 km Streckenauffahrungen sowie einem bleibenden, ca. 150 km<sup>2</sup> Fläche umfassenden großen

Flutungskörper ist ein kompliziertes hydrodynamisches und hydrochemisches Gesamtsystem entstanden, das über Jahrzehnte hinaus den Wasserhaushalt der Region maßgeblich mitbestimmen wird.

Dieses Gesamtsystem wird durch ein komplexes Wasserregime gekennzeichnet, das sich in folgende Bereiche untergliedern lässt [PLEJADES (2013a)]:

- Tiefer Grubenbereich bis ca -70 m NN: ist mit Sole geflutet und weist eine eher geringe Konvektion und einen geringen Austausch mit höheren Horizonten auf. Die Salzlösung ist gesättigt.
- Höhere Grube ab -70 m NN bis Rand des oberen Anstaubereichs: Der Bereich umfasst den Schwankungsbereich des Flutungswasserspiegels bis zum Überlaufpunkt bzw. den Überlaufbereichen. Die Wässer sind als ungesättigte Salzlösung einzustufen.
- Bereich der Grundwasserneubildung: umfasst den Bereich oberhalb des Schlüsselstollenniveaus mit eher mäßiger direkter Schadstoffmobilisierung aber mit Sauerstoffeintrag.

Die Entwässerung des Gesamtsystems erfolgt vorrangig über das Schlüsselstollensystem, welches fast die gesamte Salzfracht und den maßgeblichen Teil der Schwermetallfracht aus der Mansfelder Mulde in die Vorflut abführt.

Das Schadstoffregime steht in direkten Zusammenhang mit:

- der Quelle der geogenen Mineralisation: Schwermetalle liegen im Kupferschiefer i. W. sulfidisch vor,
- dem eher geringen (konvektiven) Austausch mit dem tieferen Grubengebäude: der überwiegende Teil der Schwermetalle und des Arsens (Hauptschadstoffpotenzial) wurde bereits durch die Flutung des Grubengebäudes (1970 - 1981) immobilisiert,
- der eher geringen Mobilisierbarkeit in der ungesättigten Zone: die Anstauwässer am Freieslebenschacht zeigen trotz direkter und jahrzehntelanger Anbindung an die Grubenbewetterung nur geringe Sauerstoffgehalte (sulfidisch gebundene Schwermetalle sind in aquatischen Systemen nicht bzw. nur gering mobil; geringe Sauerstoffgehalte wirken stabilisierend auf diesen Zustand),
- der eher hohen Mobilisierbarkeit der Schadstoffe vor allem aus der oberen Wasserlamelle der Anstauwässer mit anschließendem Transport über bergmännische Wasserlösungssysteme:
  - o der Mobilisierung durch Sauerstoffeintrag (mit Sulfatbildung; sehr hohe Sulfatfracht. Es erfolgt Sauerstoffeintrag durch Bewetterung und mit dem Niederschlagswasser/Grundwasserneubildung. Während der Sauerstoff im Anstauwasser offenbar weitgehend verzehrt ist, ist im Stollenwasser noch reichlich Sauerstoff verfügbar),
  - o der Verstärkung der Mobilisierung durch die Salzfracht (dies betrifft die gut löslichen Metall-Chloride).

Folgende grundsätzlichen Aussagen lassen sich anhand der bisherigen Untersuchungen ableiten [PLEJADES (2013a)]:

- die Schwankungen der Schadstoffwerte lassen keine sichere Ableitung eines Trends zu,
- anhand der Werte ist - unsicher - ein leicht fallender Trend (außer für As) abzuleiten,
- die Schwermetallfracht und Salzfracht aus der Mansfelder Mulde wird im Wesentlichen durch den Schlüsselstollen ausgetragen,
- der Austrag an den übrigen Stollen der Mansfelder Mulde ist deutlich geringer. Die Gehalte liegen in der Größenordnung vergleichbarer geogener Hintergrundwerte<sup>1</sup> (dies gilt ebenso für die Schlenze vor dem Zusammenfluss mit dem Schlüsselstollen).
- im Vergleich zu den gelösten Schadstoffen sind die ungelösten (partikelgebundenen) Schadstoffe für Bewertungen des Transportes und der Frachten aus dem Schlüsselstollen von untergeordneter Bedeutung, da diese (auch nach aktiver Aufwirbelung) als Schwebstoff im Stollenwasser nur in sehr geringem Umfang festgestellt werden konnten. Soweit gelöste Schadstoffe an Partikel gebunden werden, werden diese über die langen Transportwege auf frei fließenden Strecken nur im geringen Umfang verfrachtet, dann aber (vorzugsweise in „natürlichen“ Sedimentfallen) verhältnismäßig schnell abgesetzt und dauerhaft zurückgehalten (die Sedimentation kann bis mehrere Meter Mächtigkeit betragen [ROSS (2008)]).

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass derzeit ein quasistabiler Zustand (mit naturgegebenen Schwankungen) vorliegt, bei dem dauerhaft geogene Schwermetalle mobilisiert und überprägt durch anthropogene (bergbauliche) Einflüsse vor allem durch das Schlüsselstollensystem überwiegend in löslicher Form ausgetragen werden. Ohne maßgebliche Veränderung im System wird dieser Zustand über lange Zeit erhalten bleiben.

---

<sup>1</sup> Die Schwermetallgehalte liegen im Schwankungsbereich der Hintergrundwerte für aggregierte Flusslandschaften metallogen bzw. salinar [C&E (2012)], die Sulfatgehalte im mittleren Schwankungsbereich von Karstlandschaften.



## 2. Beschreibung und Bewertung möglicher Maßnahmen

### 2.1. Screening der möglichen Maßnahmen

Es existieren grundsätzlich drei Eingriffsebenen, an denen Maßnahmen eingeleitet werden können, die in einem ersten Schritt zu bewerten sind:

Ebene 1: Maßnahmen, die unmittelbar auf die Quelle wirken  
(hier: Freisetzung von Schadstoffen aus Lagerstätte in der Mansfelder Mulde, „up-stream/source“):

#### **Maßnahmen an Quelle**

Ebene 2: Maßnahmen, die innerhalb der unterirdischen Ausbreitungspfade wirken  
(hier: Grubengebäude und Hydrogeologie der Mansfelder Mulde, „in-stream“):

#### **Maßnahmen innerhalb des Ausbreitungspfades**

Ebene 3: Maßnahmen, die außerhalb des Stollensystems wirken  
(hier: nach Austritt aus dem Schlüsselstollen „down-stream/end-of-pipe“, d. h. nach Ausströmen nach Übertage):

#### **Maßnahmen auf das Schutzgut**

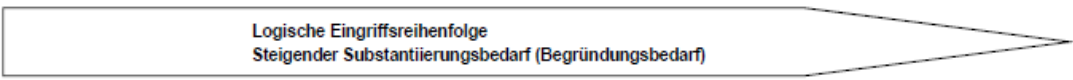
Weiter gibt es eine zusätzliche - vierte - Maßnahmenebene, die sich mit der aktuellen bzw. erreichbaren Situation befasst und die administrative Umsetzung darstellt:

Ebene 4: Maßnahmen zur Duldung des bisher erreichten oder zukünftig erreichbaren Zustandes

(hier: Weiterführung der bisherigen Maßnahmen zur Sicherung der Funktionstüchtigkeit des Abflusssystems Schlüsselstollen):

#### **Duldung des (erreichten) Status quo** (durch abgesenkte Umweltqualitätsziele)

Das nachfolgende Struktogramm fasst diese Maßnahmen zusammen (s. Anlage 1).

Maßnahme (Eingriff)				Administrative Entscheidung	
1 Eingriff an Quelle		2 Eingriff auf Ausbreitungspfad		3 Eingriff auf Schutzgut	4 Duldung
1-1 Beseitigung	1-2 Einschluss	2-1 Immobilisierung	2-2 Schadstofftransport	3 Entnahme/Reinigung	4 Anpassung der Qualitätsziele
1-1-1 Entfernung und Entsorgung	1-2-1 Physische Barrieren	2-1-1 Hydraulische Immobilisierung a: Versatz Abbau b: Verfüllung Flächen c: Verschluss des Schlüsselstollens	2-2-1 Verringerung Lösungstransport	3-1 Ex-Situ Aufbereitung a: Fällung b: Umkehrosmose c: Eindampfung	4-1 Verringertes Qualitätsziel Schlenze
1-1-2 Entfernung und Nutzung	1-2-2 Hydrodynamische Barrieren a: Oberhalb Überlaufpunkt b: Unterhalb Überlaufpunkt c: Aktive Pumpmaßnahme	2-1-2 Chemische Immobilisierung a: Reduktion der Sauerstoffzufuhr b: Einbau basischer Materialien	2-2-2 Verringerung Feststofftransport a: Sedimentfallen b: Klärbeete	3-2 In-Situ Verfahren  3-3 Ableitung	4-2 Verringertes Qualitätsziel Saale
 <p>Logische Eingriffsreihenfolge Steigender Substantiierungsbedarf (Begründungsbedarf)</p>					

**Abbildung 1: Struktogramm der Maßnahmen zur Frachtreduzierung Schlüsselstollen**

## 2.2. Kurzbeschreibung und Bewertung der Maßnahmen

Die verschiedenen Eingriffsansätze werden im Folgenden kurz beschrieben und in einem ersten Schritt überschlägig bewertet.

Zur Einordnung der Maßnahmen wurden als Hauptkriterien

- die technische Machbarkeit,
- der erforderliche Aufwand,
- die Genehmigungsfähigkeit<sup>2</sup>,
- die Zeitschiene für eine Umsetzung,
- die Erreichbarkeit des Ziels und die
- Verhältnismäßigkeit

für eine Entscheidungsfindung ausgearbeitet.

Zur besseren Einschätzung der Zielerreichung/Ergebnisbewertung und letztlich auch der Genehmigungsfähigkeit wurden folgende Zusatzkriterien abgestimmt und berücksichtigt:

- Beeinträchtigung des Landschaftsbildes,
- Beeinträchtigung der Lebensraumqualität,
- Gefahr einer Remobilisierung von Schadstoffen,
- Notwendigkeit und Möglichkeiten einer Entsorgung,
- Verbesserung des Wohls der Allgemeinheit,
- Einschätzung der Nachhaltigkeit.

Für die bessere Einschätzung der Verhältnismäßigkeit wurden die Kosten differenziert nach Investitionskosten und Betriebskosten (die ggf. auf Dauer fortlaufend anfallen) betrachtet.

Die Beschreibung der einzelnen Maßnahmenoptionen und die vergleichende Zusammenstellung mit Bewertung ist als Anlage 1 beigefügt.

Nachfolgend werden die wichtigsten Aussagen zusammengefasst.

---

<sup>2</sup> Die Genehmigungsfähigkeit entscheidet in der Praxis häufig über die Realisierbarkeit einer Maßnahme. Bei Identifizierung technisch realisierbarer und verhältnismäßiger Maßnahmen ist die Genehmigungsfähigkeit deshalb zwingend Bestandteil einer Bewertung. Da sie einzelfall- und ermessensbezogen erteilt wird bleibt sie deshalb auch ein separates Bewertungskriterium.

## 1 Eingriff an der Quelle

Nachfolgend wird unter „Quelle“ das Inventar der (mehrere Hundert km<sup>2</sup> großen, davon rund 150 km<sup>2</sup> durch Bergbau verritzte und gefluteten) Lagerstätte verstanden, welches ursächlich (z. B. Kupferschiefererz) und letztlich (z. B. im Flutungswasser des Grubengebäudes enthaltene – gelöste und ungelöste – Metalle und Salze) für den Schadstoffaustrag durch den Schlüsselstollen verantwortlich ist.

### 1-1 Beseitigung der Quelle

Die (vollständige) Beseitigung der Quellen wäre ein ultimativer Ansatz, wenn sie umsetzbar wäre: die positive Wirkung auf die Umwelt wäre offensichtlich und nachhaltig.

#### 1-1-1 Entfernung und Entsorgung der Quelle

Die Entfernung der geogenen Quellen i. B. Kupferschiefer und Salinar mit anschließender Deponierung ist unrealistisch. Sie wäre eine Kombination aus einer bergmännischen und abfallwirtschaftlichen Technologie, die mit einem extremen Aufwand, hohen Zeitbedarf, hohen Ausführungsrisiko und hohen Sekundärrisiken für die Umwelt (großräumiger Eingriff in die Landschaft, in den Wasserhaushalt, Energieaufwand, Abfallentstehung, Lärm- und Staubentstehung) verbunden wäre. Eine nachhaltige Qualitätsverbesserung wäre nur bei vollständiger Entfernung und schadloser Entsorgung gegeben und ist deshalb fraglich (hohes Restrisiko). Die Genehmigung wäre äußerst komplex und fraglich. Die Kosten wären absehbar enorm und die Verhältnismäßigkeit nicht gegeben.

#### 1-1-2 Entfernung und Verwertung der Quelle

Diese Variante entspricht der zuvor beschriebenen Variante mit dem Unterschied, dass enthaltene nutzbare Komponenten verwertet werden. Dies würde eine zusätzliche Aufbereitungsanlage erfordern, deren Betrieb mit zusätzlichen Umweltverträglichkeitsfragestellungen verbunden wäre. Es ist fraglich, ob ein maßgeblicher Teil der Inhaltsstoffe überhaupt verwertet werden könnte. Volumenmäßig müsste voraussichtlich der weitestgehende Anteil doch wieder deponiert werden. Aufwand und Risiken wären auch hier sehr hoch und die Genehmigung komplex und fraglich. Die Kosten wären ebenso enorm bzw. sogar noch höher, während die eventuellen Erlöse demgegenüber sehr bescheiden bleiben dürften, so dass auch hier die Verhältnismäßigkeit nicht gegeben wäre. Aus Umweltsicht werden hier keine wesentliche Vorteile zu 1-1-1 gesehen.

### 1-2 Einschluss

Sind die Quellen mit technischen Mitteln nicht entfernbar, ist als nächstes zu prüfen, ob durch einen (nachhaltigen) Einschluss der Quelle in situ die nachteiligen Wirkungen auf die Umwelt verringert bzw. unterbunden werden können.

#### 1-2-1 Physischer Einschluss der Quelle

Die Quellen sind i. W. durch die geologischen Strukturen eingeschlossen. Allerdings stehen sie direkt (über geologischen Ausbiss) und indirekt (über Wasserwegsamkeiten,

hier auch bergbauliche Auffahrungen) mit der Biosphäre in Verbindung. Eine technische Baumaßnahme zum vollständigen physischen Einschluss der Quelle ist praktisch nicht umsetzbar. Bestenfalls wären Teillösungen (z. B. Abdichtungsdämme in einzelnen Stollen) denkbar, die aber in der technischen Ausführung sehr schwierig bis unmöglich und sehr aufwändig wären (sehr hohe Kosten). Dabei sind sie aber in ihrer Wirksamkeit begrenzt (Restrisiko), da die Wegsamkeiten für Wasser über die verbleibenden geologischen Strukturen immer noch vorhanden wären und damit die nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt möglich blieben (Grundwasser wird unausweichlich auch in Zukunft durch Neubildung entstehen und unausweichlich über das Grundwasser/Grubenwasser mit Lagerstättenteilen in Verbindung stehen). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein physischer Einschluss unrealistisch erscheint und selbst wenn dieser technisch umsetzbar wäre, er mit enormem Aufwand und Risiken verbunden wäre, so dass er darüber hinaus als unverhältnismäßig einzustufen ist.

#### 1-2-2 Hydrodynamische Barrieren

Durch Potentialgefälle können Fließrichtung und Fließgefälle maßgeblich beeinflusst werden. Bei der bereits historisch erfolgten Flutung wurde durch Verwendung aufgesättigter Salzlösungen ein vertikaler Dichtegradient angestrebt, der sich offensichtlich zumindest für die tieferen Lagerstättenteile unterhalb des Schlüsselstollenniveaus eingestellt hat und wirksam ist. Für den weniger tiefen Lagerstättenteil unterhalb des Schlüsselstollenniveaus überlagert ein horizontaler Strömungsgradient den vertikal wirkenden Dichtegradienten nachteilig: Durch das mit dem Schlüsselstollen angelegte geneigte Fließgefälle entsteht im Bereich und unterhalb des Schlüsselstollenniveaus ein in Richtung des sog. „Überlaufpunktes“<sup>3</sup> gerichtetes Gefälle der Oberfläche des Grubenwasserkörpers. Dieses Gefälle kann zusätzlich das Potenzialgefälle der Grundwasserneubildung oberhalb der Lagerstätte erhöhen. Durch das Gefälle entsteht eine Strömungskomponente innerhalb der obersten Lamelle des Grubenwasserkörpers, wodurch das salz- und schwermetallhaltige Grubenwasser in Richtung Schlüsselstollen fließt. Folgende technischen Eingriffsmöglichkeiten könnten diesem Prozess hydrodynamisch entgegenwirken:

- 1-2-2-a Ein **Abdämmen/Aufspiegeln oberhalb des Überlaufpunktbereiches** würde nur den Gradienten erhöhen und so die unerwünschte Wirkung einer zusätzlichen Mobilisierung von Schadstoffen haben. Dies stünde im Widerspruch zu den Zielen der Gewässerbewirtschaftung, da Schadstoffmobilisierung und Schadstoffaustrag steigen würden.
- 1-2-2-b Ein **Abdämmen unterhalb des Überlaufpunktbereiches** würde einen Anstieg des Flutungsspiegels bewirken und dazu führen, dass das Niveau des bisher kaum belasteten Froschmühlenstollens erreicht würde. Da

---

<sup>3</sup> Am sogenannten Überlaufpunkt im Bereich des Glückshilfsschachtes entlastet als tiefster Anschlusspunkt der Grubenbaue mit dem Schlüsselstollen das Grubenwasser der Mansfelder Mulde in den Schlüsselstollen. In der Praxis handelt es sich weniger um einen spezifizierbaren Punkt sondern um einen Bereich: so tritt auch oberstrom bereits Grubenwasser dem Schlüsselstollen zu. Der Überlaufpunkt ist die hydraulisch tiefste Verbindung und somit maßgeblich für hydraulische Berechnungen und Betrachtungen einer hydraulischen Abriegelung des Grubengebäudes.

dieser in das bisher weitgehend verschonte Einzugsgebiet des „Süßen Sees“ entwässert, würde ein solcher Anstieg des Flutungsspiegels dessen erhebliche Beeinträchtigung zur Folge haben. Da das Gewässereinzugsgebiet des „Süßen Sees“ seinerseits zum „Saale – Einzugsgebiet“ gehört, würde diese Option nur zusätzliche Verschlechterungen ohne Verbesserung der Situation im „Saale - Gewässersystem“ bewirken. Dies stünde im Widerspruch zu den Zielen der Gewässerbewirtschaftung.

Ein **genereller Verschluss des Schlüsselstollens** mit anschließender Flutung der Grube wurde bereits in [ARGE GFE (1992)] diskutiert. Neben einer Verschlechterung des Gewässersystems „Süßer See“ – ehem. „Salziger See“ und der Vernässung tieferliegender Bereiche ist mit erheblichen neuen Konfliktpotenzialen zu rechnen: Zunahme der Salzführung (und Schwermetallfracht) in bisher noch nicht so beeinträchtigten Vorflutern (Schlenze oberhalb Einmündung Schlüsselstollen, Ritzkebach, Fleischgraben, Fleischbach, Freßbach, Laweke, Böse Sieben u. a.), Verminderung der Stabilität von Böschungssystemen, Wiederaufleben von Erdfällen im Bereich Eisleben / B 180. Insgesamt würde somit die Wasserbilanz nicht maßgeblich verändert (die Grundwasserneubildung bliebe unverändert), aber dafür würden neue Abflusswege in bisher weniger belastete Gewässer entstehen.

- 1-2-2-c Die aktive **Abförderung und Absenkung des Druckpotenzials** im oberen (geringer belasteten) Bereich des Schlüsselstollens: Damit könnte das Gefälle im Lagerstättenbereich ggf. zumindest teilweise reduziert werden. Allerdings bliebe die gesamte Wirkung begrenzt, da dieses geringer belastete Wasser ohnehin über den Schlüsselstollen bereits jetzt ablaufen kann, der durch die (energieverbrauchende) Abförderung einen neuen Weg bekommt. Gleichzeitig ist schwer abzuschätzen, wie weit der Einwirkungsbereich reichen wird und wie viel Wasser dabei gefördert und entsprechend gereinigt werden muss. Weiter ist die Wechselwirkung der Grundwasserneubildung mit der oberen Grubenwasserlamelle schwer abzuschätzen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in der Vergangenheit durchgeführten Verwahrungsmaßnahmen durch Flutung mit aufgesalzenen Wässern bereits einen positiven Eingriff in die Hydrodynamik bewirkt haben, der jedoch auf Grund der örtlichen Gegebenheiten nicht vollständig wirksam ist. Die Möglichkeiten, das bereits Erreichte durch Zusatzmaßnahmen (z.B. Einstau, Abdämmen oder Fassen und Ableitung von Teilströmen) zu ergänzen, sind als sehr begrenzt einzuschätzen.

## 2 Eingriff auf Mobilisierungs- und Ausbreitungspfade

Kann die Quelle nicht entfernt oder eingeschlossen werden, bietet der Eingriff auf die bestehenden Mobilisierungs- und Ausbreitungspfade weitere Möglichkeiten der aktiven Beeinflussung. Hierzu zählen:

### 2-1 Reduzierung / Unterbindung der Mobilisierung

Sind die Sicherung oder Beseitigung der Quellen (Entfernung und Einschluss) nicht machbar, dann sind die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Mobilisierungsmechanismen mit dem Ziel der Reduzierung bis hin zur Unterbindung der Mobilisierung zu prüfen. Hierzu zählen neben der hydraulischen und chemischen Immobilisierung auch die Möglichkeiten zur Verringerung des Feststofftransportes.

#### 2-1-1 Hydraulische Immobilisierung

Die hydraulische Immobilisierung erfolgt durch die Verringerung der Durchströmung der Quelle. Dies erfolgt im Bergbau üblicherweise durch dichten Versatz oder durch Verschluss von Zugängen zu Abbaubereichen (Strecken, Schächte, Flächen<sup>4</sup>). Folgende prinzipielle Möglichkeiten einer hydraulischen Immobilisierung sind denkbar:

2-1-1-a **Dichter Versatz in Abbaubereichen.** Die Versatzeinbringung kann in der Regel nur während der aktiven Bergbauphase oder unmittelbar danach erfolgen. Im Mansfelder Kupferschieferbergbau erfolgte der Versatz in Form von Handsteinversatz oder Bruchversatz. Beide Versatzarten haben einen signifikanten aktiven Porenanteil und sind daher hydraulisch durchlässig. Eine nachträgliche Abdichtung des Porenanteils z. B. durch Injektion von hydraulisch abbindenden oder anderen Abdichtungsmaterialien ist großflächig nicht praktikabel. Selbst eine Abdichtung in lokal eingegrenzten Bereichen ist nachträglich praktisch nur schwer möglich und sehr aufwändig. Ein wirksames und verhältnismäßiges Vorgehen mit nachhaltigen Ergebnissen ist mit diesem Ansatz nicht möglich.

2-1-1-b **Verfüllung/Abdichten der Flächen** im Bereich des Mansfelder Grubenreviers: Grundlage hierfür bildet die Annahme, dass ein hydraulisches Gefälle vom Bereich W/T-Schacht bis zum Überlaufpunkt (Bereich Glückhilfsschacht) vorliegt und dass die Flächen als primäre vertikale Fließwege mit dem geringsten hydraulischen Widerstand dienen. Daher könnte der Verschluss der primären Fließwege zumindest die Durchströmung des Grubengebäudes deutlich verringern. Ob und in welchem Umfang eine teilweise oder weitgehende Verfüllung zum Einsatz kommen könnte und welche Ergebnisse damit erzielbar wären, hängt jedoch wesentlich sowohl von den geologischen als auch den technischen Rahmenbedingungen ab: Zunächst wäre ein Konzept zu entwickeln, das die geologischen Rahmenbedingungen bewertet: Eine erste Bewertung der Zugänglichkeit der Flächen anhand vorliegender Grubenkarten ergab, dass etwa die Hälfte der Flächen für eine

---

<sup>4</sup> Flächen: im Mansfelder Kupferschieferbergbau übliche Bezeichnung für eine Strecke, die mit geringer Neigung verläuft und einen regelmäßigen, ziemlich gleichbleibenden Querschnitt besitzt.

nachträgliche Verfüllung/Abdichtung vor Ort nicht mehr zugänglich ist. Im Rahmen der Alternativenprüfung wurde deshalb die Verfüllung/Abdichtung folgender zugänglicher Strukturen als potentiell möglich betrachtet:

- Freieslebenschächter Flächen
- Abbaubereiche zwischen LL 26 und Niewandschacht inkl. der zugehörigen Flächen (hier reichen die Abbaubereiche bis an den Schlüsselstollen (ohne Feste))
- Glückhilfschächter Flächen bzw. Schacht Teilverfüllung

Bei einer Verfüllung/Abdichtung der Flächen könnte in Kombination mit dem Einbringen von zusätzlichem basischem Material (basische Baustoffe, Aschen) ggf. eine zusätzliche Verbesserung der Wirksamkeit erwartet werden (s. Maßnahme 2-1-2). Diese Variantenkombination wäre jedoch mit zusätzlichen, derzeit nicht abschätzbaren genehmigungsrechtlichen Risiken (Genehmigung des Einbaus chemisch aktiver Materialien in Gruben-/Grundwasserbereiche) verbunden.

Somit erscheint eine nachträgliche Verfüllung der Flächen bestenfalls nur teilweise und mit fraglichen Erfolg durchführbar. Die Genehmigungsrisiken und der Aufwand wären gleichzeitig sehr hoch, so dass eine Weiterverfolgung dieser Option nicht empfehlenswert ist.

- 2-1-1-c **Verschluss des Schlüsselstollens unterhalb des Überlaufpunktes:** Dieser umfasst den hydraulischen Verschluss des Schlüsselstollens im Bereich des Glückhilfsschachtes (stromab des „Überlaufpunktes“) und die Führung eines Entwässerungsrohres innerhalb des Schlüsselstollens bis zur Fassung der geringer belasteten Wässer im Anstrom und deren "Vorbeiführung" an den Bereichen zuzitzender höher mineralisierter Wässer aus den Flächen d.h. bis mindestens auf Höhe des Bolzeschachts, wo die Fassung der Grubenwässer erfolgt. Die zu erreichende Wirkung entspräche der Variante 2-1-1-b, wäre jedoch ohne das Risiko, welches sich aus der Verfüllung der Flächen bzw. der Abbaubereiche ergibt (Zugänglichkeit, Erreichen der Dichtheit, Qualität des Verfüllmaterials). Erhebliche bauliche und genehmigungsrechtliche Schwierigkeiten ergeben sich aus der Verlegung einer großdimensionierten Rohrleitung über ca. 13 km Länge im Querschnitt des Schlüsselstollens bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Abflusses im Stollen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Möglichkeiten einer hydraulischen Immobilisierung aus technischen Gründen sehr begrenzt sind, genehmigungsrechtlich eher kritisch zu bewerten sind und auch hinsichtlich der Risiken (v. a. Nichterreichbarkeit des Ziels) kritisch zu bewerten sind.

#### 2-1-2 Chemische Immobilisierung

Die Mobilisierung der Schadstoffe erfolgt im Wesentlichen durch natürliche chemische Prozesse im wässrigen Millieu, bei denen die in Mineralien gebundenen Metalle in Lösung gehen. Dieser Prozess wird wesentlich durch den pH-Wert, das Redoxpotential,

die Ionenbilanz und die Salinität gesteuert. Vereinfachend kann gesagt werden, dass das Vorhandensein bzw. die Zufuhr von Sauerstoff die Bildung von Säurepotenzial (Sulfatbildung durch Oxidation von Sulfiden) und der hohe Salzgehalt die Löslichkeit der Metallionen erhöht. Die Einstellung von anaeroben Bedingungen kann nicht nur die Mobilisierung durch Sauerstoffzufuhr verhindern sondern darüber hinaus zur Fällung von Metallionen aus der wässrigen Lösung führen: die anaerobe mikrobielle Sulfatreduktion verursacht bei ausreichendem Vorhandensein von Ca-Ionen und Sulfat-Ionen die Sulfid-Bildung, bei der z. B. gelöstes Zn als ZnS ausgefällt wird. Somit sind folgende Eingriffsoptionen grundsätzlich denkbar:

- 2-1-2-a **Verwahrung** der verbliebenen bewetterten Grubenbereiche im oberen Schlüsselstollenbereich (W-Schacht und Umfeld): Werden die derzeit vorhandenen bisher noch bewetterten (d.h. mit Frischluft versorgten) Grubenräume im oberen Schlüsselstollenbereich abgeworfen und verwahrt, wird ein erheblicher Anteil der bisherigen Sauerstoffzufuhr unterbrochen werden, d. h. durch die **Verringerung der Oxidationspotenzials** wird ein wesentlicher Mobilisierungsmechanismus unterbunden. Ggf. kann das Entstehen anaerober Bedingungen durch zusätzliche Maßnahmen (z.B. Einbringen von sauerstoffzehrendem organischem Material) gefördert werden; grundsätzlich wäre jedoch das Wirken natürlicher Prozesse vorzuziehen und etwaige Eingriffe möglichst zu vermeiden.
- 2-1-2-b Durch Einbringen basischer Materialien zur **Erhöhung des pH-Wertes** wird das Lösungspotenzial weiter reduziert. Dies kann z. B. durch Einspülen von Filteraschen in den Lagerstättenbereich erreicht werden. Allerdings ist der Eintrag von derartigen, chemisch wirksamen, nicht natürlichen Materialien oder Chemikalien genehmigungsrechtlich aufgrund der nicht auszuschließenden nachteiligen und nicht abschließend vorhersehbaren Umweltwirkungen fraglich.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass Optionen zur Verringerung der Mobilisierung von Schadstoffen durch Verringerung der Sauerstoffzufuhr durch Abwerfen bzw. Verwahrung der noch bewetterten Grubenbereiche grundsätzlich einen positiven Beitrag zur Reduktion der Schadstofffreisetzung leisten können.

## 2-2 Verringerung des Schadstofftransports

Sind die vorhergehend betrachteten Möglichkeiten zu Entfernung, Einschluss und/oder Immobilisierung nicht hinreichend realisierbar, ist als nächste Stufe der Eingriff auf die Transportmechanismen zu betrachten.

### 2-2-1 Verringerung des Lösungstransports

Die Steuerung des Transports von Schadstoffen in gelöster Form erfolgt im Wesentlichen über die Strömung im Schlüsselstollen, der die Mansfelder Mulde entlastet. Die Strömung im Schlüsselstollen wird durch seine Neigung (seinen Gradienten) und sein Einzugsgebiet geprägt. Bereits im Rahmen der Betrachtung des Eingriffsprinzips „Einschluss (1-2)“ wurde festgestellt, dass das Unterbinden des Abflusses über den Schlüsselstollen zu unerwünschten negativen Auswirkungen führen wird, sobald das aufsteigende kontaminierte Wasser das Froschmühlenstollenniveau



erreichen und über diesen in das Gewässereinzugssystem des „Süßen Sees“ gelangen würde.

Zur möglichen Reduzierung der Abflussmengen insbesondere aus dem kontaminierten Lagerstättenteil wäre eine Variante jedoch vorstellbar:

Diese umfasst den Anstau des Schlüsselstollens unterhalb des „Überlaufpunktbereiches“ aus der Lagerstätte in den Schlüsselstollen und den kontrollierten Abzug des weniger kontaminierten Schlüsselstollenwassers bzw. dessen Anstau über den Schlüsselstollen und/oder ggf. auch über den Froschmühlenstollen /Zabenstedter Stollen. Da die Fließwege und Fließbedingungen unter Tage nur sehr begrenzt einschätzbar sind, könnten die Auswirkungen nur im Anstauversuch konkret ermittelt werden. Technisch wären hierfür aufwändige Bauwerke erforderlich: Dammbauwerk(e), ggf. Umleitungs-/Abzugseinrichtungen zur Abfuhr geringer kontaminierten Schlüsselstollenwassers, ggf. ein Ersatz für den Freieslebenschacht. Das zu errichtende System wäre aufwändig und kompliziert und die erreichbare Wirkung auch in Anbetracht der räumlichen Ausdehnung ungewiss.

#### 2-2-2 Verringerung des Feststofftransports

Grundsätzlich wäre eine Reduzierung des Feststofftransportes mittels Sedimentfallen oder Klärbeeten innerhalb bzw. außerhalb des Schlüsselstollens möglich:

2-2-2-a **Sedimentfalle:** Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der Feststofftransport wahrscheinlich einen nur sehr geringen Anteil an der Schadstoffverfrachtung innerhalb des Schlüsselstollensystems hat. Grundsätzlich sollen trotzdem an dieser Stelle die Maßnahmen zur Reduzierung in die Betrachtungen einbezogen werden. Dazu würde sich die bereichsweise Beruhigung der Strömungsverhältnisse zur Sedimentation (Sedimentfallen) anbieten. In Anbetracht der insgesamt eher geringen Menge würde sich eine Sedimentfalle im Mundlochbereich anbieten (zusätzliches Wehr mit Stauraum).

2-2-2-b **Klärbeete:** Die Anlage biofilmreicher durchströmter Klärbeete im Bereich zwischen Schlüsselstollenmundloch und Friedeburg würde die Möglichkeit eines deutlich höheren Schadstoffrückhalts im Vergleich zu Sedimentfallen bieten. Dies ist begründet in der möglichen erhöhten Absorption an Biofilmen (s. Kap. 3.4 in [PLEJADES (2013a)]). Um eine relevante Absorption zu erreichen, müssten relativ großen Beeteflächen angelegt werden, um die hohe Strömungsgeschwindigkeit des Schlüsselstollens deutlich auf das erforderliche Maß zu reduzieren. Unklar ist jedoch, ob tatsächlich ein signifikanter Rückhalt von Schadstoffen erfolgt, ob dieser ganzjährig (d. h. auch im Winterhalbjahr) zu verzeichnen ist und wie eine „Beräumung“ der Klärbeete ohne Remobilisierung ermöglicht werden kann. Offen ist, wo und in welchem Umfang geeignete Flächen überhaupt zur Verfügung stünden. Neben diesen Risiken entstehen genehmigungsrechtliche Risiken für die Errichtung und den Betrieb der Anlagen; ebenso sind die wirtschaftlichen Risiken nicht abschätzbar. Eine effiziente Realisierbarkeit dieser Maßnahme ist daher als sehr gering einzuschätzen.

### 3 Direkter Eingriff auf das Schutzgut Wasser

An dieser Stelle sind die möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität durch Verringerung der Schadstoffgehalte im Wasser des Schlüsselstollens zu betrachten.

#### 3-1 Ex-Situ -Verfahren

Bei den nachfolgend aufgeführten Verfahren handelt es sich um Verfahren der Ex-situ-Behandlung des Stollenwassers in technischen Reinigungsanlagen.

- 3-1-a **Fällung:** Die Reinigung durch Fällung ist für Metalle ein übliches Verfahren. Dabei handelt es sich i. d. R. um eine chemische Behandlung, bei der durch Änderung des pH-Wertes die Metalle gefällt werden. Bei komplexen Metallgehalten kann sich dies komplizierter gestalten, da sich die einzelnen Metall-Ionen chemisch unterschiedlich verhalten: Bei dem Schlüsselstollenwasser wäre am ehesten eine hochbasische Fällung geeignet. Bei anschließender Neutralisierung der Basizität würden zusätzlich Salze entstehen, da das Fällen von Chloriden bzw. Salzen nur aus übersättigten Lösungen (siehe auch nachfolgend Umkehrosmose) gelingt. Der Prozess der Fällung ist aufgrund der hohen Salzfrachten nicht als separate Maßnahme sondern nur in Kombination mit einer Umkehrosmose oder Eindampfung möglich.
- 3-1-b **Umkehrosmose:** Die Reinigung sowohl von Metall- als auch Salzfrachten gelingt umso effizienter, je höher die Konzentrationen sind. Ein technisches Verfahren, Lösungen aufzukonzentrieren, ist die Umkehrosmose. Insbesondere die Entfernung von Salzen ist ohne Umkehrosmose kaum wirtschaftlich durchzuführen.
- 3-1-c **Eindampfung:** die Trennung von Metallen und Salzen aus wässrigen Lösungen kann durch Abdampfen / Eindampfen, ggf. aus energetischen Gründen unter Niederdruck bzw. Vakuum erfolgen. Allerdings ist dieses Verfahren extrem energieintensiv, daher teuer und für große Durchflussmengen (wie z.B. im Schlüsselstollen) kaum beherrschbar. Sinnvoll ist dieses Verfahren nur bei hinreichender Aufkonzentrierung oder hinreichend verfügbarer preiswerter Energie (z. B. Abwärme aus anderen Industrieprozessen).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine nachgeschaltete Reinigung von metall- und salzbelasteten Wässern mit den vorhandenen Konzentrationen der Metalle und Salze und in einer Schüttung, wie sie beim Schlüsselstollen vorliegt, technisch kaum beherrschbar erscheint. Die Kosten wären auf jeden Fall extrem hoch, so dass die Verhältnismäßigkeit sehr fraglich ist. Da die Ex-Situ-Abreinigung jedoch zumindest theoretisch nach derzeitigem Kenntnisstand das einzige Verfahren wäre, das eine Erreichbarkeit eines chemisch guten Zustandes hinreichend sicher in Aussicht stellen könnte, wurde sie zur Ermittlung belastbarer Zahlen in die Betrachtungen einbezogen.

#### 3-2 In-Situ-Verfahren

Als wichtige In-Situ-Verfahren bieten sich die bereits unter 2-1-2 angesprochenen chemischen Verfahren an. Allerdings ist systembedingt deren Anwendung innerhalb der Lagerstätte effektiver als im verdünnten Zustand im oder außerhalb des Schlüsselstollens. Die Betrachtung der in-Situ-Verfahren ist daher im Rahmen der Maßnahme 2-1-2 vorzunehmen.

### 3-3 Ableitung (ohne Aufbereitung)

Die Ableitung der Wässer ohne Aufbereitung umfasst zwei mögliche Varianten:

3-3-a **Ableitung in die Schlenze:** Dies entspricht dem Status quo, bei dem die Entlastung der Mansfelder Mulde gezielt durch die Ableitung über die Schlenze in die Saale erfolgt. Eine Aufgabe dieses Systems würde zu einer unkontrollierten und nicht beherrschbaren - und deshalb unbedingt zu vermeidenden - Freisetzung von geogenen Schadstoffen führen. Der Erhalt des Systems bedeutet hingegen die Nicht-Verschlechterung. Sollte es keine anderen mit verhältnismäßigen Aufwand (bzw. Risiken) umsetzbaren Maßnahmen geben, verbliebe diese Variante als Minimalvariante.

3-3-b **Direkte Ableitung (mittels Rohrleitung) in die Saale:** Die Ableitung der Wässer des Schlüsselstollens mittels einer Rohrleitung in die Saale bedeutet im Ergebnis die Vermeidung des Schadstofffrachteintrags durch den Schlüsselstollen in die Schlenze. Die Verlegung einer großdimensionierten Leitung (oder von zwei Leitungen mit geringerem Durchmesser) von ca. 1,3 km Länge im offenen Gelände würde grundsätzlich technisch keine Schwierigkeit darstellen. Im Ergebnis dieser Maßnahme würde zwar die Schlenze entlastet, nicht jedoch die Saale. Ggf. könnte es zu einer begrenzten Verschlechterung in der Saale führen, da der bisher als passive Reinigungsstrecke wirkende Gewässerabschnitt der Schlenze entfallen würde. Offen bliebe auch, ob eine Direkteinleitung in die Saale mit den hohen Metall- und Salzfrachten genehmigungsfähig wäre. In jedem Fall wäre die behördliche Festlegung eines verringerten Qualitätsziels für den Saaleabschnitt zwischen Friedeburg und Elbemündung grundlegende Voraussetzung (s. Maßnahme 4-2). Eine weitere unbedingt notwendige Voraussetzung wäre eine wasserrechtliche Genehmigung für die Fassung und Ableitung der Schlüsselstollenwässer. Ebenso ist noch nicht bekannt, ob ggf. auch naturschutzrechtliche Aspekte berührt werden.

Diese relativ aufwändige Maßnahme würde somit umwelttechnisch zwar eine Verbesserung für den Gewässerabschnitt der Schlenze darstellen, aber das eigentliche Ziel der Entlastung der Saale und abstromiger Gewässer verfehlen. Ob die Maßnahme darüber hinaus genehmigungsrechtlich überhaupt machbar wäre (Direkteinleitung einer erheblichen Salz- und Schwermetallfracht in die Saale) und Akzeptanz in der Öffentlichkeit finden würde, ist als sehr fraglich einzuschätzen.

#### 4 Duldung

Ausgangspunkt der Betrachtung sind der bereits seit Jahrzehnten bestehende Zustand und die in den letzten Jahren bereits durch die GVV zur Verbesserung der Situation durchgeführten Maßnahmen wie u.a. die Verwahrung zahlreicher Tagesöffnungen.

Die Entwässerung der Mansfelder Mulde erfolgt im Ergebnis des jahrhundertelangen Bergbaus über Stollen. Aufgrund seiner Teufenlage entwässert das Schlüsselstollensystem die Hauptmenge des durch den anstehenden Zechstein und Kupferschiefer geogen erheblich mit Salz und Schwermetallen belasteten Grundwassers der Mansfelder Mulde über die Schlenze in die Saale. Wesentlich für die Lösung von Schwermetallen ist die Sulfidoxidation im anstehenden Gestein durch zusetzendes, sauerstoffreiches Niederschlagswasser sowie durch die Sauerstoffzuführung aus der Bewetterung der vorhandenen Wasserlösestollen.

Da weder in der WRRL noch in der deutschen Gesetzgebung (BBergG, ABergV, ABPV, WHG, Landeswassergesetze und AbwV) Regelungen zum Umgang mit Grubenwässern getroffen oder spezifische Qualitätsstandards festgelegt werden, ist das Schlüsselstollenswasser nach Einstellung des Bergbaus letztendlich als ein (Grund-) Wasser mit geogenen Mineralfrachten zu betrachten. Durch den anthropogen geschaffenen Hohlraum erfolgt die hydraulische Entlastung der unterirdischen Lagerstätte, die vor Anlage des Schlüsselstollensystems über Quellen erfolgte und u. a. zur Entstehung des salzigen Sees geführt hat. Der Übertritt in die Schlenze ist insoweit ein quasi natürlicher und aufgrund der irreversiblen anthropogenen Tätigkeiten unvermeidbarer Vorgang, der dauerhaft anhalten wird und mit technischen Maßnahmen nicht unterbunden werden kann, ohne an anderen Stellen Nachteile für Mensch und Umwelt zu verursachen. Daher handelt es sich u.E. nicht um eine Einleitung (Gewässerbenutzung) sondern quasi um den punktuellen Zutritt von Grundwasser in den Vorfluter Schlenze.

Dies vorausgeschickt, ist die Betrachtung derjenigen Maßnahmen, die eine Absicherung des aktuellen Zustandes (d.h. keine Verschlechterung) und eine langfristige Qualitätsverbesserung zum Ziel haben, prioritär.

Existieren aus technischen, wirtschaftlichen oder genehmigungsrechtlichen Gründen keine realistisch umsetzbaren Maßnahmen zur Herstellung eines guten ökologischen Potentials und / oder guten chemischen Zustandes, so ist zu prüfen, welche Bedingungen zur Duldung der aktuellen Situation vorliegen bzw. erfüllt werden müssen.

### **2.3. Vergleichende Gegenüberstellung der Maßnahmen**

Aufbauend auf den Ergebnissen der Beschreibungen und Bewertung von Maßnahmen wurde eine orientierende vergleichende und qualitativ ausgeführte Gegenüberstellung vorgenommen, die in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefasst ist.

An dieser Stelle sei auf Anlage 1 (Kap. 5) verwiesen, wo eine detaillierte vergleichende Ergebnisübersicht sowohl mit Quantifizierung der Kriterien als auch hinsichtlich der Wirkung und der Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen vorgenommen wird.

Bei der Bewertung gilt es zu bedenken, dass durch die in den letzten Jahren vorgenommenen Verwahrungsarbeiten in der Mansfelder Mulde und der damit verringerten Sauerstoffzufuhr bereits positive Effekte eingetreten sind bzw. eintreten werden.

Tabelle 1: Vergleichende Gegenüberstellung der Hauptkriterien

Nr.	Realisierbarkeit im Sinne der Erreichung des beabsichtigten technischen Ziels (Machbarkeit, Misserfolg)		Aufwand Kosten (vorläufige Einschätzung)		Einschätzung Genehmigungsfähigkeit (Anlage/ Technologie)	Dauer zeitliche Umsetzbarkeit	Verhältnis- mäßigkeit Nutzen /Aufwand	Nutzen, technische Wirksamkeit und Zielerreichung (Ziel ist die Erreichung eines „guten Zustandes / Potentials)			Bewertung Hauptkriterien
	Machbarkeit *1)	Misserfolg *2)	Invest. *3)	Variabel *4)				*5)	*6)	*7)	
1-1-1	--	-	---	---	-	-	-	Nur theoretisch denkbar	ja	(eher) nein	(12-)
1-1-2	--	-	---	---	-	-	-	Nur theoretisch denkbar	ja	(eher) nein	(12-)
1-2-1	--	-	---	---	0	+	-	Nur theoretisch denkbar	ja	(eher) ja	(1+ / 10-)
1-2-2c	-	-	--	--	-	-	0	Theoretisch mäßig-gut (25-75%)	ja	Ja	(8-)
2-1-1b	-	0	--	0	0	0	-	Theoretisch mäßig (ca. 25%)	ja	Ja	(4-)
2-1-1c	-	0	--	0	0	0	-	Theoretisch mäßig (ca. 25%)	ja	Ja	(4-)
2-1-2 a)	-	0	-	0	-	0	0	Theoretisch sehr mäßig (<25%)	ja	eher ja	(3-)
2-1-2 b)	-	0	--	0	-	0	0	Theoretisch sehr mäßig (<25%)	ja	eher ja	(4-)
2-2-1	--	--	---	0	0	-	-	Theoretisch schlecht (<15%)	ja	Ja	(9-)
2-2-2a	+	+	-	0	+	+	+	Theoretisch schlecht (<15%)	ja	Ja	(5+ / 1-)
2-2-2b	0	-	-	0	0	0	0	Theoretisch schlecht (<15%)	ja	Ja	(2-)
3-1	0	0	--	--	-	0	-	Theoretisch gut (>75%)	ja	Ja	(6-)
3-2	0	-	--	0	-	0	-	Theoretisch mäßig (ca. 25%)	ja	Ja	(5-)
3-3a	+	+	-	0	0	+	+	Keine (0%)	ja	nein	(4+ / 1-)
3-3b	0	-	-	0	-	0	-	Keine (0%) (ggf. 100% in Schlenze)	ja, ggf. Problem in Schlenze	begrenzt	(4-)

## Legende zu Tabelle 1

\*1) Einschätzung der technischen Risiken hinsichtlich Realisierbarkeit der Maßnahme:

möglich: +  
wahrscheinlich: 0  
gering: -  
nicht machbar: --

\*2) Einschätzung des Risikos für einen Misserfolg bei Umsetzung der Maßnahme:

gering: +  
möglich: 0  
wahrscheinlich: -  
sehr wahrscheinlich: --

\*3) geschätzte Investitionskosten:

gering (< 1 M€): +  
mäßig (1-10 M€): -  
hoch (10-50 M€): --  
sehr hoch (>50 M€): ---

\*4) geschätzte jährliche Betriebskosten inkl. Entsorgungskosten:

gering (< 0,5 M€/a): +  
mäßig (0,5-5 M€/a): 0  
hoch (5-10 M€/a): -  
sehr hoch (10-50 M€): --  
> 50 M€: ---

\*5) Einschätzung Genehmigungsfähigkeit (bei Anlagentechnik BImSch-V, UVU, Eingriff Wasserhaushalt/in-situ-Chemie u. ä.)

Erschwertes Genehmigungsverfahren: -  
„normales“ Verfahren: 0  
„einfaches“ Verfahren: +

\*6) Ergebnisse in &lt; 5 Jahren erreichbar:

Ergebnis in < 5 Jahren erreichbar: +  
Ergebnis in 5-15 Jahren erreichbar: 0  
Ergebnis in > 15 Jahren erreichbar: -

\*7) Ergebnis mit geringem bis mäßigem Aufwand erreichbar:

Ergebnis mit geringem bis mäßigem Aufwand erreichbar: +  
Ergebnis mit mäßigem bis erheblichem Aufwand wahrscheinlich: 0  
Ergebnis mit mäßigem bis erheblichem Aufwand möglich aber nicht sicher: -

Anmerkung: die Duldung wurde in dieser Gegenüberstellung nicht als Maßnahme bewertet. Sie hat naturgemäß (im Vergleich zu Maßnahmen) weder eine positive noch eine negative Wirkung.

Zusätzlich wurden noch weitere Kriterien zur Bewertung der Qualität und Nebenwirkung der Maßnahmen [LHW (2012c)] abgestimmt und aufgenommen. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Kriterien, die den Einfluss hinsichtlich der Umweltverträglichkeit umschreiben.

Tabelle 2: Vergleichende Gegenüberstellung hinsichtlich Zusatzkriterien

Maßn. Nr.	Land-schafts-bild *1)	Lebens-raum-qualität *2)	Gefahr Remobili-sierung *3)	Entsor-gung *4)	Wohl der Allgemei-nheit *5)	Nachhaltig-keit *6)	Summarische Bewertung Umwelt-verträglichkeit
1-1	-	-	-	-	+	-	negative Einflüsse überwiegen
1-2-2c	-	0	+	-	+	-	eher negative Einflüsse
2-1-1b /c	+ /-	+	0	+	0	-	einige negative Einflüsse
2-1-2a	+	+	0	+	0	0	kaum negative Einflüsse
2-1-2b	0	0	0	0	0	-	eher negative Einflüsse
2-2-1	+	0	0	+	0	-	einige negative Einflüsse
2-2-2	+	+	0	0	0	0	wenig negative Einflüsse
3-1	-	0	+	-	+	-	eher negative Einflüsse
3-2	0	0	0	+	0	0	einige negative Einflüsse
3-3a	+	0	0	+	0	0	wenig negative Einflüsse
3-3b	0	0	0	+	0	0	einige negative Einflüsse
4	+	+	0	+	0	-	wenig negative Einflüsse

## Legende zu Tabelle 2

\*1) Beeinträchtigung des Landschaftsbildes: \*4) Notwendigkeit der Entsorgung:

keine:	+	nein:	+
gering:	0	unsicher:	0
hoch:	-	ja:	-

\*2) Beeinträchtigung der Lebensraumqualität: \*5) Verbesserung des Wohls der

keine:	+	Allgemeinheit:	
gering:	0	nein, eher Verschlechterung:	-
hoch:	-	nein, keine Änderung:	0
		ja:	+

\*3) Gefahr einer Remobilisierung von Schadstoffen:

keine:	+
gegeben:	0
hoch:	-

\*6) Einschätzung der Nachhaltigkeit:

keine:	-
nicht absehbar:	0
ja:	+

Aus den Zusatzkriterien lässt sich ablesen, dass die Maßnahmen unter 1-1 grundsätzliche Umweltverträglichkeitsprobleme haben werden. Weiter lassen diese Kriterien keine besonderen spezifischen Umweltverträglichkeitsprobleme für die Maßnahmen unter 1-2, 2-1, 2-2 und 3-2 erkennen. Bei den Maßnahmen 3-1 sind eher negative Einflüsse erkennbar, die aber insgesamt kein maßgebliches Problem darstellen dürften. Dies ist naturgemäß dadurch begründet, dass bei den Maßnahmen 3-1 ein direkter Eingriff auf das Schutzgut erfolgt. Bei Bewertung eines möglichen Eingriffes auf das Schutzgut Grundwasser (Grubenwasser) würden alle In-Situ-Techniken (v. a. Maßnahmen 1-2, 2-1 und 3-2) mit diesem zusätzlichen Kriterium einen Malus erhalten. Für die Gesamtauswertung ist dies nicht maßgeblich, da davon ausgegangen werden kann, dass mit Ausnahme der Maßnahmen 1-1 alle Maßnahmen grundsätzlich umweltverträglich (d.h. umgebungsverträglich) ausgestaltet werden können. Im Vergleich untereinander sind die Maßnahmen mit Ex-Situ-Anlagentechnik (v. a. Maßnahmen 3-1) oder aktiver In-Situ Verfahrenstechnik (v. a. Maßnahmen 3-2) ungünstiger einzuordnen.

Bei der Bewertung der Wirkung wurde neben der tatsächlichen Schadstofffrachtreduktion vor allem der Grad der eigentlichen Zielerfüllung in Bezug gesetzt: in wie weit wird durch die Maßnahmen die UQN erreicht d.h. unterschritten. Dies kann als quantifizierbare Maßzahl mit dem Quotienten aus UQN und erreichter Qualität ermittelt werden. Ist die erreichte Qualität geringer als die UQN ist das Ziel erreicht (Quotient  $>1$  bzw.  $>100\%$ , d.h. Zielerfüllung) ansonsten ist es nicht erreicht (Quotient  $<1$  bzw.  $<100\%$ , d.h. je geringer der Quotient desto weiter ist man noch vom Ziel entfernt). Diese Maßzahlen werden systematisch für alle Maßnahmenoptionen in Anlage 1 hergeleitet.

Für die Bewertung der Verhältnismäßigkeit wird der Grad der Zielerreichung im Verhältnis zu den Kosten gesetzt. Dies bedeutet, dass damit die Effizienz der verschiedenen Maßnahmen im Sinne von erreichter Verbesserung bezogen auf eingesetztem Aufwand ermittelt und verglichen werden kann. Auch diese Werte werden systematisch für alle Maßnahmenoptionen in Anlage 1 hergeleitet. Aufgrund der begrenzten Zielerreichung und der hohen Kosten sind insbesondere ex-situ-Wasseraufbereitungsmaßnahmen trotz einer effektiven Schadstofffrachtentfernung hinsichtlich Verhältnismäßigkeit als ungünstig einzustufen.

Im Ergebnis der Bewertung verbleiben folgende Maßnahmen für eine weiterführende Betrachtung:

- Eingeschränkt machbare Maßnahmen mit begrenztem Effekt:  
Maßnahmen 2-1-2 (Chemische Immobilisierung)
- Machbare Maßnahmen mit geringem oder keinem Effekt:  
Maßnahmen 2-2-2 (Verringerung Feststofftransport), 3-3 (Ableitung)
- Begleitende Maßnahmen mit geringem Effekt:  
Maßnahme 4 (Duldung)

Aus der weiteren Bewertung sind auszuschließen:

- Nicht durchführbare oder mit erheblichen Risiken behaftete Maßnahmen und/ oder mit unverhältnismäßig hohem Aufwand mit begrenzten Effekt:
  - Maßnahmen 1-1 (Beseitigung der Quelle),
  - Maßnahmen 1-2 (Einschluss),
  - Maßnahme 2-1-1 (hydraulische Immobilisierung),

- Maßnahme 2-2-1 (Verringerung Lösungstransport) und
- Maßnahmen 3-2 (In-Situ-Verfahren),
- Unverhältnismäßige Maßnahmen mit guten Effekt:
  - Maßnahmen 3-1 (Ex-Situ Anlagentechnik) mit unverhältnismäßig viel Aufwand aber im Vergleich mit relativ guter Wirkung und schlechter Umweltverträglichkeit. Insbesondere beseitigen diese Maßnahmen die Ursache nicht und wären daher unbefristet und mit hohem Aufwand zu betreiben („ewige aktive Maßnahme“).

Anmerkung: Zur objektiveren Bewertung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wurde in Anlage 1 das Verhältnis von Nutzen und Aufwand auf der Grundlage der anteiligen Schadstofffracht des Schlüsselstollens an der Gesamtschadstofffracht der Oberflächenwasserkörper differenzierter untersucht. Hierbei zeigt sich eindeutig die Rangfolge zugunsten der o.g. Vorzugsmaßnahmen.



## 2.4. Ableitung eines optimierten Vorgehens für die Umsetzung einer technischen Lösung

Folgende gestufte Vorgehensweise mit kombinierten Maßnahmen im Bereich des Schlüsselstollensystems, die nach jetzigem Kenntnisstand erfolgversprechend sind, wird empfohlen:

- 1.) Beibehaltung des Status quo mit Anpassung der Umweltqualitätsziele und schrittweiser Verbesserung des Zustandes / Potentials durch verhältnismäßige Maßnahmen, wobei ein chemisch guter Zustand realistisch nicht erreichbar sein wird. Hierbei ist zu beachten, dass die Schadstofffreisetzung von natürlichen Prozessen beeinflusst wird, die naturgemäß Schwankungen (z.B. Niederschlag) unterliegen, so dass auch ein abnehmender Trend zeitweise von Anstiegen überlagert werden kann.
- 2.) Umsetzung/Weiterführung der Maßnahmen, welche eine schrittweise Verbesserung des Zustandes ermöglichen:
  - a) Reduktion der Sauerstoffzufuhr (Verwahrung der verbleibenden Schächte und der Tagesöffnung im rückwärtigen Bereich) und Schwermetallfrachten im Rahmen der Bergbauverwahrung (siehe Maßnahmen 2-1-2).
  - b) Umsetzung/Weiterführung der Reduktion des sedimentgebundenen Transportes (siehe Maßnahmen 2-2-2).
  - c) Aktive Aufrechterhaltung der hydraulischen Entlastung der Mansfelder Mulde durch den Schlüsselstollen (Unterhaltung, Wartung)
- 3.) Monitoring der erzielten Ergebnisse/ Bewertung der erzielbaren Ergebnisse.
- 4.) Prüfung der Umweltqualitätsziele für die Schlenze und Saale bei erreichter Verbesserung.

Mit den unter 2.) aufgeführten Maßnahmen können kurz- und mittelfristig geringfügige Verbesserungen in der Schadstofffrachtabgabe durch den Schlüsselstollen möglich werden. Welche Verbesserung aber tatsächlich eintritt und ob eine ggf. kurzfristig nur geringfügige Verbesserung aufgrund der natürlichen Schwankungen beim Abfluss und der Elementkonzentration überhaupt messtechnisch nachgewiesen werden kann, ist derzeit nicht vorhersehbar. **Daher wird die unter 1.) aufgeführte Duldung und das unter 3.) aufgeführte Monitoring erforderlich bleiben.** Eine etwaige spätere Prüfung der Umweltqualitätsziele nach Durchführung der in 2) genannten Maßnahmen vor einer Festlegung abgesenkter UQN erscheint nicht zielführend, da zu erwarten ist, dass die machbaren Maßnahmen kurz- bis mittelfristig keine wesentliche Verbesserung des chemischen Zustandes bewirken können bzw. auch nicht zu einem „guten chemischen Zustand“ führen werden.

Eine etwaige Fassung und Aufbereitung des Schlüsselstollenwassers wird nach vorliegenden Randbedingungen und Kenntnisstand dauerhaft als unverhältnismäßig eingestuft.

Weitere Maßnahmen sind mit derzeitigem Kenntnisstand und bei den derzeitigen Randbedingungen weder aussichtsreich noch zu empfehlen. Solche Maßnahmen können ggf. zu einem späteren Zeitpunkt bei sich ändernden Randbedingungen erneut in den Fokus genommen werden. Denkbar wären folgende Ansätze, die zur Verbesserung der Schlüsselstollenwasserqualität führen könnten:

- 5.) Steigende Rohstoffpreise können ggf. die Extraktion von gelösten Metallen aus dem Flutungsfluidkörper interessant machen. Bei umweltgerechter Ausführung kann hierbei eine deutliche Entlastung des Schlüsselstollens die Folge sein.

- 6.) Der Flutungskörper, welcher sowohl ökologisch als auch wasserwirtschaftlich von geringer Bedeutung ist, wird durch Versenkung von neutralen bis basischen Wässern genutzt. Dadurch kann ein Beitrag zur In-Situ-Immobilisierung erreicht werden.

Theoretisch sind auch Maßnahmen möglich, deren Realisierung nach heutigem Kenntnisstand weder technisch noch wirtschaftlich machbar ist:

- 7.) Im Rahmen der langfristigen bergbaulichen Nachsorge muss ggf. das Schlüsselstollensystem teilweise erneuert oder ersetzt werden. Dabei können ggf. Verbesserungen des hydraulischen Entwässerungsregimes ein flankierender Nebeneffekt sein (z.B. Erhöhung der Entwässerungsdruckhöhe der gefluteten Mulde, Teilanstauversuche und/oder Teilabdichtung von dann erreichbaren Grubenbereichen).
- 8.) Der Kenntnisstand zu (den heute unrealistischen bzw. unpraktikablen) In-Situ-Technologien sowie die Randbedingungen (u. a. Genehmigungsregime, Finanzierungsmöglichkeiten) verändern sich in der Zukunft derart, dass in-situ-Technologien erneut erwogen werden können.

Die in den Punkten 5. bis 8. genannten theoretisch denkbaren Möglichkeiten werden daher nicht weiter verfolgt.

Im Rahmen des Flussgebiets-Sedimentmanagements (z.B. gesteuert durch das LHW) wäre ggf. zu prüfen, ob verhältnismäßige Maßnahmen außerhalb des Schlüsselstollensystems (z.B. an anderen Orten mit Schadstoffeinträgen, Sedimentbewirtschaftung an Staustufen der Saale) sinnvoll umgesetzt werden könnten.

### 3. Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausgehend sowohl von der aktuellen als auch von der prognostizierten Schadstofffracht des Systems Grubengebäude-Schlüsselstollen-Schlenze wurden die Möglichkeiten einer Frachtreduzierung über mögliche Änderungen des Systems betrachtet:

- Änderung des Mobilisierungsregimes,
- Änderungen des Transportregimes,
- End-of-pipe-Maßnahmen.

Zusammenfassend können folgende Kernaussagen gemacht werden:

- Es gibt keine verhältnismäßigen Maßnahmen, die das Erreichen eines guten chemischen Zustandes kurz-, mittel oder langfristig nachhaltig ermöglichen.
- Eine teilweise Verbesserung ist lediglich über Maßnahmenkombinationen machbar, von denen bereits eine ganze Reihe umgesetzt wurden/werden bzw. geplant sind.

Für die weitere Vorgehensweise wird die Umsetzung/Weiterführung von folgenden verhältnismäßigen und nach heutigem Kenntnisstand erfolgversprechenden Maßnahmen empfohlen:

- a. Sukzessive Verwahrung Schächte (Tagesöffnungen) und Beendigung der Bewetterung im rückwärtigen Bereich der Mansfelder Mulde zur Reduktion der (aktiven) Sauerstoffzufuhr,
- b. Prüfung des möglichen Nutzens einer Sedimentfalle am Stollenmundloch; Umsetzung bei Nachweis des Nutzens.

Auch bei erfolgreicher Umsetzung dieser Maßnahmen wird auf lange Zeit (und auch nach 2027) kein chemisch guter Zustand bzw. ökologisch gutes Potenzial in der Schlenze erreicht werden können, so dass eine Anpassung der Umweltqualitätsziele für die Schlenze geboten ist. Eine hinreichende Begründung ergibt sich aus Art und Wirkung der Quelle und dem Tatbestand, dass mit verhältnismäßigen Maßnahmen nur eine begrenzte, nicht ausreichende Verbesserung erreicht werden kann. Eine Anpassung der Umweltqualitätsziele hätte dann entsprechende Folgen für die Unterlieger, welche in den entsprechenden Bewirtschaftungsplänen als externe Randbedingung mit zu berücksichtigen ist.

In Anbetracht der Beeinträchtigungen der Saale durch den Schlüsselstollen, sollte die Umsetzung wirksamer und verhältnismäßiger Maßnahmen, außerhalb des Schlüsselstollensystems im Hinblick auf die Verbesserung des Zustandes der Saale geprüft werden. Sofern auch hier keine verhältnismäßigen Maßnahmen abgeleitet werden können, wären auch für die Saale abgesenkte Umweltziele zu prüfen.

PLEJADES Projekt - Team

Magdeburg, den 28.09.2013



Dr. Norbert Molitor



Bernd Bräutigam

## Unterlagen

- Anmerkung: Es wurden die gleichen Kurzbezeichnungen verwendet wie beim Berichtsteil A [PLEJADES (2013a)]
- ARGE GFE (1992) ARGE GFE GmbH Halle / HPC-Consult: Studie zu den regionalen Auswirkungen einer Aufgabe des bestehenden hydrogeologischen Niveaus des Schlüsselstollens und weiterer zutage entwässernder Stollensysteme im ehemaligen Kupferschieferbergbau der Mansfelder Mulde, Halle, 59 Seiten Text, Anlagen
- C&E (2012) Abschlussbericht: „Ermittlung geogener Hintergrundbelastung durch Schwermetalle in Oberflächengewässern des Landes Sachsen-Anhalt“ – Verdichtung der Datenbasis –, Chemnitz, 23.05.2012, 52 Seiten Text, Anlagen
- LAWA (2007) LAWA-AO Rahmenkonzeption Monitoring, Teil B Bewertungsgrundlagen und Methodenbeschreibungen, Arbeitspapier II: Hintergrund- und Orientierungswerte für physikalisch-chemische Komponenten, 07.03.2007
- LHW (2012c) Stellungnahme zum Bericht zum Arbeitspaket A+B: Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den partikelgebundenen Schadstofftransport in der Saale/Elbe (Stand 27.03.2012), Email des LHW vom 24.05.2012
- LHW (2012d) Aktuelle Daten zu den Schwebstoffuntersuchungen für den betreffenden Abschnitt der Saale und für die Schlenze: Daten\_LHW\_Schwebstoff\_Schlenze-Saale.xlsx, Email vom 21.11.2012
- OgewV (2011) Oberflächengewässerverordnung. Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer vom 20. Juli 2011 (BGBl. I Nr. 37 vom 25.07.2011 S. 1429)
- PLEJADES (2013a) 4011 GVV: Frachtreduzierung Schlüsselstollen, Bericht zum Arbeitspaket A: Ermittlung der Auswirkungen des Schlüsselstollens auf den partikelgebundenen Schadstofftransport in der Saale/Elbe, Magdeburg; 28.09.2012
- ROSS (2008) Probenahme an Stollen – repräsentative Probenahme und Schwebstoffverhalten, Endbericht, Göttelmann + Ross Beratende Geowissenschaftler GbR, 21 Seiten, Breisach
- WHG (2009) Wasserhaushaltsgesetz Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 31. Juli 2009, BGBl. I Nr. 51 vom 06.08.2009 S. 2585, zuletzt geändert 24.02.2012
- 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, Wasser-Rahmen-Richtlinie (WRRL), (ABl. Nr. L 327 vom 22.12.2000 S. 1;

LAF/GVV  
Schl.-St.

Frachtreduzierung Schlüsselstollen  
**Arbeitspaket B**  
**Anlage**

28.09.2013



**Anlage 1:**

**Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen**

## **Landesanstalt für Altlastenfreistellung**

### **4011 GVV: Frachtreduzierung Schlüsselstollen**

#### **Anlage 1 zum Bericht des Arbeitspaketes B: Bewertung von technisch realisierbaren und verhältnismäßigen Maßnahmen**

Auftraggeber: Landesanstalt für Altlastenfreistellung  
des Landes Sachsen-Anhalt  
Maxim-Gorki-Straße 10  
D-39108 Magdeburg

Erstellt durch:

Plejades GmbH – Independent Experts

PLEJADES Projekt-Team  
Hegelstraße 39  
39104 Magdeburg

LAF Kennzeichen: LAF/GVV Schlüsselstollen  
Plejades Projekt-Nr.: 07-26  
Überarbeitete Berichtsfassung März 2014

Magdeburg, 28. September 2013

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	3
2	Struktogramm zur Einordnung von Maßnahmen .....	4
3.	Quantifizierung der Zielerfüllung .....	6
4.	Kalkulationsansätze.....	10
5.	Maßnahmenbeschreibungen .....	11
5.1	Ausgangssituation zum Vergleich: = Erhalt des Status quo .....	11
5.2	Maßnahme 1-1: Eingriff an der Quelle - Beseitigung.....	13
5.3	Maßnahme 1-2: Eingriff an der Quelle - Einschluss .....	14
5.4	Maßnahme 2-1: Eingriff auf den Ausbreitungspfad – Immobilisierung.....	18
5.5	Maßnahme 2-2: Eingriff auf den Ausbreitungspfad – Schadstofftransport.....	22
5.6	Maßnahme 3: Eingriff auf das Schutzgut Wasser .....	25
5	Vergleichende Ergebnisübersicht.....	29

## ABBILDUNGEN

Abbildung A- 1:	Schematische Einordnung der möglichen Maßnahmen.....	3
Abbildung A- 2:	Struktogramm zur Einordnung der Maßnahmen .....	5
Abbildung A- 3:	Zielerfüllung W1, W2 <sub>Saale</sub> und W2 <sub>Schlenze</sub> , nicht monetäre Betrachtung. (sortiert - je weiter rechts desto besser).....	33
Abbildung A- 4:	Zielerreichung und damit verbundenen Kosten. ....	34
Abbildung A- 5:	Zielerreichung bezogen auf die dazugehörigen Kosten .....	34
Abbildung A- 6:	Zielerreichung, Dimensionslose Darstellung .....	35

# 1 Einleitung

Die Qualität der Oberflächengewässer Schlenze und Saale wird durch den Zustrom mineralisierter Wässer aus dem Schlüsselstollen beeinträchtigt. Eine natürliche Verbesserung der Situation ist zukünftig nicht zu erwarten, da das geogene Reservoir (Lagerstätte) praktisch unbegrenzt ist und die naturgegebenen Mechanismen von Niederschlag, Grundwasserneubildung, natürlichen Oxidationsprozessen und hydraulischer Entlastung bestenfalls in ihrer Wirkung beeinflussbar sind, aber nicht grundsätzlich ausschaltbar. Daher ist zu prüfen, ob geeignete und verhältnismäßige Maßnahmen zur nachhaltigen Verbesserung der Oberflächengewässergüte bzw. zur Erreichung von Umwelt-Qualitätszielen in Schlenze und Saale realisierbar sind. Hierzu sind folgende Eingriffsebenen definiert worden (siehe Abbildung A 1):

- Maßnahmen, die unmittelbar auf die Quelle wirken;
- Maßnahmen, die innerhalb der unterirdischen Ausbreitungspfade wirken;
- Maßnahmen, die außerhalb des Stollensystems wirken;
- Duldung des mit geeigneten und verhältnismäßigen Maßnahmen nachhaltig erreichbaren Zustandes durch abgesenkte Umweltqualitätsziele (QZ), ggf. mit Einschränkungen bei Gewässerqualität und –Nutzung.

Maßnahme (Eingriff)					
1 Eingriff an Quelle		2 Eingriff auf Ausbreitungspfad		3 Eingriff auf Schutzgut	4 Duldung
1-1 Beseitigung	1-2 Einschluss	2-1 Immobilisierung	2-2 Schadstofftransport	3 Reinigung	4 Anpassung QZ
1-1-1 Entfernung u. Entsorgung	1-2-1 Physische Barrieren	2-1-1 Hydraulische Immobilisierung	2-2-1 Verringerung Lösungstransport	3-1 Ex-Situ Anlagentechnik	4-1 Verringertes Qualitätsziel Schlenze
1-1-2 Entfernung und Nutzung	1-2-2 Hydrodynamische Barrieren	2-1-2 Chemische Immobilisierung	2-2-2 Verringerung Feststofftransport	3-2 In-Situ Verfahren 3-3 Ableitung	4-2 Verringertes Qualitätsziel Saale

Abbildung A- 1: Schematische Einordnung der möglichen Maßnahmen

Die für die genannten Eingriffsebenen als machbar eingeschätzten Maßnahmen werden unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien einschließlich Zielerreichung, Machbarkeit, Aufwand, Umweltauswirkungen (Energieverbrauch, Abfallaufkommen, Landschaftsverbrauch, Lebensraumqualität) und Nachhaltigkeit detailliert bewertet. Abschließend werden Wirkung und Kostenaufwand der verbliebenen Maßnahmen im Rahmen einer Verhältnismäßigkeitsbetrachtung geprüft.



In den folgenden Abschnitten werden die Logik der Maßnahmenentwicklung erläutert, die Maßnahmen jeweils beschrieben, bewertet und anschließend vergleichend dargestellt.

Ziel dieser vergleichenden Gegenüberstellung ist es, die Stärken und Schwächen der jeweiligen Maßnahmen darzustellen und eine Grundlage zur Ableitung von Vorzugsoptionen zu schaffen.

## 2 Struktogramm zur Einordnung von Maßnahmen

Es gibt eine logische Reihenfolge nach der Maßnahmen entwickelt und eingeordnet werden können:

- 1.) Beseitigung /Reduktion der Ursache:  
Eingriff an der Schadstoffquelle oder (vollständiger) Einschluss der Schadstoffquelle;
- 2.) Beseitigung /Reduktion der Wirkung der Schadstoffquelle:  
Eingriff auf den Mobilisierungsmechanismus oder auf den Ausbreitungspfad für Schadstoffe;
- 3.) Sanierung (Reinigung) des betroffenen / beeinträchtigten Schutzgutes:  
Eingriff auf das Schutzgut durch Abreinigung der Schadstoffe;
- 4.) Duldung der verbleibenden Schadstoffe bzw. Beeinträchtigungen

Dabei steigt der Bedarf an Begründungen und Erklärungen in derselben Reihenfolge stetig an, da das jeweilige Eingriffsprinzip an Qualität verliert.

Es ist vom Prinzip her:

- besser die Quelle zu beseitigen
- als die Quelle einzuschließen, was wiederum besser ist
- als die Mobilisierungsmechanismen einzudämmen, was wiederum besser ist
- als die Ausbreitungspfade einzudämmen, was wiederum besser ist
- als die Folgen zu reparieren, was wiederum besser ist
- als die Folgen zu dulden.

Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Abbildung als Verfeinerung der Abbildung A1 dargestellt.

Maßnahme (Eingriff)					Administrative Entscheidung
1 Eingriff an Quelle		2 Eingriff auf Ausbreitungspfad		3 Eingriff auf Schutzgut	4 Duldung
1-1 Beseitigung	1-2 Einschluss	2-1 Immobilisierung	2-2 Schadstofftransport	3 Entnahme/Reinigung	4 Anpassung der Qualitätsziele
1-1-1 Entfernung und Entsorgung	1-2-1 Physische Barrieren	2-1-1 Hydraulische Immobilisierung a: Versatz Abbau b: Verfüllung Flächen c: Verschluss des Schlüsselstollens	2-2-1 Verringerung Lösungstransport	3-1 Ex-Situ Aufbereitung a: Fällung b: Umkehrosmose c: Eindampfung	4-1 Verringertes Qualitätsziel Schlenze
1-1-2 Entfernung und Nutzung	1-2-2 Hydrodynamische Barrieren a: Oberhalb Überlaufpunkt b: Unterhalb Überlaufpunkt c: Aktive Pumpmaßnahme	2-1-2 Chemische Immobilisierung a: Reduktion der Sauerstoffzufuhr b: Einbau basischer Materialien	2-2-2 Verringerung Feststofftransport a: Sedimentfallen b: Klärbeete	3-2 In-Situ Verfahren  3-3 Ableitung	4-2 Verringertes Qualitätsziel Saale
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <p><b>Logische Eingriffsreihenfolge</b> <b>Steigender Substantiierungsbedarf (Begründungsbedarf)</b></p> </div>					

Abbildung A- 2: Struktogramm zur Einordnung der Maßnahmen

### 3. Quantifizierung der Zielerfüllung

Auf der Grundlage einer objektiv nachvollziehbaren Quantifizierung der Zielerfüllung soll eine vergleichende Gegenüberstellung zur Ableitung einer Vorzugsvariante erfolgen.

Das Ziel der Maßnahmen ist der Schutz von Oberflächengewässern (Oberflächenwasserkörper), welche durch die aus dem Schlüsselstollen abgegebene Fracht beeinträchtigt werden.

Wesentlich für die Beurteilung einer Maßnahmen ist deren Wirkung zunächst hinsichtlich:

- Frachtreduzierung,
- Verbesserung der chemischen Qualität (der Oberflächengewässer).

Für die verbleibenden wirksamen und machbaren Maßnahmen können die weiteren Wirkungen (Nebenwirkungen) herangezogen werden:

- Umweltverträglichkeit,
- Nachhaltigkeit.

#### Kriterium Frachtreduzierung:

Als Maß „W1“ für die Frachtreduzierung wird der Ausgangszustand (heute) mit der durch die Maßnahme reduzierten Fracht verglichen:

$$W1 = \text{Frachtreduktion} = \frac{(\text{Anfangsfracht} - \text{reduzierte Fracht})}{\text{Anfangsfracht}} \quad (G1)$$

Bei angenommenem, etwa gleichbleibendem Abfluss kann W1 auch aus der (mittleren) Konzentration abgeschätzt werden:

$$W1 = \text{Frachtreduktion} = \frac{(\text{Anfangskonzentration} - \text{reduzierte Konzentration})}{\text{Anfangskonzentration}} \quad (G2)$$

Die Reduktion W1 ist dimensionslos und wird zur besseren Veranschaulichung auch in [%] ausgedrückt.

Beispiel:

- Im Anfangszustand ist die Reduktion 0%.
- Je nach Wirksamkeit der Maßnahme kann die Reduktion ansteigen.
- Im idealen, theoretischen Extremfall wird die Reduktion 100 %.
- Negative Reduktionen wären zusätzliche Konzentrationen und sind nicht zulässig.
- Reduktionen über 100% sind ebenfalls nicht möglich.

Kriterium Zielerfüllungsgrad:

Als Maß „W2“ für den Zielerfüllungsgrad wird die Abweichung der chemischen Qualität eines beeinflussten Wasserkörpers vom gewünschten Zustand (Umwelt-Qualitätsnorm = UQN) berechnet:

$$W2 = \text{Zielerfüllungsgrad} = \frac{\text{Sollzustand}}{\text{Istzustand}} \quad (\text{G3})$$

Der Istzustand entspricht dabei der jeweiligen Qualitätsgüte (Schadstoffkonzentration) und der Sollzustand dem Qualitätsziel (hier die UQN):

$$W2 = \frac{UQN}{\text{Istkonzentration}} \quad (\text{G4})$$

W2 ist ebenfalls dimensionslos und kann zur besseren Veranschaulichung auch in [%] ausgedrückt werden.

Liegt die Istkonzentration über der UQN dann ist  $W2 < 100\%$ , d. h. das Ziel ist nicht erreicht.

Beispiele:

- Wenn die Istkonzentration doppelt so hoch ist wie die UQN, dann gilt:  
 $W2 = UQN / (2 \times UQN) = 50\%$ .
- Ist die Istkonzentration gleich oder kleiner als die UQN, dann ist  $W2 > 100\%$ , d. h. das Ziel ist erreicht.

Die Zielerfüllung ist bei Werten von 100% oder  $> 100\%$  gegeben (Ziel ist erfüllt).

Weiter kann auch die Istkonzentration eines jeden durch eine Quelle (hier durch den Schlüsselstollen) beeinflussten Wasserkörpers (hier z. B. Schlenze oder Saale) beschrieben werden.

Dazu genügt es:

- den Ausgangszustand (Anfangskonzentration) im betrachteten beeinflussten Wasserkörper,
- die anteilige maximale Beeinflussung des betrachteten Wasserkörpers durch den Eintrag, und
- die Änderung der Konzentration der Quelle ( $W1 = \text{Reduktion}$ )

zu kennen.

Dann kann, unter der Annahme, dass eine Reduktion nur durch Reduktionen an der betrachteten Quelle erfolgt, der Istzustand wie folgt ermittelt werden:

Istzustand = Ausgangszustand – W1 x Beeinflussung x Ausgangszustand

Bzw.

$$\text{Istzustand} = \text{Istkonzentration} = (1 - W1 \times \text{Beeinflussung}) \times \text{Anfangskonzentration} \quad (\text{G5})$$

Wobei sich die Beeinflussung aus der Mischungsrechnung von Reduktionsmaßnahmen ermittelt:

$$\text{Beeinflussung} = \frac{\text{Fracht vor Zumischung}}{\text{Fracht nach Zumischung}} = \frac{\text{Zumischkonzentration} \times \text{Zumischvolumen}}{\text{Gesamtkonzentration} \times \text{Gesamtvolumen}}$$

Wird (G5) in (G4) eingesetzt folgt für W2:

$$W2 = UQN \times \frac{1}{(1 - W1 \times \text{Beeinflussung}) \times \text{Anfangskonzentration}} \quad (\text{G6})$$

Die maximale Beeinflussung des jeweils betrachteten Wasserkörpers durch die Quelle und die Anfangskonzentrationen wurden für die Schlenze und die Saale für die verschiedenen Schadstoffparameter ermittelt (siehe Berichtsteil A).

Als frachtrelevanter Parameter spielt Zink (Zn) eine herausragende Rolle, so dass sich die weiteren Betrachtungen auf Zink im Sinne eines Leitparameters beschränken. Für Zink kann die Gleichung (G6) für die Saale (Vermischung und Vorbelastung) und für die Schlenze (keine Vermischung und keine Vorbelastung) wie folgt angegeben werden:

$$W2_{\text{Saale}} = 1 / ((1 - W1 \times 0,63) \times 2,22) \quad (\text{G7})$$

(gilt für den Gewässerabschnitt der Saale zwischen Schlenze und Wipper, SAL06OW01-00, die maximale Beeinflussung der Saale durch die Schlenze ist für Zn 63% (aus Bericht zum Arbeitspaket A, Tabelle 10: 48,63 µg/l = berechnete Erhöhung des Gehalts in der Saale), die Überschreitung der UQN im Ausgangszustand ist 2,22-fach: 1773 mg/kg/800 mg/kg aus Bericht zum Arbeitspaket A, Tabelle 12)

$$W2_{\text{Schlenze}} = 1 / ((1 - W1 \times 1) \times 3,08) \quad (\text{G8})$$

(gilt für den Gewässerabschnitt der Schlenze zwischen dem Schlüsselstollen und der Einmündung in die Saale, SAL06OW04-00, die maximale Beeinflussung der Schlenze durch den Schlüsselstollen für Zn ist 100%<sup>1</sup>, die Überschreitung der UQN ist 3,08 –fach: (2461 mg/kg/800 mg/kg aus Bericht zum Arbeitspaket A, Tabelle 12)

<sup>1</sup> Der Zinkgehalt in der Schlenze vor dem Zusammenfluss mit dem Schlüsselstollen ist ≤ 1 % des Gehalts nach dem Zusammenfluss und wird deshalb bei der Berechnung vernachlässigt.

Somit können bei bekannter bzw. abschätzbarer Wirkung von Maßnahmen diese hinsichtlich der Reduktion W1 und der Zielerreichung W2 mit den obigen Zusammenhängen berechnet werden.

Oberste Priorität bei der Bewertung der Maßnahmen hat die Frachtreduzierung, da sie nachhaltig und langandauernd auf die Schutzgüter wirkt. Die nächst höhere Priorität hat die chemische Qualität in regionalen Gewässern, während die Qualität lokaler Gewässer sich danach nachrangig anschließt. Daher wird folgende Prioritätsreihenfolge vorgeschlagen:

- Priorität 1 (Frachtreduktion W1)
- Priorität 2 (Zielerreichung W2 für regionale Gewässer,  $W2_{Saale}$ ) und
- Priorität 3 (Zielerreichung W2 für lokales Gewässer,  $W2_{Schlenze}$ )

#### Weitere Kriterien:

Nach Bewertung mittels der Kriterien Frachtreduktion und Zielerreichung hinsichtlich Erreichbarkeit der vorrangigen Wirkung als aussichtsreich bewertete Maßnahmen, sind die weiteren Wirkungen zu bewerten:

- Umweltverträglichkeit - ist eine komplexe Zielsetzung, die sich am besten in einzelne Unterkriterien veranschaulichen und bewerten lässt, insbesondere:
  - Veränderung des Landschaftsbilds,
  - Veränderung der Lebensraumqualität,
  - Mögliche Re-Mobilisierung von Schadstoffen,
  - Emissionen und Entsorgung,
  - Wohl der Allgemeinheit.
- Nachhaltigkeit - hat ebenfalls verschiedene Aspekte:
  - Technisch: z. B. Erfordernis ewiger Maßnahmen bzw. ewiger Unterhaltung oder Nachbesserung,
  - Ökologisch: Nichterreichen eines stabilen Gleichgewichtszustandes, Risiko der Umkehr der erreichten Zustände (z. T. ähnlich wie Re-Mobilisierung von Schadstoffen),
  - Wirtschaftlich: unbegrenzte (nach Höhe) oder unbefristete (nach Zeit) Kosten.

Für eine überschlägige Bewertung der Verhältnismäßigkeit technisch möglicher Maßnahmen ist die objektiv messbare Zielerreichung für W1,  $W2_{Saale}$  und  $W2_{Schlenze}$  in Verhältnis zu den Aufwendungen für die ersten 20 Jahre maßgeblich. Der Barwert für gleichbleibende ewige Kosten bei einer Abzinsung von 5% entspricht 1 durch 5% bzw. dem 20 fachen der jährlichen Kosten. Daher entsprechen die aufsummierten, nicht abgezinsten Kosten der ersten 20 Jahre in etwa dem Barwert für ewig wiederkehrende Kosten abgezinst zu 5% p. a..

## 4. Kalkulationsansätze

Für die Maßnahmenbeschreibungen wurden zur groben Abschätzung der Kosten folgende Ansätze verwendet:

- Betriebskosten „Unterhaltung Mansfelder Mulde“: Stand heute ca. 0,8-1,0 Mio. €/a;
- Erhaltungsinvestition für einen Schacht (ca. 100m tief, Fahrungsanlage, Versorgungsleitungen): ca. 2,5 Mio. €;
- Schachtverwahrung / Schließen nicht mehr benötigter Tagesöffnungen: 2x1 Mio. €;
- Leistungspumpenanlage für 100 m Höhendifferenz: ca. 0,5 Mio. €;
- Dammbauwerke: ca. 0,5-1,0 Mio. €;
- Wasseraufbereitung (Schwermetallfällung): Betriebskosten ca. 0,2-0,5 €/m<sup>3</sup> ohne Entsorgung von Fällprodukten, Investitionskosten ca. 0,4-1,2 Mio. € je 1 Mio. m<sup>3</sup>/a Aufbereitungskapazität;
- Umkehrosmose: ca. 2-3 €/m<sup>3</sup>
- Entsorgung (salzhaltige) Fällprodukte, / Salzlauge/ Restsalze ca. 0,2-0,55 €/m<sup>3</sup> aufbereitetes Wasser;
- Komplette Betriebskosten Wasseraufbereitung mit Schwermetallfällung und Entsalzung inkl. Entsorgung 2,22-3,54 €/m<sup>3</sup>
- Sandfang: 0,2 Mio. €;
- Menge/Fracht z. Zt. 25 m<sup>3</sup>/min = 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a; 350 kt Salz/a; 160 t Metall/a;
- Strecke Überlaufpunkt/Glückhilfschacht – Freieslebenschacht 7 km;
- Strecke Überlaufpunkt/ Glückhilfschacht – Bolzeschacht 14 km;
- Strecke Schlüsselstollen - Saale 1,3 km;
- Schwermetallaufbereitung (Schwermetallfällung):
  - Investitionskosten Aufbereitung: ca. 5-15 Mio.€
  - Betriebskosten:
    - Aufbereitung (ca. 0,2-0,5 €/m<sup>3</sup>, bei 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a) ca. 2,6-6,6 Mio. €/a
- Entsalzung durch Umkehrosmose:

Bei erforderlicher zusätzlicher Entsalzung wäre eine Umkehrosmose die einzige technisch-wirtschaftliche sinnvolle Variante.  
(Kosten von etwa 2-3 €/m<sup>3</sup>; 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a) ca. 26,2-39,3 Mio. €/a
- Entsorgung der entstehenden Abfallstoffe:

Fällprodukte (Wasserreinigungsschlämme, bei angenommen ca. 1500-3000 t/a salzhaltiger Schlamm und 100-200 €/t Entwässerung + Entsorgung),  
zzgl. Entsalzungsrückstände (Salzfracht bis zu 500 000 t/a),  
Optimistischer Ansatz: ca. 3-7 Mio. €/a

## 5. Maßnahmenbeschreibungen

### 5.1 Ausgangssituation zum Vergleich: = Erhalt des Status quo

Derzeit werden im Zuge des bergbaulichen Abschlusses (Verwahrung und Nachsorge) verschiedene Maßnahmen auf Basis von zugelassenen Betriebsplänen umgesetzt.

#### Umfang:

- Offenhalten der Schächte für geotechnische Überwachung und zur Unterhaltung des Wasserlösungssystems gemäß Abschlussbetriebsplan,
- Unterhaltung des Schlüsselstollens auf ganzer Länge,
- Monitoring.

#### Kosten:

- Investition: Erhaltungsinvestition Schacht: ca. 2,5 Mio. €;
- Betriebskosten: 0,8-1,0 Mio. € /a (Kostenbasis 2012); ca. 1 Mio. €/a.

#### Ergebnisse:

- Freihalten Einzugsgebiet Böse Sieben/ Süßer See
- Abgabe an Schlenze und Saale über Schlüsselstollen, Fracht wie bisher

#### Umwelteinflüsse:

Die Maßnahme selbst beansprucht die Umwelt nicht zusätzlich, toleriert aber die bestehenden Umweltbeeinträchtigungen durch die Schadstofffracht des Schlüsselstollens.

#### Ergänzende Erläuterungen:

Der Erhalt des Status quo erreicht das Zielkriterium "keine Verschlechterung", wenn die mit Aufwand verbundenen laufenden Maßnahmen dauerhaft weitergeführt werden. Dies führt bestenfalls sehr langfristig zu einer (eher sehr) geringen Verbesserung (durch Verringerung von nach Flutung typischer Weise eintretenden instationären Ausspüleffekten bzw. das Erreichen langfristiger quasistationärer Gleichgewichte), jedoch absehbar nicht zum Erreichen eines guten Zustandes und setzt daher die Duldung voraus.

Es ist dennoch deutlich besser als ein unkontrolliertes Überlassen der Situation (also keine Maßnahmen), bei dem neben unkontrollierter Schadstoffmobilisierung und -austritten vermutlich langfristig das Gewässersystem „Böse Sieben“-„Süßer See“ zusätzlich mit aus der Mansfelder Mulde ausgetragenen Frachten belastet werden würde. Dies wäre mit einer Verschlechterung der betroffenen Gewässer verbunden.

Im Rahmen der bisherigen Bergbauverwahrung wurde nicht nur der Schlüsselstollen als kontrollierte Entlastung unterhalten, sondern gleichzeitig ein Großteil der Schächte verwahrt und ein großer Teil der Grube geflutet. Damit wurde die sauerstoffinduzierte Mobilisierung bereits deutlich reduziert. Ein Teil der Schächte wurde erst in den letzten Jahren verfüllt bzw. werden immer noch offen gehalten und aktiv bewettert, d. h. mit Frischluft versorgt, was auch die sauerstoffinduzierte Schadstoffmobilisierung fördert.



Das Offenhalten und aktive Bewettern von Schächten erfolgt auf Basis einer bergrechtlichen Auflage, wonach der heutige Nachfolgebetrieb des ehemaligen Kupferbergbaus untertägige geotechnische Überwachungsaufgaben zur Gefahrenabwehr durchzuführen hat. Mit der aktiven Bewetterung soll die Luftfeuchtigkeit unter Tage und die Schachtkorrosion in Grenzen gehalten werden.

(Anmerkung: Da der Bergbau mittlerweile jahrzehntelang zurückliegt und auch gutachterlich in 2013 nachgewiesen wurde, dass keine akuten geotechnischen Gefahren mehr vorliegen, erscheint es sinnvoll, die Verwahrung der noch für Kontrollzwecke offengehaltenen und bewetterten Schächte anzugehen, um die sauerstoffinduzierte Schadstoffmobilisierung weiter zu verringern. Diese Variante wird daher als eine mögliche Maßnahme nachfolgend noch betrachtet.)

In der Tabelle A-1 wird diese „Maßnahme“ Erhalt des Status Quo als Maßnahme 4 bezeichnet.

#### Verhältnismäßigkeitsaspekte:

- Hohe dauerhafte Kosten ("Ewigkeitskosten"), für die nächsten 20 Jahre ca. 22,5 Mio. €, danach 1 Mio. €/a;
- Keine Verschlechterung aber auch keine maßgebliche Verbesserung (bestenfalls geringfügig über sehr lange Zeiträume) gegenüber heute;
- Gesamtschadstoffreduktion  $W_1 = 0\%$ ,  
somit Aufwand-Nutzen-Ratio: 22,5 Mio. € / 0%
- Erreichte relative Umweltqualität in Schlenze  $W_{2_{\text{Schlenze}}} = 32,5\%$ ,  
somit Aufwand-Nutzen-Ratio: 22,5 Mio. € / 32,5%
- Erreichte relative Umweltqualität in Saale  $W_{2_{\text{Saale}}} = 45\%$ ,  
Aufwand-Nutzen-Ratio: 22,5 Mio. € / 45%
- Sonstige Nebenwirkungen: eher sehr begrenzt

#### Zusammenfassende Einschätzung:

- Trotz des Aufwandes gibt es absehbar keine Schadstofffrachtreduktion und die Umweltqualitätsziele werden nicht erreicht. Diese Maßnahme hat somit ein sehr schlechtes Aufwand-Nutzen-Ratio in allen drei primären Aspekten.
- Diese Maßnahme resultiert nicht aus wasserwirtschaftlichen Zielsetzungen sondern aus den vor langer Zeit zugelassenen Abschlussbetriebsplänen. Dabei wurde der Schutz der Umwelt insbesondere durch die Flutung des Grubengebäudes und den Erhalt des Schlüsselstollens berücksichtigt, wodurch die unkontrollierte Mobilisierung und das Austreten von Schadstoffen reduziert werden sollte. Die Auflage der fortgeführten aktiven Bewetterung in bestimmten Grubenbereichen zum Zwecke vorsorglicher Überwachung im Sinne einer Gefahrenabwehr und die damit verbundene Förderung der sauerstoffinduzierten Schadstoffmobilisierung steht im Konflikt mit den wasserwirtschaftlichen Interessen, die sich aus neueren wasserrechtlichen Rahmenbedingungen ergeben (u. a. Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie). Da gutachterlich keine akuten geotechnischen Gefahren bestätigt werden konnten, ist diese Auflage ggf. neu zu überprüfen. Die Unterbindung der aktiven Bewetterung bzw. Sauerstoffzufuhr wird unter Maßnahme 2-1-2a untersucht.

## **5.2 Maßnahme 1-1: Eingriff an der Quelle - Beseitigung**

In diesem Kapitel werden Maßnahmen betrachtet, die die Quelle der Schadstoffe und damit die aus ihr resultierende Schadstofffreisetzung beseitigen. Dies beinhaltet die teilweise oder vollständige Beseitigung der Kupferschieferlagerstätte.

### Betrachtete Maßnahmen:

- Maßnahme 1-1-1: Entfernung und Entsorgung,
- Maßnahme 1-1-2 : Entfernung und Nutzbarmachung (Wertstoffgewinnung)

### Umfang:

- Flächiger Bergbau/Tagebau,
- Anlegen einer Deponie (geordnete Deponierung des Aushubs),
- Betrieb einer Aufbereitung für Wässer, die durch die Aktivitäten freigesetzt werden,
- Bei 1-1-2 Betrieb einer Erzaufbereitung mit zusätzlichen Abwässern, die aufbereitet werden müssen.

### Kosten:

- Investitionskosten: Nicht sinnvoll abschätzbar; Kosten >> 1.000 Mio. €,
- Betriebskosten: >> 1 Mio. EUR/a; die Wasserhaltung und Wasseraufbereitung dürfte aufwändiger sein als in 1-2-2,
- Erlöse stehen in keinem Verhältnis zu den Kosten.

### Ergebnis:

- Erhebliche Umwelteinflüsse zu erwarten
- Im Vergleich zu Maßnahmen 1-2 und 3-1 bieten Maßnahmen unter 1-1 nur Nachteile.

### Umwelteinflüsse:

- Erheblicher zusätzlicher Eingriff in den Wasserhaushalt (Entnahme und Einleitung),
- Erheblicher zusätzlicher Landschaftsverbrauch,
- Hoher zusätzlicher Entsorgungsbedarf (Berge, Aufbereitungsabgänge, Wasserbehandlungsabfälle),
- Hohes zusätzliches Mobilisierungspotenzial für Schadstoffe durch zusätzlichen Aufschluss,
- Hohe zusätzliche Emissionen (Staub, Lärm),
- Hoher zusätzlicher Ressourcenbedarf (Luft, Wasser, Energie),
- Lange Eingriffsdauer mit negativen Auswirkungen.

#### Ergänzende Erläuterungen:

Maßnahmen unter 1-1 dürften nach heutigen Maßstäben wirtschaftlich illusorisch bzw. kaum genehmigungsfähig sein. Sie hätten auf jeden Fall erhebliche negative Umweltauswirkungen.

#### Verhältnismäßigkeitsaspekte.

- Sehr hohe Kosten (nicht abschließend quantifizierbar),
- Kein relevanter Vorteil für die Umwelt/ Wasserhaushalt (bestenfalls nur Abgabe von aufbereiteten Wässern in das Oberflächengewässer),
- technisch nur mit erheblichen Einschränkungen (Lagerstätte wird kaum vollständig abgebaut werden können) und Aufwand (u. a. zur Abwehr von schädlichen Umweltauswirkungen) umsetzbar.

#### Zusammenfassende Einschätzung:

- Nicht zielführend,
- Nicht umsetzbar,
- Kein verhältnismäßiger Ansatz zur Frachtenreduktion.

### **5.3 Maßnahme 1-2: Eingriff an der Quelle - Einschluss**

Wenn Maßnahmen zur Beseitigung der Quelle nicht zum Zuge kommen, wären als nächste Option Maßnahmen zum Einschluss der Quelle – also der Lagerstätte - zu prüfen. Ziel ist hierbei die Wechselwirkung der Lagerstätte mit der Umwelt zu unterbinden (also eine Art „in-Situ-Deponie“ herzurichten).

#### Betrachtete Maßnahmen:

- Maßnahme 1-2-1 Physischer Einschluss  
(Zielstellung: Verhinderung der Schadstoffausbreitung durch physikalische Barrieren)
- Maßnahme 1-2-2 Hydrodynamische Barrieren  
(Zielstellung: Verhinderung der Schadstoffausbreitung durch hydraulische Gefahrenabwehr)

#### Umfang:

##### 1-2-1 Physischer Einschluss:

- Einschluss durch Vollversatz sämtlicher Hohlräume mit dichtem Material. Dies ist nicht möglich; es sei denn, die Grubenräume würden aufgewältigt (wieder geöffnet). Für diesen Fall gilt eine ähnliche Logik wie bei den Maßnahmen 1-1.
- Einschluss durch vollständige Umschließung mit Dichtmaterial (Dichtwand). Es ist kein technisches Verfahren hierfür bekannt. Die Maßnahme wird als nicht realisierbar eingeschätzt und wird daher nicht weiter verfolgt.

#### 1-2-2 Hydrodynamischer Einschluss:

- Variante 1-2-2a: Abdämmen oberhalb des Überlaufpunkts,
- Variante 1-2-2b: Abdämmen unterhalb des Überlaufpunkts,
- Variante 1-2-2c: Abdichtung der Hauptfließwege (Schlüsselstollen, ggf. Zabenstedter Stollen und Froschmühlenstollen) und Schaffung einer alternativen hydraulischen Entlastung z. B. durch Abförderung von Wässern mit relativ geringer Schadstofffracht und Abgabe in Saale oder Schlenze (möglichst ohne Aufbereitung).

Die Varianten 1-2-2a und 1-2-2b führen zu einer Aufspiegelung der unterirdischen Wässer, die sich dann einen anderen Entlastungsweg suchen. Sehr wahrscheinlich wird dann ein Teil der Wässer über den höher liegenden Froschmühlenstollen auslaufen, der dann die Schadstofffrachten in das bisher nur sehr gering vorbelastete Gewässersystem „Böse Sieben“ – „Süßer See“ abgeben würde. Ein anderer Teil der belasteten Wässer kann unkontrolliert an anderen Stellen zu Tage treten, sei es an bereits bestehenden Quellen oder an neuen Quellen bzw. neuen Vernässungszonen. Daher scheiden diese Varianten aus, da diese auf Grund der negativen Folgen (Beeinträchtigung anderer Gewässer), im Widerspruch zu den Zielen der Gewässerbewirtschaftung stehen. Die weitere Betrachtung der Variante 1-2-2 "Hydrodynamischer Einfluss" erfolgt nur für Variante 1-2-2c.

Bei Variante 1-2-2c wird versucht, eine kontrollierte alternative Entlastung zum Schlüsselstollen zu schaffen, was ein Fassen, Heben, Abfordern und Ableiten an anderer Stelle als Ausgleich für die Wasserbilanz erfordert. Das führt zu einer Reduktion der Wassermengen im Schlüsselstollen und damit auch zu der über den Schlüsselstollen abgeführten Schadstofffracht. Da jedoch weiterhin über den Überlaufpunkt hoch belastete Wässer in den Schlüsselstollen treten können, könnten die Schadstoffkonzentration am Schlüsselstollenauslauf trotz Schadstofffrachtreduktion deutlich ansteigen. Eine zusätzliche Wasseraufbereitung wäre vermutlich nach aktiver Förderung stark mineralhaltiger Wässer erforderlich, da eine dann benötigte Einleitung in ein Gewässer eine wasserrechtliche Erlaubnis erfordert, welche die Abgabe von hohen Schadstoffkonzentrationen bzw. Schadstofffrachten vermutlich nicht zulassen kann (siehe auch Variante 3-1 – hier Wasseraufbereitung ohne Heben, Abfordern und Ableiten). Durch die Verlegung der Fassung in den weniger belasteten Bereich könnte allerdings der geringer belastete Anstrom (Süßwasserlamelle aus der Grundwasserneubildung im Bereich des Oberstroms) dazu beitragen, dass sich die mittlere Schadstofffracht reduziert, um vielleicht ein Viertel bis maximal auf die Hälfte. Allerdings ist es wahrscheinlich, dass sich bei einem dauerhaften Betrieb auf Grund des neuen Potenzialgefälles vermehrt Schadstofffrachten mobilisieren und sich auf die Fassungsstelle zu bewegen, was wiederum dann zu einer Erhöhung der Schadstofffracht führen wird. Die über den Schlüsselstollen weiter ablaufenden restlichen Schadstofffrachten würden wie bisher unbehandelt abgegeben – es sei denn es würde versucht werden, dem mit einer Abdichtung zu entgegen (z. B. Variante 1-2-2b). Insgesamt besteht das erhebliche Risiko dass diese Maßnahme nur begrenzt wirksam ist und auf lange Sicht nicht nachhaltig.

### Kosten Variante 1-2-2c:

- Ausgangspunkt / Annahmen: Um die Salzlösung zu minimieren, ist das Grubengebäude mit Sole geflutet worden. Dadurch entsteht eine Dichteschichtung mit einer aufschwimmenden Schicht weniger mineralisierter Wässer (Süßwasserlamelle). Der Bereich der Süßwasserlamelle beträgt z. Zt. etwa 1/5 des Gebietes. Durch die Entnahme der GW-Neubildung (gesch. 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a) könnte unter günstigen Annahmen vielleicht ein Viertel bis etwa maximal die Hälfte des derzeitigen Abflusses erfasst werden. Dadurch könnte sich die über den Schlüsselstollen abgegebene Fracht schätzungsweise um ein Viertel bis auf maximal die Hälfte reduzieren.
- Summe Investitionskosten: ca. 18-38 Mio. € ; angesetzt 28 Mio. € ;  
Summe Betriebskosten: 30,2 Mio. €/a bis 47,3 Mio. €/a; angesetzt: 38,75 Mio. €/a

### Davon im Einzelnen:

- Kosten Wasserhaltung:

- Investitionskosten für Infrastruktur:
  - Offenhalten des Schachts oder Erstellung eines Leistungsbrunnens: 2,5 Mio. €
  - Installation einer leistungsfähigen Pumpenanlage: 0,5 Mio. €
  - Installation von ca. 15 km Rohrleitung zur Ableitung gehobener Wässer 10-20 Mio. €
  - Summe: ca. 13-23 Mio. €
- Betriebskosten für Wasserhaltung:
  - Offenhalten des Systems: ca. 0,8-1,0 Mio. €/a,
  - Förderung (ca. 13,1 Mio m<sup>3</sup>/a x 0,011 €/m<sup>3</sup>) ca. 0,14 Mio. €/a;
  - Summe: ca. 0,94-1,14 Mio. €/a.
  - angesetzt: 1 Mio. €/a.

#### Nebenrechnungen:

- Abfluss: ca. 25 m<sup>3</sup>/min = 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a;
- Heben: 1000 kg um 115 m heben = 1 MWs = ca. 0,32 kWh,  
Bei Stromkosten von rd. 0,35 €/kWh kostet der gehobene m<sup>3</sup> ca. 0,011 €/m<sup>3</sup>
- Fördern: oben enthalten bzw. vernachlässigbar

- Kosten für Wasseraufbereitung:

- Investitionskosten für Wasseraufbereitung: ca. 5-15 Mio. €
- Betriebskosten für Wasseraufbereitung (13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a): ca. 29,2-46,3 Mio. €/a

### Umwelteinflüsse:

- Massiver Eingriff in den Wasserhaushalt (Entnahme und Einleitung),
- Kaum (zusätzlicher) Landschaftsverbrauch,
- Bei Wasseraufbereitung Entsorgungsbedarf (Wasserbehandlungsabfälle),
- Geringes Mobilisierungspotenzial,
- Geringe Emissionen (Staub, Lärm),
- Ressourcenbedarf bei Pumpen und Wasseraufbereitung (Energie),

- Unbefristete Dauer der Maßnahme ("Ewigkeitsdauer") bei Pumpen und Wasseraufbereitung,
- das Ableitungsvolumen des Schlüsselstollens wird quantitativ voraussichtlich deutlich zurückgehen, aber dafür ggf. mit höheren Schadstoffkonzentrationen verbunden sein.

#### Verhältnismäßigkeitsaspekte (nur 1-2-2c):

- Unter günstigen Voraussetzungen könnte sich überschlagsmäßig die abgegebene Fracht des Schlüsselstollens auf ein Viertel bis auf die Hälfte reduzieren (Entlastung Salzfracht: bis ca. 87.500 -175.000 t/a; Entlastung Metallfracht: ca. 40-80 t/a)
- Dies bedeutet:
  - $W1 = \text{ca. } 25 - 50\%^2$ ,
  - $W2_{\text{Schlenze}} = \text{ca. } 43 - 65\%$ ,
  - $W2_{\text{Saale}} \text{ ca. } 54 - 66\%$
- Demgegenüber stehen Investitionskosten von Fix: ca. 28 Mio. € zzgl. Betriebskosten von ca. 38,75 Mio. €/a,
- Die Umsetzung wäre mit vielen Risiken verbunden, da sich die Qualität der entnommenen und aufzubereitenden Wassermenge schwer abschätzen lässt. Weiter ist die tatsächliche Frachtreduktion schwerer als bei Variante 3-1 abschätzbar und ist mit Sicherheit schlechter als in 3-1.

#### Ergänzende Erläuterungen zu 1-2-2c:

Es ist darauf hinzuweisen, dass bei der bisherigen Grubenverwahrung die Grubenräume soweit wie möglich mit Salzlaugen geflutet wurden. Dadurch erfolgte insgesamt eine deutliche Teilimmobilisierung im Grubengebäude. Insbesondere die tieferen Grubenbereiche wurden durch diese Maßnahme erfolgreich immobilisiert.

Bei einem hydrodynamischen Einschluss und einer Förderung über ein Pumpensystem würde die direkte Ableitung von Schadstofffrachten über den Schlüsselstollen zwar voraussichtlich deutlich reduziert werden, die hydrodynamische Wirkung auf die einzelnen Abbaubereiche im obersten Bereich des Grubengebäudes ist derzeit jedoch nicht vorhersehbar. Das Risiko, dass einzelne Fließwege schadstoffbelasteter Grubenwässer durch den nur lokal wirkenden hydraulischen Gradienten der Pumpe nicht erfasst werden, ist sehr hoch. Negative Umweltauswirkungen durch diffuse Austritte an der Oberfläche sind derzeit nicht quantifizierbar.

Selbst wenn diese Risiken außer Acht gelassen werden würden, wäre der Aufwand doch im Vergleich zur Wirkung sehr hoch. In den ersten 20 Jahren würden Kosten von über 800 Mio. € anfallen, während die Zielerfüllungsgrade im günstigen Fall für die Frachtreduzierung  $W1$  bei 50%, für die chemische Qualität  $W2_{\text{Saale}}$  bei 66% und  $W2_{\text{Schlenze}}$  bei 65% liegen (im ungünstigen Fall:  $W1 = 25\%$ ,  $W2_{\text{Saale}} 54\%$ ,  $W2_{\text{Schlenze}} 43\%$ ). Die UQN werden nicht erreicht ( $W2 < 100\%$ ) und für die Schadstoffreduktion haben andere Maßnahmeoptionen bessere Nutzen/Kosten-Verhältnisse ( $W1/\text{Aufwand}$ ).

Die Maßnahme 1-2-2c ist bei Abwägung der möglichen Ergebnisse, den Kosten und den Risiken als nicht zielführend und nicht verhältnismäßig einzustufen, zumal die Maßnahme 3-1

---

<sup>2</sup> Hier und nachfolgend sind die Angaben auf volle Prozent gerundet angegeben.

bei geringeren Kosten und geringeren Risiken bessere Ergebnisse liefern würde. Die Maßnahmen 1-2-2a und 1-2-2b kommen aus technischen Gründen nicht in Betracht.

#### Zusammenfassende Einschätzung:

- Nur mit Risiken umsetzbar,
- Nur bedingt zielführend,
- Nicht verhältnismäßig (vergleichsmäßig hohe Kosten bei mäßiger Wirkung).

#### **5.4 Maßnahme 2-1: Eingriff auf den Ausbreitungspfad – Immobilisierung**

Können die Schadstoffe nicht entfernt oder an Ort und Stelle eingeschlossen werden, ist in einem nächsten Schritt zu prüfen, ob der Mobilisierungsmechanismus unterbunden werden kann. Hierbei wird eine durch eine Immobilisierung der Schadstofftransport unterbunden.

#### Betrachtete Maßnahmen:

- 2-1-1 Hydraulische Immobilisierung  
(Zielstellung: Bewegungen des Grundwassers als Transportmedium werden verhindert)
- 2-1-2 Chemische Immobilisierung  
(Zielstellung: sauerstoffinduzierte Mobilisierung wird verhindert)

#### Umfang:

##### 2-1-1 Hydraulische Immobilisierung:

Grundwasser ist Transportmedium sowohl für Sauerstoff, welcher die Ursache für die Mobilisierung durch Oxidation von Sulfidmineralien ist, als auch für die gelösten d. h. mobilisierten Schadstoffe. Kann das Transportmedium in seinen Bewegungen behindert werden, würden sowohl Schadstoffmobilisierung als auch Schadstofftransport verringert.

- Variante 2-1-1a: Großflächiger, dichter Versatz in Abbaubereichen (erschlossenen Lagerstättenbereichen) durch Einbau, Einspülen oder Injektion von Versatz- oder Abdichtungsmaterialien.  
Hierfür ist eine Aufwältigung des Bergwerks zumindest teilweise (in den oberen Randbereichen) notwendig, um Zuwegungen für den Versatz zu schaffen. Der für Bewegungen verfügbare Hohlraum bzw. die Durchlässigkeit (Permeabilität) der Resthohlräume/-poren könnte so reduziert werden, was insgesamt die Dynamik von Schadstoffmobilisierung, -transport und -austrag reduzieren würde.
- Variante 2-1-1b: Verfüllen der Flächen und ausgewählter Abbaubereiche im Bereich Schlüsselstollen. Dadurch würden gezielt Vorzugsfließwege ganz oder teilweise abgedichtet.
- Variante 2-1-1c: Hydraulischer Verschluss des Schlüsselstollens (Höhe Glückhilfsschacht) und Führung eines Entwässerungsrohres innerhalb des Schlüsselstollens bis mindestens Höhe Bolzeschacht, wo die Fassung der Grubenwässer erfolgt. Dadurch würde der derzeitige Überlauf aus der tieferen Grube in den Schlüsselstollen durch eine höhere Aufspiegelung reduziert, während die von oben zusitzenden geringer belasteten Wässer durch das Entwässerungsrohr am Überlaufbereich vorbeigeführt werden. Dadurch soll insgesamt das hydraulische System so verändert werden, dass weniger Belastung

aus dem Grubentiefsten kommt ohne die hydraulische Entlastung über den Schlüsselstollen zu unterbinden.

Kosten Variante 2-1-1a:

- Nicht realisierbar, nicht sinnvoll abschätzbar

> 1000 Mio. €

Kosten Variante 2-1-1b:

- Investitionskosten:
  - 4-5 Dämme à 1-2 Mio. €, entspricht 5 - 10 Mio.€ ca. 10 Mio. €
  - erhebliche Kostenrisiken (Realisierungsrisiken);
  - Abdichtung des Bereichs ohne Feste zwischen Schlüsselstollen und den Abbaubereichen zwischen LL 26 und Niewandschacht (3 km à geschätzt 5.000 €/m) ca. 15 Mio. €
  - Erhaltung des übrigen bisherigen Systems ca. 2,5 Mio. €
  - ggf. zusätzlicher Schacht erforderlich ca. 5 Mio.€
- **Gesamtkosten** ca. **32,5 Mio. €**
- **Betriebskosten:** ähnlich bisherigen zzgl. 1 zusätzlicher Schacht: ca. **1,2 Mio. €/a.**

Kosten Variante 2-1-1c:

- Investitionskosten:
  - Einbringen einer Rohrleitung (ca. 13 km Länge, mind. DN 1800 à 1.000 €/m: 13 Mio. €
  - Verschluss des Schlüsselstollens unterhalb des Überlaufpunkts 1 Mio. €
  - Abdämmung des oberen Rohrendes 2 Mio. €
  - Neue Tagesöffnung für Wartungsbefahrungen 5 Mio. €
  - Wiederaufwältigung von 5 km Strecke (ca. 5000 €/m) 25 Mio. €
  - Erhaltung des übrigen bisherigen Systems ca. 2,5 Mio. €
- **Gesamtkosten** ca. **48,5 Mio.€**
- **Betriebskosten:** ca. **1 Mio. €/a**

Ergebnis:

- Der Anstau bis Höhe Bolzeschacht würde eine Gefällereduzierung im Flutungsraum um ca. ¼ bewirken. Dadurch könnte sich die abgegebene Fracht über den Schlüsselstollen um max. 25 % reduzieren. (W1 = 75%)



## 2-1-2 Chemische Immobilisierung:

- Variante 2-1-2a: Verwahrung der noch offen gehaltenen Grubenbereiche.  
Es werden noch Grubenräume zu Kontrollzwecken und Überwachungsaufgaben (Auflage der Bergbehörde) offengehalten. Dazu werden noch Schächte betrieben, durch die aktiv (sauerstoffreiche) Frischwetter in das Grubengebäude geleitet werden. Dieser aktive Sauerstoffeintrag trägt vermutlich zur sauerstoffinduzierten Mobilisierung von Schadstoffen bei, wobei das tatsächliche Ausmaß nur schwer quantifizierbar ist. Ziel ist es, die verbliebenen offen gehaltenen Grubenräume aufzugeben, soweit sie für die Unterhaltung des Schlüsselstollensystems als hydraulische Entlastung der Mansfelder Mulde nicht mehr benötigt werden. Für die hydraulische Entlastung der Mansfelder Mulde wäre voraussichtlich das Offenhalten von Tagesöffnungen im letzten Abschnitt des Schlüsselstollens erforderlich. An laufenden Maßnahmen wären dauerhaft Unterhaltungsmaßnahmen am Schlüsselstollen, der Betrieb von Tagesöffnungen und Monitoring durchzuführen. Da dieser Abschnitt nicht in der Lagerstätte liegt, führt eine Frischluftzufuhr lediglich in diesem Bereich zu keiner relevanten Mobilisierung von Schadstoffen aus der Lagerstätte.
- Variante 2-1-2b: Zur Erhöhung des pH-Wertes Einbringen basischer Materialien.  
Da die ehemaligen Abbauräume in den Grubenfeldern nicht mehr bergmännisch zugänglich sind, verbleibt als einzige Option zur Einbringung von basischen Materialien die Injektion über die Wasserphase. Hierzu würden Injektionsbohrungen benötigt über die Chemikalien in signifikanten Mengen in die erschlossenen Lagerstättenbereiche eingebracht werden können. Die Injektion von Chemikalien in großen Mengen in den Untergrund ist erfahrungsgemäß sowohl technisch als auch genehmigungsrechtlich mit erheblichen Risiken verbunden, so dass diese Maßnahme ggf. gar nicht umsetzbar bzw. nicht genehmigungsfähig ist.

### Kosten Variante 2-1-2a:

- **Investitionskosten:**  
Verwahrung der bewetterten Grubenbereiche im oberen Schlüsselstollenbereich (W-Schacht und Umfeld)  
geschätzt 2-4 Mio.€ angesetzt ca. 4 Mio. €
- **Betriebskosten:**  
Betrieb des Schlüsselstollensystems im unteren Bereich.  
(ca. Mundloch bis Freiesleben-Schacht, Unterhaltung, Monitoring):: ca. 0,6 Mio.€/a

### Kosten Variante 2-1-2b:

- Investitionskosten:
  - Herrichten eines Injektionsbereichs im Bereich Sanderschacht (ca. 2-7 Mio. €) inkl. Bohrungen (ca. 0,5-1,5 Mio. €/Stk.)  
ergibt Aufgabesystem (geschätzt) ca. 8,5 Mio. €
  - Erhalten des bisherigen Systems ca. 2,5 Mio. €
- **Gesamtkosten:** **ca. 11 Mio. €**
- Betriebskosten:
  - Offenhalten des Systems, bei Ansatz ähnlicher Mengen Reaktionsprodukte wie für eine Fällanlage, z. B. ca. 0,2 €/ m<sup>3</sup>, bei Target 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a ; ca. 2,6 Mio. €/a
  - Fortführung bisherige Unterhaltung + Monitoring ca. 1 Mio. €/a
- **Betriebskosten:** **ca. 3,6 Mio. €/a**

### Ergebnis:

- Die Wirkung der Verwahrung der rückwärtigen Schächte mit Unterbindung von Sauerstoffzufuhr zur Verringerung der Mobilisierungsraten (Maßnahme 2-1-2a) ist schwer abzuschätzen. Es gibt derzeit keine belastbare Möglichkeit die Effekte der Bewetterung und die Effekte von Sauerstoffeintrag durch Grundwasserneubildung abzugrenzen. Eine mögliche Reduktion der Fracht (W1) könnte vielleicht bei bis zu 25% liegen. Angesetzt wird in einem ersten Schritt eine Reduktion (W1) um 12,5%, die sich auf Dauer einstellen könnte.
- Der Einfluss der Anhebung des pH-Werts (Maßnahme 2-1-2b) ist schwer abschätzbar. Hierzu sind Berechnungen auf der Grundlage von Versuchen notwendig. Vielleicht sind rund 25% an Frachtreduktion (W1) möglich.

### Umwelteinflüsse:

- Begrenzter Eingriff in den Wasserhaushalt (Isolierung),
- Unbefristete Dauer der Maßnahme ("Ewigkeitsmaßnahme"),
- Kein Landschaftsverbrauch,
- Kein (zusätzliches) Mobilisierungspotenzial,
- Geringe Emissionen (Staub, Lärm; nur während Bau),
- Geringer Ressourcenbedarf (nur während Bau),
- Befristete Dauer der Baumaßnahmen.

### Ergänzende Erläuterungen:

Eine hydraulische Immobilisierung ist mit verhältnismäßigem Aufwand nicht realisierbar, bei der chemischen Immobilisierung mittels pH-Wert-Anhebung ist die zu erwartende Frachtreduzierung ohne weiteren Aufwand (Versuche) nicht prognostizierbar. Die chemische Immobilisierung durch Sauerstoffreduzierung verbleibt als gangbare Möglichkeit, jedoch ist die realistisch zu erwartende Frachtreduzierung nach heutiger Einschätzung eher gering.

### Verhältnismäßigkeitsaspekte:

- Für die Variante 2-1-2a (Verwahrung der noch offen gehaltenen Grubenbereiche) beträgt die Frachtreduktion W1 12,5% (bis ca. 25%), der Zielerfüllungsgrad W2<sub>Schlenze</sub> liegt bei 37% (bis ca. 43%) und W2<sub>Saale</sub> bei 49% (bis ca. 54%). Allerdings könnte es einige Zeit (viele Jahre) dauern, bis sich eine Wirkung einstellt, da das Gesamtsystem relativ träge ist.
- Die Wirkung von der Variante 2-1-2b könnte (muss aber nicht) besser sein, im günstigsten Fall geschätzt um 25%. Dann wären für die Variante 2-1-2a die Frachtreduktion W1 ca. 25%; der Zielerfüllungsgrad W2<sub>Schlenze</sub> ca. 43% und der Zielerfüllungsgrad W2<sub>Saale</sub> ca. 54%.

### Zusammenfassende Einschätzung:

- Maßnahmen 2-1-1b und 2-1-2a mit Risiken umsetzbar,
- bedingt zielführend,
- 2-1-1b hat ein schlechteres Nutzen/Kosten-Verhältnis als 2-1-2a (2-1-2a hat im Vergleich zu den übrigen Maßnahmen mit einer Frachtreduktion > 0,5% / Mio. € ein günstigeres Nutzen/Kosten-Verhältnis, wobei eine Frachtreduktion von

lediglich <1 %/ Mio. € immer noch nicht befriedigend ist. Daher kann diese Maßnahme nur als bedingt verhältnismäßig eingestuft werden.

### **5.5 Maßnahme 2-2: Eingriff auf den Ausbreitungspfad – Schadstofftransport**

Wenn auch die Mobilisierung nicht verhindert werden kann, wird in einem nächsten Schritt der Transport geprüft. Hier soll der Transport der Schadstoffe verringert werden.

#### Betrachtete Maßnahmen:

- 2-2-1 Verringerung Lösungstransport
- 2-2-2 Verringerung Feststofftransport

#### Umfang:

Variante 2-2-1 Verringerung Lösungstransport:

- Anstau des Schlüsselstollens unterhalb des Überlaufpunktes und kontrollierter Abzug des weniger kontaminierten Schlüsselstollenwassers (bzw. der Süßwasserlamelle) bzw. dessen Anstau über den Schlüsselstollen und/oder ggf. auch über den Froschmühlenstollen hinaus. Das Hauptrisiko läge darin, dass langfristig der kontaminierte Wasserkörper bis in den Abzugshorizont ansteigen könnte, was dann die erreichten Ergebnisse wieder rückgängig machen würde. Die erforderlichen Maßnahmen sind vergleichbar mit denen von Variante 2-1-1b in Verbindung mit 2-1-1c, wobei die Leitungsführung ggf. deutlich aufwändiger ist und über Versuchsreihen angepasst werden muss. Unter vorsichtig optimistischen Annahmen könnten daher eine Umsetzung von 2-1-1b+2-1-1c angesetzt werden (mit einem eher schlechteren (möglicherweise nicht nachhaltigen) Effekt, also < 25%. Pragmatisch werden 12,5% angesetzt.)

Variante 2-2-2 Verringerung Feststofftransport:

- Variante 2-2-2a: Errichtung einer Sedimentfalle im Mundlochbereich des Schlüsselstollens.  
Die Errichtung einer Sedimentfalle ist nicht aufwändig, jedoch mit wenig kontinuierlichem Effekt, der geschätzt bei <5% liegt, vorsichtig angesetzt 1 %. Zusätzlich zur Errichtung der Sedimentfalle sind entweder der Status quo oder die Maßnahme (2-1-2b) zusätzlich erforderlich. Insgesamt effektiver erscheint die Kombination mit Maßnahme 2-1-2b, welche eine zusätzliche Schadstoffreduktion von bis zu 25% ergibt, wobei zunächst pragmatisch 12% angesetzt werden können. In Summe würde dann für die Variante 2-2-2a eine Reduktion um  $1\% + 12,5\% = 13,5\%$  folgen.

Variante 2-2-2b: Anlage biofilmreicher durchströmter Klärbeete im Bereich zwischen Schlüsselstollenmundloch und Friedeburg.

- Der Abschnitt der Schlenze nach Einmündung des Schlüsselstollens wirkt bereits jetzt als Schadstoffsенke (siehe Berichtsteil A). In wieweit dieser Effekt durch zusätzliche Biobeete gesteigert werden kann ist fraglich und viele technische Fragestellungen sind ungeklärt. Insgesamt wird bei schwer quantifizierbaren Risiken ein eher geringer zusätzlicher möglicher Reinigungseffekt eingeschätzt (vielleicht zusätzliche Steigerung der Reduktion um ca. 5%, angesetzt 2,5%). Der Nutzen ist dann vor allem für die Saale ab der Einmündung der Schlenze bedeutsam, während sich für die Schlenze selbst kaum eine Verbesserung darstellt, da dieser Effekt im Wesentlichen erst kurz vor der

Einmündung wirksam wird. Da es sich um eine Maßnahme außerhalb des Schlüsselstollensystems handelt, bleiben alle ohnehin dort umgesetzten Maßnahmen bestehen. Insgesamt am effektivsten erscheint die Kombination mit Maßnahme 2-1-2b, was eine zusätzliche Schadstoffreduktion von bis zu 25% ergibt (angesetzt 12,5%, zusammen Reduktion von 15% (Saale) bzw. 12,5% (Schlenze).

#### Kosten für Variante 2-2-1:

- Die erforderlichen Maßnahmen sind vergleichbar mit denen von Variante 2-1-1b in Verbindung mit Variante 2-1-1c, wobei die Leitungsführung ggf. deutlich aufwändiger ist und über Versuchsreihen angepasst werden muss. Unter vorsichtig optimistischen Annahmen könnten Investitionskosten von 2-1-1b+2-1-1c und Betriebskosten von 1-1-1c angesetzt werden:
  - Investitionskosten (32,5+48,5 Mio. €): ca. 81 Mio. €
  - Betriebskosten (1 Mio. €): ca. 1 Mio. €/a

#### Kosten für Variante 2-2-2a:

- Investitionskosten:
  - Ertüchtigung des vorhandenen Wehres am Mundloch und Errichtung einer sekundären Sedimentfalle im unmittelbaren Anschluss. ca. 0,2 Mio. €
  - Unterhaltung Schlüsselstollen (Ansatz Maßnahme 2-1-2b): ca. 4,0 Mio. €

**Gesamtkosten: ca. 4,2 Mio. €**
- Betriebskosten:
  - Wartung der Sedimentfalle und jährliche Entleerung ca. 0,1 Mio. €/a
  - Unterhaltung Schlüsselstollen (Maßnahme 2-1-2b): ca. 0,6-1 Mio. €/a

**Betriebskosten: ca. 0,7 Mio. €/a**

#### Kosten für Variante 2-2-2b:

- Investitionskosten:
  - Errichtung von Klärbeeten im Talbereich zwischen Schlüsselstollenmundloch und Friedeburg, Anlage eines Verteilersystems zu den Klärbeeten und eines Auffang- und Ableitesystems in die Schlenze (ca. 2-3 Mio. €) angesetzt ca. 3 Mio. €
  - Unterhaltung Schlüsselstollen (Maßnahme 2-1-2b): ca. 4 Mio. €

**Investitionskosten: ca. 7 Mio. €**
- Betriebskosten:
  - Wartung des Systems und Reinigung (Entleerung) im Jahresrhythmus oder seltener. Für die Sedimentaufnahme aus einem solchen System liegen bisher keine Erfahrungen vor; eine Remobilisierung während des flächenhaften Eingriffs kann nicht ausgeschlossen werden. Unterhaltung und Reinigung der Beete, Entsorgung des Sediments ca. 1 Mio. €/a
  - Unterhaltung Schlüsselstollen (Maßnahme 2-1-2b): ca. 0,6-1 Mio. €/a

**Betriebskosten: ca. 1,6 Mio. €/a**

#### Ergebnis:

- Die Einrichtung einer Sedimentfalle bietet eine gute Rückhaltungsmöglichkeit bei einfacher Wartung. Die Rückhaltungswirkung für die insgesamt über den Schlüsselstollen abgeführten Schadstoffe ist i. d. R. sehr gering (da der Hauptanteil in gelöster Form ausgetragen

wird), könnte aber in Ausnahmesituationen (bei Mobilisierung von Sediment durch außergewöhnliche (theoretische) Ereignisse, wie z. B. Wasserschwall durch ein seismisches Ereignis)) wirkungsvoll sein.

- Bei funktionstüchtigen Klärbeeten ist ein höherer Schadstoffrückhalt zu erwarten, jedoch sind sowohl das jahreszeitabhängige Rückhaltevermögen, die „Gewinnbarkeit“ des Sediments und die dabei ggf. erhöhte Remobilisierbarkeit der Schadstoffe bisher noch nicht untersucht (bisherige Untersuchungen zeigen eher geringe Mengen partikelgebundener Schadstofffracht an). Das Sediment wäre vermutlich als Abfall einzustufen und entsprechend zu entsorgen.

#### Umwelteinflüsse:

- Kein Eingriff in den Grundwasserhaushalt,
- Unbefristete Dauer der Maßnahme ("Ewigkeitsmaßnahme"),
- Landschaftsverbrauch für Klärbeete,
- Zusätzlicher Abfall (v. a. bei Klärbeeten, wenn sie ausgeschlagen werden müssen, Sediment aus Sedimentfalle müsste ebenfalls entsorgt werden),
- Begrenztes Mobilisierungspotenzial,
- Geringe Emissionen (Staub, Lärm),
- Geringer Ressourcenbedarf (nur für Bau),
- Befristete Dauer der Baumaßnahmen.

#### Verhältnismäßigkeitsaspekte:

- Für Variante 2-2-1 berechnet sich, bei Kosten von 81 Mio. € + 1 Mio. €/a die Wirkung wie folgt:
  - $W1 = 12,5\%$ ;
  - $W2_{\text{Schlenze}} = 37\%$ ;
  - $W2_{\text{Saale}} = 49\%$ .
- Für Variante 2-2-2a berechnet sich, bei Kosten von 4,2 Mio. € + 0,7 Mio. €/a, die Wirkung wie folgt:
  - $W1 = 13,5\%$ ;
  - $W2_{\text{Schlenze}} = 38\%$ ;
  - $W2_{\text{Saale}} = 49\%$ .
- Für 2-2-2b muss die Wirkung, da sie nun teilweise außerhalb des Schlüsselstollensystems stattfindet, etwas differenzierter berechnet werden, als für die anderen Fälle. Die Berechnungen beziehen sich auf Kosten von 7 Mio. € zzgl. 1,6 Mio. €/a:
  - $W1_{\text{Schlenze}} = 12,5\% + 0\%$ ;
  - $W2_{\text{Schlenze}} = 37\%$ ;
  - $W1_{\text{Saale}} = 12,5\% + 5\%$ ;
  - $W2_{\text{Saale}} = 49\%$ .

#### Ergänzende Erläuterungen:

Die Variante 2-2-2a kann als flankierende Option sowohl in Kombination mit 2-1-2a als auch mit 3-1d angesehen werden. Der Gesamtnutzen ist eher sehr gering bei zusätzlichen eher negativen Umweltauswirkungen (Abfall).

Das bereits vorhandene Wehr dürfte u. U. eine mehr als ausreichende Sedimentfalle sein.

Die Maßnahme 2-2-2b könnte ebenfalls als flankierende Option sowohl in Kombination mit 2-1-2a und mit 3-1d angesehen werden, jedoch bei deutlich höheren Risiken und schlechterer Umweltverträglichkeit.

#### Zusammenfassende Einschätzung:

- mit Risiken umsetzbar,
- bedingt zielführend,
- Maßnahme 2-2-2a bedingt verhältnismäßig (geringe Kosten bei geringem Nutzen).

### **5.6 Maßnahme 3: Eingriff auf das Schutzgut Wasser**

Wird die Ursache, die Mobilisierung und der Transport von Schadstoffen nicht beseitigt, kann eine Verbesserung nur noch durch die Behandlung des beeinträchtigten Schutzgutes erzielt werden. Unter den Maßnahmen 3 werden daher Optionen für die Behandlung der belasteten Wässer untersucht.

#### Betrachtete Maßnahmen:

- 3-1 Ex-Situ Anlagentechnik (Reinigung nach Fassung und Ableitung)
- 3-2 In-Situ Verfahren (Reinigung vor Fassung und Ableitung)
- 3-3 Ableitung (Fassung und Ableitung ohne Reinigung)

#### *3-1 Ex-Situ Anlagentechnik:*

Bei der Ex-Situ Anlagentechnik erfolgt die Behandlung von belasteten Wässern in einer eigens dafür errichteten und betriebenen Anlage.

#### Umfang:

Reinigung mittels Ex-Situ Anlagentechnik:

- Ähnlich wie Variante 1-2-2 mit Wasseraufbereitung aber Fassung am Stollenmundloch:
  - Option 3-1a: Schwermetallabreinigung (ohne Salzabreinigung)  
ist genehmigungsrechtlich fragwürdig, da die Einleitung stark salzhaltiger Wässer nach der aktuellen Verwaltungspraxis und Rechtsprechung nach Möglichkeit abgelehnt wird,
  - Option 3-1b: zusätzliche Salzabreinigung
- Umsetzbar ist die Kombination 3-1a mit 3-1b.
- Erforderlich ist außerdem das Offenhalten vom Schlüsselstollensystem, welche am besten mit Verwahrung der Schächte (Variante 2-1-2a) erfolgt.
- Variante 3-1c: Eindampfung (ggf. als oder in Kombination mit Niederdruck- oder Vakuumverfahren bzw. in Kombination mit Umkehrosiose zur Minimierung der Energiekosten) ist bei den gegebenen Wassermengen energetisch illusorisch und wird nicht weiter betrachtet.

Kosten (Kombination 2-1-2a + 3-1a + 3-1b):

- Investitionskosten:
  - Infrastruktur ca. 4 Mio. €
  - Schwermetallfällung (Anlage) ca. 5-15 Mio. €
  - Salzabreinigung: in Betriebskosten eingerechnet
- **Gesamtkosten (angesetzt): ca. 14 Mio. €**
- Betriebskosten
  - Unterhaltung der Infrastruktur ca. 0,6 Mio. €/a
  - Schwermetallfällung (0,23-0,53 €/m<sup>3</sup>) ca. 3-7 Mio. €/a
  - Umkehrosmose, mit ggf. vorlaufender Vorbehandlung  
ca. 2-3 €/m<sup>3</sup> (inkl. Entsorgung Reststoffe und  
Amortisation), 13,1 Mio. m<sup>3</sup>/a ca. 26,2 -39,3 Mio. €/a
- **Betriebskosten (angesetzt): ca. 38,4 Mio. €/a**

Ergebnis:

- Die Wasseraufbereitung bietet eine sehr hohe Wirkung auf das Schutzgut mit einer Reduktion der Schadstofffracht von 75-100% (angesetzt wird 95%).
- Es verbleiben jedoch erhebliche technische Umsetzungsrisiken und unerwünschte Nebeneffekte (siehe nachfolgende Umweltauswirkungen). Diese müssten, da es sich theoretisch um eine ewige Maßnahme handelt, auch ewig in Kauf genommen werden.

Umwelteinflüsse:

- Begrenzter Landschaftsverbrauch,
- Begrenztes Mobilisierungspotenzial,
- Dauerhafte Entsorgung von Abfällen aus dem Wasseraufbereitungsbetrieb erforderlich (Residuen: schwermetallhaltige bzw. salzhaltige Schlämme),
- Dauerhafte Emissionen für Wasseraufbereitungsbetrieb (Staub, Lärm, ggf. Abgase),
- Dauerhafter Ressourcenbedarf (Energie für Wasseraufbereitung, Chemikalien für Wasserbehandlung),
- Unbefristete Dauer der Maßnahme ("Ewigkeitsmaßnahme").

Verhältnismäßigkeitsaspekte:

- Bei hohen Kosten und Nebeneffekten wird eine gute Wirkung erzielt:
  - W1: 95%;
  - W2<sub>Schlenze</sub> > 100%, angesetzt 100%;
  - W2<sub>Saale</sub> > 100%, angesetzt 100%
- Die Optionen mit Wasseraufbereitungsanlage (3-1a-c) sind sehr ressourcenverbrauchend, nicht nachhaltig und mit sehr hohen Kosten verbunden.

Ergänzende Erläuterungen:

Die Aufbereitung nur eines Teilstromes wäre mit anteilig geringeren Kosten verbunden. Aber selbst für einen 10% geringeren Schadstoffaustrag müssten über 3 Mio. €/a zzgl. Investitionen aufgewendet und negative Umweltauswirkungen (Einleitung salzhaltiger Wässer) in Kauf genommen werden, so dass die Genehmigungsfähigkeit mit Risiken behaftet ist. Da die Maßnahme nicht die Ursache (Mobilisierung geogener Mineralisationen) behebt, ist von einem

unbefristeten Betrieb („ewige Maßnahme“) auszugehen. Vor dem Hintergrund des begrenzten Nutzens (hier: Verbesserung des chemischen Zustandes) sind solche Maßnahmen als unverhältnismäßig einzustufen.

### *3-2 In-Situ Verfahren:*

Alternativ zur Ex-Situ-Anlagentechnik kann ggf. die natürliche Umgebung in der sich die Wässer befinden als Reaktionsraum verwendet werden. Die für die Behandlung erforderlichen Prozesse müssen dann im Lagerstätten- oder Transportbereich der Wässer erfolgen und die ggf. notwendigen Chemikalien müssen entsprechend dort eingebracht werden.

Die Schaffung eines anaeroben Milieus im Flutungsraum des Grubengebäudes führt zur Reduzierung des Sauerstoffgehaltes und Immobilisierung durch Anhebung des pH-Wertes. Diese Maßnahmen entsprechen den Varianten in Maßnahme 2-1-2b (Chemische Immobilisierung).

- Für Maßnahme 3-2 können deshalb die Einschätzungen für Maßnahme 2-1-2b übernommen werden

Die In-Situ-Variante könnte zwar einen erfolgversprechenden Ansatz für die Verbesserung der Wasserqualität darstellen, ist aber mit sehr hohen Kosten, Umsetzungsrisiken und mit erheblichen Umweltauswirkungen für andere Umweltschutzgüter (u. a. Energie, CO<sub>2</sub>, Abfall) verbunden. Wie bei 2-1-2b ist davon auszugehen, dass nur ein Teilerfolg (Reduktion um ca. 25%) erreichbar ist.

### *3-3 Ableitung*

Dabei handelt sich nicht um eine Behandlung im engeren Sinne, sondern vielmehr um ein Freihalten von zu schützenden Wässern von Schadstofffrachten. Dies erfolgt am besten durch Fassen und Ableiten der schadstoffhaltigen Wässer.

#### Umfang:

- Variante 3-3a: Ableitung in die Schlenze: Entspricht dem Status quo (siehe auch die in Kapitel 4.1 beschriebenen Maßnahme)
- Variante 3-3b: Ableitung in Saale: Zur Entlastung der Schlenze wird eine zusätzliche Rohrleitung für die direkte Ableitung des Schlüsselstollenwassers in die Saale gebaut.

#### Kosten Variante 3-3a:

- Investitionskosten:
  - Erhaltungsinvestition im rückwärtigen Bereich/Schachterhalt: ca. 2,5 Mio. €
- Betriebskosten:
  - 0,8-1,0 Mio. € /a (Unterhaltung Schlüsselstollen, Schächte) ca. 1 Mio. €/a



### Kosten Variante 3-3b

- Investitionskosten:
  - Investitionskosten aus 3-3a ca. 2,5 Mio. €
  - zusätzliche Verlegung von 1,3 km Rohrleitung 2xDN1000 (à 700 €/m) ca. 1,8 Mio. €
  - Einlaufbauwerke Schlüsselstollen und Saale ca. 1,5 Mio. €

**Gesamtkosten: ca. 5,8 Mio. €**
  
- Betriebskosten:
  - Grundlage: wie 3-3a - Unterhalt Schlüsselstollen, Schächte ca. 1,0 Mio. €/a
  - zusätzlich Einlaufbauwerke, Messsysteme ca. 0,2 Mio. €/a

**Betriebskosten: ca. 1,2 Mio. €/a**
  
- Alternativ Kombination mit (2-1-1a) möglich.

### Ergebnis:

- Eine Frachtreduktion für die Saale erfolgt grundsätzlich nicht.
- Bei Variante 3-3b erfolgt eine Frachtentlastung der Schlenze (mit der Verlagerung der Fracht in die Saale).

### Umwelteinflüsse:

- Bei 3-3b Entzug von Wassermengen aus der Schlenze,
- Kein bis geringer Landschaftsverbrauch (für Rohrleitung bei 3-3b),
- Ggf. geringfügige Verschlechterung der Saale (für Rohrleitung 3-3b), da Reinigungseffekt der Schlenze entfällt,
- Unbefristete Dauer der Maßnahme ("Ewigkeitsmaßnahme").

### Verhältnismäßigkeitsaspekte:

- Die Ableitung in die Schlenze kann als Sowieso-Aufwand eingeschätzt werden und wäre daher als Erhalt des Status quo noch verhältnismäßig, aber schlechter als Maßnahme 2-1-2a (mit Verwahrung der Schächte im rückwärtigen Teil). Für Schlenze und Saale würde sich entsprechend nichts verändern
  - $W1 = 0\%$ ;
  - $W2_{\text{Saale}} = 45\%$ ;
  - $W2_{\text{Schlenze}} = 32\%$ .
- Mit der zusätzlichen Rohrleitung (3-3b) könnten ggf. die UQN für die Schlenze erreicht werden, aber dafür wird ihr ein erheblicher Teil des Wassers im letzten Fließabschnitt entzogen. Der Schadstoffeintrag in die Saale bleibt im besten Fall unverändert, so dass der Nutzen insgesamt lediglich auf den Abschnitt der Schlenze beschränkt wird. Die Situation insbesondere für die Saale würde sich aber verschlechtern, weil der Reinigungseffekt der Schlenze entfällt.
  - $W1 = 0\%$ ,
  - $W2_{\text{Saale}} = 45\%$ ,
  - $W2_{\text{Schlenze}} > 100\%$ , angesetzt 100%.
- Die kürzeste Rohrleitung (1,3 km in östliche Richtung zur Saale) hätte eine Dükerung der Schlenze zur Folge, eine Ableitung in nördliche Richtung ist wegen des Reliefs nicht

möglich. Wegen des flachen Reliefs, der Dükerung, des großen Rohrdurchmessers, der insbesondere nach der Schneeschmelze hohen Wassermenge und des möglichen Rückstaueffektes bei hohem Saalewasserstand sind die planerischen Anforderungen an eine solche Rohrleitung hoch, die Ausführungs- und Wartungskosten können deutlich höher ausfallen als derzeit geschätzt.

- Auf jeden Fall müsste die Maßnahme 3-3b mit dem Erhalt des Status Quo bzw. mit der Maßnahme 2-1-2a kombiniert werden. Letzteres ist vermutlich effizient und kompensiert möglicherweise eine ggf. mögliche Verschlechterung des Frachteintrags in die Saale.

## 5 Vergleichende Ergebnisübersicht

Die verschiedenen, im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Maßnahmenoptionen, werden nachfolgend vergleichend gegenübergestellt, um darauf aufbauend eine verhältnismäßige Vorzugsalternative herzuleiten.

Die zu den einzelnen Optionen getroffenen Ausführungen zur Verhältnismäßigkeit (Wirkung und Kosten) werden nachfolgend in der Tabelle A-1 dargestellt.

Wie in Tabelle A-1 dokumentiert, gibt es insgesamt keine befriedigende Lösung für eine verhältnismäßige und wirksame Frachtreduzierung.

### Anmerkungen zu Tabelle A-1:

- Die angegebene Frachtreduktion bezieht sich zunächst auf die geschätzte Reduzierung der Fracht aus dem Schlüsselstollen für Schlenze bzw. Saale, nicht aber auf die Reduzierung der in den Gewässern vorhandenen Gesamtfracht dieser Stoffe.
- Für die differenzierte Betrachtung werden  $W_1$ ,  $W_{2_{Saale}}$  und  $W_{2_{Schlenze}}$  angegeben. Die Herleitung dieser Maßzahlen ist in Abschnitt 3 erläutert und das Ergebnis im untenstehenden Diagramm dargestellt.
- Die angegebenen Kosten für 20 Jahre beinhalten die Investitionskosten und die Betriebskosten für 20 Jahre

**Tabelle A- 1: Zusammenstellung Kosten / Frachtreduktion für mögliche Maßnahmeoptionen**

Es werden nur Maßnahmen dargestellt, die in den vorherigen Kapiteln näher betrachtet wurden.

Maßnahme	Art der Maßnahmen	ca.- Kosten Investitionen (Fix) Mio. €	ca.-Kosten Betriebskosten (Var) Mio. €/a	Kosten 20 Jahre, Mio. € (= ca. Barwert ∞)	Einschätzung Wirkung (In Klammern: Alternativeinschätzung)	Sonstige Hinweise	Ersteinschätzung* Verhältnismäßigkeit Frachtreduktion/Kosten	Generelle Einschätzung
<b>Keine Maßnahme</b>	Unkontrolliertes Überlassen der Natur	(keine)	(keine)	(keine)	Gesamtfracht etwa unverändert oder höher (Restfracht ca. 100%)	Verschlechterung Zusätzliche Belastung „Süßer See“-„Böse Sieben“	Kaum gegeben	Nicht zielführend
<b>4 (Status quo)</b>	Erhalt jetziger Zustand und Fortführung Monitoring	2,5	1	22,5	Restfracht ca. 100% W1 = 0%, W2 <sub>Saale</sub> = 45%, W2 <sub>Schlenze</sub> = 32%	Leicht umsetzbar, Keine Verschlechterung	Sehr schlecht 0%/22,5 M€	umsetzbar überschaubare Risiken, verhältnismäßig
<b>1-1-1/1-1-2</b>	Schadstoffentfernung (Bergbau)	Sehr hoch	Sehr hoch	> 1000	Verschlechterung möglich Langfristig ggf. verbessert	Nicht umsetzbar	Entfällt	Nicht zielführend und umsetzbar
<b>1-2-1</b>	Vollversatz	Sehr hoch	Sehr hoch	> 1000	Schwer abschätzbar	Nicht umsetzbar	Entfällt	Nicht zielführend und umsetzbar
<b>1-2-2c</b>	Hydrodynamischer Einschluss mit Wasseraufbereitung	28	38,75	> . 800	Restfracht 50%(-75%) W1=50% (25%) W2 <sub>Saale</sub> = 66% (54%) W2 <sub>Schlenze</sub> = 65% (43%)	Erhebliche Umsetzungsrisiken Kostenrisiken	Sehr schlecht 50%/>800 M€	keine Vorzugsoption
<b>2-1-1b</b>	Hydraulische Immobilisierung: Dammbauwerke +Stollensystem+ +Streckenabdichtung	32,5	1,2	56,5	Restfracht 75% W1=25% W2 <sub>Saale</sub> = 54% W2 <sub>Schlenze</sub> = 43%	Erhebliche Umsetzungsrisiken Kostenrisiken	Schlecht 25%/56,5 M€	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>2-1-1c</b>	Hydraulische Immobilisierung: Rohrleitung +Stollensystem +Abdichtungsbauwerk	48,5	1	68,5	Restfracht 75% W1=25% W2 <sub>Saale</sub> = 54% W2 <sub>Schlenze</sub> = 43%	Erhebliche Umsetzungsrisiken, Kostenrisiken	Schlecht 25%/68,5 M€)	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>2-1-2a</b>	Chemische Immobilisierung: Verwahrung offener Schächte	4	0,6	16	Restfracht (75%-) 87,5% W1=12,5% (25%) W2 <sub>Saale</sub> = 49% (54%) W2 <sub>Schlenze</sub> = 37% (43%)	Geringe Genehmigungsrisiken	Vielleicht verhältnismäßig 12,5%/16 M€	Verbleibt Option, da überschaubare Risiken
<b>2-1-2b</b>	Chemische Immobilisierung: Erhöhung des ph-Wertes	11	3,6	83	Restfracht 75% W1=25% W2 <sub>Saale</sub> = 54% W2 <sub>Schlenze</sub> = 43%	Erhebliche Umsetzungsrisiken, Genehmigungsrisiken, Kostenrisiken	Schlecht 25%/83M€	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>2-2-1</b>	Verringerung Lösungstransport + Offenhalten System	81	1	101	Restfracht (75%-) 87,5% W1=12,5% (25%) W2 <sub>Saale</sub> = 49% (54%) W2 <sub>Schlenze</sub> = 37% (43%)	Erhebliche Umsetzungsrisiken Kostenrisiken	Schlecht 12,5%/101 M€	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>2-2-2a</b>	Verringerung Feststofftransport Sedimentfalle + Kombination 2-1-2a	4,2	0,7	18, 2	Restfracht ca. 86,5% W1=13,5% W2 <sub>Saale</sub> = 49% W2 <sub>Schlenze</sub> = 38%	Geringe Genehmigungsrisiken	Vielleicht verhältnismäßig 13,5%/18,5 M€ Ggf. besser	Verbleibt Option, da überschaubare Risiken

Fortsetzung Tabelle A-1: Zusammenstellung Kosten / Frachtreduktion für mögliche Maßnahmeoptionen

Maßnahme	Art der Maßnahmen	Ca.- Kosten (Fix) Mio. €	Ca.-Kosten (Var) Mio. €/a	Kosten 20 Jahre	Einschätzung Wirkung	Sonstige Hinweise	Ersteinschätzung* Verhältnismäßigkeit Frachtreduktion/Kosten	Generelle Einschätzung
<b>2-2-2b</b>	Biobeet + Kombination 2-1-2a	7	1,6	39	Restfracht ca. 85% W1 <sub>Saale</sub> = 12,5% + 5% W2 <sub>Saale</sub> = 43% W1 <sub>Schlenze</sub> = 12,5% + 0% W2 <sub>Schlenze</sub> = 34%	Umsetzungsrisiken Kostenrisiken	Schlecht 15%/39 M€	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>3-1</b>	Ex-Situ Anlagentechnik: Kombiniert mit 2-1-2a	14	38,4	> 780	Restfracht ca. (25%-) 5% W1=95% W2 <sub>Saale</sub> = 100% W2 <sub>Schlenze</sub> = 100%	Erhebliche Umsetzungsrisiken	Schlecht (bis sehr schlecht) <25%/>780 M€	keine Vorzugsoption, da viele Risiken
<b>3-2</b>	In-Situ Behandlung: Wie 2-1-2b	11	3,6	83	Restfracht 75% W1=25% W2 <sub>Saale</sub> = 54% W2 <sub>Schlenze</sub> = 43%	Erhebliche Umsetzungsrisiken, Genehmigungsrisiken, Kostenrisiken	Schlecht 25%/83M€	keine Vorzugsoption, da sehr viele Risiken
<b>3-3a</b>	Ableitung in Schlenze (Vergleichbar Status Quo)	2,5	1	22,5	Restfracht ca. 100% W1 = 0%, W2 <sub>Saale</sub> = 45%, W2 <sub>Schlenze</sub> = 32%	Leicht umsetzbar, Keine Verschlechterung	Sehr schlecht 0% /22,5 M€	umsetzbar, überschaubare Risiken, wirtschaftlich verhältnismäßig
<b>3-3b</b>	Ableitung (Rohrleitung) zur Saale (zusätzlich zu Status quo 3-3a)	5,8	1,2	29,8	Restfracht ca. 100% W1 = 0%, W2 <sub>Saale</sub> = 45%, W2 <sub>Schlenze</sub> = 100%	Geringe Umsetzungsrisiken Genehmigungsrisiken	Sehr schlecht 0%/29,8 M€	verbleibt als Zusatzoption, da überschaubare Risiken

\* Verhältnismäßigkeit Frachtreduktion / Kosten zur Orientierung: > 0,5% / Mio. € vielleicht verhältnismäßig; 0,1-0,5% / Mio. € schlecht <0,1% / Mio. € sehr schlecht;

**Tabelle A- 2: Vergleichende Gegenüberstellung Umwelteinflüsse (der Maßnahme selbst)**

Maßn. Nr.	Land-schafts-bild *1)	Lebens-raum-qualität *2)	Gefahr Remobili-sierung *3)	Entsor-gung *4)	Wohl der Allgemei-heit *5)	Nachhaltig-keit *6)	Summarische Bewertung Umwelt-verträglichkeit
1-1	-	-	-	-	+	-	negative Einflüsse überwiegen
1-2-2c	-	0	+	-	+	-	eher negative Einflüsse
2-1-1b /c	+ /-	+	0	+	0	-	einige negative Einflüsse
2-1-2a	+	+	0	+	0	0	kaum negative Einflüsse
2-1-2b	0	0	0	0	0	-	eher negative Einflüsse
2-2-1	+	0	0	+	0	-	einige negative Einflüsse
2-2-2	+	+	0	0	0	0	wenig negative Einflüsse
3-1	-	0	+	-	+	-	eher negative Einflüsse
3-2	0	0	0	+	0	0	einige negative Einflüsse
3-3a	+	0	0	+	0	0	wenig negative Einflüsse
3-3b	0	0	0	+	0	0	einige negative Einflüsse
4	+	+	0	+	0	-	wenig negative Einflüsse

Es werden nur Maßnahmen dargestellt, die in den vorherigen Kapiteln näher betrachtet wurden.

**Legende zu Tabelle A-2**

\*1) Beeinträchtigung des Landschaftsbildes:

keine: +  
 gering: 0  
 hoch: -

\*2) Beeinträchtigung der Lebensraumqualität:

keine: +  
 gering: 0  
 hoch: -

\*3) Gefahr einer Remobilisierung von Schadstoffen:

keine: +  
 gegeben: 0  
 hoch: -

\*4) Notwendigkeit der Entsorgung:

nein: +  
 unsicher 0  
 ja: -

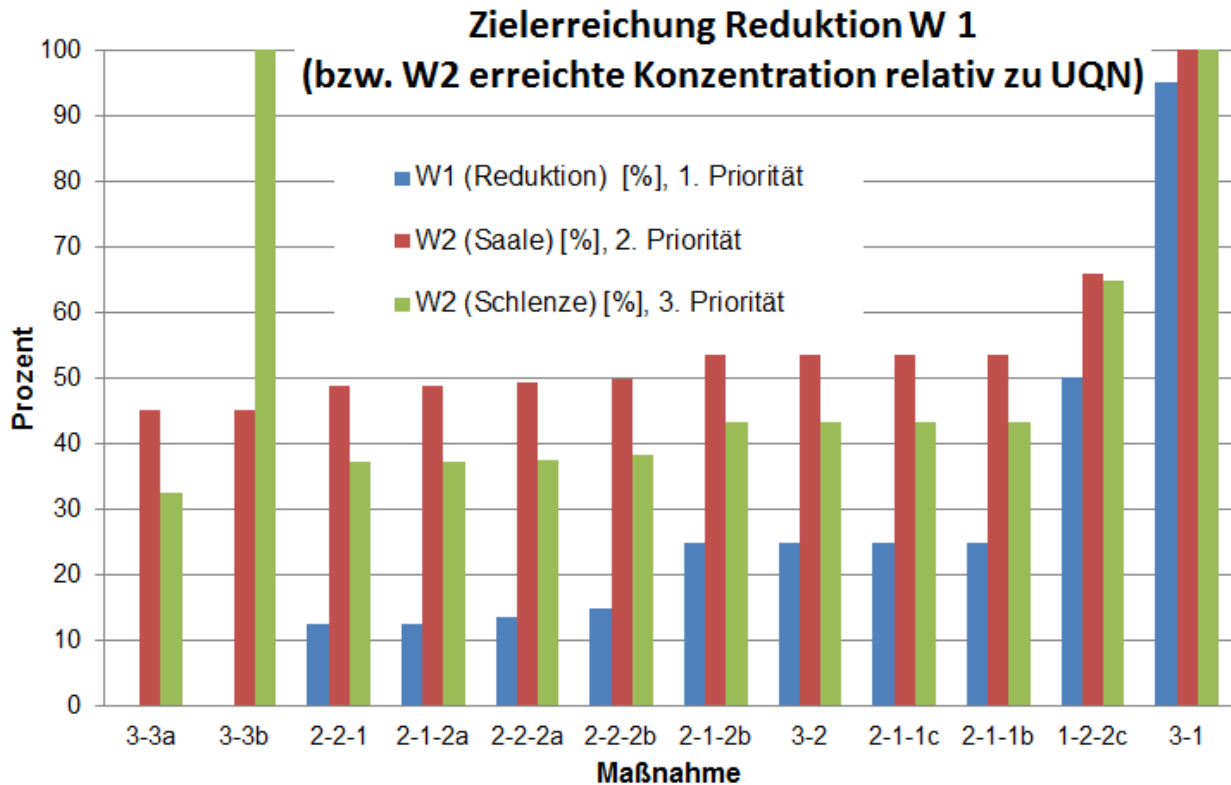
\*5) Verbesserung des Wohls der Allgemeinheit:

nein, eher Verschlechterung: -  
 nein, keine Änderung: 0  
 ja: +

\*6) Einschätzung der Nachhaltigkeit:

keine: -  
 nicht absehbar: 0  
 ja: +

Folgerungen (aus nicht monetärer Betrachtung):



**Abbildung A- 3: Zielerfüllung W1, W2<sub>Saale</sub> und W2<sub>Schlenze</sub>, nicht monetäre Betrachtung. (sortiert - je weiter rechts desto besser)**

Aus Abbildung A-3 wird ersichtlich, dass auch die Verfahren mit Wasseraufbereitungsanlagen (1-2-2c und 3-1), die Ziele nicht ganz erreichen können.

Aus Tabelle A-2 wird ersichtlich, dass Wasseraufbereitungsanlagen mit negativen Nebenwirkungen verbunden sind. Keine bzw. wenig (zusätzliche) Nebenwirkungen haben insbesondere die Maßnahmen zur Schachtverwahrung (1-2-2c), sowie die eher passiven Maßnahmen wie Sedimentfalle (2-2-2) oder Ableitung (3-1).

Folgerungen (bei zusätzlich monetärer Betrachtung):

Bei Hinzuziehung von Kosten (Abbildung A-4) wird deutlich, dass gerade die Wasseraufbereitungsanlagen mit sehr hohen Kosten verbunden sind.

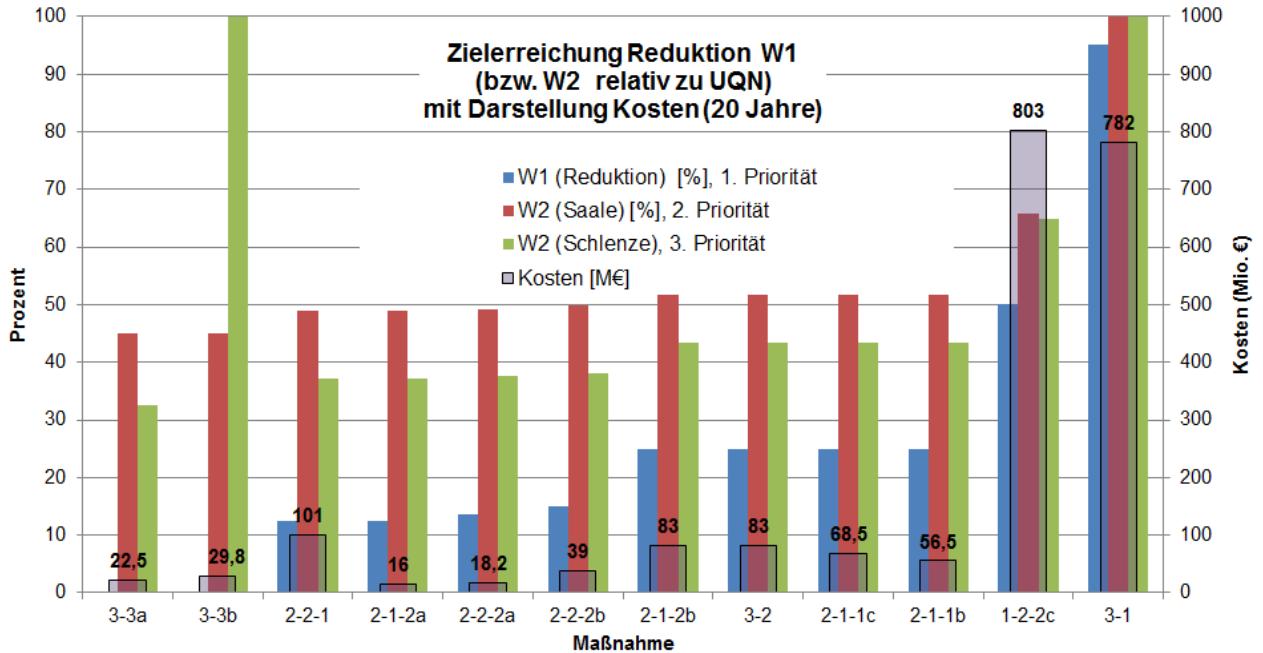


Abbildung A- 4: Zielerreichung und damit verbundenen Kosten.

Werden die Zielerreichungen ins Verhältnis der Kosten gesetzt und die Maßnahmen nach diesem Kriterium sortiert, so erscheint eine deutlich andere Rangfolge, wie dies Abbildung A-5 zeigt:

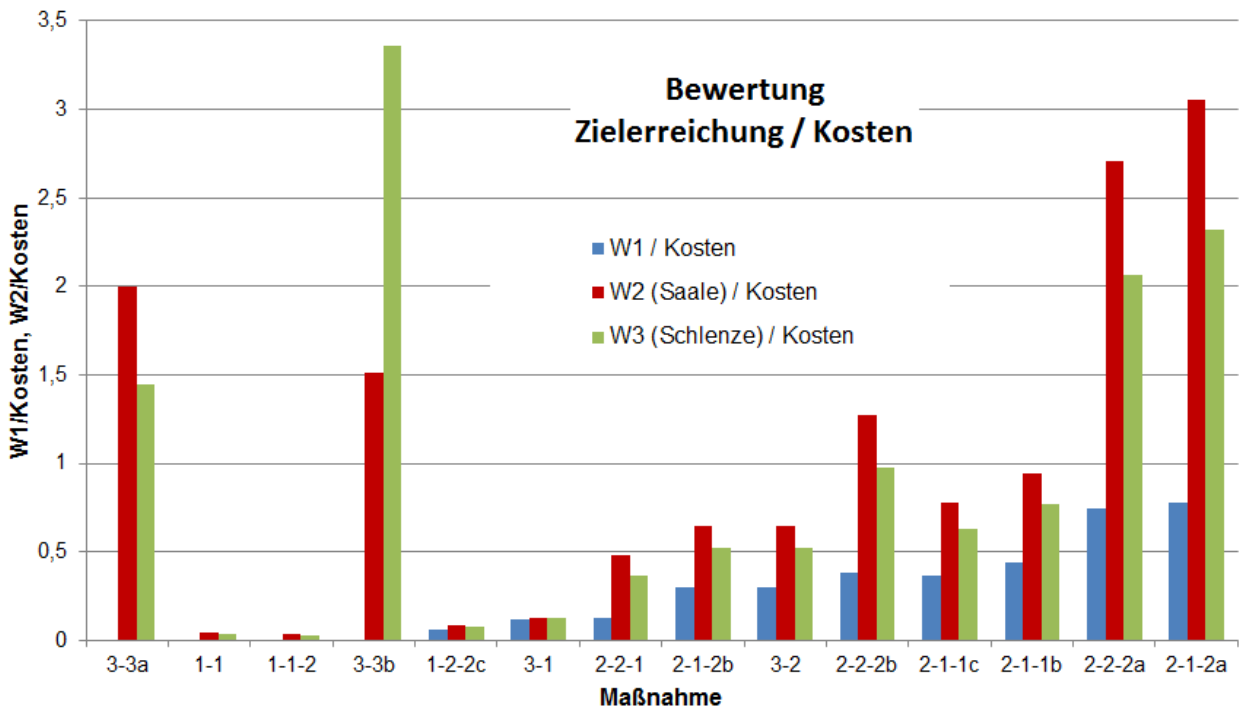
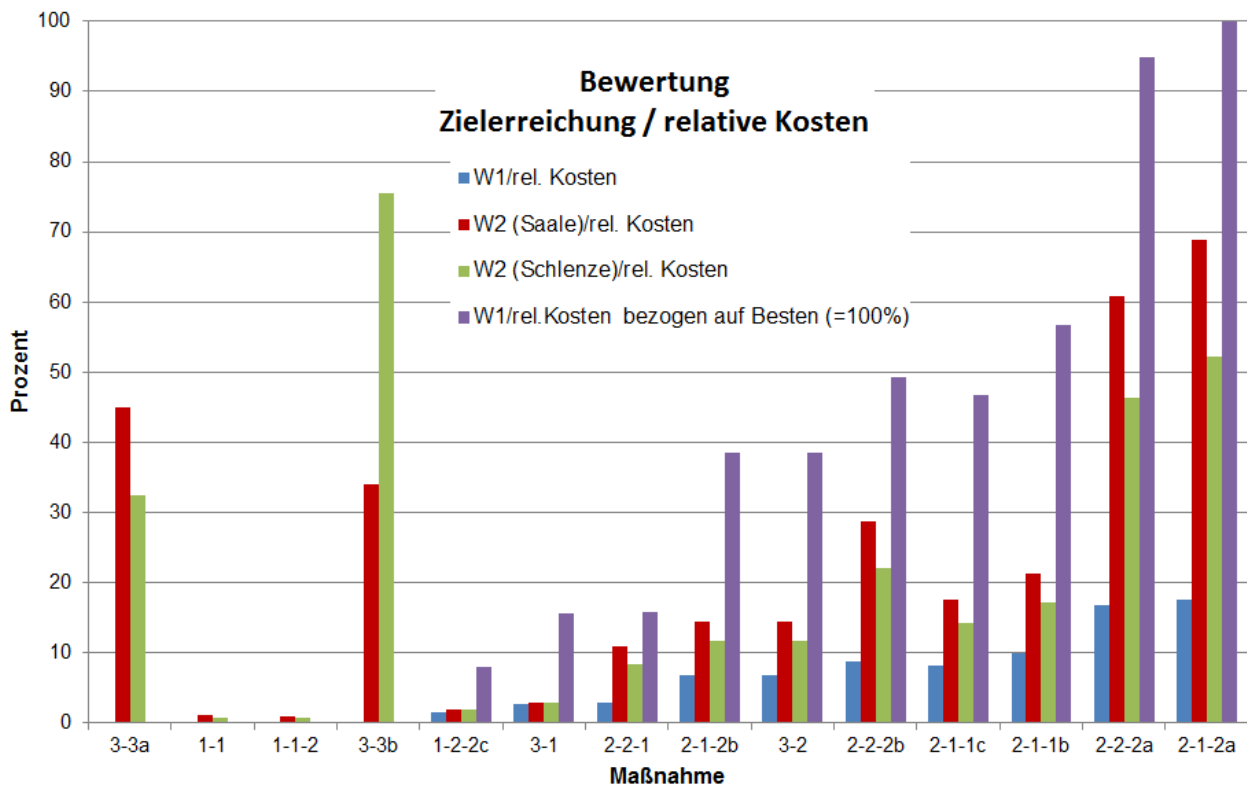


Abbildung A- 5: Zielerreichung bezogen auf die dazugehörigen Kosten

Es zeigt sich, dass die Wasseraufbereitungsmaßnahmen hinsichtlich gewichteter Zielerreichung als deutlich ineffektiver bewertet werden müssen, während die Maßnahmen mit passiven Reduktionsmaßnahmen (z. B. Sauerstoffunterbindung mit Schachtverwahrung (Variante 2-1-2a), Sedimentfalle (Variante 2-2-2a), Hydraulische Abdämmmaßnahmen) günstiger bewertet werden. Gleichzeitig verschieben sich - wie zu erwarten - die technisch unwirksamen Varianten (z. B. Erhalt des Status Quo, Variante 3-3a) auf die ungünstige Bewertung (ganz nach links).



**Abbildung A- 6: Zielerreichung, Dimensionslose Darstellung**

Dieser Zusammenhang wird noch deutlicher, wenn man dieses Verhältnis in den Bezug zur besten Maßnahme setzt. So wurden in Abbildung A-6 die Werte durch den Bezug auf die effizienteste Maßnahme (s. Abb. A-5) dimensionslos gemacht.

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass insbesondere die Maßnahmen 2-1 und 2-2 deutlich effizienter sind als die Maßnahmen 3-3a, 3-3b und 1-1 und die überdurchschnittlich aufwendigen Maßnahmen 1-2-2c und 3-1.

Berücksichtigt man zudem, dass hier nur der Aufwand für 20 Jahre betrachtet wird, dieser aber eigentlich ewig betrieben werden muss, dann wird das Nutzen-Aufwand-Verhältnis noch deutlich schlechter.

**Hieraus ergibt sich, dass es keine verhältnismäßigen Maßnahmen gibt, welche die mit den UQN geforderten Ziele erreichen.** Dies wiederum impliziert die Umsetzung der als sinnvoll und verhältnismäßig erkennbaren Maßnahmen 2-1-2a und 2-2-2a zusammen mit einer Anpassung der UQN an die erreichbaren Ziele.