

# Vom sauren Bergbausee zum Fischereigewässer mittels Inlake - Schiffstechnik

Denny Clauß<sup>1</sup>, Dr. Günter Scholz<sup>1</sup>, Wolfgang Rabe<sup>1</sup>, Lucas Günther<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MOVAB-D GmbH, Straße der Freundschaft 92, 02991 Lauta, E-Mail: [info@movab-d.de](mailto:info@movab-d.de)

Im Rahmen eines Pilotprojektes sollte aus dem seit Jahren sauren, ca. 30 ha umfassenden Restloch (RL) 122 Tröbitz, ein Fischereigewässer entstehen. Die Planung erfolgte im September 2009 auf der Grundlage von Probeuntersuchungen und Technikumsversuchen an der TU Bergakademie Freiberg.

Bei der Realisierung der Maßnahme „In-Lake Behandlung RL 122“ im November 2009 wurde als Verfahren die zweistufige Behandlung mit Anhebung des anfänglichen pH-Wertes von 3,1 auf ca. pH 5 mit Kalksteinmehl und die weitere Anhebung bis  $\text{pH} \geq 7$  mit Kalkhydrat bei Eintrag der Einsatzstoffe in suspensierter Form durch ein international erprobtes schwedisches Sanierungsschiff angewandt.

Mit der innovativen Methode erreichte man einen pH- Wertanstieg von ca. 3 auf ca. 8,5, eine weitgehende Ausfällung der gelösten Metalle sowie einen merklichen Pufferaufbau in nur drei Tagen.

Die hier vorgestellte Behandlung des RL Tröbitz zeigt, dass es möglich ist, auf einfache, wirksame und ökologisch unbedenkliche Weise, saure Seen in biologisch aktive und für die Fischerei nutzbare Gewässer in kürzester Zeit zu überführen.

In context of a pilot project, the mining lake (RL) 122 Tröbitz, 30 hectares wide and acidic for years, was ought to be transformed into a fishery. The strategy was developed in September 2009, based on samples and experiments during technical course at the technical university Bergakademie Freiberg (Germany).

Putting the project „In-Lake treatment RL 122“ into practice in November 2009, a two-step treatment was applied. The first step: rising the primarily pH-values from 3,1 to ca. 5 using powdered limestone. In the next step, the pH values should have been raised to  $\geq 7$ , using lime hydrate. The suspended substances were inserted by an internationally tested swedish lake-liming-ship.

Using this innovative method, the pH-values could have been raised up to 8,5, an extensive precipitation of the dissolved heavy metals was achieved, as well as the constitution of a noticeable buffer within only three days.

The presented treatment of the mining lake Tröbitz shows an easy, effective and ecologically harmless possibility, to transform acidic lakes into biologically active waters, which are available for fishing, in a very short time.

## 1 Einführung

Die Mittel- und Ostdeutschen Braunkohlenreviere bestimmen seit vielen Jahrzehnten das Bild der hiesigen Regionen. Viele der Tagebaurestlöcher verwandelten sich seit ihrer Stilllegung durch Flutung und ansteigendes Grundwasser in stark mineralisierte und saure Seen, die es zu sanieren gilt. Für die Nachnutzung der Bergbaufolgeseen ist das Erreichen einer den Nutzungszielen entsprechenden Wasserbeschaffenheit entscheidend. Die günstigste Lösung zur Neutralisation saurer Tagebaufolgeseen (TFS) stellt nach wie vor die Zuführung von Oberflächenwasser dar. Diese ist aber manchmal nicht in ausreichenden Mengen vorhanden, so dass andere Möglichkeiten der Gewässersanierung benutzt wer-

den müssen. Grubenwasserreinigungsanlagen (GWRA) sind aus Kostengründen für eine Seeneutralisation nicht geeignet (Bahl et al. 2007). Das Einbringen von Kalkprodukten per Hubschrauber, wie es in Schweden bzw. zur Kalkung von Wäldern auch in Deutschland gehandhabt wird, ist für die Seeneutralisation aus Kosten- und Umweltschutzgründen nur in Ausnahmesituationen möglich.

Als praktikabel, umweltverträglich und wirtschaftlich vorteilhaft hat sich die so genannte Inlake-Schiffstechnik erwiesen.

## 2 Inlake-Schiffstechnik

### 2.1 Vorteile

Bei der Inlake- Schiffstechnik wird das Neutralisationsmittel in suspensierter Form per Schiff auf der Wasseroberfläche eines Sees verteilt. Dabei ergeben sich grundlegende Vorteile:

- Großflächige Verteilung des jeweils gewählten alkalischen feinkörnigen/flüssigen Stoffes auf der Seeoberfläche,
- Mögliche Nutzung der windinduzierten Strömungen im See zur Erfassung großer Seevolumina als Reaktionsraum,
- Steuerung der Stoffkonzentration des jeweils eingesetzten alkalischen Stoffes entsprechend seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften (Reaktivität, Kornzusammensetzung) und der konkret vorliegenden Wasserqualität durch spezielle Eintragsvorrichtungen und ein spezielles Monitoringsystem,
- Kein aufwändiger Bau von Einsatzstellen, Siloanlagen und stationären Einrichtungen erforderlich.

Der mit der kostenlosen Windenergie so geschaffene „Rührkessel-Mechanismus“ stellt das Hauptmerkmal für die hohe Wirtschaftlichkeit des Verfahrens dar. Die Kosten für die Neutralisierung je Kubikmeter Seewasser sind im Vergleich zu anderen Verfahren günstiger.

### 2.2 Anwendbarkeit schwedischer Erfahrungen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Seen in Schweden, Norwegen und Finnland, die seit mehr als 30 Jahren erfolgreich mittels unterschiedlicher Applikationstechnologien (Schiffe, Hubschrauber, Aufbringen auf Eis, etc.) neutralisiert werden und Tagebaurestgewässern in Deutschland, liegt in der Zufuhr der Säure und dem Gesamtchemismus der Wässer. Während in Nordeuropa der Eintrag des Säurepotentials über den Niederschlag in Form von  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{HNO}_3$  erfolgt, geschieht dies bei Bergbaurestseen über das Grundwasser aus dem Anstehenden oder den Kippenbereichen und in geringem Maße über den Eintrag von Sediment im Wellenschlagbereich der Küstenlinien. Das Säurepotential entfaltet sich bei Tagebaurestseen einerseits aus  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (kein  $\text{HNO}_3$ ) und andererseits aus einem erheblichen Anteil  $\text{Fe}^{2+}$ . Beide Komponenten stammen aus der Pyritverwitterung.

Da es sich sowohl bei den nordeuropäischen Seen als auch den Bergbaurestseen in Sachsen, Brandenburg und Mitteldeutschland um dimiktische Seen handelt, werden diese zwei mal im Jahr komplett durchmischt. Die Frage, woher der Säureeintrag erfolgt, ist also nur von akademischem Interesse, denn durch die zweimalige Durchmischung pro Jahr werden jegliche Schichtungen aufgehoben.

Es gibt keinerlei Hinweise darauf, dass sich in den Restseen der Lausitz eine stabile Dichteschichtung ausbilden kann, die eine dimiktische Durchmischung verhindern könnte.

Deutliche Unterschiede bestehen hinsichtlich des Chemismus: die schwedischen Seen sind gering mineralisiert (in der Regel Leitfähigkeit  $< 300 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), die Bergbaurestseen weisen dagegen eine Leitfähigkeit um  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$  auf. Ferner sind die nordeuropäischen Seen schwach sauer ( $\text{pH} \sim 5$ ), während pH-Werte von  $< 3$  der Bergbaufolgeseen der Lausitz keine Seltenheit darstellen. Generell ist somit klar, dass für die Behandlung von sauren Bergbaurestseen spezifisch mehr Neutralisationsmittel eingesetzt werden muss. Hinsichtlich der Reaktionskinetik sind die Bedingungen in stark sauren Seen günstiger wegen der besseren Reaktivität des Neutralisationsmittels bei niedrigem pH-Wert. Dies ist unbestritten, da die Carbonatlösungskinetik wissenschaftlich sehr gut untersucht und beschrieben wurde (Busenberg & Plummer 1982).

## 2.3 Technik

Zum Einsatz kam der in Schweden mehrfach erprobte Schiffstyp BRAHE. Mit mehreren hundert Einsätzen pro Jahr im Verlaufe der letzten 15 Jahre konnte man davon ausgehen, dass sowohl eine ausgereifte und zuverlässige Technik als auch erfahrenes Bedienungspersonal für die Behandlung des RL 122 Tröbitz zur Verfügung stand. Die Schiffseinheit wurde per Straßentransport an das Ufer des Sees transportiert und konnte dank seines mobilen Unterbaus auch an schwierigen Uferstellen gewässert werden. Um eine schnelle Umsetzbarkeit der Schiffe über Land zu anderen Sanierungsbereichen und große Aktionsradien zu ermöglichen, ist die Gesamtanlage mobil und zugelassen für den Straßenverkehr. Die Einrichtung besteht im Wesentlichen aus einem Transport- LKW, einem Trailer und dem Hauptfunktionsteil, dem Sanierungsschiff. Die Gesamtmasse der Einrichtung beträgt ca. 25 t (ohne Bunkerfüllung des Sanierungsschiffes). Der Transport- LKW ist speziell umgerüstet für die schnelle Umsetzung der mobilen Inlake- Sanierungseinrichtung. Für den Straßentransport nimmt er den Trailer mit dem darauf befestigten Sanierungsschiff „Huckepack“. Am Einsatzort wird der Trailer mit dem Sanierungsschiff über die am LKW integrierte hydraulische Lifteinrichtung be- und entladen. Der Trailer dient der Beförderung des Sanierungsschiffes vom LKW zum Wasser, dem zu Wasser lassen und dem Anlanden. Der Vorteil dieser Technik besteht darin, dass der Trailer (Abb. 1) auf Grund seiner Bauweise (Ballonreifen) auch auf unwegsamstem Gelände mit Hilfe einer Fernbedienung bis ins Wasser frei beweglich ist. Das Sanierungsschiff kann dann problemlos vom Trailer aus entkoppelt werden.



**Abb. 1: Trailer mit Sanierungsschiff beim Wässern**



**Abb. 2: Sanierungsschiff auf dem RL 122 Tröbitz im Verteilbetrieb**

Das Sanierungsschiff ist der funktionelle Hauptteil der mobilen Sanierungseinrichtung. Es dient der vorgegebenen gesteuerten Bewegung der Verteileinrichtung über das Gewässer und der dosierten Ausbringung des Neutralisierungsmittels (Abb. 2).

Das Schiff besitzt folgende technische Daten:

- Länge / Breite / Höhe mit LKW: 8,50 m / 3,10 m / 4,20 m
- Geschwindigkeit: 11 km/h
- Leergewicht: 7,5 t
- Beladungsvolumen: max. 11,0 m<sup>3</sup>
- Ausbringkapazität: 7000 l Suspension/min
- Ausbringkapazität: max. 1,5 m<sup>3</sup> Kalk/min
- Der Schiffskörper besteht aus Aluminium

Der 210 PS starke Dieselmotor treibt insgesamt 5 VOLVO- Hydraulikmotoren (Pumpen) an. Diese Pumpen sind verbunden mit Hydrostatgetrieben und dienen als Antrieb für alle an Bord befindlichen Bauelemente wie z.B. für die Suspensionsherstellung genutzten Wasserpumpen, dem Schneckenförderer zur Kalkzumischung, der Misch- und Dosiereinrichtung und der Steuerung der Verteilerdüsen der Neutralisierungssuspension, der Schiffsschraube sowie der Radantriebe des Trailers und die Generatoreinrichtung zur Stromversorgung. In der Kabine befinden sich die gesamte Steuerungs-, Überwachungs- und Aufzeichnungstechnik, wie Schaltanlagen, hydraulische Regeleinrichtungen für Schiffs- und Pumpenantriebe, Dosiereinrichtungen usw., der Bordcomputer für Steuerungs-, Aufzeichnungs- und Überwachungsaufgaben, das GPS-System für die Nachweisführung der befahrenen/bekalkten Fläche und Bordtelefon. Das aus dem See angesaugte Wasser und der über Schneckenförderer und Rohrleitung zugeführte Kalk aus dem Kalkbunker im Rumpf werden gemischt und dann über zwei bzw. vier Strahlrohre (Sprühdüsen) dosiert auf die Oberfläche des Sees ausgebracht.

Zur Bewegung des Sanierungsschiffes dient eine Schiffsschraube (Propeller), die horizontal um 360° drehbar ist und damit gleichzeitig als Steuerruder für die Vorwärts-, Seitwärts und Rückwärtsfahrt dient. Schraube und Ruder werden ebenfalls hydraulisch angetrieben. Die Antriebseinheit ist am Heck außenbordseitig angebracht und für den Transport, Wassern und Anlanden vertikal justierbar.

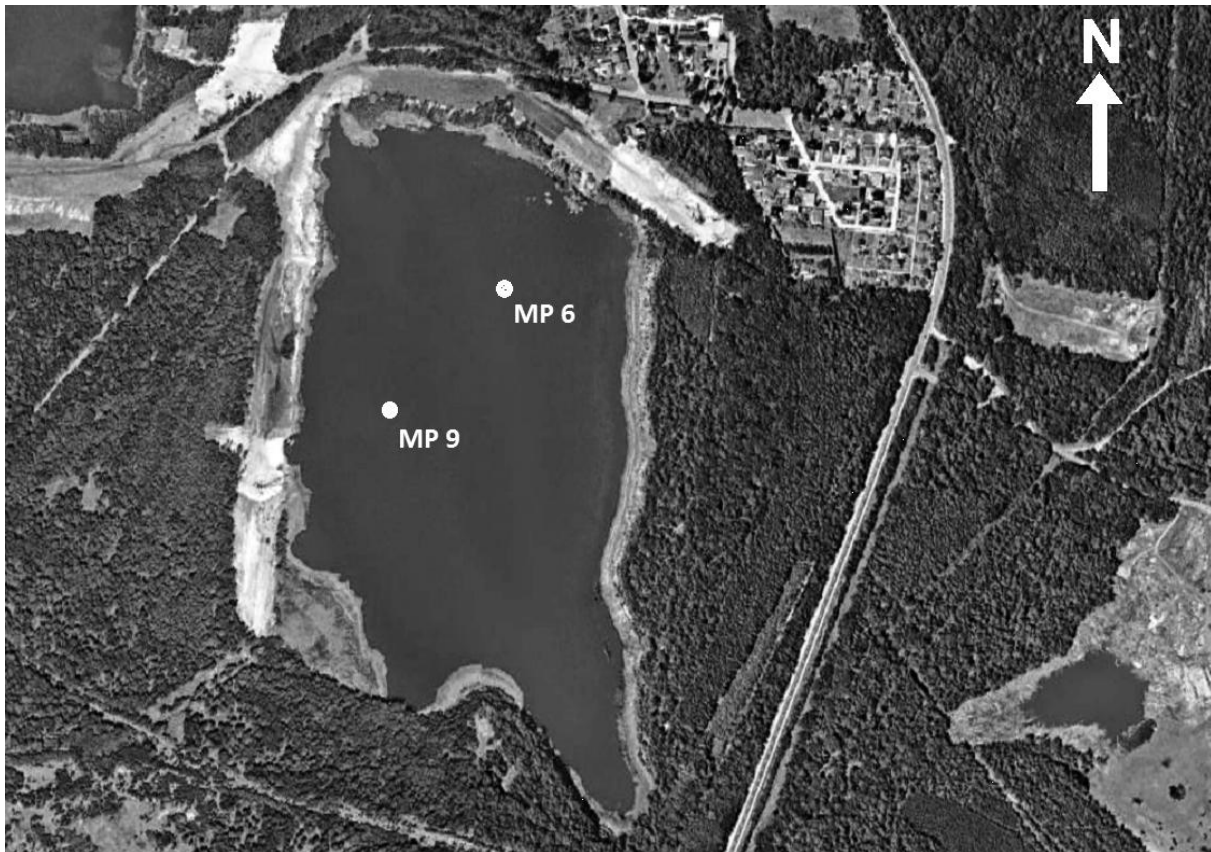
### 3 Planung und Durchführung

#### 3.1 Ausgangssituation

Das Restloch (RL) 122 Tröbitz (Abb. 3) befindet sich südlich der Ortslage Tröbitz im Landkreis Elbe-Elster und entstand im Tagebau der Grube Louise, der im Zeitraum 1923 bis 1940 betrieben wurde. Bis 1992 wurde das RL 122 als industrielle Absetzanlage für Kohletrübe aus umliegenden Brikettfabriken genutzt. Nach der Außerbetriebnahme 1959 stieg der Grundwasserspiegel wieder an. Seit etwa 1970 ist der Grundwasserwiederanstieg abgeschlossen und es entstand eine ca. 30 ha große Wasserfläche mit einer Ausdehnung von ca. 900 m in Nord-Südrichtung und von ca. 400 m in West-Ostrichtung. Das RL 122 ist zu- und abflusslos. Wasserstandsschwankungen sind meteorologisch bedingt. Verbindliche Aussagen zu Grundwasserzu- und Abfluss und zu Grundwasserqualitäten liegen nicht vor. Im Jahr 2005 erfolgte der Kauf durch die Teichwirtschaft Hammermühle von der LMBV im sauren Zustand. Mehrere Messungen an verschiedenen Probenahmestellen im See zeigten, dass der Wasserkörper des RL 122 relativ einheitlich war. Das Wasser wies einen niedrigen pH-Wert sowie hohe Metallionenkonzentrationen und eine hohe Leitfähigkeit auf. Mit einem  $K_{b4,3}$ -Wert von 1,2 bis 1,3 mmol/l und einem  $K_{b8,2}$ -Wert von 2,2 bis 2,4 mmol/l bei einem pH-Wert von 3,1 bis 3,2 war es stark sauer. Tab. 1 beschreibt wichtige Parameter an zwei beliebigen Messstellen im See.

**Tab. 1: Wesentliche Parameter des Wassers des RL 122 Tröbitz**

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>MP 6</i>	<i>MP 9</i>
pH-Wert	[]	3.18 (12.3°C)	3.22 (13.6°C)
$K_{b4,3}$ -Wert	[mmol/l]	1.20	1.15
$K_{b8,2}$ -Wert	[mmol/l]	2.35	2.31
Eisen gelöst	[mg/l]	8.19	8.16
Aluminium	[mg/l]	8.22	8.27
<b>Calcium</b>	[mg/l]	287	279



**Abb. 3:** Luftbild RL 122 Tröbitz aus Google Earth 2009. Ziel der geplanten Sanierung des RL 122 Tröbitz war es, im Rahmen eines Pilotprojektes aus dem seit Jahren sauren Bergausee ein Fischereigewässer zu entwickeln.

### 3.2 Einsatzstoffe für die Neutralisation

Für die Seesanieung kamen spezielle feinkörnige Kalkprodukte in Form von Kalksteinmehl (KSM) und Kalkhydrat (KH) vom Kalkwerk Dresden zum Einsatz, die maximal einen Korndurchmesser von 0,09 mm aufwiesen. Die Ermittlung der Einsatzstoffmengen erfolgte in Form einer Modellierung auf Basis der im Labor ermittelten Wasserbeschaffenheit sowie auf der Grundlage von Voruntersuchungen im Technikum. Im Ergebnis der vorlaufenden Untersuchungen wurde für eine pH- Wertanhebung von ca. 3,2 auf pH 5 eine Kalksteinmehlmenge von 150 bis 200 t abgeschätzt. Für eine weitere pH-Wertanhebung auf  $\geq 7$  ergab sich eine erforderliche Kalkhydratmenge von 50 bis 75 t. Unsicherheiten bestanden bei der tatsächlichen Seewassermenge, dem Sedimenteinfluss sowie dem erreichbaren Wirkungsgrad bei den Löse-, Neutralisations- und Fällungsreaktionen im RL Tröbitz auf Grund der relativ geringen Wassertiefe.

### 3.3 Verfahrensdurchführung

Für eine effektive Verteilung der Einsatzstoffe kam ein international erprobtes Sanierungsschiff zum Einsatz. Hauptaufgabe des Sanierungsschiffes ist die möglichst großflächige Verteilung von Neutralisierungsmitteln in einem kurzen Zeitraum in sauren Gewässern zur Anhebung des pH-Wertes und Ausfällung von Metallionen. Als Verfahren wurde die zweistufige Behandlung mit Anhebung des pH-Wertes auf ca. pH 5 mit Kalksteinmehl und die weitere Anhebung bis  $\text{pH} \geq 7$  mit Kalkhydrat bei Eintrag der Einsatzstoffe in suspensierter Form angewandt.

Das Sanierungsschiff wurde jeweils für die einzelnen Austragsfahrten mit einer Kalksteinmehlmenge von ca. 10 t bzw. einer Kalkhydratmenge von ca. 4 t befüllt. Im Fall des Einsatzes von Kalkhydrat verringern sich diese Mengenwerte auf Grund der geringeren spezifischen Dichte auf etwa das 0,4-fache.

Die Fahrgeschwindigkeit des Schiffes wurde auf 3 - 5 km/h eingestellt. Aus dem Kalkvorratsbehälter erfolgt mittels kalibrierter Förderschnecken ein Einsatzstoffaustrag. Diese Kalkmenge wurde mit ca. 420 m<sup>3</sup> Seewasser/h zu einer Suspension vermischt. Die Verteilbreite der speziellen Verteildüsen mit gleichmäßiger flächenhafter Ausbringung der an Bord erzeugten Suspension in Fahrtrichtung betrug ca. 50 m.

Eine ca. 30 m lange Schlauchleitung ermöglichte mittels pneumatischer Transportausrüstung des Silofahrzeugs die Beladung der erforderlichen Neutralisationsmengen in den Bunker des Sanierungsschiffes. In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 4) sind die Fahrspuren des Sanierungsschiffes für die einzelnen Tracks am 14.11.09, die eine gleichmäßige Verteilung der Einsatzstoffe auf der Seeoberfläche belegen, wieder gegeben:



Abb. 4: GPS-Tracks des Sanierungsschiffes auf dem RL 122 Tröbitz am 14.11.2009

## 4 Ergebnisse

Begleitend zur Realisierung der Maßnahme erfolgte zur Sicherung und zum Nachweis des Sanierungserfolges ein intensives Monitoring mit Multiparametersonde zur Aufnahme von Tiefenprofilen sowie zusätzlich von Wasserprobenahmen und Analyse durch ein unabhängiges akkreditiertes Labor. Dabei kam ein engmaschiges GPS-basiertes Messnetz mit insgesamt 16 Messstellen zum Einsatz. Beispielhaft sind die Mittelwerte für den pH-Wert über die Tiefe an ausgewählten Messstellen im Projektablauf in der folgenden Tabelle (Tab. 2) zusammengestellt:

Tab. 2: Entwicklung der pH-Werte mit den Einsatzmengen im RL 122

Datum/Uhrzeit	KSM/KH in t	MP 1	MP 9	MP 13	MP 15
27.10.09, 12:30	0	3,28	3,25	3,26	3,29
12.11.09, 16:00	51/0	3,4	3,8	3,4	3,7
13.11.09, 10:30	205/0	4,1	4,9	5,2	5,1
16.11.09, 8:00	205/0	5,9	5,1	5,2	5,3
16.11.09, 12:00	205/68	5,8	7,8	5,4	5,7
<b>17.11.09, 9:30</b>	205/68	7,8	8,4	8,9	8,8

Aus Tabelle 2 ist erkennbar, dass es ohne Einsatzstoffeintrag vom 14.11. bis 16.11. früh infolge der erforderlichen Reaktionszeiten für die Ausfällung der Eisen- und Aluminiumhydroxide zu einem deutlichen pH- Wertanstieg kam. Bereits am 16.11.09 wurden nach Eintrag von 50 t Kalkhydrat pH-Werte von  $> 7$  im gesamten Seebereich gemessen. Am 17.11. lag der pH- Wert im Mittel bei 8,5. Das Eisen war bei pH 4,6 weitgehend ausgefällt.

**Tab. 3: Entwicklung der Analysewerte im RL 122 (Labor LWU)**

<i>Datum</i>	<i>pH</i>	<i>K<sub>b4,3</sub></i>	<i>K<sub>b8,2</sub></i>	<i>Eisen</i>	<i>Aluminium</i>	<i>Calcium</i>
		mmol/l	mmol/l	mg/l	mg/l	mg/l
13.11.09	3,2	1,2	2,3	8,2	8,2	280
14.11.09	4,6	0	1,1	0,04	6	310
<b>17.11.09</b>	7,8	-0,65	0	0,01	0,9	350

Aus Tab. 3 ist weiter ersichtlich, dass der Aluminiumgehalt im Ausgangszustand mit ca. 8 mg/l höher lag, als bei den bisher vorliegenden Messwerten. Am 16.11.09 war eine intensive Verteilung der Kalkhydrateinsatzmengen erforderlich, um den Aluminiumpuffer im pH- Bereich zwischen 4,5 und 6 zu durchfahren.

Der eingestellte Puffer gegen Wiederversauerung mit einem  $K_{b4,3}$ -Wert von -0,65 mmol/l liegt im oberen Bereich der bei stark mineralisierten Gewässern erreichbaren Werte von im Mittel -0,3 bis -0,6 mmol/l. Die Erhöhung der Calciumionenkonzentration im Wasserkörper infolge der Sanierungsmaßnahme mit Einsatzstoffsuspensionseintrag durch ein Sanierungsschiff bestätigt den guten erreichbaren Verfahrenswirkungsgrad von  $\geq 70\%$  auch bei Einsatz des Naturprodukts Kalksteinmehl.

Das Ausbringen des KSM wurde zu Beginn des Vorhabens so gestaltet, dass man Bereiche mit hoher Tiefe, damit hohem Volumen und hohem Aciditätspotential/Flächeneinheit, bis zu einem pH-Wert von ca. 4 überproportional beaufschlagt. Damit konnte das Absinken der Eisenhydroxidschlammengen in den Tiefenbereichen des Sees bewirkt und eine Uferverschmutzung mit EHS vermieden werden.

Das Füllen des Bunkers des Sanierungsschiffes erfolgte problemlos über eine Schlauchleitung mittels pneumatischer Transportausrüstung des Silofahrzeugs. Transportdistanzen von bis zu 50 m konnten problemlos überbrückt werden.

Das Projekt besaß Beispielcharakter und hat einen hohen wissenschaftlich- technischen Stellenwert, da eine Optimierung der Stoffauswahl sowie des Eintragsverfahren für die Behandlung derartiger, saurer Gewässer bisher nicht erfolgte und hierbei bedeutende wirtschaftliche Vorteile erschlossen werden können.

## 5 Zusammenfassung

Das Pilotprojekt für die Behandlung von sauren Tagebauseen mittels Sanierungsschiff sowie der Einsatzstoffkombination Kalksteinmehl und Kalkhydrat wurde mit der Initialneutralisation des RL 122 Tröbitz im Zeitraum vom 12.11.2009 bis 17.11. 2009 erfolgreich realisiert.

Im Ergebnis des Pilotprojektes erreichte man durch das innovative Verfahren im RL 122 Tröbitz mit einer Gewässerfläche von ca. 30 ha und einem Volumen von 1,1 Mio. m<sup>3</sup> saurem Seewasser durch den Eintrag von ca. 275 t Kalkprodukten (205 t Kalksteinmehl und 68 t Kalkhydrat) eine Erhöhung des pH-Wertes von etwa 3 auf einen pH-Wert von ca. 8 und die weitgehende Ausfällung von Schwermetallen wie Eisen und Aluminium, in nur drei Tagen. Den Puffer gegen Wiederversauerung stellte man auf einen  $K_{s4,3}$ -Wert von ca. 0,6 mmol/l ein.

Die in Anspruch genommenen Einsatzstoffmengen entsprachen in etwa den in Vorversuchen ermittelten und geplanten Neutralisationsmengen.

Infolge der erzielten Ergebnisse, können folgende Aussagen getroffen werden:

- Saure Tagebauseen mit einer bergbautypischen Wasserbeschaffenheit können mit der Inlake- Schiffstechnik effizient und schnell neutralisiert werden.

- Die zweistufige Neutralisation mit der Einsatzstoffkombination Kalksteinmehl im extrem sauren pH- Bereich von  $\leq 3$  bis ca. 4,5 sowie Kalkhydrat im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich von ca. 4,5 bis  $\geq 7$  in suspensierter Form ist machbar und wirtschaftlich vorteilhaft.
- Der überproportionale Kalksteinmehleintrag pro Flächeneinheit im extrem sauren Bereich bis pH 4 auf den Seebereichen mit den größten Tiefen und Volumen führte zu einem effektiven Schiffsbetrieb mit Ausfällung der gelbbraunen Eisen(III)Hydroxide in diesen Tiefenbereichen.
- Die breitflächige Einsatzstoffsuspensionsverteilung in den Flachwasserbereichen mit einer Tiefe von  $< 5$  m ist erst nach Schwermetallausfällung ab pH 4,5 bis 5 erforderlich (Einsatzstoffmenge für ca. 10 bis 20 % der Acidität).
- Das flexible mobile Sanierungsschiff mit Suspensionsherstellung an Bord und mit einem Lagervolumen von ca.  $10 \text{ m}^3$  erfordert nur geringe Einsatzstellenvorbereitungen.

Aktuelle Messungen zeigen den Trend einer gewissen Nachhaltigkeit. So lag der pH-Wert im April 2010 noch bei ca.  $> 7$  und der Säurepuffer  $K_{s4,3}$  bei ca.  $> 0,5$ .

Insgesamt kann aus dem Projektablauf im Nov 2009 abgeleitet werden, dass für die Seesanieung von sauren Seen mit definiertem Eintrag/Verteilung von Kalkprodukten mittels Sanierungsschiff eine neue, innovative Methode zur Verfügung steht. Das angewandte Verfahren mit Einsatz von speziellen Neutralisationsstoffen ermöglicht es, auf einfache, wirksame und ökologisch unbedenkliche Weise, saure, lebensfeindliche Seen in biologisch aktive und für die Fischerei nutzbare Gewässer in kürzester Zeit zu überführen.

## 6 Literatur

Bahl, T., Rieger, K. , Scholz, G. (2007): Wirtschaftlich effektive Verfahren zur Neutralisation saurer Tagebaurestseen. Workshop - Management bergbaubedingten Säurepotentials, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau TU Bergakademie Freiberg 22./23. Februar 2007

Busenberg, E. & Plummer, L.N. (1982): The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in  $\text{CO}_2$ -  $\text{H}_2\text{O}$  solutions between 0 and 90 °C, and an evaluation of the aqueous model for the system  $\text{CaCO}_3$ - $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6), 1011 – 1040