

Neue Erkenntnisse zur Anwendung von In-Lake-Verfahren für die Neutralisation saurer Bergbaufolgeseen

Wolfgang Rabe¹, Wilfried Uhlmann²

¹eta AG engineering, Schäfereistraße 24, 03130 Spremberg, wrabe@eta-ag.com,

²Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Langobardenstraße 48, 01239 Dresden, iw.uhlmann@t-online.de

Die Neutralisation von sauren Bergbaufolgeseen ist eine wichtige Aufgabe bei der Sanierung der Folgelandschaften des ehemaligen Braunkohlenbergbaus in der Lausitz und in Mitteldeutschland. Von verschiedenen Technologien zur Behandlung des Grund- und Oberflächenwassers sind In-Lake-Verfahren wirtschaftlich, genehmigungsfähig und mit einem vertretbaren Risiko zur Erfüllung der ökologischen Zielparameter einsetzbar. Beispielhaft werden das Vorgehen und die Ergebnisse der Behandlung des Horstteiches bei Luckau nach einem zweistufigen Verfahren näher erläutert. Innerhalb von ca. 20 Tagen gelang es hier, die Wasserbeschaffenheit von extrem sauren Verhältnissen (pH $\approx$ 2,8) auf pH-Werte im Neutralbereich (pH $>$ 8) zu verbessern. Im Zuge der Neutralisation wurden alle Schwermetalle und Schwebstoffe weitgehend ausgefällt und eine merklicher Puffer gegen saure Zuströme aufgebaut.

The neutralisation of acidic open cast mining lakes is an important task at the restoration of post lignit mining landscapes in Lusatia and Middle Germany. From several treatment technologies for the manipulation of ground and surface waters the in-lake-treatment procedures are most cost effective, licensable and usable with passable risks to reach ecological targets. The proceedings and the results of a two-stage-treatment technology of the Horstteich near Luckau will be exemplified in this article. In this case it was possible, within 20 days, to improve the water quality from extreme acidic (pH $\approx$ 2.8) to neutral conditions (pH $>$ 8). During the neutralisation nearly all heavy metals and suspended substances were precipitated and a noticeable buffer was buildt up against acidic inflows.

1 Vorbemerkungen

Die LMBV mbH betreibt die Sanierung der ehemaligen Tagebaue in der Lausitz und in Mitteldeutschland und deren Ausbau zu Tageauseen. Gemäß Braunkohlenplan als Sanierungsrahmenplan bzw. Sanierungsplan für die stillgelegten Tagebaue, soll in den entsprechenden Tageauseen eine Wasserqualität erreicht werden, die eine Freizeit- und Erholungsnutzung und die Entwicklung eines seentypischen natürlichen Fischbestandes bzw. die Nutzung als Wasserspeicher und Ausleitung in öffentliche Gewässer ermöglicht. Mit der Füllung der Tageauseen wird Wasser in den ehemaligen Bergbauregionen zu einem wichtigen Landschaftsfaktor.

Die Füllung der Tageauseen und die Beeinflussung der Wasserqualität erfolgt vorzugsweise mit Flutungswasser aus den Flüssen der Einzugsgebiete. Aus der Analyse der letzten Jahre zum erreichten Ist-Zustand der Tageauseen wurde festgestellt, dass die landesplanerischen Ziele für die Wasserbeschaffenheit alleine durch Fremdwasserflutung in zahlreichen Tageauseen in absehbarer Zeit nicht erreicht

werden können. Auf Grund des großen Säurepotentials in den Kippenarealen muss weiter mit einem über Jahrzehnte anhaltenden Säureeintrag in die entstehenden Tageauseen bzw. Seeketten gerechnet werden (GRÜNEWALD *et al.* 2003).

Die LMBV arbeitet dazu an kostengünstigen, nachhaltigen, sicheren und genehmigungsfähigen Lösungen für die Entwicklung der Gewässergüte (ZSCHIEDRICH & BENTHAUS 2005).

2 Bisheriger Stand der In-Lake-Technik bei der Tageausee-sanierung

Neben der vorrangig betrachteten Flutung für die Entwicklung der Gewässergüte werden zunehmend weitere Sanierungstechniken auf ihre Einsatzmöglichkeit geprüft und zum Teil bereits erfolgreich angewandt. Das sind vor allem:

- der Weiterbetrieb vorhandener und Neubau von Grubenwasserreinigungsanlagen (GWRA),
- die sogenannte Seekonditionierung mit In-Lake-Verfahren,

- das Anlegen von reaktiven Teppichen im Uferbereich der Tagebauseen,
- das Anlegen von reaktiven Wänden im umliegenden Gebirge der Tagebauseen,
- weitere im FuE-Maßstab befindliche chemische und biologische Maßnahmen.

Ein wesentliches Steuerelement bei der Tagebauseesanierung kann neben der natürlicherweise beschränkten Zufuhr von Flußwasser die intelligente Gestaltung der Seekonditionierung mit In-Lake-Verfahren sein.

Die großvolumigen Seen mit ihren verschiedenen Morphologien und ihrer besonderen limnologischen Dynamik und die hierin enthaltene Dünnsäure stellen verfahrenstechnisch hohe Anforderungen an die Applikation von Neutralisationsmitteln. Die eta AG Schwarze Pumpe hat sich in Zusammenarbeit mit der LMBV mbH gemeinsam mit dem IWB Dr. Uhlmann (Dresden) und anderen Partnern in den zurückliegenden Jahren bemüht, wirkungsvolle und kosteneffektive Verfahren zur chemischen Neutralisation saurer Tagebauseen zu entwickeln.

Einsatzfälle für die In-Lake-Technik waren bisher die Resuspension von Aschesedimenten im TBS Burghammer (RABE *et al.* 2002), die Sodapulverapplikation in TBS Bockwitz (NITSCHKE & TIENZ 2005), die EHS-/Kalksedimentresuspension im TBS Koschen (RABE *et al.* 2004; GRÜNEWALD *et al.* 2005) sowie die In-Lake-Behandlung des Horstteiches bei Luckau, hier mittels eines zweistufigen Verfahrens mit Natronlauge und Dolomit (RABE & ROHR 2005; UHLMANN 2006). Die innovativen Elemente der bisher entwickelten In-Lake-Verfahren sind insbesondere die Mobilität der Technik, die problemspezifische Wahl und Konfektionierung der Neutralisationsmittel, vorzugsweise in suspensierter Form sowie die passive flächenhafte Applikation der Neutralisationsmittel in die Seen mit schwimmenden Leitungen unter gezielter Nutzung natürlicher Potentiale (Temperatur, Wind, Strömung) für die optimale Verteilung der Stoffe im Gewässer.

3 Planung und Durchführung der In-Lake-Behandlung des Horstteiches bei Luckau

3.1 Ausgangssituation

Der im Gebiet zwischen Luckau und Finsterwalde gelegene, zu den Borsdorfer Teichen zuge-

ordnete Horstteich mit einem Volumen von ca. 650.000 m³ und einer Fläche von ca. 10 ha entstand in der Zeit um 1900 in der Folge des Kohleabbaus des oberflächennah anstehenden 1. Lausitzer Flözhorizontes und wurde bis 1999 als Erholungsgebiet und als Bade- und Angelgewässer genutzt.

Infolge des Grundwasserwiederanstieges im Winter 1999/2000 sprang die Vorflut oberhalb der Borsdorfer Teiche wieder an und durch den Zufluss von saurem Oberflächenwasser setzte ab 2000 eine zunehmende Versauerung des Horstteiches von ursprünglich pH 7,5 bis pH 2,8 2002 ein.

Im 2. Quartal 2004 erfolgte als erste Sanierungsmaßnahme im Auftrag der LMBV die Umverlegung des sauren Oberflächenzuflusses zum Horstteich. Ein nachfolgendes Monitoring führte zu der Einschätzung, dass der Versauerungsprozess im Horstteich durch die Umverlegung des Zulaufs gestoppt wurde (RABE 2004). Eine Umkehrung des Versauerungsprozesses fand zunächst nicht statt. Eine natürliche Entsäuerung des Horstteiches würde nach ersten Einschätzungen mindestens viele Jahre bis Jahrzehnte beanspruchen.

Ziel der geplanten Sanierung des Horstteiches ab Oktober 2005 war es, den Horstteich in seiner Wasserqualität so zu beeinflussen werden, dass der pH-Wert auf $\geq 6,5$ erhöht, ein merklicher Puffer gegen den sauren Grundwasserzustrom sowie eine uneingeschränkte Nutzung im Jahr 2006 möglich wird.

3.2 Einsatzstoffe für die Neutralisation des Horstteiches

3.2.1 Grundlagenuntersuchungen mit ausgewählten Einsatzstoffen

Im Rahmen der Planung des Projektes „Neutralisation Horstteich“ wurden folgende Einsatzstoffe untersucht:

- Natriumhydroxyd als verdünnte Natronlauge,
- Gebrannter Dolomit (< 0,2 mm),
- Soda und
- Weißkalkhydrat.

Da sulfatreiches Seewasser (ca. 1.000 mg/L) als Suspensionsmedium eingesetzt werden sollte, wurde auf die Einsatzuntersuchung von Branntkalk (Gipsbildung) verzichtet.

Der Neutralisationsmittelbedarf wurde mittels Modellierung und im Technikumsversuch im Labor der Lausitzer Analytik GmbH ermittelt. Im Technikumsversuch wurde des Weiteren der entstehende Puffer als $K_{S4,3}$ -Wert und die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt. In der Tabelle 1 ist der ermittelte Produktbedarf für eine pH-Wertanhebung auf 7 dargestellt. Unter realen Bedingungen ist lediglich für Natronlauge von einem Wirkungsgrad von 100 % auszugehen.

Aus der folgenden Tabelle 2 ist ersichtlich, dass Natronlauge die mit Abstand höchste Reaktivität der untersuchten Einsatzstoffe aufweist und ca. 70.000fach schneller reagiert als beispielsweise Soda. Soda (vgl. Tabelle 2) und Dolomit gebrannt dominieren dagegen beim Aufbau eines Säurepuffers.

Für den Einsatzfall Horstteich wurde ein zweistufiges Verfahren mit einer Initialneutralisation mittels Natronlauge und mit einer nachfolgenden pH-Feineinstellung mit Pufferaufbau mittels einer Mischung aus gebranntem und ungebranntem Dolomit konzipiert. Auf Grund der zuvor ermittelten Ergebnisse wurde im Labormaßstab ein initialer pH-Anstieg mit Natronlauge auf pH 6 realisiert und nachfolgend sowohl mit Soda als auch mit Dolomit gebrannt der pH-Wert weiter auf 7 erhöht und nach einer Verweilzeit von zehn Tagen der Säurepuffer gemessen (siehe Tab. 3).

Aus Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass mit einer höheren Menge an Soda und bei deutlich erhöhter Reaktionszeit im Vergleich zu Dolomit gebrannt lediglich ein gleich großer Puffer gegen saure Einflüsse erreicht wurde.

Eine weitere wichtige Größe bei der Seesanieung ist der pH-Wert, bei dem die Calcitsättigung erreicht und Calcit ausgefällt wird. Nach durchgeführten Modellrechnungen neigt das Horstteichwasser auf Grund seiner Zusammensetzung dazu, bei Einsatz von Soda bereits ab pH 7 Calcit abzuscheiden. Bei Einsatz von Natronlauge und Magnesiumbranntkalk ist dies erst ab pH 10 zu erwarten. Die Calcitabscheidung führt zu Wirkungsgradverlusten und damit unweigerlich zu erhöhten Kosten des Verfahrens.

3.2.2 Auswahl der Einsatzstoffe für das Projekt Neutralisation Horstteich

Für die initiale Behandlung mit Anhebung des pH-Wertes von ca. 2,8 auf ca. 6 wurde Natronlauge (NaOH) mit einer Konzentration von 23% verwendet. Die Anlieferung erfolgte mittels Tankfahrzeug.

Für die weitere Anhebung des pH-Wertes auf $\geq 6,5$ und den Aufbau eines merklichen Hydrogencarbonatpuffers wurde ein Gemisch aus 50% Dolomit gebrannt (CaO, MgO) mit einer Körnung von $< 0,02$ mm sowie 50% Dolomitfüller

Tab. 1: Mit Originalseewasser ermittelter Produktbedarf für eine pH-Wertanhebung von 2,8 auf 7,0 (Rührzeit 2 min).

Produkt	Spez. Bedarf	Bedarf Horstteich
	g/m^3	Mengen (t)
Dolomit gebrannt	435	283
Löschkalk	632	410
Soda	407	265
NaOH	307	200

Tab. 2: Mit Originalseewasser ermittelter Zeitbedarf für eine pH-Wertanhebung von 2,8 auf 7,0 (Rührzeit 2 min).

Produkt	Zeitbedarf	Reaktivität	$K_{S4,3}$ -Wert
	min	Faktor	mmol/L nach 10 d
NaOH	0,08	1	0,8
Löschkalk	2,5	310	0,5
Dolomit gebrannt	3	375	1,2
Soda	5.700	71.000	0,3

Tab. 3: Mit Seewasser ermittelter Neutralisationsmittelbedarf für eine pH-Wertanhebung von 6,0 auf 7,0 und erreichter Säurepuffer.

Produkt	Zeitbedarf	g/m^3	t/Horstteich	$K_{S4,3}$ -Wert
	min			mmol/L
Dolomit gebrannt	0,5	21	14	0,3
Soda	1433	30	20	0,3

($\text{CaCO}_3/\text{Mg CO}_3$) mit einer Körnung von $< 0,09$ mm eingesetzt.

3.3 Verfahrensdurchführung

Mit der Verfahrensdurchführung wurde die Fa. Tief- und Wasserbau Boblitz, mit der ingenieurtechnischen Begleitung die eta AG Büro Schwarze Pumpe und mit der gutachterlichen Begleitung das IWB Dr. Uhlmann (Dresden) von der LMBV beauftragt. Die Arbeiten wurden im 4. Quartal 2005 ausgeführt.

Für den Einsatz von Natronlauge wurde mittels einer mobilen Dosiereinrichtung bei direkter Entnahme aus dem Tankfahrzeug eine ca. 2,5%ige Natronlauge in einer Menge von ca. 100 m^3/h erzeugt und über eine flexible, mehrere 100m lange Rohrleitung zu einem schwimmenden Eintragsschiff transportiert. Über einen ca. 15 m breiten Verteilbalken mit 20 Düsen (Abb. 1) wurde die Suspension mit hoher Geschwindigkeit von ca. 6 m/s unter Wasser bis in die Tiefenbereiche und durch gleichzeitige Bewegung des Schiffes praktisch im gesamten Seebereich eingebracht.

Die verwendete Dolomitmischung wurde vorge-mischt mittels Silofahrzeug antransportiert und in einem Silo zwischengelagert. Der Austrag von ca. 3 t/h aus dem Silo erfolgte mit einer geregelten Exenterschneckenpumpe bei gleichzeitiger Zuführung von Seewasser.

Über einen Injektor wurde die Suspension mit weiterem Seewasser vermischt und in einer Gesamtmenge von ca. 100 m^3/h über die flexible, mit Bojen gesicherte, schwimmende Rohrleitung zum Verteilschiff transportiert. Mittels des Ver-

teilschiffes erfolgte der Eintrag der Suspension mit zwei Sprühdüsen auf die Seeoberfläche des Gewässers. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit wurde ein Anteil in den Uferbereich eingetragen, wo die Zuströmung von saurem Grundwasser vermutet wird (Abb. 2).

3.4 Ergebnisse der Seebehandlung und Nachhaltigkeit

Im Rahmen der Seesanieung wurden im Zeitraum vom 26.10. bis 22.11.2005 insgesamt 410 t 23%ige Natronlauge und 54 t Dolomitgemisch eingesetzt. Die Entwicklung des pH-Wertes und der Säurekapazität im Horstteich im Behandlungszeitraum zeigt die Abb. 3.

In Abb. 3 ist gut erkennbar, dass die Erhöhung der Säurekapazität mit der ersten Natronlaugezugabe beginnt und nahezu kontinuierlich bis zum Ende der Behandlung ansteigt. Der pH-Wert dagegen steigt erst nach weitgehender Ausfällung des gelösten Eisens und Überwindung des so genannten Eisenpuffers ab $K_{\text{S}4,3}$ von $-0,5$ mmol/L deutlich an. Der weitere Anstieg bis auf pH-Werte um 9 findet relativ zügig statt.

In der folgenden Abb. 4 wird die Entwicklung des Seewassers in der Vor- und Nachlaufphase des In-Lake-Verfahrens betrachtet. Trotz des Zulaufs von saurem Grundwasser und auch kurzzeitig von saurem Oberflächenwasser bleibt der eingestellte Puffer bis April 2006 nahezu konstant bei ca. 0,5 mmol/L. Da der See von Januar bis Ende März 2006 von einer geschlossenen Eisdecke bedeckt war, wird das Ergebnis der Frühjahrszirkulation im Gewässer mit großem Interesse erwartet.



Abb. 1: Schiff mit Verteilbalken und Düsen für den NaOH-Eintrag.



Abb. 2: Eintrag der Dolomitsuspension mit Sprühdüsen.

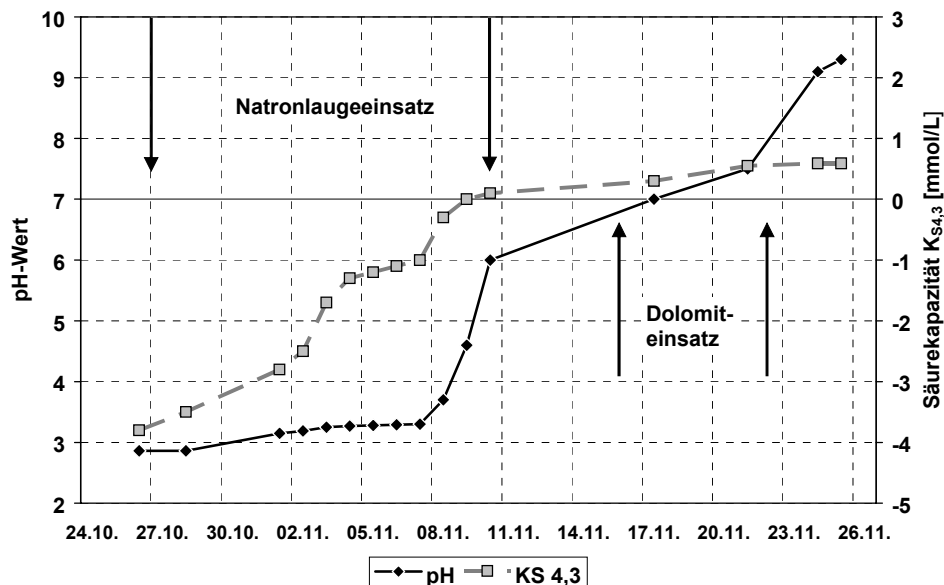


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes und der Säurekapazität $K_{S4,3}$ im Horstteich im Behandlungszeitraum.

3.5 Modellierung und begleitende Untersuchungen

3.5.1 Modellgestützte Abbildung der In-Lake-Neutralisation

Die chemischen Prozesse während der In-Lake-Neutralisation im Horstteich wurden mit einem hydrochemischen Seemodell nachgebildet. Das Wassermengenmodell wurde durch ein vergleichsweise einfaches Mischreaktormodell abgebildet. Da das In-Lake-Verfahren während der herbstlichen Vollzirkulation durchgeführt wurde, musste die Stratifizierung nicht berücksichtigt werden. Monatliche Tiefenprofilmessungen an insgesamt sechs Stellen im Horstteich belegen eine gute Durchmischung des Seewassers und das weitgehende Fehlen physikalischer und chemischer Gradienten.

Die chemischen Prozesse wurden mit dem hydrogeochemischen Modell PHREEQC dargestellt. Folgende physikalische und chemische Prozesse fanden Berücksichtigung bei der hydrochemischen Modellierung des In-Lake-Verfahrens:

- Der Eintrag von Sauerstoff aus der Atmosphäre durch eine Gleichgewichtsbeziehung zur Gewährleistung oxidischer Verhältnisse entsprechend der gemessenen Redoxspannungen.
- Der Austausch von Kohlendioxid zwischen dem Seewasser und der Atmosphäre entsprechend einer Austauschkinetik 1. Ordnung

- Die Ausfällung von Eisenhydroxiden mit Oberflächenkomplexierung von Sulfat während der Neutralisation entsprechend einer Gleichgewichtsbeziehung.
- Die Ausfällung von Aluminiumoxihydroxosulfaten während der Neutralisation entsprechend einer Gleichgewichtsbeziehung.
- Die Ausfällung von Calcit durch eine Gleichgewichtsbeziehung.

Die Gleichgewichtskonstanten der Eisenhydroxide und Aluminiumoxihydroxosulfate sowie die stöchiometrische Zusammensetzung letzterer wurde durch spezielle Technikumsversuche (kontinuierliche Titration mit Abtrennung der ausgefällten Phasen) ermittelt. Das molare Verhältnis von Sulfat-Schwefel zu Eisen liegt bei etwa 5:1. Die Modellierung der Technikumsversuche hat gezeigt, dass es sich hierbei um oberflächenkomplexiertes Sulfat an Eisenhydroxid handelt. Für die Oberflächenkomplexierung wurden die in PHREEQC angebotenen Konstanten verwendet.

Eine Fällung von Gips hat während der In-Lake-Neutralisation im Horstteich nicht stattgefunden. Die Mitfällung von oberflächenkomplexiertem Sulfat am Eisen ist für die Sulfatbilanz des Horstteiches nicht von Bedeutung.

Die Modellrechnungen bestätigen, dass erst bei $\text{pH} > 9$ das Calcitgleichgewicht erreicht wurde. Die Calcit ausfällung fand bei einer rechnerischen Übersättigung von $\text{SI} \approx +0,5$ im Horstteich statt.

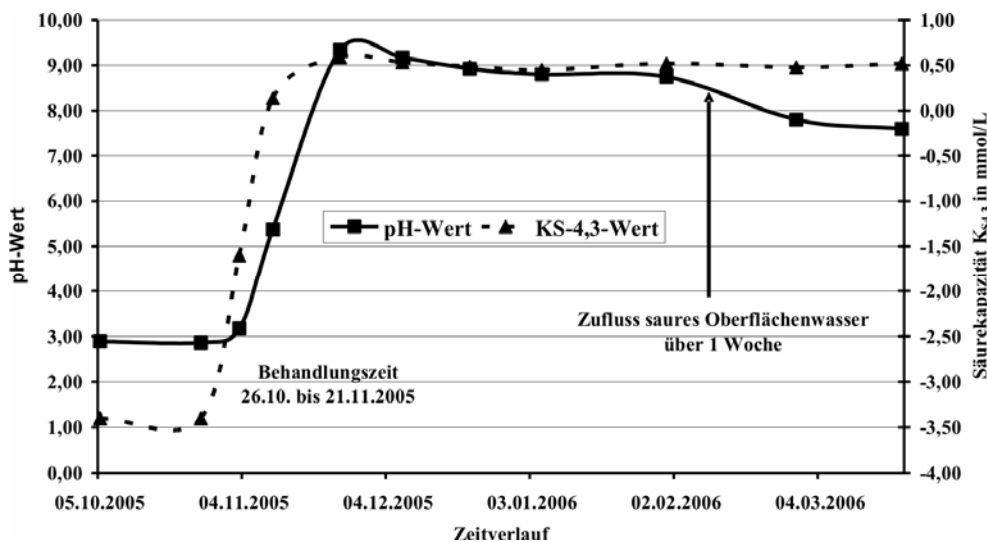


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf pH-Wert und Säurekapazität im Horstteich von Oktober 2005 bis April 2006.

Die Menge des ausgefällten Calcits war jedoch sehr gering. Sie war durch den niedrigen Kohlenstoffgehalt des Seewassers ($TIC \approx 0,5 \dots 1,0 \text{ mg/l}$) limitiert! Der Einsatz von Natronlauge zur Neutralisation des Horstteiches war folglich eine gute Wahl. Tabelle 4 zeigt die chemischen Prozesse, die während der Neutralisation mit Natronlauge im Horstteich stattgefunden haben.

In der nachfolgender Tabelle 5 sind diese Prozesse bilanziert.

Die gemessene Beaufschlagung des Seewassers mit Natrium liegt zwischen 80 bis 90 mg/L und bestätigt damit die bilanzierte Einsatzmenge. Die berechnete geringe Änderung der Calciumkonzentration im Seewasser ist messtechnisch nicht nachweisbar. Die Bilanzierung belegt, dass die Natronlauge vollständig wirksam geworden ist und den vollständigen Abbau der Acidität des Seewassers im Horstteich bewirkt hat. Das Dolomitgemisch ist nur teilweise wirksam geworden, hat aber wesentlich zum Aufbau der Alkalinität des Seewassers beigetragen. Die Autoren gehen davon aus, dass der bislang nicht wirksam gewordene Teil des Dolomitgemisches die Nachhaltigkeit der Maßnahme verbessert.

Durch Modellrechnungen und Laboruntersuchungen ist gezeigt worden, dass durch den Eintrag von etwa 25 t Kohlenensäure (CO_2) nach der durchgeführten In-Lake-Behandlung, der Aufbau eines Säurepuffers $K_{S4,3}$ im Horstteich bis etwa 3 mmol/L möglich gewesen wäre. Damit hätte die Nachhaltigkeit der Maßnahme zusätzlich verbessert werden können.

3.5.2 Prognose der weiteren hydrochemischen Entwicklung des Sees

Die Grundwasserbeschaffenheit im Zustrom zum Horstteich ist in zwei seenahen Messstellen nachgewiesen. Bei Belüftung würde aus dem Grundwasser ein schwach saures bis ungepuffertes Seewasser entstehen, was zu einer langsamen Wiederversauerung des Horstteiches führen muss. Der Volumenstrom des Grundwassers zum Horstteich ist jedoch nicht bekannt. Dieses Problem wurde durch den Ansatz unterschiedlicher Verweilzeiten des Seewassers im Horstteich modelltechnisch gelöst.

Die hydrochemische Modellierung des In-Lake-Verfahrens hat gezeigt, dass dem Kohlenstoffhaushalt des Sees eine entscheidende Bedeutung für die weitere chemische Entwicklung zukommt.

Vor der In-Lake-Neutralisation war der CO_2 -Partialdruck des Seewassers mit 1...3 mbar geringfügig höher als in der Atmosphäre. Durch die Calcitfällung hat sich nach der Neutralisation ein sehr niedriger CO_2 -Partialdruck im Seewasser eingestellt. Das Seewasser wird folglich Kohlenensäure aus der Atmosphäre absorbieren. Weitere Kohlenstoffquellen des Horstteiches sind der Grundwasserzustrom sowie sedimentäre und hypolimnische Respirationprozesse. Im Modell ist zunächst nur der Kohlenstoffeintrag mit dem Grundwasser und aus der Atmosphäre berücksichtigt worden. Die Bedeutung der Respiration wird als gering eingeschätzt.

Tab. 4: Neutralisations- und Begleitreaktion durch den NaOH-Eintrag.

Reaktion	Gleichung
(1) Neutralisation der Wasserstoffionen	$\text{H}^+ + \text{NaOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+$
(2) Dissoziation des Hydrogensulfats	$\text{HSO}_4^- + \text{NaOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
(3) Hydrolyse des Eisens(III)	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{NaOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{Na}^+$
(4) Hydrolyse des Aluminiums	$\text{Al}^{3+} + 3\text{NaOH} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{Na}^+$
(5) Dissoziation der Kohlensäure	$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HCO}_3^- + \text{Na}^+$
(6) Dissoziation des Hydrogencarbonats	$\text{HCO}_3^- + \text{NaOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-} + \text{Na}^+$
(7) Carbonatfällung	$\text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow$

Tab. 5: Bilanzierung der Neutralisations- und Begleitreaktion durch den NaOH-Eintrag.

Reaktion	Ionen	Entstehung [meq/l]	Verbrauch [meq/l]	Natrium [mmol/l]	Rechnerische Beaufschlagung bzw. Verlust
(1)	Wasserstoffionen		-1,2	+1,2	
(2)	Hydrogensulfat		-0,5	+0,5	
(3)	Eisen(3)		-1,2	+1,2	
(4)	Aluminium		-0,6	+0,6	+83 mg/l
(5)	Kohlensäure		-0,05	+0,05	
(5) (6)	Hydrogencarbonat	+0,05	-0,05	+0,05	
(6) (7)	Carbonat	+0,05	-0,05		
(7)	Calcium		-0,05		-2 mg/l

Die prognostischen Berechnungen zeigen, dass sich der pH-Wert im Horstteich durch die Zufuhr von Kohlensäure aus der Atmosphäre und mit dem Grundwasser auf Werte um 7 verringern wird, wobei die Pufferung von etwa 0,5 mmol/l erhalten bleibt. Die Entwicklung der Beschaffenheit des Seewassers seit Dezember 2005 bestätigt bislang die modellgestützt prognostizierten Trends.

Die Nachhaltigkeit der In-Lake-Neutralisation des Horstteiches wird wesentlich durch die Beschaffenheit und Menge des Grundwasserzustroms beeinflusst werden. Das begleitende Monitoring zum Horstteich und die begleitenden hydrochemischen Modellrechnungen zur Wasserbeschaffenheit werden hierüber weitere Erkenntnisse liefern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel des Horstteiches bei Bornsdorf wurden die Potenzen der In-Lake-Technik praktisch unter Beweis gestellt. Die Herstellung einer verdünnten Einsatzstoffsuspension sowie der flächenhafte Eintrag in das Gewässer erzeugen

optimale chemisch-physikalische Triebkräfte zwischen dem Konditionierungsmittel und den relevanten Wasserinhaltsstoffen. Durch die aktive Verteilung der Einsatzstoffsuspension mit einem mit Eigenantrieb versehenen Eintragschiff wurden zusätzliche Wirkungseffekte erreicht. Neben einem ohnehin hohen Wirkungsgrad bei der initialen Neutralisation mit Natronlauge (nahezu 100%) wurde mit einem speziellen Dolomitprodukt eine Grundlage zur Sicherung der Nachhaltigkeit und damit für die Anregung der biologischen Selbstregulierung im Gewässer gelegt. Dabei bewirkt der überproportionale Eintrag in Bereiche mit saurem Grundwasserzustrom nachhaltige Effekte analog einer reaktiven Böschung.

Die in der Planungsunterlage in Aussicht gestellten Effekte des In-Lake-Verfahrens konnten durch die projektbegleitenden Messungen und Modellrechnungen bestätigt werden. Durch einen zusätzlichen kombinierten Einsatz von CO_2 kann der Hydrogencarbonatpuffer gegen saure Einflüsse weiter deutlich erhöht werden.

Für die Behandlung von größeren sauren Tagebauseen wird eine alternative kostengünstige Produktkombination mit einer initialen Behand-

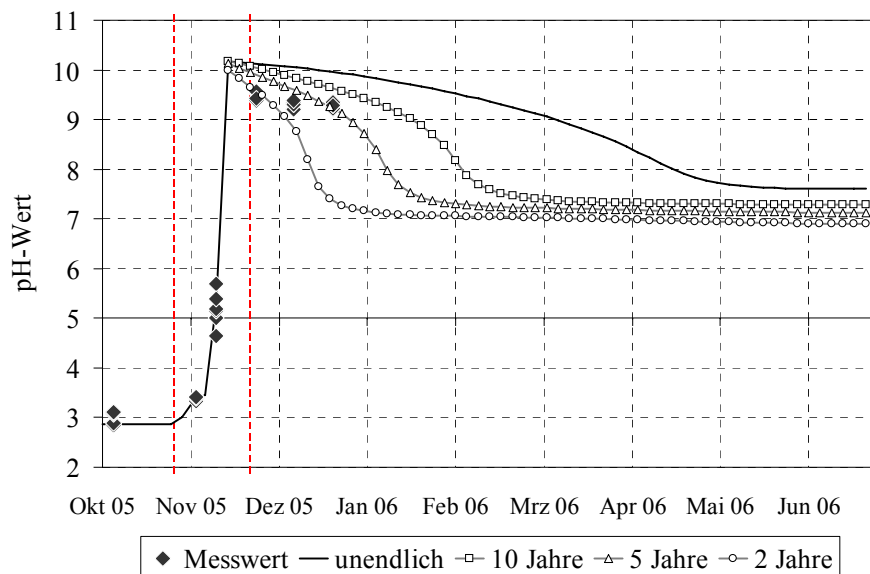


Abb. 5: Prognose des pH-Wertes im Horstteich bis Juni 2006 für unterschiedliche Verweilzeiten des Seewassers.

lung mit preiswerten gebrannten Kalk- oder Dolomitprodukten bis auf pH-Werte von ≥ 4 und einer pH-Feineinstellung mit Natronlauge auf Werte zwischen 6 und 8 vorgeschlagen. Auf Grund der vollständigen und schnellen Umsetzung der Natronlauge kann im Vergleich zu anderen Einsatzstoffen eine Behandlung mit entsprechenden Vorgaben sehr genau geplant und das Ergebnis exakt prognostiziert werden. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit können in weiteren Kombinationen CO_2 , Mischungen aus gebrannten- und ungebrannten Kalk-/Dolomitprodukten, NaHCO_3 und ggf. Soda eingesetzt werden. Ebenfalls ist das Aufspülen von geeigneten Produkten in Bereiche mit potentiell sauren Grundwasserzuströmungen sinnvoll.

Wir schätzen ein, dass die von uns entwickelt In-Lake-Technik ein geeignetes, kostengünstiges und nachhaltiges Instrumentarium zur Behandlung saurer Tagebauseen ist und gemeinsam mit der Flutung zur Gesundung des Wasserhaushaltes der Lausitz und von Mitteldeutschland beitragen kann.

5 Literatur

GRÜNEWALD, U., UHLMANN, W., SEILER, D., FLEISCHHAMMEL, K., ENDER, R. (2005): Ergebnisbericht – Weiterführung des Monitorings zur Einschätzung der Nachhaltigkeit des Pilotversuches „Resuspension und anschließende Verspülung sedimentierter Kalke im TBS Koschen von Januar bis Juli 2005“.

GRÜNEWALD, U., UHLMANN, W., SEILER, D., FLEISCHHAMMEL, P., MAZUR, K., ENDER, R. (2003): Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen der Erweiterten Tagebauseekette.

NITSCHKE, C., TIENZ, B.-S., (2005): Wasserkonferenz der LMBV, am 28.01.2005 in Hoyerswerda, Bisherige Erfahrungen bei der Sodapulverapplikation im Bockwitzer See.

RABE, W. (2004): Jahresbericht 2004 - Monitoring Horstteich.

RABE, W. (2005) Abschlussbericht „Ingenieurtechnische Objektbetreuung beim Schwimmbagger-einsatz zur Resuspension von Kalksedimenten im Tagebausee Koschen“.

RABE, W., ROHR, T. (2005): Bericht zur Ingenieurtechnische Objektbetreuung bei der Durchführung des In-Lake-Verfahrens am Horstteich in Bornsdorf einschließlich begleitendem Monitoring.

RABE, W., SCHOLZ G., KUNZE, P., APPELT, J., (2002): Abschlussbericht Neutralisation Wasserkörper Burghammer mittels Aschesedimentumlagerung.

UHLMANN, W. (2006): Gutachterliche Bewertung In-Lake-Verfahren zur Verbesserung der Wasserbeschaffenheit im Horstteich bei Bornsdorf.

ZSCHIEDRICH, K. & BENTHAUS F. C. (2005): Proceedings des DGFZ e.V., Heft 27: Braunkohlesanierung – bergbauliche und wasserwirtschaftliche Aufgaben, 93 – 113.