

Effizienz bei Inlakebehandlungen von sauren Tagebaufolgeseen

Günter Scholz¹, Wolfgang Rabe¹, Broder Merkel², Mandy Schipek²,

MOVAB-D GmbH, Straße der Freundschaft 92, 02991 Lauta, Deutschland, info@movab-d.de¹,

TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09596 Freiberg/Sachsen, Deutschland, merkel@geo.tu-freiberg.de, mandy.schipek@geo.tu-freiberg.de²

Bei der Renaturierung saurer Bergbaufolgeseen hat sich in jüngster Vergangenheit die Inlaketechnik als wirtschaftlich günstige Lösung neben der Flutung mit Oberflächenwasser zunehmend durchgesetzt. Unterschiedliche Schiffstypen, Helikopter- und Rohrleitungssysteme werden für das Einbringen von Kalk und Kalksuspensionen in die Wasserkörper z.Z. auf dem Markt angeboten. Im Rahmen des F/E Projektes OILL (OPTIMICING IN LAKE LIMING) konnte der Nachweis geführt werden, dass sowohl mit schiffgestützten als auch mit Rohrleitungssystemen durch die Nutzung von windinduzierten Strömungen im Seekörper sowie der Applikation von Brannt- bzw. Pufferkalk besonders hohe wirtschaftliche Effekte bei der Seesanieung realisierbar sind. Die Bestimmung der Effektivität eines Inlake - Projektes sollte stets auf Basis labortechnisch erfasster Messwerte des Seewassers vor und nach der Behandlung erfolgen.

The application of in-lake - treatment technology for the neutralization of acid mining lakes has proven in the past as a highly efficient alternative. Different types of helicopters, ships- and pipe based technologies are used for the spreading of the different kinds of alkalis materials on the lake. Mostly lime-based materials such as burned limestone or hydrate lime were applied. Within the research project OILL (OPTIMICING IN LAKE LIMING) it was proven that wind- indicated currents in the lake are able to distribute lime particle in a highly efficient way. The use of burnt lime and milled limestone with very low grain size led to a high efficiency. The calculation of the effectiveness of in-lake -liming projects should be done based on laboratory data from water samples which have to be taken before and after the treatment.

1. Vorbemerkung

Wirkungsgradbetrachtungen im Rahmen von Inlakebehandlungen saurer Tagebaufolgeseen (TBS) liegen von zahlreichen Pilotprojekten aus jüngster Vergangenheit vor.

Bei der Resuspension von Kalksedimenten im TBS Koschen im Jahr 2004 wurde für das eingesetzte Verfahren im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung ein Wirkungsgrad von etwa 90 % bezogen auf die Alkalinität der eingebrachten Suspension ermittelt (BENTHAUS & UHLMANN 2006).

Basis für diese Aussage war u. A. eine hydrogeochemische Modellierung gemäß nachfolgendem Modellansatz (1):

$$\frac{d(V * C)_{TBS}}{dt} = \sum_i Q_i * C_i)_{GWzu} + \sum_i Q_i * C_i)_{OWzu} - \sum_j Q_j * C_{TBS})_{GWab} - \sum_j Q_j * C_{TBS})_{OWab} + R_{Bö} \pm R_{Reak} + R_{Susp} \quad (1)$$

In der zeitvariablen Stoffmengenbilanz des Tagebaufolgesees $d(V * C)_{TBS}/dt$ werden hier die zuströmenden Grund- und Oberflächenwässer (GWzu bzw. OWzu) mit ihren spezifischen Beschaffenheiten wie folgt berücksichtigt (BENTHAUS & UHLMANN 2006):

- die abströmenden Grund- und Oberflächenwässer (GWab bzw. OWab) mit der Beschaffenheit des 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.

Die Modellkalibrierung erfolgte in diesem Zusammenhang auf der Basis einer in den vergangenen 10 Jahren nahezu unveränderten Stoffmengenbilanz mit den vorhandenen limnologischen und hydrochemischen Daten.

Obwohl die vorgenannte Herangehensweise zur Ermittlung von Wirkungsgraden bei Inlakeprojekten wünschenswert wäre, lassen die heterogenen geohydraulischen und geochemischen Verhältnisse an vielen TBS keine verlässlichen Aussagen auf Basis eines solchen Modellansatzes als Planungsgrundlage zu.

2. Einflußfaktoren

2.1 Einsatzstoffe

Da der hohe Kostenaufwand bei der Renaturierung von sauren TBS zum großen Teil mit dem Einsatzstoff bestimmt wird und dieser meist mehr als 60% der Gesamtkosten beträgt (HÖPPNER et al. 2006), kommt der Auswahl der zum Einsatz gebrachten Produkte höchste Priorität zu.

Die nachfolgende Tab. 1 gibt Auskunft über erreichbare chemische Wirkungsgrade von am Markt verfügbaren Produkten auf der Basis von Batch- und Säulenversuchen sowie Pilotprojekten.

Tab. 1: Reaktionswirkungsgrad ausgewählter Einsatzstoffe für die pH-Wertanhebung

Produkt	Wirkungsgrad
Natronlauge NaOH	100%
Soda Na ₂ CO ₃	100%
Kalksteinmehl (KSM) CaCO ₃	60 - 90%
Kalkhydrat Ca(OH) ₂	75 - 95%
Branntkalk CaO	85 - 95%
KSM CC 20	80 - 90%
Branntdolomit CaO/MgO	70 - 90%
EHS-Schlamm aus GWRA	75 - 90%
Dolomitsteinmehl CaCO ₃ ·MgCO ₃	60 - 80%

Die besten Voraussetzung zur Sicherung hoher Wirkungsgrade bieten Natronlauge und Soda auf Grund ihrer Reaktivität und der Generierung von Pufferkapazitäten im Fall Soda. Diese Produkte sind aber auf Grund der hohen spezifischen Kosten bisher nur im Rahmen von Pilotprojekten großtechnisch eingesetzt worden (RABE & UHLMANN 2006) (NEUMANN et al. 2007).

Zunehmend werden aus Kostengründen Kalk-Produkte gewählt, die im Rahmen von Batch-Tests und Pilotprojekten ihre Eignung für diverse Gewässer unter Beweis gestellt haben.

Abb. 1 zeigt beispielsweise das Ergebnis derartiger Testserien mit Originalwasser aus dem TBS Scheibe.

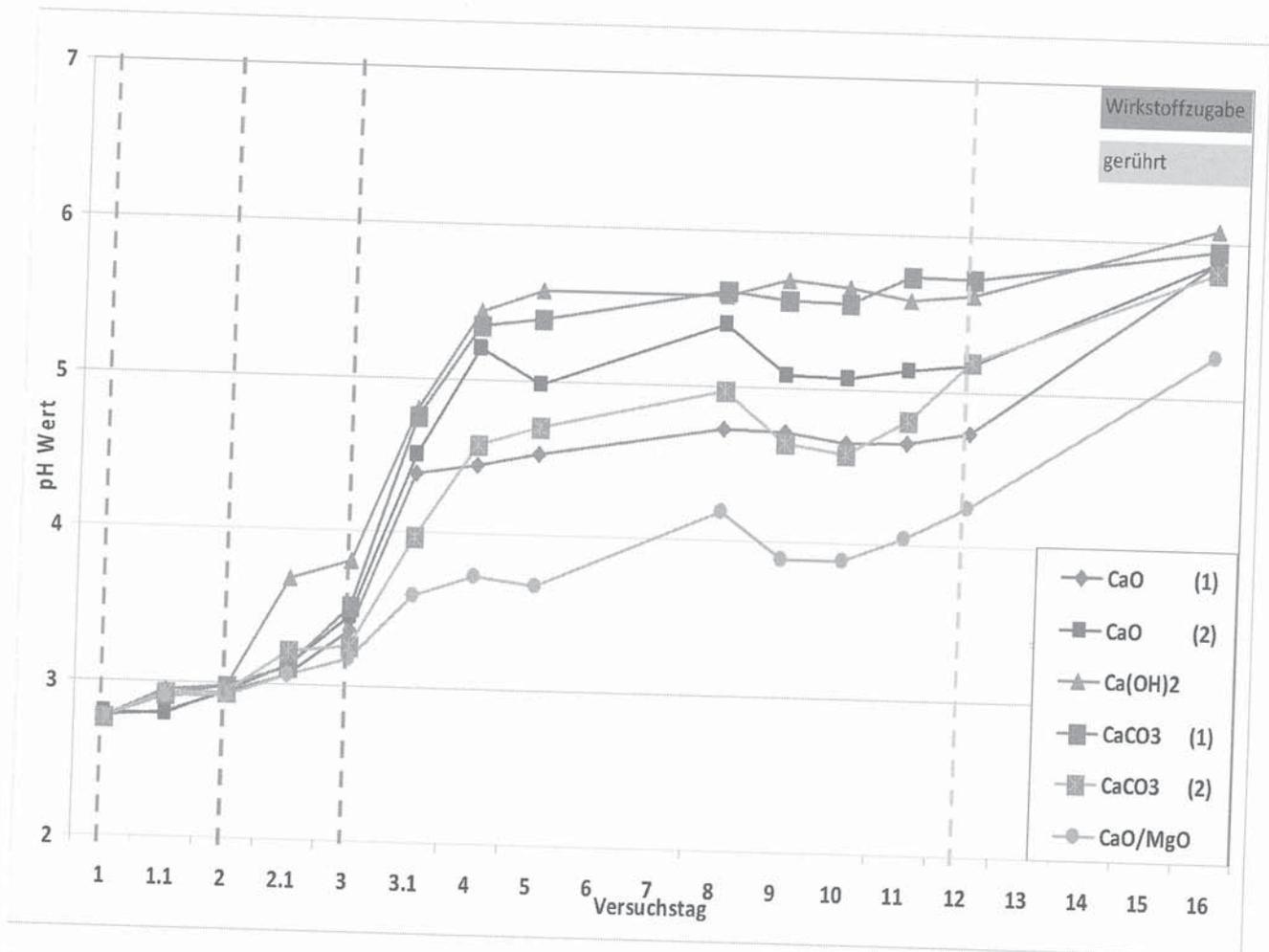


Abb. 1: Testreihen mit Originalwasser

Deutlich sichtbar wird hier der Vorteil feinkörniger Produkte wie z. B. bei Karbonatkalk und gebrannten Produkten wie Weißfeinkalk WFK (CaO).

Abb. 2 zeigt die Applikation von feinkörnigem Kalksteinmehl (KSM) im Gewässer „Jahnteich“ der Stadt Weißwasser im Jahr 2011. An Hand von Laboranalysen konnte hier ein chemischer Wirkungsgrad von > 90% im Rahmen einer Kurzzeitbehandlung von 2 Tagen nachgewiesen werden.

Die hohe Feinheit dieses Materials, die spezielle Kornstruktur und die großflächige Verteilung des Materials auf der Wasseroberfläche können als Hauptfaktoren für diese Effizienz angesehen werden.

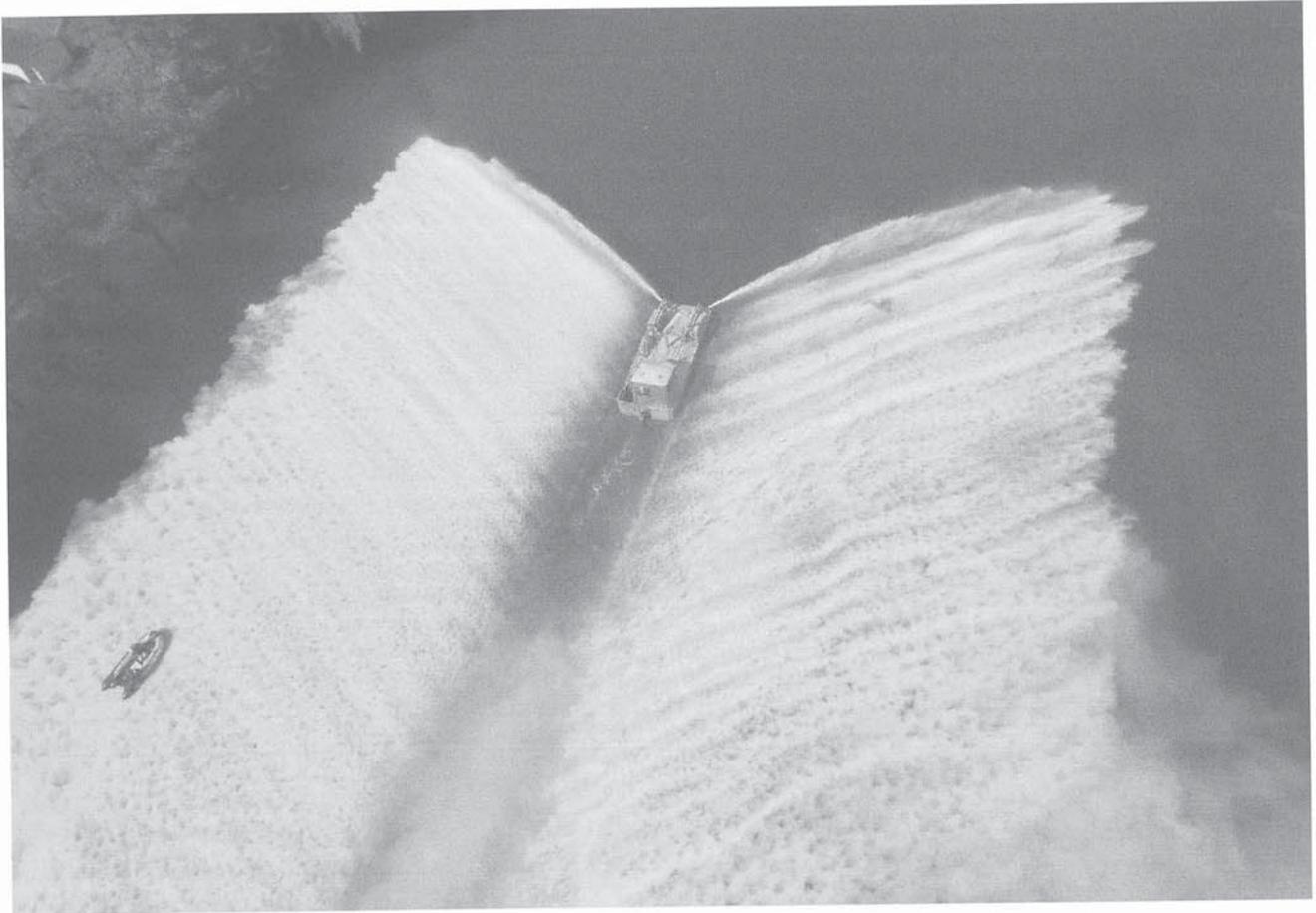


Abb. 2: Applikation von feinkörnigem KSM im Jahnteich

2.2 Applikationstechniken

Weltweit werden zur Seenkalkung Spezialschiffe, Helikopter, Rohrleitungssysteme und so genannte Kalkdosierstationen eingesetzt, wenn z.B. Flutungswasser zum Einbringen zusätzlicher Alkalität bereit steht.

Hohe chemische Wirkungsgrade stehen im Zusammenhang mit dem während der Applikation in kurzer Zeit verfügbarem Reaktionsraum im Seekörper für das eingesetzte Material.

Dies bedeutet, dass stets eine große Oberfläche des Sees für die Applikation bereitgestellt werden muss, um möglichst einen nahezu 100%igen Stoffumsatz für das entsprechende Einsatzmaterial zu sichern. Damit sind Verteilsysteme, wie z.B. Schiffe mit großflächiger Verteilung einer Suspension auf der Wasseroberfläche stets wirtschaftlich im Vorteil.

In diesem Zusammenhang kommt der Ausnutzung windinduzierter Strömungen sowohl bei Schiffs- bzw. Rohrleitungssystemen eine hohe Bedeutung zu.

Wie aus Abb. 3 ersichtlich nimmt die Weglänge eines Stoffpartikels beim Absinken im Seekörper um ein Mehrfaches zu, wenn sich die beaufschlagten Wassermassen windgetrieben und durch thermodynamische Kräfte bewegen.

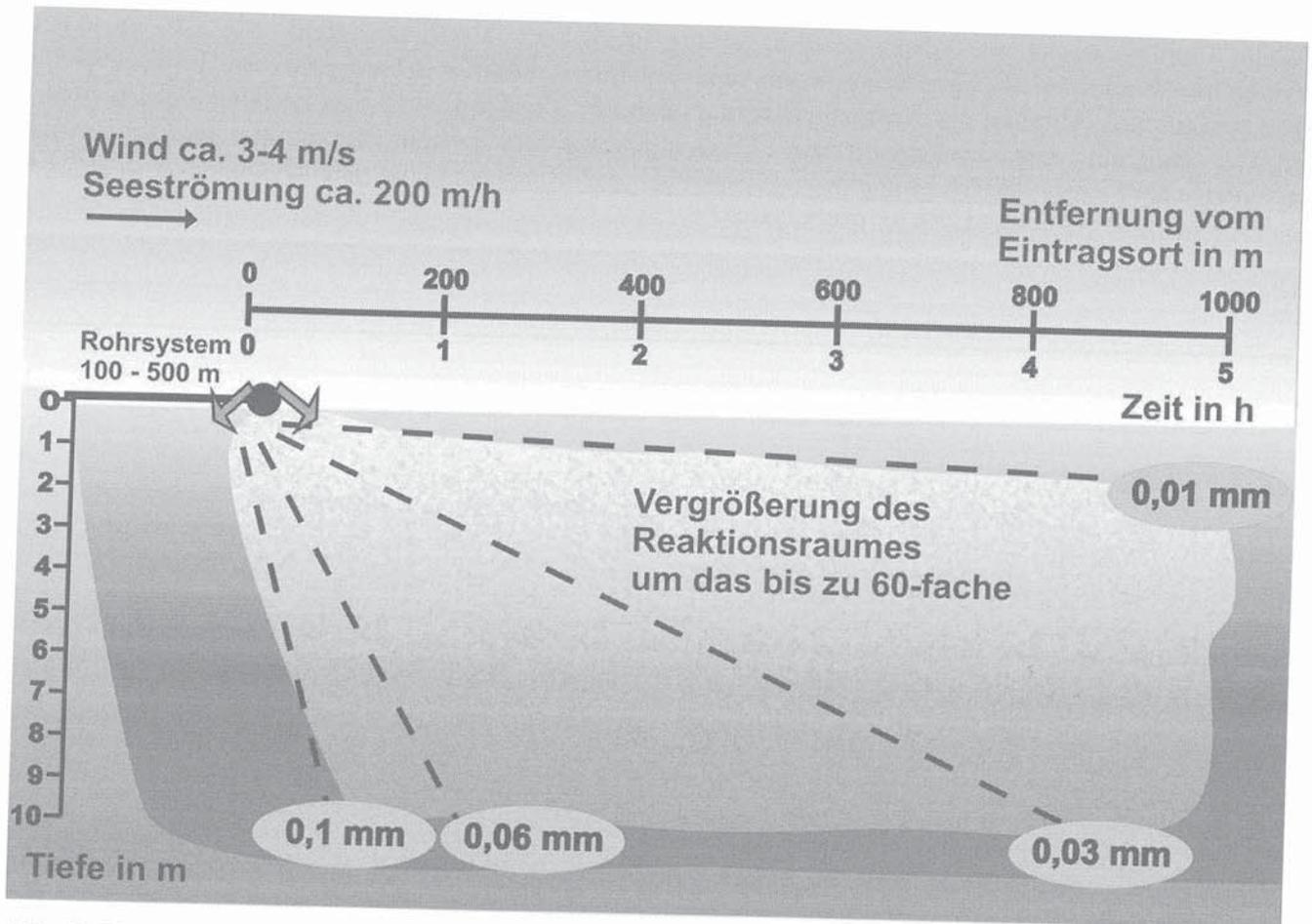


Abb. 3: Verteilungsverhalten von Kalkpartikeln unterschiedlicher Größe bei Windgeschwindigkeiten von 3 bis 4 m/s und den daraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 200 m/h

Abb. 4 und Abb 5 verdeutlichen diesen Effekt an Hand von Luftbildern bisheriger Seesäuerungsprojekte. Im Fall des Einsatzes von Rohrleitungssystemen für das Einbringen von Suspensionen in ein Gewässer ist zu gewährleisten, dass mit einer zeitgesteuerten Zugabe der Alkalität Überkonzentrationen an der Einspeisestelle vermieden werden. Mit der Vorausberechnung der windinduzierten Strömungen an der Einspeisestelle ist es möglich die stündlich/täglich optimal einzuspeisende Alkalität den Wetterbedingungen anzupassen (MERKEL B. et al. 2011). Für die Vorausberechnung von Seeströmungen hat sich die Nutzung des hydrodynamischen Modells ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) als praktikabel erwiesen (HODGES B.R. & DALLIMORE C.).



Abb. 4: Verteilung von Alkalität durch windinduzierte Strömungen im TBS Burghammer mittels Schiffssystem



Abb. 5: Verteilung von Alkalität durch windinduzierte Strömungen im TBS Koschen mittels Rohrleitungssystem

Wenn Flutungswasser zur Suspensionsherstellung hierbei zur Verfügung steht, wie z.B. am TBS Burghammer mit der Kleinen Spree, kann eine besonders effektive Lösung für die kontinuierliche Einspeisung von Alkalität zur Aufrechterhaltung neutraler Verhältnisse im See gestaltet werden (Abb. 6). Der Höhenunterschied zwischen dem Flusspiegel und dem Seespiegel kann hier günstig für die erforderliche Energiebereitstellung zum Einmischen der Suspension in den Westbereich des Sees genutzt werden (MOVAB-D & METZNER GMBH).

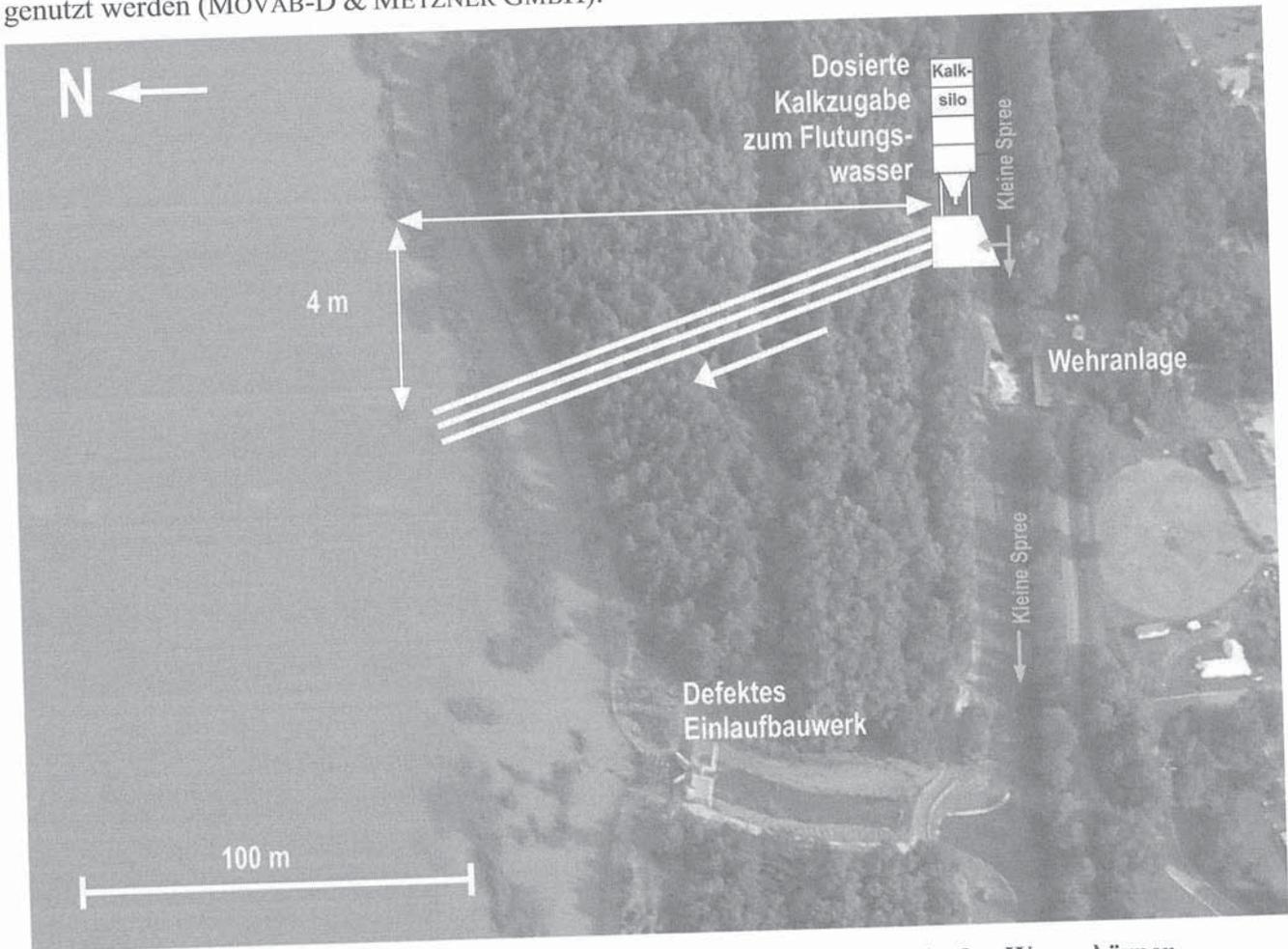


Abb. 6: Effektive Lösung für die kontinuierliche Einspeisung von Alkalität in den Wasserkörper

2.3 Seewasserqualität

Auf die Problematik von Modellberechnungen der Effizienz wurde eingangs hingewiesen. Die erforderlichen Eingabedaten können in der entsprechenden Qualität bei Planungen nicht beschafft werden. Das ist auch dadurch bedingt, dass die Seewasserzustände bezogen auf Menge und Qualität nicht konstant sind. Die tatsächlichen Grundwasserzu- und -abflüsse sind erst im Zusammenhang mit der Sanierungsmaßnahme bestimmbar. (Die sehr unterschiedliche chemische Seewasserbeschaffenheit zu sanierender TBS gestattet zwar eine Vorausberechnung zu erreichender Wirkungsgrade einer Inlakebehandlung auf Basis bekannter Modellansätze; ist aber auf Grund der Bedeutung des Gesamtwirkungsgrades eines Projekts nicht für eine Planung empfehlenswert).

Die Durchführung von Batch- und Säulenversuchen lässt hier in jedem Fall zuverlässigere Aussagen zu, da hiermit die großtechnischen Bedingungen einer Stoffapplikation in wesentlich komplexerer Form abgebildet werden können und der Einsatzstoff als Probematerial die Wirklichkeit auch besser abbildet als eine Stoffzusammensetzungstabelle eines Herstellers eines Produktes. Hinzu kommt, dass insbesondere die Reaktionsgeschwindigkeit (Kinetik) von sehr vielen Parametern abhängt und nicht durch einen Wert sondern nur durch eine Bandbreite an Faktoren bestimmt werden kann.

3. Ermittlung des chemischen Wirkungsgrad am konkreten Projekt

Die Ermittlung des chemischen Wirkungsgrades im Rahmen eines großtechnischen Seeexperimentes bei der Neutralisation eines sauren TBS sollte erfahrungsgemäß wie folgt gestaltet werden.

- Errichtung eines repräsentativen Messstellennetzes mit fest liegenden GPS-Koordinaten.
- Entnahme von repräsentativen Wasserproben an einer Vielzahl von Messstellen; möglichst nach einer Windwetterlage (gute Durchmischung des Seekörpers)
- Labortechnische Erfassung der Acidität der Einzelproben unmittelbar vor und nach der Seewasserbehandlung
- im Fall eines dimiktischen Gewässers Probenahmen in unterschiedlichen Tiefen
- Berechnung des GW- Zu- und Abflusses durch Erfassung des Zeitraumes der Wiederversauerung und der Veränderung der Volumina des Seewasserkörpers
- Labortechnische Bewertung des Einsatzstoffes an Hand von Stoffproben des tatsächlich im Projekt eingesetzten Produktes

Nachfolgend in Tab. 2 aufgeführtes Berechnungsbeispiel verdeutlicht die Herangehensweise der Berechnung für einen polymiktischen TBS.

Tab. 2: Wirkungsgradermittlung bei einer Inlakebehandlung

Volumen Bergbausee	m ³	350.000
eingesetzte Kalkmenge < 0,02 mm	t	14,80
Wirkungsgrad aus ks _{4,3} -Änderung		
ks _{4,3} vor Behandlung	mmol/l	0,06
ks _{4,3} nach Behandlung	mmol/l	0,79
Ergebnis	mmol/l	0,73
entspricht Kalkmenge bei 90 % Reinheit	t	14,19
berechneter Wirkungsgrad		95,91%
Wirkungsgrad aus Ca-Gehalt-Änderung		
Ca vor Behandlung	mg/l	46,2
Ca nach Behandlung	mg/l	60
Ergebnis	mg/l	13,8
entspricht Kalkmenge bei 90 % Reinheit	t	13,42
berechneter Wirkungsgrad		90,65%

Im Fall eines ausgeprägt dimiktischen TBS muss zur Bestimmung von Wirkungsgraden die Periode der Vollzirkulation im Frühjahr und Herbst herangezogen werden. Andernfalls sind im Epilimnion und Hypolimnion entsprechende Kompartimente im Gewässer festzulegen und sowohl mess- als auch labortechnisch zu bewerten. Die erforderliche Genauigkeit bestimmt die Anzahl der Messpunkte in der räumlichen Erfassung aller erforderlichen Daten. Im Fall der Behandlungsdauer von 1 - 2 Wochen kann auf die Berücksichtigung des Einflusses der Böschungserosion in den meisten Fällen verzichtet werden. Bei länger andauernden Behandlungszeiten ist hierzu eine gesonderte Bewertung erforderlich; gleichfalls zum Einfluss von Niederschlägen und Verdunstung.

4. Resümee

Die Ermittlung des Wirkungsgrades von Inlake - Projekten bei der Neutralisation von sauren TBS kann grundsätzlich auf Basis einer hydrogeochemischen Modellierung an einem Ganzseenexperiment aber auch mittels einer umfassenden Datenerfassung an einem Messdatennetz des betreffenden Gewässers und deren Bewertung unmittelbar vor und nach der Seewasserbehandlung erfolgen.

Aus heutiger Sicht muss dabei der Herangehensweise mittels Datenerhebung über ein geeignetes Messdatennetz der Vorrang eingeräumt werden, weil im Fall der modellgestützten Berechnung schwer erfüllbare Anforderungen gestellt werden müssen, wie:

- Berücksichtigung von komplexen hydrochemischen Reaktionen im Seewasser (Dissoziation, Komplexbildung, Ausfällungen usw.)
- Berücksichtigung der zeitvariablen Wasser- und Stoffbilanz des Sees vor und während des Inlake-Verfahrens, inklusive aller Zu- und Abströme (Grundwasserzufluss, Grundwasserabfluss, Oberflächenzufluss, Oberflächenabfluss, Niederschlag, Verdunstung)
- Berücksichtigung von Aciditäts- bzw. Alkalinitätseinträgen durch Böschungserosion
- Die Beeinflussung von Grundwasseracidität und Acidität durch Böschungserosion muss im Modell angepasst werden. Zur Ermittlung des Einflusses sind ausgewählte Parameter im Wasserkörper bei einem deutlichem Abfallen des pH-Wertes im Anschluss an eine Behandlungsmaßnahme zu messen.

Hinzu kommt, dass es grundsätzlich kritisch erscheint, modellgestützte Berechnungen von See-Experimenten auf andere Seen zu übertragen, weil:

- Seen unterschiedlich tief sind,
- unterschiedlich Durchmischungsbedingungen (temperaturbedingte oder windinduzierte Durchmischung während der Behandlung) aufweisen und
- die Wasserchemie des jeweiligen Sees einen signifikanten Einfluss u. a. durch Inhibitoren haben kann und sich damit die Kinetik der Reaktionen ändert.

Die Berücksichtigung von komplexen hydrochemischen Reaktionen ist nur teilweise möglich. Eine thermodynamische Betrachtung ist zwar möglich, aber selbst hier ist es nach heutigem wissenschaftlichen Kenntnisstand nicht möglich, die inhibierende Wirkung von bestimmten Elementen (z.B. Mn, Cd, Sulfat) auf das Löslichkeitsprodukt von z.B. Carbonat thermodynamisch zu erfassen (SCHIPEK 2011). Hinzu kommt, dass eine Modellierung auf Basis chemischer Thermodynamik viel einfacher ist, als die kinetische Modellierung der Auflösung von Kalkstein (CaCO_3), Kalkhydratsuspensionen (Ca(OH)_2) und Branntkalk (CaO). Für absolut reine Produkte mit einer bestimmten Korngröße sind entsprechende Gleichungen in der Literatur zu finden. Industrieprodukte unterscheiden sich aber von diesen im Reinheitsgrad und der Kornverteilung und sind daher mit diesen einfachen Ansätzen hinsichtlich ihrer Lösungskinetik nicht hinreichend exakt beschreibbar.

5. Literatur

- BENTHAUS, C.-F.; UHLMANN, W. (2006): Die chemische Behandlung saurer Tagebauseen in der Lausitz. Erfahrungen zur Kalkschlammresuspension im Tagebausee Koschen – 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag: Behandlungstechnologien für bergbaubeeinflusste Wässer, TU Bergakademie Freiberg: 85-96
- HODGES, B.R.; DALLIMORE, C. (2010): ELCOM Science Manual v2.2; Centre for Water Research, University of Western Australia
- HÖPPNER, ST.; RIEGER, C.; SCHOLZ, G. (2006): Wirtschaftliche Bewertung innovativer aktiver und passiver Wasseraufbereitungssysteme für saure Bergbauwässer, Wissenschaftliche Mitteilungen 31, TU Bergakademie Freiberg 2006
- MERKEL, B.; CLAUB, D.; RABE, W.; SCHOLZ, G.; SCHIPEK, M. (2011): Wiederherstellung intakter Grund- und Oberflächengewässer nach dem Braunkohlenbergbau; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein – Jahresrevue, Sonderausgabe für das deutsche Gas- und Wasserfach 2011/2012; 62. Jahrgang – Dezember – ISSN 1436-6134, 74 ff
- MOVAB-D, V&C METZNER GMBH (2012): Projektvorschlag: Errichtung einer einfachen und schnell realisierbaren Zulaufanlage am Bergbaufolgesee (BFS) Burghammer, internes Material
- RABE, W.; UHLMANN, W. (2006): Neue Erkenntnisse zur Anwendung von In-Lake-Verfahren für die Neutralisation saurer Bergbaufolgeseen – 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag: Behandlungstechnologien für bergbaubeeinflusste Wässer, TU Bergakademie Freiberg: 97-104
- SCHIPEK M. (2011): Treatment of acid mine lakes - Lab and field studies. FOG. Vol29