

# Erstmalige Neutralisation eines großen Tageausees durch In-Lake-Verfahren – Erste Erfahrungen zu Beginn der Nachsorgephase

Volker Neumann<sup>1</sup>, Claus Nitsche<sup>1</sup>, Bernd-Stephan Tienz<sup>2</sup> & Karl-Heinz Pokrandt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BGD GmbH Dresden, Tiergartenstr. 48, 01219 Dresden, Email: vneumann@bgd-gmbh.de

<sup>2</sup>LMBV GmbH, Walter-Köhn-Straße 2, 04356 Leipzig,

Der Bockwitzer See südlich Leipzig besitzt Anfang 2007 ein Volumen von fast 21 Mio. m<sup>3</sup> und eine Fläche von 1,8 km<sup>2</sup>. 2003/4 betrug der pH-Wert im Tageausee 2,7, die Konzentration an Gesamteisen 55 mg/L und die Acidität (K<sub>B 8,2</sub>-Wert) 8 mmol<sub>eq</sub>/L. Der Neutralisation des gesamten Sees (In-Lake-Verfahren) 2004-2006 wurde einer jahrzehntelangen Aufbereitung des in den Saubach auszuleitenden Überschusswassers der Vorzug gegeben, da eine Wiederversauerung des Sees nach der Neutralisation auf Grundlage modellgestützter Prognosen ausgeschlossen wurde. Die bislang unterschätzte Beteiligung der Sedimente bis > 20 cm Tiefe und der gegenüber bisherigen Annahmen wesentlich größere Zeitbedarf gelten unabhängig vom eingesetzten Neutralisationsmittel und sollten zukünftig als objekt-spezifische Bemessungsgrundlage bei In-Lake-Verfahren berücksichtigt werden. Aktuelle Erkenntnisse zu Beginn der nunmehr erforderlichen Nachsorgephase (Rehabilitation) 2007 verdeutlichen die Grenzen einer mit wirtschaftlich angemessenem Aufwand erreichbaren modellgestützten Prognose.

Lake Bockwitz in the south of Leipzig has a volume of nearly 21 Mio. m<sup>3</sup> and an area of ca. 1,8 km<sup>2</sup> at the beginning of 2007. The former open pit lake had an pH-value of 2,7, a total iron concentration of 55 mg/L and an acidity of 8 meq/L in 2003/4. An in-lake neutralisation was preferred to a long-term treatment of the excess water to be drained off into the brook Saubach with a common AMD treatment facility, because a re-acidification was excluded by model-based prognosis. The so far underestimated participation of sediments up to a depth of > 20 cm, and (in regard to former assumptions) a greater requirement of time are valid regardless of used neutralisation agents, and therefore ought to be used as a lake specific calculation parameter to be processed in future in-lake neutralisations. Actual findings at the beginning state of post-operative treatment becoming necessary elucidate the limits of a model-based prognosis gained by cost-effective effort.

## 1 Einleitung

Das infolge Grundwasserwiederanstieg geflutete Hauptrestloch des ehemaligen Braunkohletagebaus Bockwitz südlich Leipzig in Sachsen, der Bockwitzer See, besitzt Anfang 2007 ein Volumen von fast 20,9 Mio. m<sup>3</sup> und eine Fläche von 1,8 km<sup>2</sup>. Auf der Grundlage einer geohydraulischen Prognose werden nach Erreichen des Endwasserspiegels aus dem See langfristig im Mittel etwa 2,4 m<sup>3</sup>/min Überschusswasser in die Vorflut (Mordgrundbach → Saubach → Eula) eingeleitet. Die Genehmigung hierfür wurde behördlicherseits mit der Auflage verbunden, dass das ausgeleitete Wasser einen pH-Wert zwischen 6 und 8 und Gesamteisen-Konzentrationen von unter 3 mg/L aufweisen muss. Demgegenüber lag im See nach Erreichen von über neun Zehnteln des Endwasserspiegels 2003/4 ein pH-Wert von 2,7 und eine Gesamteisen-Konzentrationen von etwa 55 mg/L vor.

Modellgestützte Prognosen, die nach dem damaligen aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt wurden ergaben, dass eine Wiederversauerung des Sees nach erfolgter Neutralisation weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Dementsprechend wurde der Neutralisation des gesamten Sees (In-Lake-Verfahren) vor einer jahrzehntelangen Aufbereitung des auszuleitenden Wassers der Vorzug gegeben. Laborative Vorversuche bewiesen die überlegene Wirksamkeit der Soda gegenüber anderen pulverförmigen Neutralisationsmitteln, so dass mit einem vergleichsweise geringen technischen Aufwand dosiert werden konnte. Positive Erfahrungen zur Wirksamkeit der Soda lagen bereits auch aus einem ersten Feldversuch an einem Tageausee mit einem Volumen von 0,14 Mio. m<sup>3</sup> vor (POKRANDT & ZEH 1999).

Die In-Lake-Neutralisation wurde seitens der LMBV, dem wissenschaftlichen Beirat der LMBV und den begleitenden Fachbehörden als

Pilotvorhaben eingestuft, aus dem Erkenntnisse für zukünftige In-Lake-Neutralisationen zu erwarten sind.

Die Planung der In-Lake-Neutralisation hinsichtlich des unter Beachtung der Seewasserzirkulation optimalen Eintragspunktes und Dosierung erfolgte modellgestützt unter Verwendung des gekoppelten Grundwasser-Oberflächenwasser-Beschaffenheitsmodells MODGLUE (MÜLLER 2004).

Nach der 2004/2006 erfolgten Neutralisation des Sees liegen zu Beginn der Nachsorgephase 2007 genügend Erkenntnisse vor, die nicht nur eine Einschätzung der erreichten Effektivität des In-Lake-Verfahrens ermöglichen, es kann auch erstmals eine Abschätzung darüber erfolgen, wie groß die dem See weiterhin permanent zuströmende Acidität ist. Deren Betrag entspricht dem Fehler der durchgeführten modellgestützten Prognose. Diese berücksichtigt neben dem Modellfehler (Grundwasservolumenstrom in den einzelnen Bilanzräumen bzw. -körper) auch den Messfehler. Dieser folgt insbesondere aus der Unsicherheit über die Repräsentativität einer Grundwassermessstelle hinsichtlich der dem See aus den einzelnen Grundwasserbilanzräumen bzw. -körper unmittelbar zuströmenden Acidität. Die vor allem in den versauerten Böschungsbereichen stattfindende Beschaffenheitsveränderung ist weder im Ausmaß noch in der Dauer bekannt und daher eine prinzipielle Unsicherheit bei den durchgeführten hydrochemischen Prognoserechnungen; ebenso ist der Anteil des Aciditätseintrags durch die Böschungserosion unbekannt (GUDERITZ *et al.* 2003). Nach der Januar 2007 erfolgten Errichtung einer Erosionsmessstelle und sechs Grundwassermessstellen im Böschungsbereich des Bockwitzer Sees liegen erste Messungen vor, die Rückschlüsse auf die Größenordnung der genannten Aciditätszuflüsse im aktuellen Zustand des Sees erlauben.

## 2 In-Lake-Neutralisation

### 2.1 Voraussetzungen

Zu Beginn der Neutralisation im März 2004 besaß der Bockwitzer See ein Volumen von 17,9 Mio. m<sup>3</sup> und eine Fläche von ca. 1,6 km<sup>2</sup> auf. Die mittlere Tiefe lag bei 11 m, die Maximaltiefe im nordwestlichen Teil bei 17-18 m. Der Bockwitzer See weist eine stabile dimiktische Schichtung auf, die mittlere Aufenthaltszeit liegt bei 11 Jahren. Der Gewässergrund steigt von West nach Osten leicht sowie zum Südbereich hin kontinuierlich an, wobei das nördliche Drittel eine Art Kessel bildet. Zur südwestlich angrenzenden ehemaligen Dammwasserhaltung bestand 2004 nur eine schmale oberflächliche Verbindung, der trennende Damm wurde Ende 2005 überflutet.

Die Auswahl eines geeigneten Neutralisationsmittels erfolgte in laborativen Vorversuchen unter Verwendung von Wasser aus dem Bockwitzer See. Untersucht wurden ein dolomitischer Feinkalk, Weißkalkhydrat, Schlammkreide und deren Suspension sowie leichte Soda. Letztere erwies sich aufgrund ihrer hervorragenden Löslichkeit und schnellen Auflösung gegenüber den anderen pulverförmig dosierten und Calcium- bzw. Magnesium enthaltenden Neutralisationsmitteln als eindeutig überlegen und erzielte eine ähnlich schnelle Wirksamkeit wie die als Referenz zugegebene 0,1 M Natriumhydroxid-Lösung. In weiteren Versuchen zeigte sich, dass die Intensität der Einmischung bei der Sodadosierung letztendlich keinen Einfluss auf die innerhalb kurzer Zeit zu erzielende Beschaffenheit besitzt. Bei einer der Acidität adäquaten Dosierung der Soda wird ein pH-Wert von pH  $7,1 \pm 0,1$  erhalten, wobei durch den bei der Filtration auftretenden intensiven Kontakt mit der Fällung sogar der theoretisch zu erwartende pH-Wert (8,2) erreicht wird. Eine Unterdosierung um 1/3 führt dagegen zu einem pH-Wert von lediglich pH  $3,8 \pm 0,1$ . Wird Sodapulver auf die Oberfläche einer mit Seewasser gefüllten 1 m langen Plexiglassäule gegeben, so sind bereits nach etwa einem Tag zwei Drittel und nach einer Woche die gesamte Säule auf pH 6,5-7,0 (Universalindikator pH 4-10, Fa. Merck) neutralisiert (NEUMANN *et al.* 2006). In früheren Untersuchungen im Labor der BGD GmbH konnte bereits gezeigt werden, dass ein Ausgasen des bei der Sodazugabe im stark sauren Wasser gebildeten Kohlendioxids aufgrund des riesigen Aufnahmevermögens des Wassers nur in geringem Maße stattfindet (max. 1/3 des MAK-Werts).

Die Planung der In-Lake-Neutralisation erfolgte auf Grundlage des gekoppelten Grundwasser-Oberflächenwasser-Beschaffenheitsmodells MODGLUE (MÜLLER 2004), mit dem als optimaler Eintragsort die Südbucht des Bockwitzer Sees ermittelt wurde. Die erforderlichen Modellparameter und Randbedingungen wurden dem limnologischen Gutachten (GUDERITZ *et al.* 2003) entnommen.

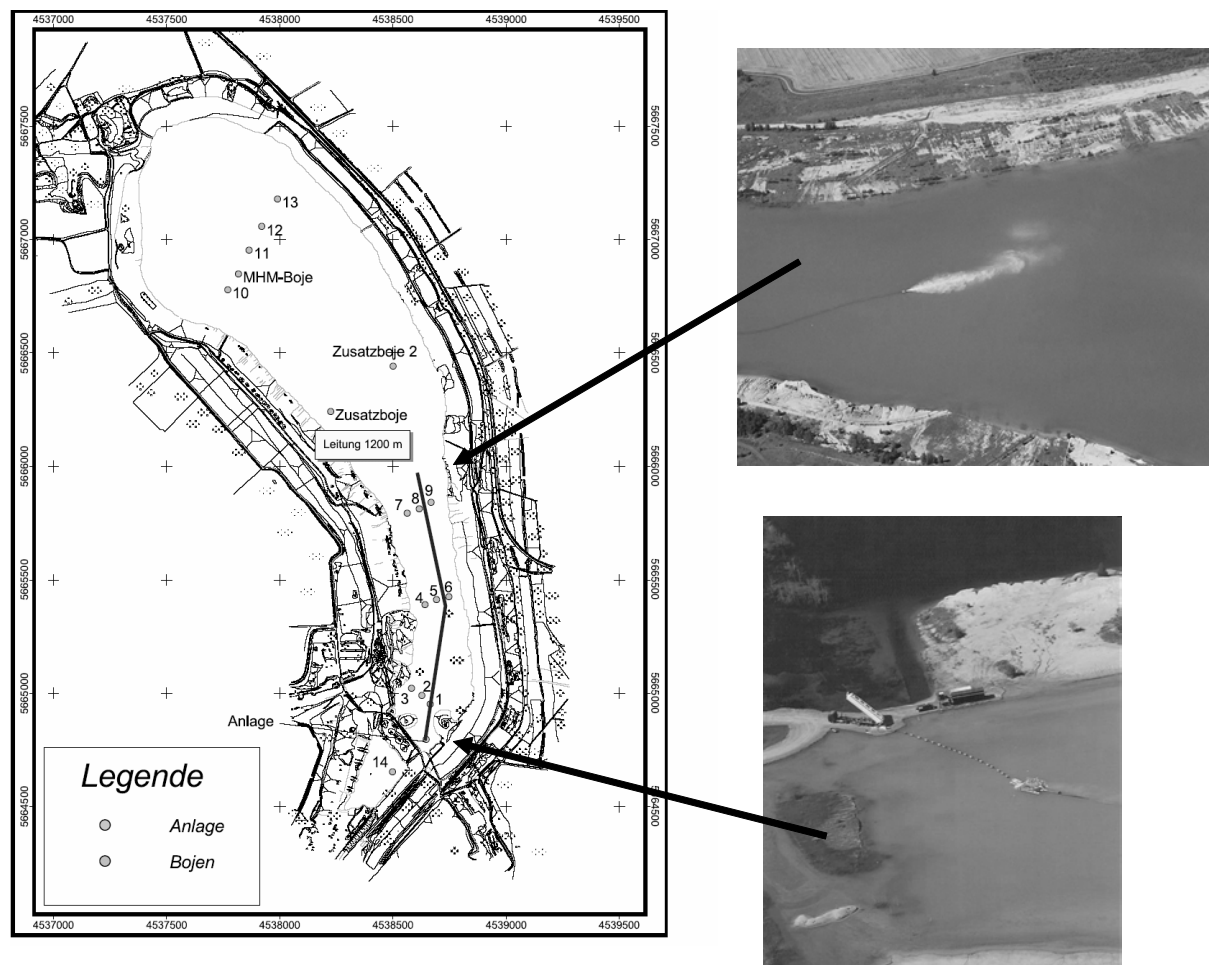
## 2.2 Applikation der Soda

Die Applikation der leichten Soda erfolgte 2004/2005 in mehreren Stufen direkt vom Silofahrzeug aus im Südbereich des Sees, dem laut Modellsystem optimalen Zugabepunkt. Dabei erfolgte die Dosierung im Frühjahr 2004 über zwölf Wochen mit drei Silofahrzeugen pro Tag. Mit fortschreitender Eliminierung der Acidität wurde 2005 auf arbeitstäglich ein bis zwei Fahrzeuge reduziert, wobei über eine neben der Dosieranlage verankerte Pumpstation ein Abfördern der gebildeten konzentrierten Lösung über eine 1200 m lange Rohrleitung ( $d = 400 \text{ mm}$ ) etwa in die Mitte des Sees erfolgte (s. Abbildung 1).

## 2.3 Begleitendes Monitoring

Begründet durch den Pilotcharakter des Vorhabens umfasste das begleitende Monitoring eine umfängliche Ermittlung chemischer und physikalischer Beschaffenheitsdaten von Seewasser und

Seesedimenten, die Aufnahme meteorologischer Daten sowie die Verarbeitung dieser Daten in dem genannten Modell. Im Zeitraum von März 2004 bis September 2006 wurden insgesamt 38 Befahrungen durchgeführt, bei denen i.d.R. 14 Tiefenprofile entlang von vier über den See verteilten Messprofilen (mit 3 bis 5 Bojen) mittels Multiparametersonde (pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit,  $\text{O}_2$ -Konzentration, Redoxpotential) und 16 Wasserproben (je Bojenreihe an einer Boje aus unterschiedlicher Tiefe) und mehrere Sedimente gewonnen wurden. Die entnommenen Wasserproben wurden analysiert auf die folgenden Parameter: pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, abfiltrierbare Stoffe, Acidität, Alkalinität, Aluminium, Eisen (gesamt), Eisen (gelöst), Eisen(II), Mangan, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Sulfat, Chlorid. Die i.d.R. mittels Ekman-Greifer entnommenen Seesedimente wurden auf Trockenmasse, pH-Wert, Acidität (pH 8,2 bzw. 4,3), Alkalinität (pH 8,2 bzw. 4,3) ana-



**Abb. 1:** Sodaapplikation im Bockwitzer See 2004-2005: Übersichtskarte mit Messpunkten (links), Dosier- und Pumpstation (rechts unten) und Auslauffloß (rechts oben; Floßlänge 7,5 m; Verteilung über ca. 100 m); © Luftaufnahmen: Stremke, LaNaServ Landschafts- und Naturschutzservice, Blankenhain OT Tromlitz.

lysiert und die Elemente (Aluminium, Eisen, Mangan, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium) im Königswasseraufschluss bestimmt.

Mitte 2005 und 2006 erfolgten Spezialprobenahmen zur Gewinnung von Sedimentkernen an ausgewählten Messpunkten im Bockwitzer See und im benachbarten Restsee Südkippe. Zusätzlich erfolgten spezielle Analysen (z. B. Dichtemessung, Sieb-/Schlämmanalyse, Kationenaustauschkapazität und austauschbare Kationen) und laborative Tests (z. B. zur Rücklösung von Fällungen).

## 2.4 Ergebnisse und Diskussion

### 2.4.1 Beschaffenheit des Seewassers

Von Beginn an zeigt sich im Seewasser an der Oberfläche des gesamten Sees (wie auch in den darunterliegenden Schichten) eine gleichmäßige Verringerung der Acidität über den gesamten Zeitraum, was die schnelle und gleichmäßige Verteilung der eingebrachten Soda in nahezu dem gesamten Seevolumen beweist (Abbildung 2). In Übereinstimmung mit der Modellprognose wird auch anhand der analysierten Natriumkonzentration eine vollständige Lösung und gleichmäßige Verteilung der eingebrachten Soda im See festgestellt. Eine Ausnahme bildet die Entwicklung der Acidität in den direkt über dem Grund liegenden Schichten, ein Teil der eingebrachten Soda verteilt sich als dichtere Schicht über dem Grund des Sees. Wird die Soda zu rasch dosiert, erfolgt durch die vorhandene Dynamik im See keine genügend schnelle Einmischung in das Seevolumen und es kann partiell zu Verlusten über Calciumcarbonatbildung (grüne Pfeile) kommen. Während der Herbstzirkulation gleicht sich die Beschaffenheit im See innerhalb weniger Tage aus (blauer Pfeil). Hierbei wird zumindest ein Teil der gebildeten Carbonate zurückgelöst, da wieder stärker saures Wasser mit dem Seegrund in Kontakt kommt.

Nach der Dosierung von Soda zwischen März und Juni 2004 in einer Menge, die ausreichend für die Neutralisation des Seewassers gewesen war, entsprach die im gesamten See eingestellte Beschaffenheit einer Eliminierung der Acidität ( $K_{B8,2}$ -Wert) von etwa 65 % (s. Abbildung 2), so dass sich für 2005 eine Nachdosierung erforderlich machte. Bei der Suche nach der Ursache für diese unerwartet geringeren Effektivität wurden drei Quellen diskutiert: Verluste durch Ausfällung infolge der insbesondere an der Einblasstelle lokal auftretenden, konzentrierten Lösung (Calciumcarbonatfällung), Kationenaustausch

mit dem Sediment, d. h. Nachlieferung der in den Sedimenten gespeicherten Acidität sowie andere Aciditätsströme (z. B. aus der Erosion oder der Elution versauerter seenaher Böschungen).

Durch Einsatz einer Tauchergruppe wurden im September 2004 im Bereich der Dosierstation das Ausmaß und die Konsistenz der gebildeten Ablagerung erfasst. Hierbei musste festgestellt werden, dass die Südbucht des Bockwitzer Sees durch eine bis dahin nicht bekannte Schwelle auf dem Seeboden in Richtung See begrenzt wurde („Schüsselform“ der Südbucht), die den Abfluss der gebildeten konzentrierten Sodalösung und deren Einmischung in das Seevolumen behinderte und somit zur Ausbildung der Ablagerung beitrug. Dennoch konnte anhand des festgestellten Ausmaßes der Ablagerung und der Analyse entnommener Proben gezeigt werden, dass gemessen an der insgesamt in den See eingebrachten Sodamenge der abgelagerte Carbonatanteil im genannten Bereich lediglich bei 2 % lag.

Zudem konnte in Laborversuchen gezeigt werden, dass durch saures Seewasser eine Rücklösung der Alkalinität erfolgt: Eine Probe der alkalischen Ablagerung unterhalb der Dosieranlage wurde in Kontakt mit Seewasser gebracht, über mehrere Tage stehen gelassen und das Wasser nach Dekantieren jeweils mehrmals ausgetauscht. Dabei zeigte sich, dass entscheidend für die beobachtete Rücklösung nicht die Intensität der Durchmischung mit dem Wasser ist, sondern ein häufiger Austausch des sauren Wassers, wie es während der Zirkulationsphasen im See auftritt. Bei Kontakt des Seewassers mit der alkalischen Ablagerung kommt es zur Absorption von Eisen und Aluminium, zur Freisetzung von Natrium und der Alkalinität sowie anfangs zur Bindung, später zur Freisetzung von Calcium.

Zur Vermeidung lokaler Übersättigung infolge der Seebodenschwelle im Bereich der Dosieranlage wurde für die Nachdosierung 2005 beschlossen, die eingebrachte Soda über eine Pumpstation und eine 1200 m lange Rohrleitung in die Mitte des Sees zu befördern, um damit einer besseren Verteilung in tieferen Seebereichen abzusichern (s. Abbildung 1). In der Stagnationsperiode im Sommer 2005 wurde die Sodadosierung außerdem langsamer fortgeführt. In dieser Zeit stagnierte in den tiefsten Seeschichten im Norden (Bojenreihe 4) die Eliminierung der Acidität und nahm sogar leicht zu (roter Pfeil in Abbildung 2), ein Hinweis auf in der Tiefe zutretendes saures Wasser. Innerhalb der Zirkulationsphasen gleichen sich die Verhältnisse im gesamten Seewasservolumen an (dunkle Pfeile in

Abbildung 1), d. h. erst in diesem Zeitraum ist eine erste und vorläufige Aussage über die erzielte Wirksamkeit einer Dosierung möglich.

#### 2.4.2 Beschaffenheit der Sedimente

Um ihren Einfluss auf die Neutralisation des Sees besser zu erfassen, wurden die Sedimente ab Oktober 2004 stärker in das Monitoring einbezogen. Untersuchungen zur Kornverteilung erbrachten zunächst einen überraschend hohen Anteil feiner und schluffiger Bestandteile ( $< 0,63 \text{ mm}$ : 50-95%) in Sedimenten, die einen erheblichen Flächenanteil am gesamten Seeboden besitzen.

Anhand der Veränderung des pH-Werts und der Acidität (bis pH 4,3) im Sediment der Boje MHM, eines der von der Eintragstelle der Sodadosierung am weitesten entfernt liegenden Messpunkte im Norden des Sees, kann das Ausmaß der durch Kationenaustausch aus dem Sediment freigesetzten Acidität aufgrund zahlreicher Messungen über den Gesamtverlauf des Vorhabens nachgewiesen werden (s. Abbildung 3). Im Vergleich zum Ausgangszustand im März 2004 wird die Acidität (bis pH 4,3) im Sediment bis in eine Tiefe von 15 cm um  $(5 \pm 1) \text{ cmol/kg}$  erheblich verringert; an anderen Stellen im See bis in Tiefen von mehr als 30 cm. Die Acidität bis zum

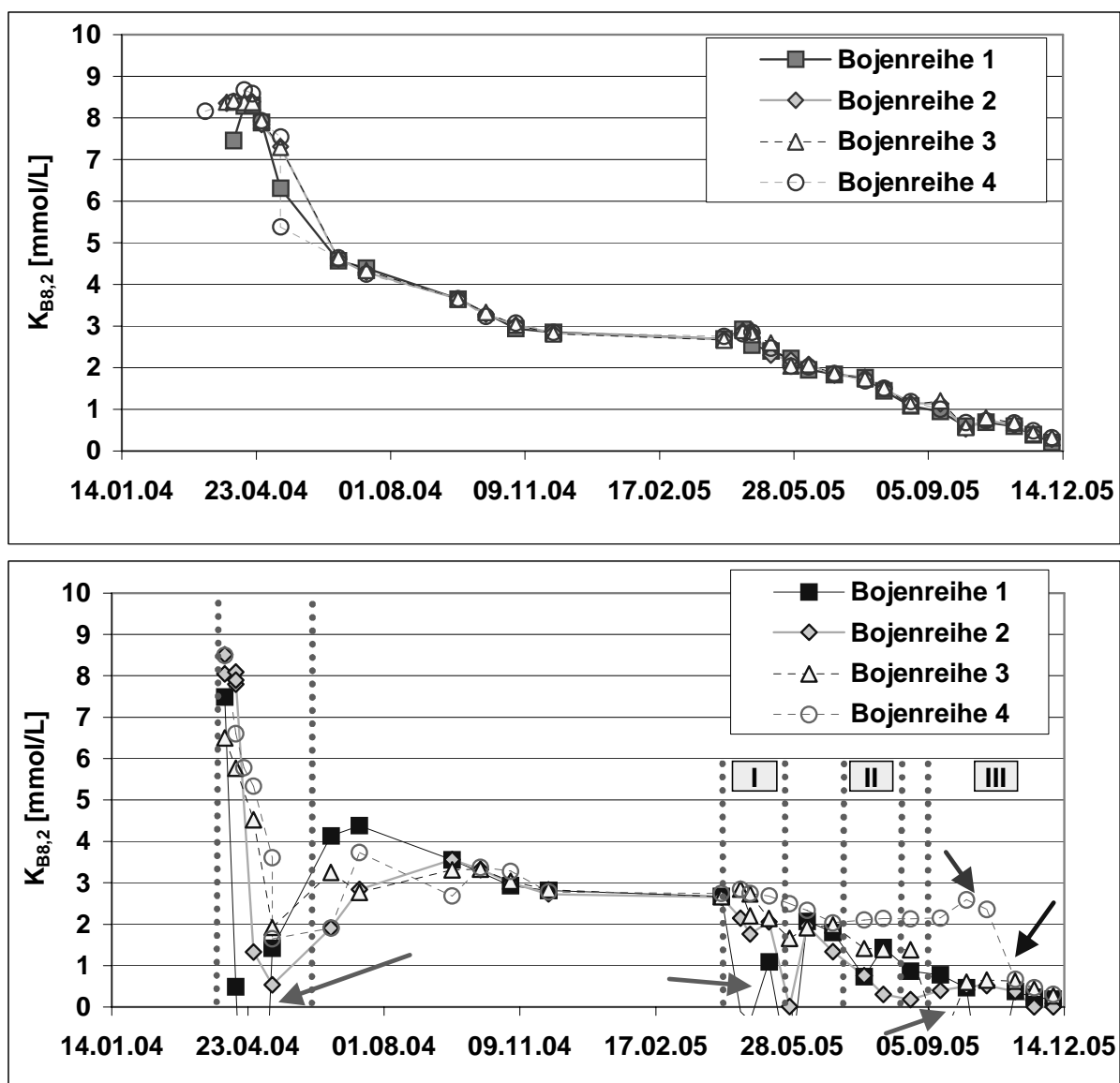


Abb. 2: Rückgang der Acidität ( $K_{B\ 8,2}$ -Wert) an der Oberfläche (oben) und über dem Grund (unten) des Bockwitzer Sees als Folge der Sodadosierung, unterschieden nach den vier Messprofilen; grüner Pfeil: vorübergehend über Grund auftretende Alkalinität an der 1. (2004) und 3. Bojenreihe (2005); roter/blauer Pfeil: im tiefen Nordbereich Konstanz in der Stagnationsphase und Rückgang erst während der Herbstzirkulation; I bis III: Perioden der langsamen Sodazugabe 2005.

pH-Wert 8,2 wird noch stärker reduziert (um 10-15 cmol/kg). Anhand der Mittelwerte aller Untersuchungen des Sediments an der MHM-Boje, an der es nachweislich nie zu Ausfällungen kam, lässt sich daher die Größenordnung des Kationenaustausches für den gesamten See abschätzen (s. Tabelle 1): Natrium- und Calciumionen sorbieren im Sediment und setzen dadurch dessen Acidität ins Seewasser frei. Etwa 10 % der durch die Soda 2004 - 2006 zugesetzten Natriumionen wurden sorbiert (2006: zu mehr als 80 % aus-

tauschbar), die Konzentration des Calciums am Sediment wächst im Gesamtzeitraum in gleicher Höhe. Die Zunahme beider Ionen (als Äquivalentkonzentration) im Sediment entspricht in etwa der eliminierten Sedimentacidität (bis pH 4,3). Folglich wurde etwa ein Fünftel der 2004-2006 in den Bockwitzer See dosierten Soda für die Eliminierung der aus dem Seesediment durch Kationenaustausch freigesetzten Acidität benötigt.

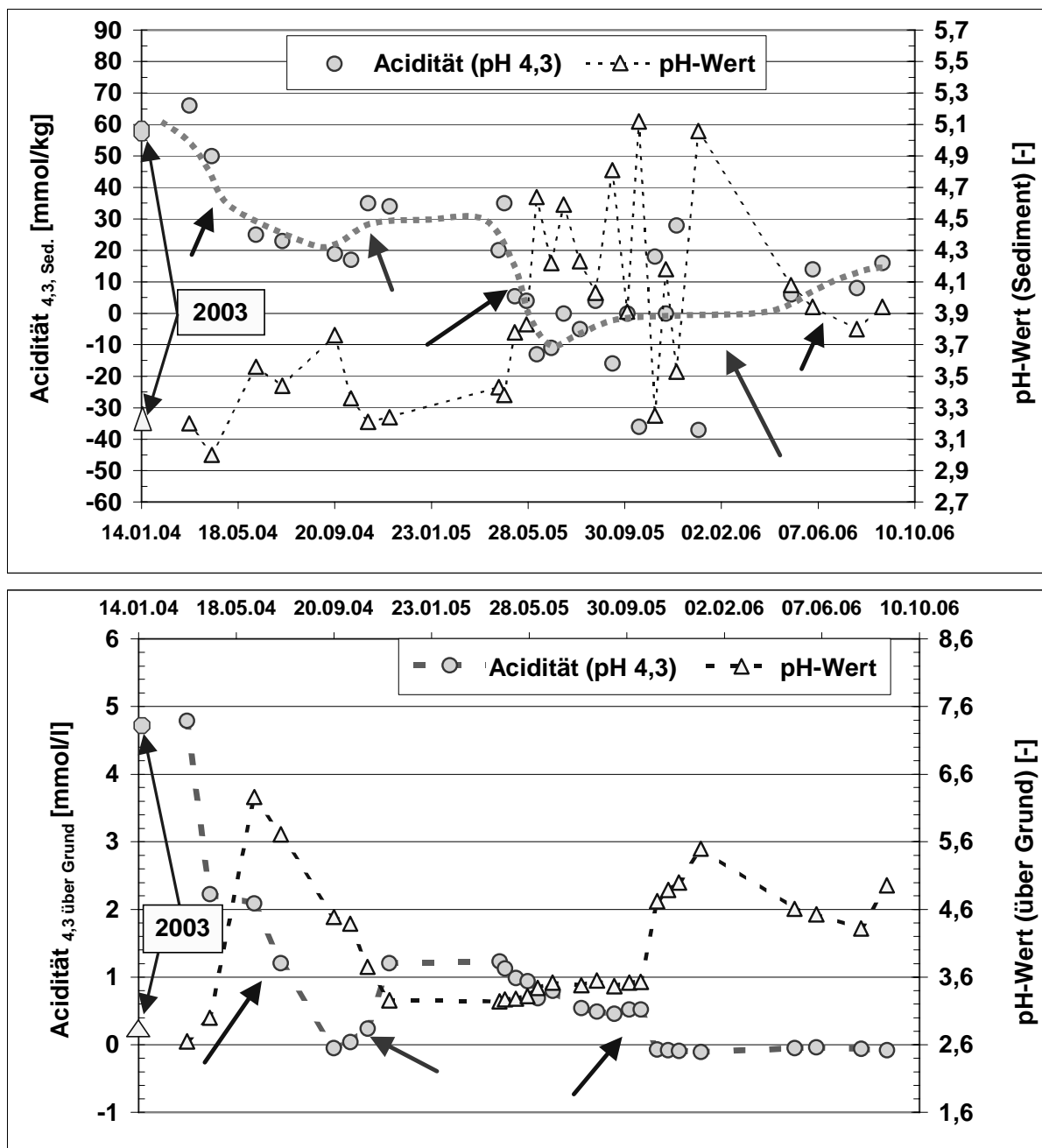
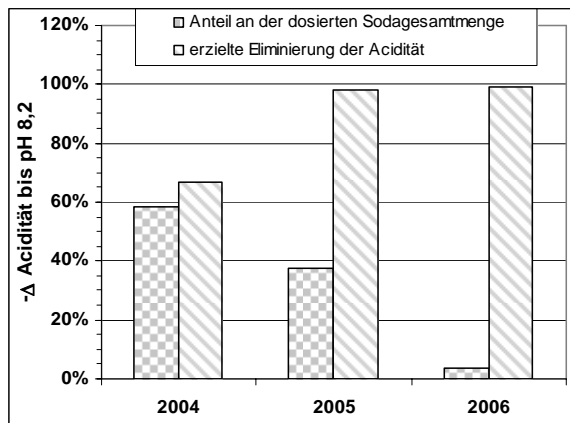


Abb. 3: Veränderungen des pH-Wertes und der Acidität ( $K_B$  4,3-Wert) im Sediment an der MHM-Boje (Nordbereich des Sees; oberes Bild) sowie der Acidität und des pH-Werts der angrenzenden Wasserschicht („über Grund“; unteres Bild) als Folge der Sodadosierung im Bockwitzer See (blaue Pfeile); dagegen Zunahme der Acidität (rote Pfeile) in den Winterhalbjahren 2005/2006



**Abb. 4: Verteilung der zugegebenen Sodamenge auf die Jahre 2004-2006 im Vergleich mit der jeweils im Seewasser erreichten Eliminierung der Acidität ( $K_{B\ 8,2}$ -Wert; bezogen auf den Ausgangszustand 2003/4)**

Ionenaustauschprozesse laufen als heterogene Prozesse deutlich langsamer ab als Veränderungen innerhalb der Wasserphase, aufgrund ihres nicht zu vernachlässigenden Beitrags sind gesicherte Aussagen zur Wirksamkeit einer Dosierung daher erst nach wenigstens zwei Zirkulationsphasen möglich.

#### 2.4.3 Abschätzung des dem See permanent zuströmenden Aciditätsstroms

Nach Erreichen einer ausleitbaren Wasserqualität im See Anfang 2006 musste im Jahresverlauf 2006 festgestellt werden, dass ein steter Zustrom von Acidität in den See stattfindet. Anhand der durchgeführten Abschätzungen, z. B. durch einen jeweilig eintretenden erneuten Anstieg der Acidität im See nach Verbesserung der Beschaffenheit infolge geringer Sodadosierungen (insgesamt im Umfang von ca. 5 % der 2004/2005 eingebrachten Sodamenge, s. Abbildung 4) konnte dieser Aciditätszustrom auf etwa 20-30 kmol/d beziffert werden, was einem Alkalinitätsäquivalent von 1,2-1,5 t Soda täglich entspricht. Unter der Annahme, dass dieser zwischen Ende 2005 bis Anfang 2007 abgeschätzte Zufluss von Acidität auch für den Gesamtzeitraum (seit der Planung im März 2003) gültig ist, ist dem See in dieser Zeit eine Aciditätsfracht zugeströmt, die zwischen 10 % und 15 % der insgesamt dosierten Sodamenge verbraucht hat und daher bei der Bilanzierung des gesamten Vorhabens zu berücksichtigen ist. Nach ersten, Anfang 2007 vorgenommenen Untersuchungen ist eine wesentliche Quelle in der Elution versauerter Böschungsbereiche durch zutretende Grund- und Sickerwässer zu sehen.

### 3 Zusammenfassung

Die In-Lake-Neutralisation des Bockwitzer Sees zwischen 2004-2006 als LMBV-Pilotvorhaben wurde durch ein umfangreiches Monitoring einschließlich spezieller Laboruntersuchungen und modellgestützter Verarbeitung der Messdaten begleitet. Die Neutralisation eines derart sauren Gewässers dieser Größenordnung erfolgte unserer Kenntnis nach erstmals in Europa, sehr wahrscheinlich sogar weltweit. Wesentliche Erkenntnisse sind (1) eine bisher von der Fachwelt unterschätzte Beteiligung der Sedimente bis in mehr als 20 cm Tiefe, deren Acidität durch Kationenaustausch reduziert wird und daher zu einem erheblich höheren Bedarf an Neutralisationsmittel führt, und (2) ein gegenüber bisherigen Annahmen wesentlich größerer Zeitbedarf, um die Wirksamkeit der vorgenommenen Dosierung beurteilen zu können, wobei die Zugabe des Neutralisationsmittels kurz vor oder während der Zirkulationsphasen im See vorteilhaft ist. Diese Erkenntnisse gelten unabhängig vom eingesetzten Neutralisationsmittel für jedes In-Lake-Neutralisationsverfahren und sollten daher bei der Planung und Diskussion der optimalen Gestaltung zukünftiger Verfahren berücksichtigt werden. Hierzu ist insbesondere die Quantifizierung der in den Sedimenten eines zu neutralisierenden Sees gebundenen Acidität als zusätzliche, objektspezifische Bemessungsgrundlage für die Abschätzung der erforderlichen Menge an Neutralisationsmittel notwendig.

Die vorgenommene Bilanzierung des Pilotvorhabens zeigt, dass zur Eliminierung der Acidität im Seewasser bzw. im Sediment etwa 65 % bzw. etwa 20 % der dem Seewasser dosierten Soda benötigt wurden. Weitere 5-10 % sind Verluste, 10-15 % neutralisierten den permanenten Zustrom saurer Wässer in den See. Letzteres entspricht, bezogen auf die berücksichtigte Aciditätsfracht, dem für den Bockwitzer See erhaltenen Prognosefehler. Er resultiert nach gegenwärtigem Kenntnisstand vor allem aus dem Messfehler, d. h. der Repräsentativität der Grundwassermessstelle hinsichtlich der dem See aus den einzelnen Grundwasserbilanzräumen bzw. -körper unmittelbar zuströmenden Acidität. Dieser Aciditätseintrag aus den vormals belüfteten und somit versauerten Böschungsbereichen erfolgt sowohl über den Sickerwasser- als auch über den Grundwasserpfad; zu seiner Verringerung und damit zur Sicherung einer dauerhaften Neutralisation des Bockwitzer Sees sollte folglich die Sickerwasserneubildung unterhalb der versauerten Böschungsbereiche durch Abdeckung mit

**Tab. 1: Abschätzung des Umfangs des Kationenaustausches mit dem Sediment durch Übertragung der an der MHM-Boje ermittelten Ergebnisse für Natrium, Calcium und die Acidität bis pH 4,3 (Mittelwerte) auf die Seefläche, Annahmen: Reindichte 2,65 t/m<sup>3</sup>, Austausch bis 20 cm Tiefe.**

| Parameter  | Einheit         | 2003     | 2004     | 2005     | 2006     |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Seefläche (aus Kennlinie)  | km <sup>2</sup> | 1,614    | 1,715    | 1,770    | 1,820    |
| zum Stichtag   | -               | 23.03.03 | 01.12.04 | 28.11.05 | 27.11.06 |
| Tiefe Austausch  | m               | 0,2      | 0,2      | 0,2      | 0,2      |
| Sedimentvolumen  | m <sup>3</sup>  | 322.800  | 343.000  | 354.000  | 364.000  |
| Masse Sediment   | t               | 855.520  | 908.950  | 938.100  | 964.600  |
| Na (KWA)   | kmol/t          | 0        | 0,017    | 0,019    | 0,026    |
| Na (KWA)   | kmol            | 0        | 15114    | 18081    | 24604    |
| Differenz (als Soda)   | t               | 0        | 801      | 157      | 346      |
| <b>Summe sorbierten Natriums 2004-2006 entspricht rd. 1300 t Soda, d. i. ca. 10 % der Dosierung</b>  |                 |          |          |          |          |
| Ca (KWA)   | kmol/t          | 0,039    | 0,048    | 0,059    | 0,049    |
| Ca (KWA)   | kmol            | 33365    | 43870    | 55047    | 47452    |
| Differenz (als Soda)   | t               | 0        | 1114     | 1185     | -805     |
| <b>Summe sorbierten Calciums 2004-2006 entspricht rd. 1500 t Soda, d. i. ca. 11 % der Dosierung</b>  |                 |          |          |          |          |
| Acidität bis pH 4,3  | kmol/t          | 0,064    | 0,034    | 0,016    | 0,012    |
| Acidität bis pH 4,3  | kmol            | 54.753   | 31.005   | 15.264   | 11.302   |
| Differenz (als Soda)   | t               | 0        | 1.259    | 834      | 210      |
| <b>Summe desorbierte Acidität 2004-2006 entspricht rd. 2300 t Soda, d. i. ca. 17 % der Dosierung</b> |                 |          |          |          |          |

einer Vegetationsschicht verringert werden. Außerdem empfiehlt sich eine Ermittlung der Elutionsraten für die unterhalb der Böschungen versauerten Grundwasserbereiche, um daraus gegebenenfalls technischen Maßnahmen abzuleiten. Die Kosten beider Maßnahmen wären dann denen einer bedarfsweisen Zugabe an Neutralisationsmittel zum Ausgleich des permanenten Aciditätszustroms gegenüberzustellen.

Zusammenfassend ergibt sich einerseits, dass sowohl das bisher verwendete Grundwasser- bzw. Seemodell (Rührkesselreaktormodell) als auch das Messnetz prinzipiell ausreichend sind, da angesichts eines Prognosefehlers von ca. 10-15 % weder der Ersatz durch eine höhere Modellklasse noch die Einführung eines höher auflösenden Grundwassermessnetzes gerechtfertigt wäre. Andererseits war die Entscheidung für die In-Lake-Neutralisation richtig, da deren Kosten weniger als ein Fünftel der einer GWRA betragen, die der damaligen Prognose nach über mindestens 30 Jahre (aufgrund des Prognosefehlers nun sogar noch länger) hätte betrieben werden müssen.

## 4 Literatur

- GUDERITZ, I., MÜLLER, K., BETHGE, C., NEUMANN, V. & NITSCHKE, C. (2003): Limnologisches Prognosegutachten für die Restseen im Tagebauterritorium Borna-Ost/Bockwitz, im Auftrag der LMBV mbH, unveröff., Dresden, 19. Dezember 2003.
- MÜLLER, M. (2004): Modellierung von Stofftransport und Reaktionen mit einem neuentwickelten, gekoppelten Grund- und Oberflächenwassermodell am Beispiel eines Tagebaurestsees, Dissertation, Proceedings des DGFZ e.V., Heft 25, ISSN 1430-0176, Dresden, 2004.
- NEUMANN, V., NITSCHKE, C., TIENZ, B.-S. & POKRANDT, K.-H. (2006): Erstmalige Neutralisation eines Tagebaurestsees in Mitteldeutschland durch In-Lake-Verfahren zur Sicherstellung der Ausleitbedingungen des Überschussswassers - Erfahrungen und neue Erkenntnisse, 72. Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft – Fachgruppe in der Gesellschaft Deutscher Chemiker, 22.-24. Mai 2006, Celle, V12, S. 64-68, ISBN 3-936028-39-7.
- POKRANDT, K.-H. & ZEH, E. (1999): Flutungskonzept Südraum Leipzig, in: UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (Hrsg.), Prozesse und Stoffströme in Kippensedimenten – Tagebaue Zwenkau, Cospenden und Espenhain, Workshop, 3. und 4. Juni 1999, UFZ-Bericht Nr. 25/1999, S. 6-17.