

# Die chemische Behandlung saurer Tagebauseen in der Lausitz. Erfahrungen zur Kalkschlammresuspension im Tagebausee Koschen.

Friedrich Carl Benthous<sup>1</sup>, Wilfried Uhlmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungs-Gesellschaft mbH, Knappenstraße 1, 01968 Senftenberg, FC.Benthous@lmbv.de

<sup>2</sup>Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann, Langobardenstr. 48, 01239 Dresden

Durch zusetzendes Grundwasser entstehen im Lausitzer Braunkohlerevier saure Tagebauseen. Durch Fremdfutung wird die Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen günstig beeinflusst. Das Wasserdarbot ist jedoch begrenzt. Aktuelle Prognosen zeigen, dass auch mit Fremdfutung ein Teil der Tagebauseen sauer bleiben wird.

Zum Erreichen der vorgegebenen Nutzungsziele sind Maßnahmen zur Wasserbehandlung vorgesehen. Die LMBV unterstützt Partner bei der Weiterentwicklung und Anwendung verschiedener Verfahren, die aus Forschungsarbeiten hervorgegangen sind. In mehreren Pilotprojekten werden derzeit verschiedene Verfahren und Rohstoffe auf Zielerreichung, Wirksamkeit, Nachhaltigkeit und Kosten geprüft.

Im Tagebausee Koschen lagerten Kalkschlämme, die im Zuge der Böschungsstabilisierung umgelagert werden mussten. Diese Maßnahme wurde in den Jahren 2004 und 2005 genutzt, um die Wasserbeschaffenheit des Tagebausees Koschen vorteilhaft und kostengünstig durch ein in-lake-Verfahren zu beeinflussen. Mit einem Saugspülbagger wurde das Kalkmaterial aufgenommen, als Suspension durch eine Spülleitung zu mehreren auf dem See positionierten Kreisregner transportiert und ausgebracht. Durch spezielle verfahrenstechnische Verbesserungen wurde die Suspensionsherstellung optimiert. Die windinduzierten Strömungsverhältnisse im See haben die Stoffverteilung unterstützt.

Zeitgleich mit der Maßnahme erfolgte die Zufuhr von Flutungswasser, die Weiterleitung von Wasser in den stromunteren Tagebausee und die herbstliche Vollzirkulation. Durch eine hydrochemische Bilanzierung und Modellierung mit einem Kompartimentmodell konnten die Effekte der Teilprozesse quantitativ abgegrenzt werden. Die Behandlung des Sees führte zu einem Alkalinitätsgewinn von +0,7 eq/m<sup>3</sup> und durch die Flutung zusätzlich von 0,2 eq/m<sup>3</sup>. Mit einem Wirkungsgrad von etwa 90%, bezogen auf die Alkalinität der Suspension, war das in-lake-Verfahren im Tagebausee Koschen sehr erfolgreich.

Acidic groundwater from catchments areas at mining lakes in the Lausitz basin causes negative effects on water quality. Those do not fit to existing standards and does not correspond to further use of mining lakes. Most of the lakes are to be filled by surface waters from nearby rivers and creeks.

Cause of the limited availability of flooding water a hydrochemical treatment of water bodies is necessary. In order to apply modern techniques, the LMBV company support partners to develop new procedures. The LMBV evaluates the results of R+D projects on applications to reach the objectives with high efficiency, sustainability and cost effectiveness.

At the Koschen lake, limestone slurry of a former treatment plant had to be moved because of stability reasons. In order to ameliorate the water quality in the lake, this slurry deposit had been mixed to a 540,000 m<sup>3</sup> suspension and used as neutralising agent. Wind effects had been used to spread the agent all over the water body. While running this project in 2004 and 2005, the lake had been filled simultaneously with about 9 Mio. m<sup>3</sup> of surface waters. Hydrochemical modelling, based on a monitoring program, allows demonstrating the effects of the treatment as well as the filling process. The increase of alkalinity gained by treatment and by filling was about +0.7 eq/m<sup>3</sup> respectively +0.2 eq/m<sup>3</sup>. Together they allow ameliorating the water body by economic means.

## 1 Einleitung

Der Braunkohlenbergbau hat nachhaltig in die Gebietswasserhaushalte der Lausitz und Mitteldeutschlands eingegriffen. Durch die Inanspruchnahme der Oberfläche zur Gewinnung der Kohle und die Trockenlegung der Tagebaue wurde das Grundwasser weiträumig abgesenkt. In den Revieren entstanden Grundwasser-Absenkungstrichter mit einem Wasserdefizit von 13 Mrd. m<sup>3</sup>, davon allein 7 Mrd. m<sup>3</sup> in der Lausitz. Die kurzfristige Schließung von zahlreichen Tagebauen infolge der Neuausrichtung der Energiewirtschaft in den 1990er Jahren ließ zahlreiche Restlöcher entstehen, aus denen allein in der Lausitz insgesamt 28 größere Seen mit rund 14.000 ha Wasserfläche entstehen werden.

Bergbaufolgeseen des Braunkohlenbergbaus unterscheiden sich von natürlichen Seen durch ihre landschaftstypische Morphologie. Der Eintrag von Verwitterungsprodukten der Pyrit- und Markasitoxidation aus den kohlebegleitenden Schichten der tertiären Sande führt zur Versauerung des Wassers. Die entstehenden Bergbaufolgeseen sind infolge dieser sauren Stoffeinträge durch geringe pH-Werte (pH ≈ 2...3), hohe Sulfatgehalte (>1.000 mg/l) und hohe Mineralisation gekennzeichnet.

Durch die Umweltministerkonferenz der Länder wurde 1994 das „Rahmenkonzept zur Wiederherstellung eines ausgeglichenen, sich weitgehend selbstregulierenden Wasserhaushaltes in den vom Braunkohlenbergbau beeinträchtigten Flusseinzugsgebieten“ verabschiedet. Durch die LMBV und die für den Wasserhaushalt verant-

wortlichen Landesbehörden ist ein sich selbst regulierender Wasserhaushalt wiederherzustellen. Dieser Grundsatz ist durch die Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in die Landeswassergesetze rechtlich untermauert worden. Diese fordern für künstliche oder erheblich veränderte Gewässer - Bergbaufolgeseen sind dieser Kategorie zuzuordnen - ein gutes ökologisches Potential und einen guten chemischen Zustand. Dazu sind entsprechende Maßnahmenprogramme durch die wasserverantwortlichen Behörden bis 2009 aufzustellen, die im Wesentlichen auf den Konzepten der LMBV aufbauen werden. Das Flutungs- und Konditionierungskonzept (LMBV 2005) orientiert auf eine maximale Nutzung von Oberflächenwasser der Vorfluter in den Bergbauregionen zur Flutung der Tagebaurestlöcher. Nach den Erfahrungen bei der Flutung des Olbersdorfers Sees in der Lausitz und des Cospudener Sees südlich von Leipzig kann eine nutzungsgerechte Wasserbeschaffenheit unter günstigen Randbedingungen allein durch die Flutung erreicht werden.

Durch den schnellen Anstieg des Wasserspiegels im Tagebausee werden aciditätsreiche Zuflüsse vermieden. Die in das Gebirge gerichtete Strömung wirkt stabilisierend auf die Böschungen und vermindert den zusätzlichen Eintrag durch die Erosion. Das Einleiten von Oberflächenwasser aus der fließenden Welle mit Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff begünstigt den chemisch-biologischen Neutralisationsprozess im See. Zur schnellen Flutung mit Oberflächenwasser gibt es zurzeit keine wirtschaftliche Alternative. Was mit Oberflächenwasser zur Gütesteu-

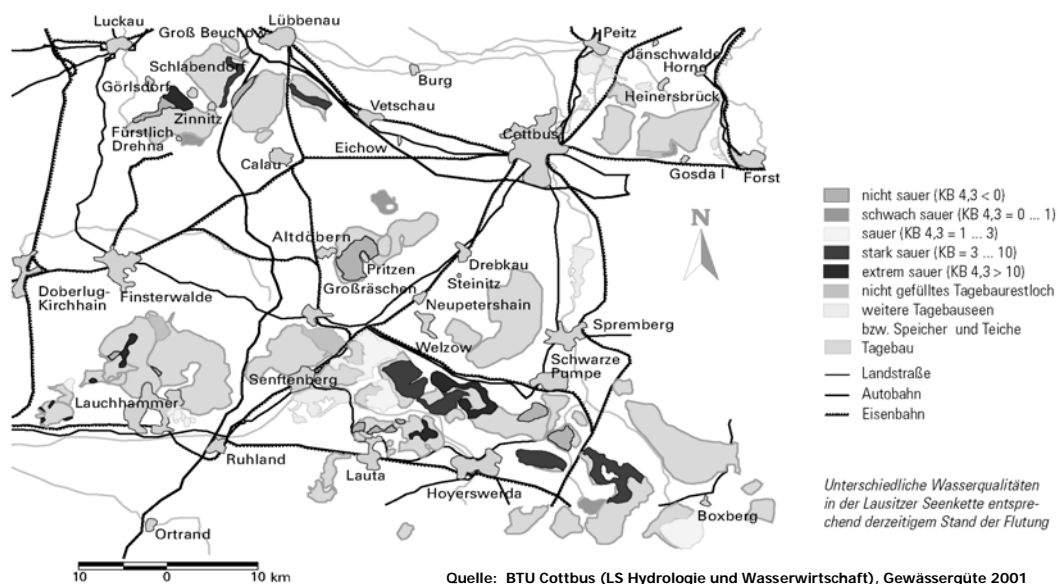


Abb. 1: Übersicht Sanierungsbergbau Lausitz und Lage des Tagebausees Koschen.

rung nicht erreicht werden kann, muss jedoch durch zusätzliche chemotechnische Maßnahmen ausgeglichen werden.

## 2 Behandlungsverfahren

### 2.1 Übersicht

Seit 1995 wird die Beschaffenheitsentwicklung in den entstehenden Tagebauseen durch kompetente Partner untersucht. In limnologischen Gutachten wird der aktuelle Zustand eines Sees dargestellt und die Entwicklung unter den bekannten Randbedingungen prognostiziert. Die langjährigen Untersuchungen sind die Grundlage für die weiteren Maßnahmen.

Im Rahmen des montanhydrologischen Monitorings erfolgt die Untersuchung der Beschaffenheit von Tagebauseen, des Grundwassers und von Fließgewässern. Mit über 80.000 Messungen im Jahr werden auch tagebauseeerne Bereiche erfasst, die für die langfristige Beschaffenheitsentwicklung von besonderer Bedeutung sind. Die Ergebnisse des Monitorings werden in einer geohydrologischen Datenbank erfasst. Sie bilden die Grundlage für die hydrogeologische Modellierung als auch für die jährlich zu erstellenden Berichte an die Behörden.

Zahlreiche Forschungsarbeiten zur Beeinflussung der Wasserbeschaffenheit sind vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und andere Institutionen gefördert und zum Teil von der LMBV kofinanziert worden. Darin sind Alternativen der Beeinflussung der Gewässerbe-

schaffenheit untersucht worden. Eine Vielzahl von Verfahrensvorschlägen ist entstanden. Die meisten sind bisher aber nur im Labor- und kleintechnischen Maßstab unter idealen Randbedingungen erprobt worden. Die Umsetzung dieser Vorschläge in technische Maßnahmen stellt eine besondere Herausforderung für die LMBV dar. Diese sind mit Risiken und auch Chancen verbunden. Letztere gilt es zu nutzen.

Erst die Durchführung von technischen Pilotmaßnahmen unter den Randbedingungen der Sanierung liefert verallgemeinerungswürdige und belastbare Aussagen zur Anwendung neuer Verfahren für die wasserwirtschaftliche Sanierung hinsichtlich:

- der Erfolgsaussichten für das Erreichen der Zielstellung,
- der Verfahrensdurchführung,
- der Verfügbarkeit der vorgesehenen Einsatzstoffe und
- der Wirtschaftlichkeit.

### 2.2 Wirkungsweise

Auch weiterhin ist die Flutung mit Oberflächenwasser aus den Vorflutern das wirksamste und wirtschaftlichste Verfahren zur Beeinflussung der Gewässerbeschaffenheit. Dazu sind eine Reihe von hydrotechnischen Maßnahmen umzusetzen. Neben der Böschungssicherung zur Vermeidung von Stoffeinträgen durch Erosion ist die Errichtung von wasserbaulichen Anlagen eine elementare Grundvoraussetzung. Zuleitungs- und

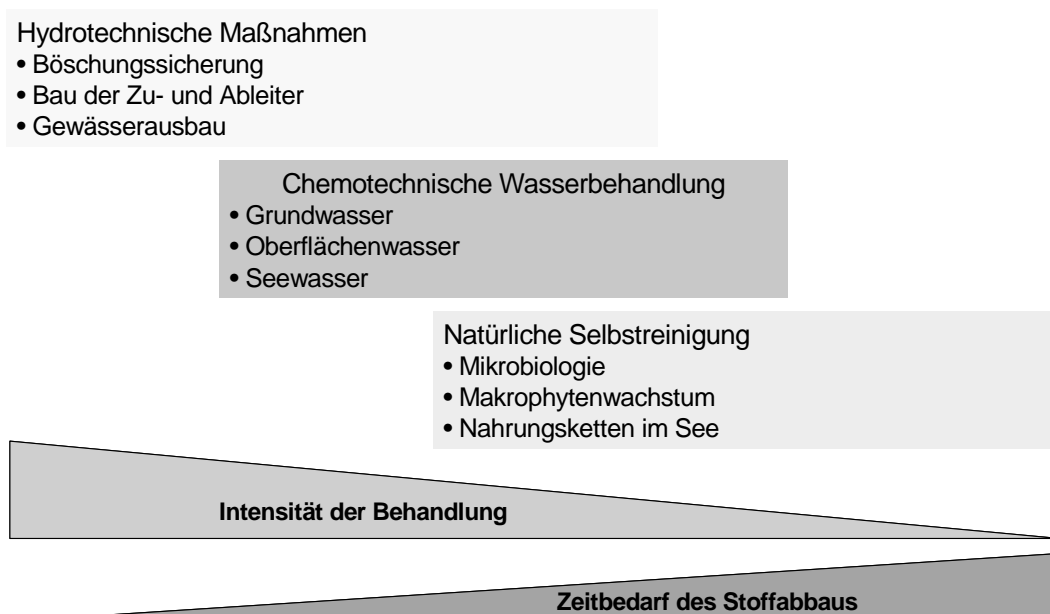


Abb. 3: Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit.

**Tab. 1: Entwicklungstand der Verfahren zur Neutralisation saurer Tagebauseen.**

Medium	Prozessspezifik		Entwicklungsstand				
			Entwurf	Labor	Klein- tech- nisch	Groß- tech- nisch	Stand der Technik
Flutungswasser Seewasser	Unbehandelt						X
	(Chemisch) vorkonditioniert						(X)
	Chemisch	in-lake on-site				X	X
	Elektrochemisch			X			
Grundwasser	Biologisch	Passiv			O		
		Aktiv			X		
	Hydraulisch	Dichtwände					X
	Chemisch und/oder Biologisch	Reaktive Wände Funnel-and-Gate Pump-and-Treat	X			O	
Kombiniert	Seereaktionsböschungen und -teppiche					O	X

X Aktueller Entwicklungsstand der Verfahren

(X) Anwendung im Bergbau, aber noch nicht für den konkreten Fall der Seeneutralisation

O Verfahren derzeit in der Testphase

Auslaufbauwerke, Druckrohrleitungssysteme, Pumpstationen sowie Heberleitungen werden errichtet, um Flutungswasser nicht nur vom Vorfluter in den Tagebausee, sondern auch von einem Flussgebiet in das andere überzuleiten. Ein wichtiges Überleitungselement für die Flutung der Spreetaler Seen und der Restlochketten Sedlitz - Skado - Koschen stellt die Neißewasserüberleitung dar. Der Endausbau, das heißt die Vernetzung der Seen mit der öffentlichen Vorflut, wird wasserstandsabhängig mit dem Bau der Auslaufbauwerke vollzogen. In Summe sind in der Lausitz 13 Überleitungen und 20 Auslaufbauwerke zu errichten.

Zum Ausgleich des defizitären Wasserdargebots sind verstärkt chemotechnische Wasserbehandlungsmethoden für die Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit weiter zu entwickeln. Dazu sind der aktuelle Säureinhalt im See sowie der Säureeintrag aus dem Grundwasser zu berücksichtigen. Der Säureeintrag aus Uferböschungen und Kippen in Abhängigkeit von Zustandsänderungen der Flutung müssen bei der Konzeption berücksichtigt werden. In den nächsten Jahren werden daher verstärkt Verfahren angewendet, um die Wasserkörper sowie die Wasserströme effektiv und kostengünstig behandeln zu können. Die Nachhaltigkeit der Verfahren, auch in der Nachsorge, wird dabei eine zentrale Rolle spielen. Da die Tagebauseen als offene Systeme im Austausch mit der hydrologischen Umgebung stehen, ist die Überlagerung von Maßnahmen zur Gewässerbeeinflussung verstärkt zu betrachten.

Darüber hinaus sind natürliche Selbstreinigungsprozesse wissenschaftlich zu untersuchen und

anwendungsreif zu machen. Hier gilt es, mikrobiologische Stoffkreisläufe gezielt zur Gewässerbehandlung nutzen. Die Potentiale der Primärproduktion und der Respiration sind für die Sanierung der Gewässer auszuschöpfen. Bereiche mit grundwassernahem Flurabstand können zur Verbesserung des Wasserhaushaltes in der Region gezielt für die Wasserbehandlung genutzt werden.

## 2.3 Stand der Entwicklung

Die Verfahren zur Beeinflussung der Gewässerbeschaffenheit in Tagebauseen können der besseren Übersicht halber nach dem Medium, wo sich die Wirkung primär entfaltet, und nach der prozessspezifischen Ausrichtung klassifiziert werden (Tab. 1). Als kombinierte Verfahren sind solche gemeint, die gleichzeitig das Grund- und Seewasser beeinflussen. In der Tab. 1 ist der aktuelle Entwicklungsstand der Verfahren zur Neutralisation von sauren Tagebauseen charakterisiert.

## 3 Koschen

### 3.1 Ausgangsbedingungen

Der Tagebau Koschen wurde von 1954 bis 1971 geführt. Bis zu seiner Einstellung wurden ca. 83 Mio. Tonnen Kohle gefördert. Seitdem ist der verbliebene Hohlraum von 92 Mio. m<sup>3</sup> überwiegend durch das zuzitende Grundwasser gefüllt worden. Lediglich weniger als 5% des Volumens sind bisher durch Flutung mit Oberflächenwasser aufgefüllt worden. Im Zuge der gegenwärtigen

**Tab. 2: Morphometrie und Wasserbilanz.**

Kennwert	Maßzahl	Maßeinheit
Volumen (Sep 2004)	81.600.000	m <sup>3</sup>
Fläche (Sep 2004)	5.150.000	m <sup>2</sup>
Mittlere Tiefe	16	m
Mittlerer Grundwasserzustrom	0,5	m <sup>3</sup> /s
Oberflächenwasserzufluss *)	0,0...1,6	m <sup>3</sup> /s
Mittlere Verweilzeit	5	a

\*) zeitweilige Flutung aus der Schwarzen Elster

**Tab. 3: Hydrochemie.**

Chemischer Kennwert	Maßzahl	Maßeinheit
pH	3,0	
Basenkapazität K <sub>B4,3</sub>	1,6	mmol/L
Basenkapazität K <sub>B8,2</sub>	2,0	mmol/L
Sulfat	650	mg/L
Eisen	12	mg/L
Aluminium	2	mg/L

**Tab. 4: Chemisch/mineralogische Zusammensetzung der Kalkschlämme.**

Mineral	Formel	Massenanteil im Schlamm	Theoretische Säurekapazi- tät bis pH=4,3 in mol/kg	Gemessene Säurekapazi- tät bis pH=4,3 in mol/kg
Calcit	CaCO <sub>3</sub>	53 M%	10,6	16...22
Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>	32 M%	8,6	
Thaumasit	Ca <sub>3</sub> [CO <sub>3</sub> /SO <sub>4</sub> /Si(OH) <sub>6</sub> ].12H <sub>2</sub> O	10 M%	gering	
Ettringit	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> [(OH) <sub>4</sub> /SO <sub>4</sub> ].24H <sub>2</sub> O			
Weitere (Grafit, Ferrosili- cium, Eisen)	5 M%			

Böschungssanierung war zur Beseitigung von rutschungsgefährdeten Tiefenbereichen im Tagebausee Koschen die Entnahme von Bodenmassen aus Flachwasserbereichen erforderlich. Die Entnahmebereiche schlossen auch die Kalkschlammablagerungen im nordwestlichen Bereich mit ein. In diesem Zusammenhang lag der Gedanke nahe, die bodenmechanisch notwendig umzulagernden Kalkschlämme für die Neutralisation des sauren Seewassers des Tagebausees Koschen im Sinne eines Pilotversuches zur in-lake-Neutralisation zu nutzen.

Der Pilotversuch im Tagebausee Koschen (Geierswalder See) wurde von September bis Dezember 2004 durchgeführt. Mit der technischen Ausführung des Vorhabens war die BUL Sachsen betraut, die wissenschaftliche Betreuung war durch die BTU Cottbus, LS Hydrologie und Wasserwirtschaft sowie das Institut für Wasser und Boden, Dresden gesichert. Finanziert wurde die Maßnahme von der LMBV.

### 3.2 Limnologie und Hydrochemie

Der Tagebausee Koschen erhält Grundwasserzustrom von Süden aus den gewachsenen Grundwasserleitern der Tätzschwitzer Rinne. Gemäß den Berechnungen des geohydraulischen Großraummodells der LMBV beträgt der Grundwasserzustrom bei einem Wasserstand von +99 mNN etwa 0,5 m<sup>3</sup>/s. Der Grundwasserabstrom erfolgt nach Nordosten und Norden in Richtung der Tagebauseen Skado bzw. Sedlitz überwiegend durch Kippen. Aus der Grundwasserzustrombilanz lässt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von etwa 5 Jahren ableiten. Bei Flutung aus der Schwarzen Elster verkürzt sich die Verweilzeit entsprechend.

Der Tagebausee kann durch ein Wasserbauwerk südlich von Kleinkoschen aus der Schwarzen Elster geflutet werden. Der Koschener See ist durch Überleiter mit den östlich bzw. nördlich gelegenen Tagebauseen Skado bzw. Sedlitz verbunden. Der Koschener See wurde erstmalig im April und November 2004 aus der Schwarzen Elster geflutet. In der zweiten Flutungsphase im November 2004 wurde zeitgleich Wasser zum Tagebausee Skado (Partwitzer See) übergeleitet.

Im Jahr 2004 wurden insgesamt 1,1 Mio. m<sup>3</sup> Elsterwasser in den Tagebausee Koschen eingeleitet und 0,9 Mio. m<sup>3</sup> in den Tagebausee Skado übergeleitet. In der ersten Jahreshälfte 2005 betrug die Flutung aus der Schwarzen Elster bereits 7,9 Mio. m<sup>3</sup> und die Überleitung nach Skado 7,7 Mio. m.

Zu Beginn der Resuspension im September 2004 wurde ein Wasserstand von +99,1 mNN gemessen. Das zugehörige Seevolumen betrug etwa 81,6 Mio. m<sup>3</sup>. Durch die Flutung war der Wasserstand im März 2005 zeitweilig bis auf +99,8 mNN angestiegen. Durch verringerte Einleitmengen und fortgesetzte Überleitung nach Skado erreichte der Wasserspiegel Ende Juni mit +99,2 mNN etwa das Ausgangsniveau zu Beginn der Kalkschlammresuspension.

Der Tagebausee ist ein dimiktisches Gewässer mit stabiler thermischer Schichtung im Sommerhalbjahr. Die Stratifizierung setzt gewöhnlich im April ein, erreicht im August/September ihren Höhepunkt und löst sich im Zuge der herbstlichen Vollzirkulation wieder auf.

Im Vergleich der Lausitzer Tagebauseen weist der Tagebausee Koschen nur einen geringen Säuregrad auf (Tab. 3). Das Seewasser war vor Beginn des Pilotprojektes und der herbstlichen Flutung mit Basenkapazitäten  $K_{B4,3} \approx 1,6$  mmol/l und  $K_{B8,2} \approx 2,0$  mmol/l gekennzeichnet. Das zuströmende Grundwasser der Tätzschwitzer Rinne ist ebenfalls nur schwach sauer. Zustrom von Kippengrundwasser findet aufgrund des hohen Seewasserspiegels praktisch nicht statt. Weitere chemische Kennwerte des Seewassers können aus der Tab. 3 entnommen werden.

### 3.3 Randbedingungen

Als Hauptbestandteile der Kalkschlämme wurden durch chemische und mineralogische Untersuchungen die Minerale Calcit, Portlandit, Thaumazit und Ettringit nachgewiesen (Tab. 4). Portlandit hat sich durch Hydratisierung des Bunkalkes während der Suspensionsherstellung gebildet. Calcit entstand durch Carbonisierung des Calciumhydroxides während der langen Liegezeit.

Die Kalksedimente weisen eine hohe Restalkalität und Reaktivität auf. Die experimentell bestimmte Säurekapazität stimmte im Mittel mit der theoretischen Säurekapazität überein. Das verfügbare Alkalinitätspotential der Kalksedi-

mente stellte für den Tagebausee Koschen eine Anhebung des pH-Wertes von  $\text{pH} \approx 3,0$  auf  $\text{pH} \approx 3,5$  und eine Minderung der Basenkapazität  $K_{B4,3}$  des Seewassers von 1,6 mmol/l auf etwa 0,3 mmol/l in Aussicht.

Durch Modellrechnungen und Laborversuche zur Löslichkeit und Reaktivität der Kalksedimente konnte gezeigt werden, dass eine hohe chemische Ausbeute der feststoffgebundenen Alkalinität nur bei einem vergleichsweise geringen Feststoffanteil der Suspension erreicht werden kann. Ein optimaler chemischer Wirkungsgrad lässt sich bei einem Gehalt des reaktiven Calciumhydroxides von 0,17 Masse-% bzw. einem mittleren Feststoffgehalt der Suspension von ca. 0,5 Masse-% erzielen. Bei hohen pH-Werten in der Suspension fallen Calciumcarbonat und Magnesiumhydroxid aus.

### 3.4 Angewendete Technik

Die Kalkschlämme wurden mit einem schwimmenden Saugspülbagger als Suspension aufgenommen und über eine schwimmende Rohrleitung ans Ufer gepumpt. Zum Anmischen der Suspension wurde saures Seewasser verwendet. Über eine Druckerhöhungsstation wurde die Suspension in eine etwa 1.200 Meter lange, durch schwimmende Pontons fixierte, Rohrleitung auf den See geführt. Die Suspensionsverteilung erfolgte über insgesamt 10 Großkreisregner (Abb. 4). Eine Düse am Rohrleitungsende diente der gleichmäßigen Druckhaltung und Verteilung der Suspension. Die Verteilung konnte mittels Boot über das Gewässer geschwenkt werden (Abb. 5). Unter gezielter Ausnutzung der durch Wind induzierten Oberflächenströmung im See konnte ein sehr großer Behandlungsraum erzeugt werden.



Abb. 4: Suspensionsverteilung im Koschener See mit Kreisregnern (Foto: BTU Cottbus).

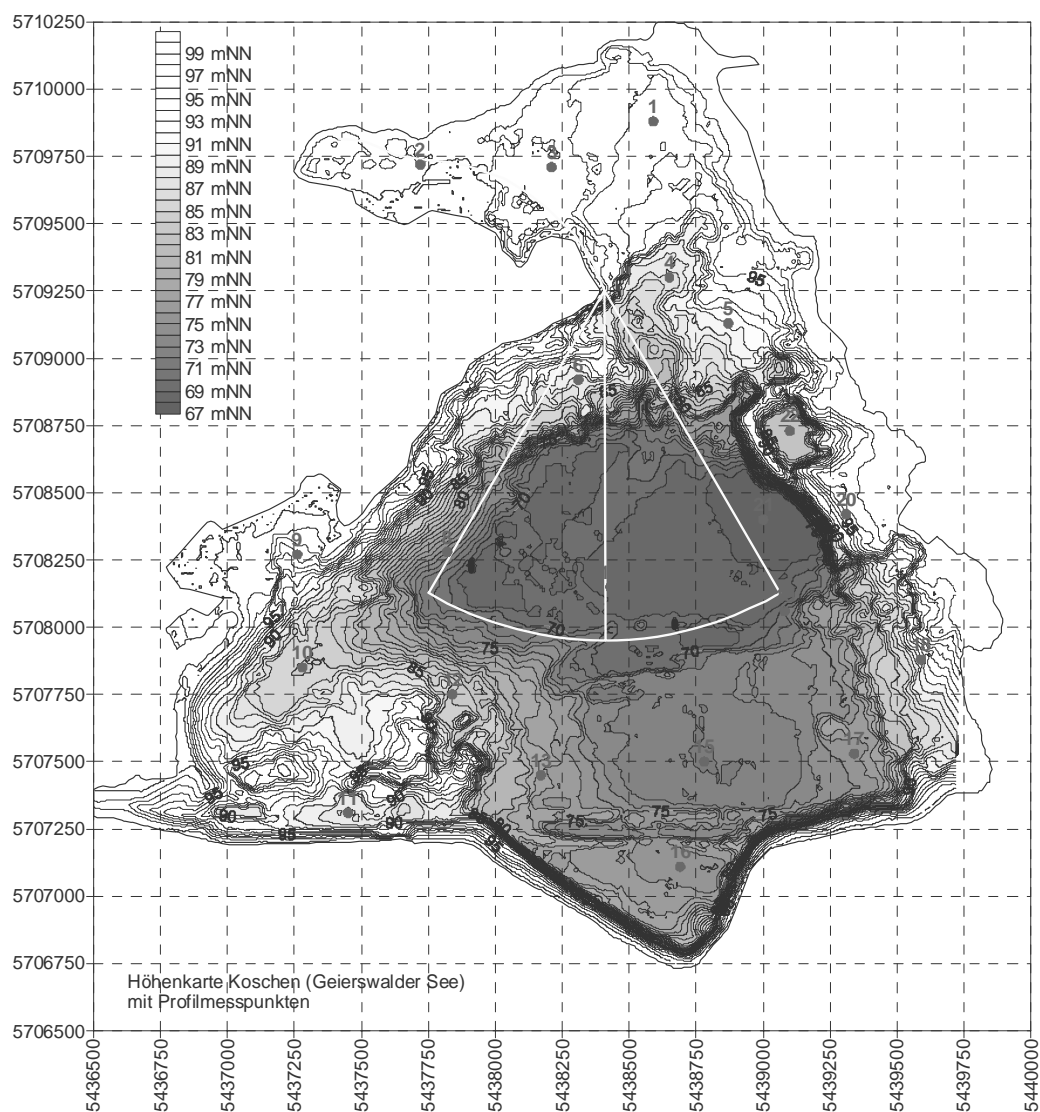
Technisch Probleme hatten anfänglich die Säurekorrosion und Materialabrasion bereitet. Grobe Sedimentbestandteile hatten zur Verstopfungen der Regnerdüsen geführt. Bei Verwendung säure- und abrasionsbeständiger Materialien sowie eines industriereinen Neutralisationsmittels ist ein störungsfreier Betrieb der in-lake-Technik möglich.

Der Feststoffgehalt der Suspension wurde über die Schneidekopf- und Pumpendrehzahl des Saugspülbaggers gesteuert. Im realen Betrieb konnte ein Feststoffgehalt der Suspension im Mittel von ca. 1,9 Masse-% erreicht werden.

Der Feststoffgehalt und die stoffliche Zusammensetzung der Suspension waren sehr ungleichmäßig (Abb. 6). Die Betriebsüberwachung erfolgte durch regelmäßige Messung der Suspensionsdichte und ihrer chemischen Kennwerte. Der pH-Wert der Suspension lag im Median bei

$\text{pH} \approx 9$  mit einer Spannweite von  $\text{pH} \approx 3$  bis  $\text{pH} \approx 13$ . Die zugehörige Säureneutralisationskapazität betrug im Mittel  $K_{S4,3} \approx 106 \text{ mmol/l}$ . Die Berechnungen ergeben ein mittleres wirksames Säureneutralisationspotential des Feststoffes von  $5,6 \text{ mol/kg}$ . Im Vergleich zum maximalen Neutralisationspotential des reinen Kalkschlammes (vgl. Kap. 3.3) lag das tatsächliche mittlere Neutralisationspotential des umgelagerten Sediments damit bei etwa 30%.

Insgesamt wurde ein Volumen von ca.  $520.000 \text{ m}^3$  Kalkschlamm-Suspension in den Tagebausee Koschen verspült. Bei einem mittleren Feststoffgehalt von 1,9 Masse-% entspricht das einer umgelagerten Feststoffmenge von ca. 10.000 Tonnen. Bei einem mittleren Neutralisationspotential des Sediments von  $5,6 \text{ mol/kg}$  resultiert daraus ein Alkalinitätseintrag von ca. 56.000 keq im Maßnahmezeitraum.



**Abb. 5:** Schwenkbereich der Verteilung (gelb) und Messpunkte des Monitorings (rot) im Tagebausee Koschen.



**Abb. 6:** Unterschiedliche Zusammensetzung der Suspension.

## 4 Wissenschaftliche Begleitung

Das Pilotvorhaben zur Resuspension von Kalkschlämmen im Tageausee Koschen wurde von der BTU Cottbus und vom Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann wissenschaftlich begleitet. In dichten zeitlichen Abständen wurden Profilmessungen im Tageausee durchgeführt und Wasserproben entnommen. Die Profilmessungen und Probennahmen erfolgten an mehreren Stellen im See (Abb. 4). Die Untersuchungen belegen sehr geringe chemische Gradienten in der Horizontalen und einen schnellen Wasseraustausch innerhalb der jeweiligen Kompartimente.

Das Pilotvorhaben erfolgte nicht unabhängig vom hydrologischen Geschehen. Während des Vorhabens (November 2004) und in den Monaten unmittelbar nach dem Vorhaben (Januar bis April 2005) wurde aus der Schwarzen Elster Oberflächenwasser in den See eingeleitet. Zur Bewertung des Wirkungsgrades und der Nachhaltigkeit des in-lake-Vorhabens mussten die Effekte der Flutung von den chemischen Effekten der Kalkschlammresuspension abgegrenzt werden. Das erfolgte auf der Grundlage eines hydrochemischen Seemodells (Kap. 4.1) sowie einer Alkalinitätsbilanz (Kap. 4.2).

### 4.1 Hydrogeochemische Modellierung

#### 4.1.1 Modellansatz

Die Flutung der Lausitzer Tageauseen wird durch Modellrechnungen zur Wasserbeschaffenheit begleitet (LMBV 2003). Die Tageauseen werden limnologisch überwiegend als Mischreaktor- oder Kompartimentmodelle abgebildet.

Diese Abstraktionsebene hat sich für mittelfristige Prognosen als zweckentsprechend erwiesen. Die hydrochemischen Prozesse in den Tageauseen werden mit dem Programm PHREEQC (PARKHURST & APPELO 1999) abgebildet. Die konzeptionellen Grundlagen zur hydrochemischen Modellierung saurer Tageauseen sind im Wesentlichen in (LUA 1996) und (LUA 2001) dargelegt.

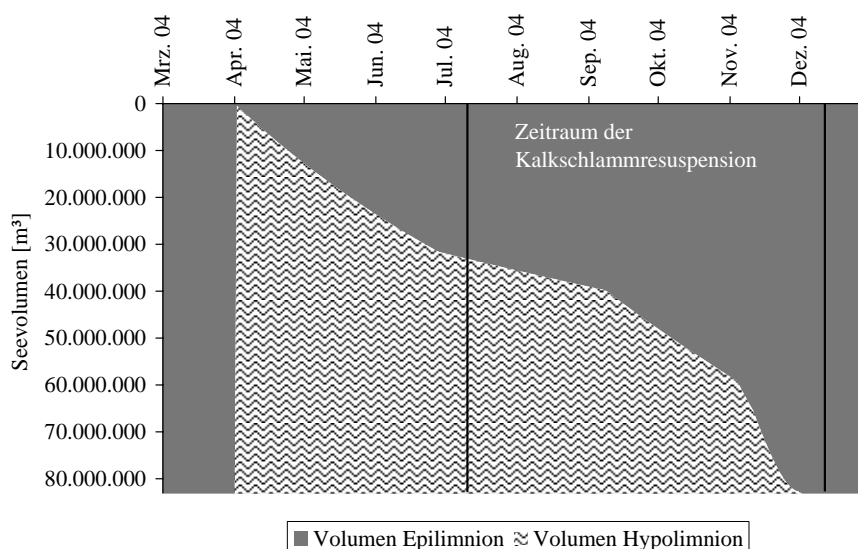
Die hydrochemische Modellierung der sauren Tageauseen baut auf Stoffmengenbilanzen für die einzelnen chemischen Komponenten auf:

$$\frac{d(V \cdot C)_{TBS}}{dt} = \sum_i (Q_i \cdot C_i)_{GWzu} + \sum_i (Q_i \cdot C_i)_{OWzu} - \sum_j (Q_j \cdot C_{TBS})_{GWab} - \sum_j (Q_j \cdot C_{TBS})_{OWab} + R_{Bö} \pm R_{Reak} + R_{Susp}$$

In der zeitvariablen Stoffmengenbilanz des Tageausees  $d(V \cdot C)_{TBS}/dt$  werden die zuströmenden Grund- und Oberflächenwässer (GWzu bzw. OWzu) mit ihren spezifischen Beschaffenheiten, die abströmenden Grund- und Oberflächenwässer (GWab bzw. OWab) mit der Beschaffenheiten des Tageausees (TBS), nicht volumenstromgebundene Stoffeinträge durch Erosion der Böschungen ( $R_{Bö}$ ), chemische und biologische Prozesse ( $R_{Reak}$ ) sowie technisch applizierte Stoffeinträge ( $R_{Susp}$ ), wie z.B. die Kalkschlammresuspension, berücksichtigt. Die erforderlichen zeitvariablen Volumina und Volumenströme werden durch geohydraulische Modelle ermittelt. Die feststoffgebundenen Stoffeinträge und die chemischen Prozesse werden durch chemische Untersuchungen, spezielle Teilmodelle (z.B. zur Erosion) sowie durch Modellanpassung an gemessene Datenreihen der Wasserbeschaffenheit quantifiziert.

#### 4.1.2 Modellkalibrierung

Für den Tageausee Koschen war vor der Kalkschlammresuspension im Rahmen limnologischer und hydrochemischer Bearbeitungen eine Stoffmengenbilanz ausreichend gut angepasst worden. Da sich die Wasserbeschaffenheit des Tageausees Koschen während der letzten 10 Jahre kaum verändert hat, konnten die Säureeinträge mit dem Grundwasser sowie durch Böschungserosion integral quantifiziert werden. Sie betragen im Mittel etwa 70 kmol/d. Die Stoffmengenbilanz bildete die Grundlage zur Einschätzung der Wirkung der Kalkschlammresuspension auf die Wasserbeschaffenheit des



**Abb. 7: Kompartimente des Tagebausees Koschen.**

Gewässers, der durch Vergleich zwischen dem messtechnisch erfassten Alkalinitätseintrag und der modellgestützt reflektierte Entwicklung ermittelt wurde.

#### 4.1.3 Kompartimentmodell

Eine Verringerung der Acidität lies sich zunächst nur im Epilimnion des geschichteten Gewässers feststellen, wo die Einspülung der Suspension erfolgte. Trotz fortgesetzter Resuspension stagnierte zeitweilig sogar die hydrochemische Entwicklung im Epilimnion. Das wurde durch die Veränderung der Thermokline im Zuge der herbstillchen Zirkulation verursacht.

Die Besonderheiten der hydrochemischen Entwicklung während der herbstillchen Zirkulation mussten mit einem Kompartimentmodell mit entkoppelten Wasserbilanzen abgebildet werden (Abb. 7). Die Zufuhr von Flutungswasser sowie die Überleitung in den Tagebausee Skado erfolgten nur in das bzw. aus dem Epilimnion des Sees. Während der Zirkulation wuchs das Teilvolumen des Epilimnions durch Einmischung von Wasser aus dem Hypolimnion:

#### 4.1.4 Ergebnisse

Durch die Einspülung der resuspendierten Kalkschlamm konnte die Basenkapazität des Seewassers verringert werden. Im Dezember 2004 wurden im Mittel nur noch 1,0 mmol/l für die Basenkapazität  $K_{B4,3}$  und 1,4 mmol/l für die Basenkapazität  $K_{B8,2}$  gemessen (Abb. 8). Der pH-Wert wurde auf  $\text{pH} \approx 3,3$  angehoben. Während der Winterflutung 2005 erfolgte eine weitere Verringerung der Basenkapazität auf etwa  $K_{B4,3} \approx 0,7...0,8$  mmol/l (Abb. 8).

Das hydrochemische Kompartimentmodell spiegelt die hydrochemische Entwicklung des Seewassers während der Kalkschlammresuspension gut wider. Die Übereinstimmung belegt die gesicherten Datengrundlagen und die ausreichend gute Kalibrierung des Modells. Damit erwies sich das Kompartimentmodell zugleich als prognosefähig und konnte Antwort auf die weiter zu erwartende Entwicklung der Seewasserbeschaffenheit geben.

#### 4.1.5 Prognose

Für die instationäre Phase der Frühjahrsflutung 2005 lag keine zeitaktuelle Grundwasserbilanz vor. Der Einfluss des veränderlichen Grundwasserzustroms auf die Wasserbeschaffenheit des Seewassers musste deshalb sinnvoll eingegrenzt werden. Im Sinne einer Grenzfallbetrachtung werden zwei Varianten für die Phase des Wasserspiegelanstiegs im See betrachtet (Abb. 8). In der ersten Variante wurde von einem unverändert hohen Grundwasserzustrom und in der zweiten Variante von einem zeitweiligen Ausbleiben des Grundwasserzustroms ausgegangen. Die realen Messwerte der Seewasserbeschaffenheit müssen sich zwischen den beiden Grenzfällen einordnen.

Die gemessene Entwicklung der Wasserbeschaffenheit im ersten Halbjahr 2005 wird durch die Berechnungen gut widerspiegelt (Abb. 9). Die Differenz zwischen den beiden Grenzfällen ist gering. Die Grenzfallbetrachtung zeigt, dass die Annahme zu den Grundwasserströmen in der kurzen Flutungsphase für die Gesamtbewertung der Wirkungseffekte nicht entscheidend ist.

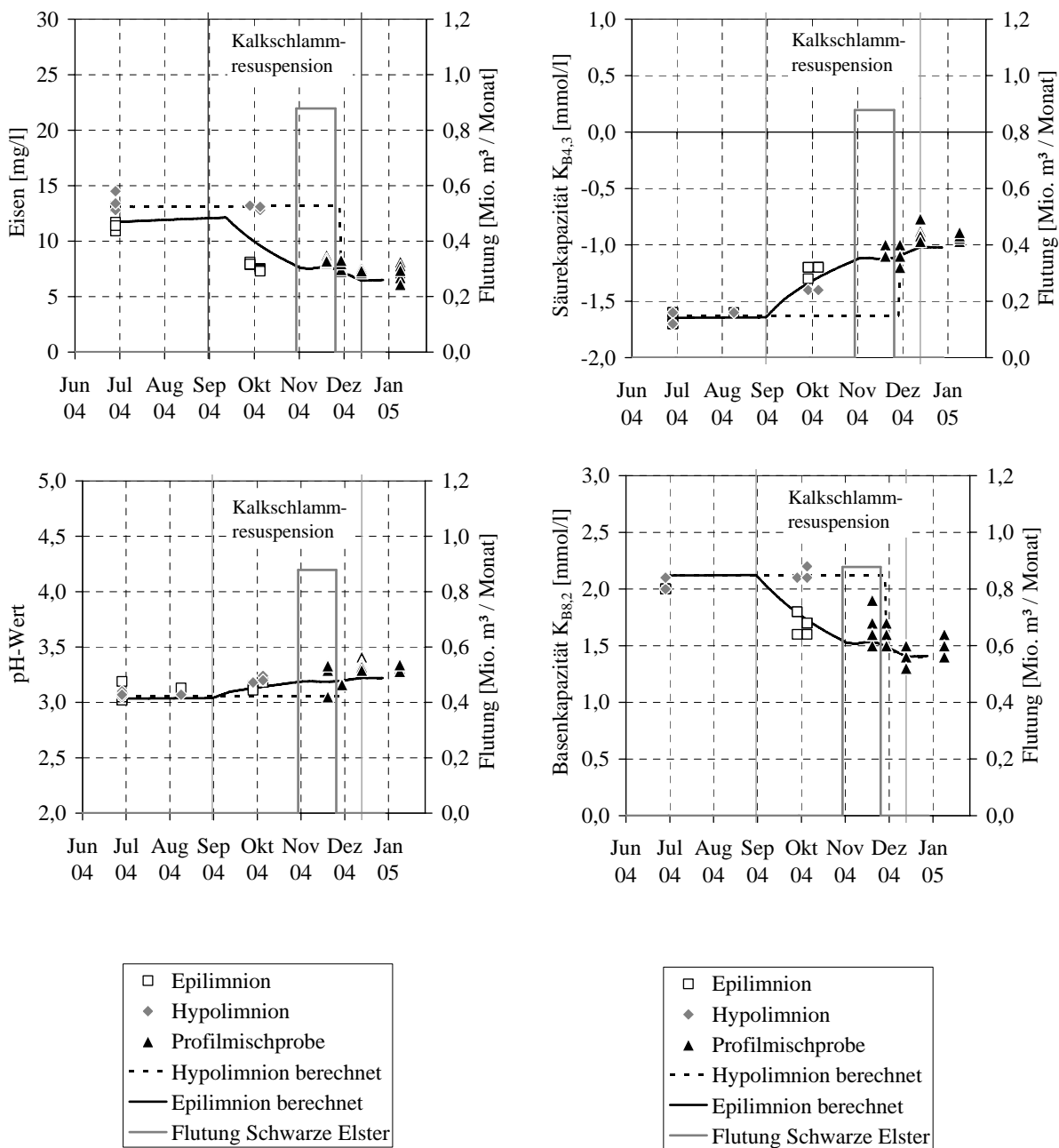


Abb. 8: Messwerte und Modellwerte der hydrochemischen Entwicklung des Tageausees Koschen.

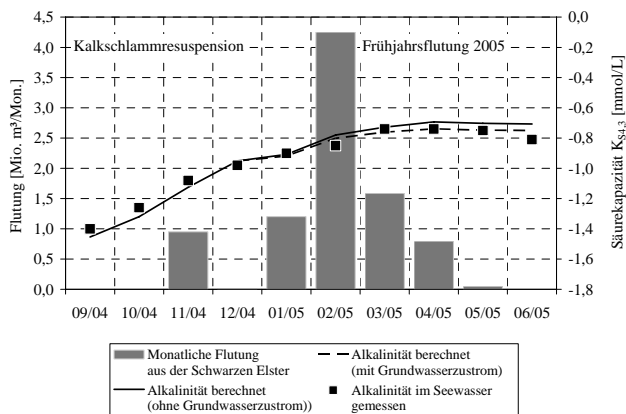


Abb. 9: Messwerte und Prognosewerte der Alkalinität des Tageausees Koschen.

**Tab. 5: Bilanz der Alkalinitätseffekte (in Bezug auf pH = 4,3) auf den Tagebausee Koschen.**

Herbstflutung 2004	Kalkschlammresuspension	Frühjahrsflutung 2005
Alkalinitätsimport durch Flutung aus der Schwarzen Elster: Alk $\approx$ 900 keq	Alkalinitätsimport durch Kalkschlammresuspension Alk $\approx$ 56.000 keq	Alkalinitätsimport durch Flutung aus der Schwarzen Elster $\approx$ 7.800 keq
Aciditätsexport durch Überleitung in den Tagebausee Skado: Aci $\approx$ -1.300 keq	Neutralisation der Acidität durch Seewasserentnahme zur Suspensionsherstellung: Alk $\approx$ 800 keq	Aciditätsexport durch Überleitung in den Tagebausee Skado Aci $\approx$ -4.500 keq
Verdünnung des Seewassers als Aciditätsverringerng: Aci $\approx$ -0,02 eq/m <sup>3</sup>		Verdünnung des Seewassers als Aciditätsverringerng Aci $\approx$ -0,07 eq/m <sup>3</sup>
Berechneter Alkalinitätsgewinn: $\Delta$ Alk $\approx$ +0,74 eq/m <sup>3</sup>		Berechneter Alkalinitätsgewinn: $\Delta$ Alk $\approx$ +0,22 eq/m <sup>3</sup>
Gemessener Alkalinitätsgewinn: $\Delta$ Alk $\approx$ +0,69 eq/m <sup>3</sup>		Gemessener Alkalinitätsgewinn: $\Delta$ Alk $\approx$ +0,23 eq/m <sup>3</sup>

## 4.2 Alkalinitätsbilanz

Die durch hydrochemische Modellierung nachgebildete Veränderung des Seewassers lässt sich auch durch eine Alkalinitätsbilanz des Tagebausees Koschen nachweisen. Die Wirkung der Flutung wurde nach chemischen Effekten (Alkalinitätseintrag) und Verdünnungswirkung differenziert. Der berechnete entspricht in der Größenordnung dem gemessenen Alkalinitätsgewinn (Tab. 5).

Die Verringerung der Acidität im Herbst 2004 geht zu mehr als 90% auf die Resuspensions der Kalkschlamm zurück (Tab. 5). Die Herbstflutung hatte einen vergleichsweise geringen Effekt, da die Pufferung der Flutungswassers aus der Schwarzen Elster nur gering war. Die Aciditätsverringerng im Winter/Frühjahr 2005 geht zu etwa gleichen Anteilen auf den Alkalinitätsimport aus der Schwarzen Elster, dem Aciditätsexport nach Skado und die Verdünnungswirkung des Flutungswasser zurück.

Weder durch die hydrochemische Modellierung noch durch die Alkalinitätsbilanz lässt sich eine relevante Nachreaktion der eingespülten Kalkschlamm im Seewasser belegen. Im Tagebausee Koschen ist ziemlich exakt die Alkalinität wirksam geworden, die bereits in der Suspension verfügbar war. Eine nachträgliche Auflösung ursprünglich nicht gelöster Anteile hat offensichtlich nicht stattgefunden. Andererseits lassen sich auch keine Alkalinitätsverluste durch Entcarbonisierung im Einspülbereich der Suspension nachweisen.

Der chemische Effekt der Kalkschlammresuspension im Herbst 2004 auf das Seewasser ist mit einem Alkalinitätsgewinn von etwa

0,7 mmol/l deutlich höher als der chemische Effekt der Frühjahrsflutung 2005 mit einem Alkalinitätsgewinn von etwa 0,2 mmol/l.

## 4.3 Nachhaltigkeit

Bei anhaltendem saurem Grundwasserzustrom zum Tagebausee sind aber weder eine einmalige chemische Neutralisation noch eine einmalige Flutung auf Dauer nachhaltig. Die ersten Messergebnisse im Sommer 2005 zeigen, dass die mit der Kalkschlammresuspension erzielte Teilneutralisation des Seewassers durch sauren Grundwasserzustrom und durch Stoffeinträge aus den Böschungen wieder aufgezehrt wird. Um den 2004/2005 erreichten Effekt des in-lake-Verfahrens dauerhaft zu sichern, müssen dem Tagebausee Koschen durchschnittlich 0,2 m<sup>3</sup>/min Flutungswasser zugeführt werden.

Die Ergebnisse der Modellierung und Bilanzierung zum Tagebausee Koschen decken sich mit den Erfahrungen zum benachbarten Senftenberger See. Der Senftenberger See wird seit über drei Jahrzehnten mit einer Nachsorgeflutung von MQ  $\approx$  0,6 m<sup>3</sup>/s aus der Schwarzen Elster versorgt. Das zeitweilige Ausbleiben des Elsterwassers hat hier Mitte der 1990er Jahre zu Versauerungsschüben geführt. Das zeigt, dass für die Aufrechterhaltung neutraler Verhältnisse in den Lausitzer Tagebauseen insbesondere die Kontinuität der Nachsorgeflutung von Bedeutung ist.

## 5 Ergebnis

Der Wirkungsgrad des Pilotprojektes für ein in-lake-Verfahren wurde durch die Daten der Betriebsüberwachung und durch Messwerte der Seewasserbeschaffenheit modellgestützt bewer-

tet. Es konnte nachgewiesen werden, dass die in der Kalkschlamm suspension gemessene Alkalinität im hohen Grad im Tagebausee Koschen wirksam geworden ist. Im Zeitraum der Maßnahme wurde die Basenkapazität des Seewassers von  $K_{B4,3} \approx 1,6$  mmol/l auf rund 0,9 mmol/l verringert.

Das in-lake-Verfahren kann wegen des hohen spezifischen Wirkungsgrades als erfolgversprechend eingeschätzt werden. Die wichtigsten Garantien für den hohen Wirkungsgrad des getesteten Resuspensionsverfahrens waren der geringe Feststoffgehalt der Suspension, ihre großflächige Verteilung mittels Kreisregnern sowie die Unterstützung der Stoffverteilung durch natürliche horizontale Strömungsprozesse im See. Die Beobachtungen legen nahe, dass die Frühjahrs- und Herbstzirkulation prädestinierte Phasen zur Durchführung von in-lake-Verfahren sind.

Die Nachsorgemengen, die zur Aufrechterhaltung neutraler Verhältnisse in zuvor sauren Tagebauseen notwendig sind, können durch eine einmalige chemische Gewässerbehandlung nicht substantiell verringert werden. Durch chemische Maßnahmen kann die Flutung in Wassermangelsituationen zeitweilig ersetzt und der Zeitraum bis zum Erreichen neutraler Verhältnisse verkürzt werden. Die chemische Gewässerbehandlung steht nicht in Konkurrenz zur Flutung, sondern stellt ein ergänzendes Hilfsmittel zum Erreichen gewässergütewirtschaftlicher Ziele dar. Dies gilt insbesondere für Tagebauseen, bei denen das Dargebot des Flutungswassers für eine Neutralisation nicht ausreichend ist.

## 6 Literatur

- PARKHURST, D.L AND C.A.J. APPELO (1999): Users guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water Resources Investigations Report 99-4259, USA, Denver, Colorado 1999.
- LUA (1996) Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen. Studien und Tagungsberichte. Band 6. Landesumweltamt Brandenburg 1995, 86 S.
- LUA (2001) Tagebaurestseen. Wasserbeschaffenheit und wassergütewirtschaftliche Sanierung. Konzeptionelle Vorstellungen und erste Erfahrungen. Studien und Tagungsberichte. Band 35. Landesumweltamt Brandenburg 2001, 77 S.
- GRAUPNER, B.J., BENTHAUS, F.C., BÜRGER, ST., WERNER, F. (2005) Implications of EU-Water Framework Directive for East German Post Mining Landscape Lausitz - Coping with sparse knowledge of the underground. *Limnologia*, 35 (2005) 199-205.