

# **Wirtschaftliche Bewertung innovativer, aktiver und passiver Wasseraufbereitungssysteme für saure Bergbaugewässer**

St. Höppner<sup>1</sup>, K. Rieger<sup>1</sup>, G. Scholz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BUL Sachsen GmbH, Spreetaler Straße 4, 02979 Elsterheide OT Sabrodt

<sup>2</sup> Waldstraße 21 A, 02977 Hoyerswerda, scho-hoy@t-online.de

Die Behandlung mehrerer Tagebauseen ( TBS ) mittels Inlake-Technik im Rahmen von Pilotprojekten im Lausitzer Braunkohlenrevier hat den Nachweis erbracht, dass damit eine effiziente Methode zur Lösung des Aciditätsproblems dieser Wasserkörper zur Verfügung steht.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit dieser Technik ist die großflächige Verteilung der zur Anwendung kommenden alkalischen Stoffe auf der Seeoberfläche mittels intelligenter Verteileinrichtungen (bewegliche Rohrsysteme bzw. Schiffe) und die Nutzung der windinduzierten Strömungen. Des Weiteren ist die Wahl der möglichen alkalischen Stoffe wesentlich für das wirtschaftliche Optimum. Die Kombination von Stoffen kann die Wirtschaftlichkeit konkreter Projekte ebenfalls verbessern, ebenso die Nutzung von alkalischen Abprodukten aus Grubenwasserreinigungsanlagen.

The treatment of acidic lignite mining lakes in the Lausitz area in the eastern part of Germany by so called inlake-technologies has shown that consequently is available a high economical procedure. Most important is, in order to reach the economical peak; to use a sophisticated distribution equipment located at the surface of the lake. The use of ships is also possible. Furthermore lead the selection of the suitable alcalic raw material (lime, magnesium, sodium products) and combinations of these to fine results. Distribution equipments based on flexible pipes or ships are available. The use of waste material from water treatment plants can be also an efficient solution to treat acidic mining lakes.

---

## **1 Einleitung**

Tagebaurestseen (TBS) sind besonders im Lausitzer Braunkohlenrevier mit hoher Acidität und hohen Sulfatgehalten belastet. Die Wiederherstellung eines natürlichen Wasserhaushaltes erfordert neben der möglichst schnellen Flutung weitere finanzielle Aufwendungen zur Abwehr von Gefahren und Schaffung von Voraussetzungen für eine möglichst baldige Nutzung der Gewässer.

Zur Lösung des Aciditätsproblems haben sich neben Grubenwasserreinigungsanlagen (GWRA) ergänzend zur Flutung mit Oberflächenwasser (OFW) in jüngster Zeit sogenannte Inlake-Techniken und In-situ-Verfahren als aussichtsreiche Verfahrensvarianten im Pilotmaßstab unter praktischen Bedingungen bestätigt.

Von entscheidender Bedeutung für die effiziente Anwendung eines Verfahrens ist der zum Einsatz gebrachte Rohstoff für die chemische Behandlung des sauren Wassers und die Reaktionsbedingungen zum Stoffumsatz für die Gewährleistung hoher Wirkungsgrade.

Im Hinblick auf kostengünstige und risikoarme Verfahrensvarianten wird im vorliegenden Beitrag eine Bewertung aussichtsreicher Optionen für die Behandlung saurer Wasserkörper vorgenommen.

Unter Federführung der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) wurden in der Vergangenheit diverse Projekte zur Wasserbehandlung durchgeführt. Der aktuelle Stand dieser Technik ist hierzu in (ZSCHIEDRICH 2005) und (BENTHAUS 2005) wiedergegeben.

Bezüglich der Inlake-Technik sind die Beiträge von (NITZSCHE & TIENZ 2005; SCHOLZ 2005) und (RABE & BLASCYK 2006) von besonderem Interesse.

## **2 Verfahrensvarianten**

In der Vergangenheit wurde ein breites Spektrum möglicher Verfahren zur Behandlung saurer und sulfatreicher TBS zur Diskussion gestellt. Fragen der Kosten bzw. der Wirtschaftlichkeit wurden bisher wegen der meist noch in der Grundlagenforschung angesiedelten Projektideen nicht vorberüdig behandelt.

Mit den nunmehr im Auftrag der LMBV durchgeführten Pilotprojekten zur Inlake-Behandlung von TBS (BURGHAMMER; KOSCHEN; BOCKWITZ; HORSTTEICH) wurde eine Grundlage geschaffen die es gestattet auf der Basis belastbarer Daten Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von konkreten Projekten zu treffen. Damit ist es möglich erste Bewertungen zu Chancen/Risiken von zukünftig zu realisierenden größeren Sanierungsprojekten bereits in der Planungsphase zu treffen.

Nach wie vor existiert außerhalb der Flutung von TBS keine vertretbare wirtschaftliche Basis zur Lösung des Sulfatproblems in den Lausitzer Tagebauseen; hier verbleibt vorerst die Flutung ohne Alternative.

Ungeachtet dieses Sachverhaltes gibt es aber Handlungsbedarf zur Lösung des Aciditätsproblems sowie der Schwermetallproblematik (Eisen, Aluminium u.a.) weil mit dem zunehmenden Füllungsgrad der TBS auch das Umfeld der TBS mit saurem Wasser beeinflusst wird und die Mobilität von Schadstoffen mit abnehmenden pH-Wert steigt.

Als Verfahrensvarianten werden nachfolgend Inlake-Techniken, GWRA und so genannte Reaktive Teppiche einer näheren vergleichenden Betrachtung unterzogen.

## 2.1 Inlake-Technik

Der Vorteil der Inlake-Technik gegenüber der bisher gebräuchlichen GWRA-Technik ergibt

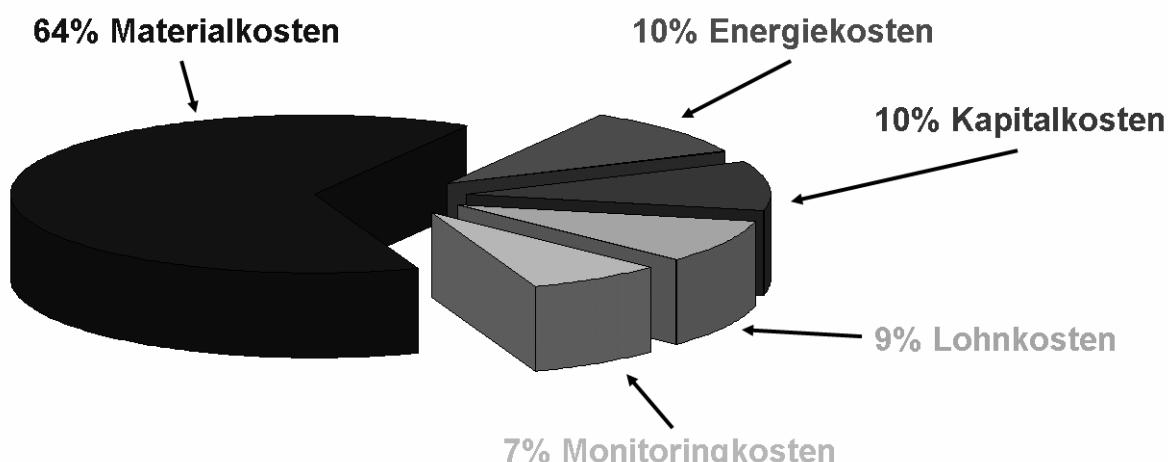
sich durch folgende Sachverhalte:

- Durch großflächige Verteilung des alkalischen Einsatzstoffes im Seekörper, wird der verfügbare Reaktionsraum bis zum 1000-fachen größer.
- Windinduzierte Strömungen an der Seeoberfläche liefern quasi kostenlos Energie für die zusätzliche Stoffverteilung im See für einen hohen Wirkungsgrad.
- Die Einzelpartikel des eingesetzten Stoffes erhalten stets optimale Reaktionsbedingungen für einen schnellen Reaktionsablauf.

Um diese Vorteile im Rahmen der Applikation konkreter Einsatzstoffe zu einem wirtschaftlichen Optimum zu führen, bedarf es weiterer Betrachtungen zum chemisch-physikalischen Verhalten der in Frage kommenden Stoffe.

Die Bedeutung der richtigen Wahl des Einsatzstoffes für die Wirtschaftlichkeit eines konkreten Projektes geht aus Abb. 1 hervor.

Am Beispiel einer untersuchten Inlake-Behandlung am TBS Bluno mit Magnesiumumbranntkalk wird sichtbar, dass > 50 % der Gesamtkosten durch den Einsatzstoff verursacht werden. Alternative Stoffe wie Soda oder Natronlauge vergrößern diesen Kostenteil noch weiter. Damit wird deutlich, dass die Stoffauswahl und der Wirkungsgrad sehr entscheidend den Gesamtkostenaufwand zukünftiger Sanierungsprojekte bestimmen.



### Beispiel TBS - Bluno (Initialneutralisation)

Abb. 1: Kostenstruktur der Inlake-Technik (Planung Initialneutralisation TBS Bluno).

**Tab. 1: Analysen Einsatzstoffe (Quelle : Rheinkalk).**

Parameter	Kalkmilch	Branntkalk	Sorbacal	Dolomit-halbbrannt	Dolomit gebrannt	Einheit
<b>CaO</b>	73,5	94,5	40,0	41,9	45,5	Ma. %
<b>MgO</b>	0,6	1,2	25,0	29,6	32,0	Ma. %
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,4	1,5	0,6	5,9	1,8	Ma. %
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,2	0,1	0	0,2	0,2	Ma. %
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,1	0,3	0,6	1,6	0,8	Ma. %
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,1	0,3	0,2	2,2	0,9	Ma. %
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	---	---	0,1	0,2	0,1	Ma. %
<b>Glühverlust</b>	25,1	2,1	33,5	18,4	18,7	Ma. %

Die auf dem Markt verfügbaren alkalischen Stoffe für eine Inlake-Behandlung unterscheiden sich erheblich bezüglich ihrer anwendungstechnischen Eigenschaften. Für eine Erstbewertung haben sich Labortests mit Schwefelsäure bzw. mit Originalseewasser als praktikabel erwiesen. Damit sind Aussagen zur Kinetik der sehr komplex ablaufenden Prozesse möglich.

Die Stoffzusammensetzung einiger ausgewählter Produkte die beispielhaft einem Labortest unterzogen wurden geht aus Tabelle 1 hervor.

Ergebnisse dieser Tests mit den unterschiedlichen Kalk- und Dolomitprodukten mit Aussagen zur Stoffumsatzgeschwindigkeit sind in den Abbildungen 2, 3 und 4 wiedergegeben. Die Kornzusammensetzung geht aus Abb. 4 hervor.

Die ausgewählten Produkte unterscheiden sich in den physikalisch-chemischen Eigenschaften erheblich und geben damit in etwa die Spannbreite der Produkteigenschaften preislich günstiger Stoffe wieder.

Der hohe Säure- und Seewasserverbrauch bei Kalkhydratprodukten widerspiegelt das hohe Reaktionsvermögen mit großen Umsatzzraten im Minutenbereich. Den guten Eigenschaften von Kalkhydrat bezüglich Reaktionsgeschwindigkeit stehen höherer Preis und geringere spezifische Alkalität z.B. gegenüber Magnesiumbranntkalk entgegen.

Deutlich erkennbar wird auch der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Reaktionsverhalten der Einsatzstoffe. Fein gemahlene Dolomitprodukte erreichen ebenfalls akzeptable Umsatzzraten was besonders bei Seewasser (Abb. 3) im

Bereich mehrerer Stunden Reaktionszeit zu akzeptablen Ergebnissen führt.

Die wirtschaftlichen Chancen für die Anwendung eines Stoffes mit der Inlake-Technik werden neben dem Preis ganz entscheidend von dessen Kornverteilung bestimmt.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, wie viel Zeit einem Partikel zur Verfügung steht bis es den Seegrund erreicht bzw. welche Sinkgeschwindigkeit es einnimmt. Je niedriger die Sinkgeschwindigkeit im Wasser umso höher ist die Chance dass sich das Einzelpartikel vor Erreichen des Seegrundes voll umgesetzt hat.

Die zu erwartenden Sinkgeschwindigkeiten bzw. Sedimentationszeiten können unter Voraussetzung eines konstanten Teilchendurchmessers nach der Stokes'schen Gleichung berechnet werden:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{9 \cdot \eta} \quad (Gl.1)$$

v ... Sinkgeschwindigkeit

r ... Teilchenradius

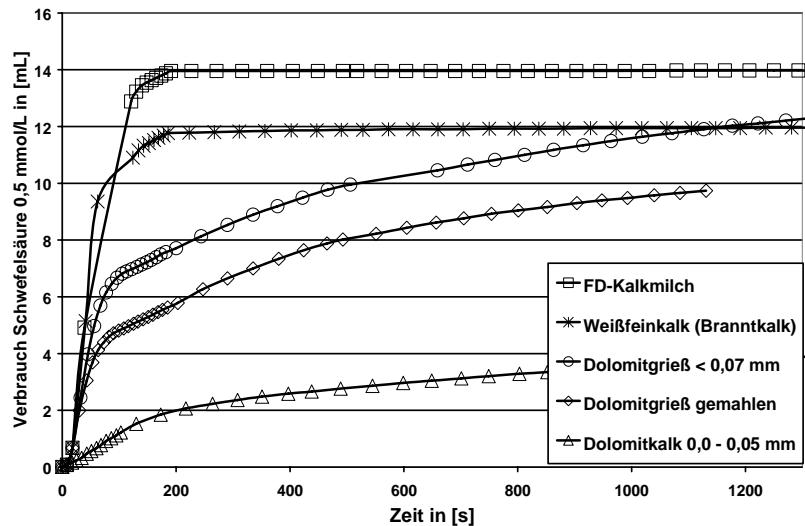
g ... Erdbeschleunigung

$\rho_1$  ... Dichte des kugelförmigen Teilchens

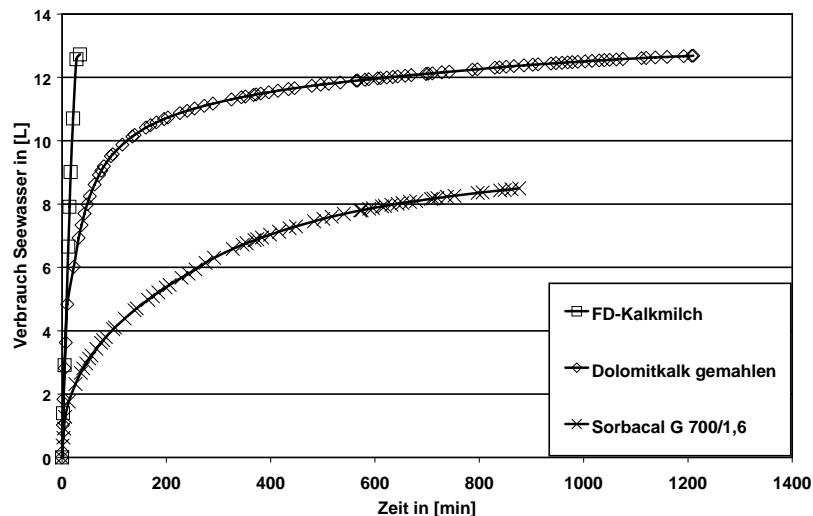
$\rho_2$  ... Dichte des umgebenden Mediums

$\eta$  ... dynamische Viskosität des Mediums im Reaktionsraum

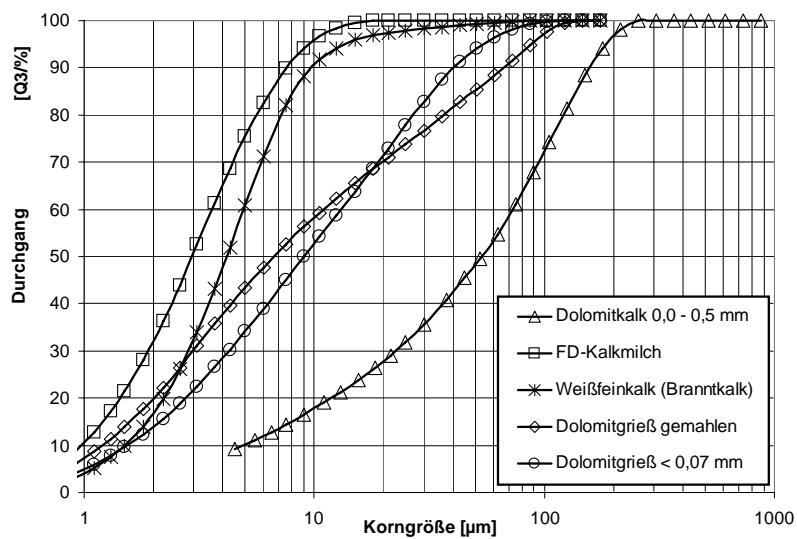
In Tabelle 2 sind Berechnungsergebnisse unter der Annahme kugelförmiger Teilchen für die in Frage kommenden Korndurchmesser des Einsatzstoffes wiedergegeben.



**Abb. 2:** Neutralisation von Kalk- und Dolomitprodukten mit Schwefelsäure (Quelle: Rheinkalk).



**Abb. 3:** Neutralisation von Kalk- und Dolomitprodukten mit Seewasser (Quelle: Rheinkalk).



**Abb. 4:** Korngrößenanalyse der untersuchten Produkte (Quelle: Rheinkalk).

**Tab. 2: Sinkgeschwindigkeiten und Sedimentations-/Verweilzeiten von kugelförmigen Teilchen aus Kalk-/Dolomitprodukt (0 – 2 mm; 1,3 g/cm<sup>3</sup>).**

Teilchendurchmesser		Sinkgeschwindigkeit v cm/s	Sedimentationszeit t für			
d mm	d μm		10 cm s min	10 m s min		
2	2000	65,400	0,15	0,00	15,29	0,25
1	1000	16,350	0,61	0,01	61,16	1,02
0,5	500	4,088	2,45	0,04	244,65	4,08
0,25	250	1,022	9,79	0,16	978,59	16,31
0,125	125	0,255	39,14	0,65	3914,37	65,24
0,06	60	0,059	169,89	2,83	16989,47	283,16
0,03	30	0,015	679,58	11,33	67957,87	1132,63
0,015	15	0,004	2718,31	45,31	271831,46	4530,52
0,008	8	0,001	9556,57	159,28	955657,49	15927,62

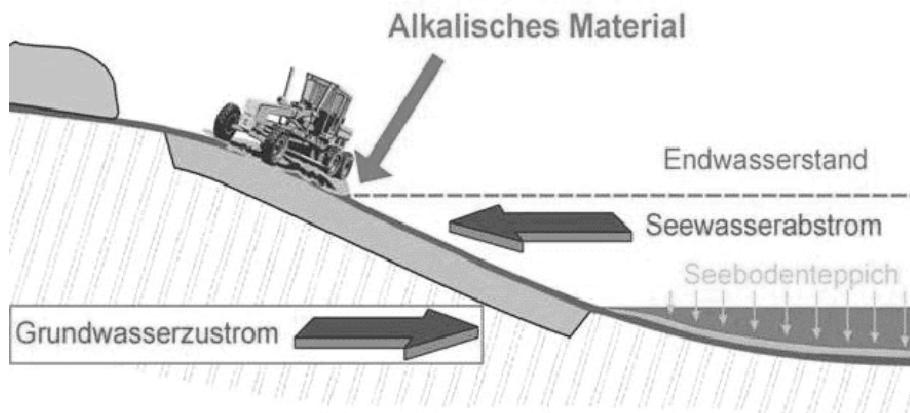
Die Tabelle 2 zeigt deutlich die Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit vom Korndurchmesser.

Körnungsanteile größer 0,5 mm erreichen in wenigen Minuten bei Wassertiefen von 10 – 30 m den Seegrund. Sie sind damit für den Stoffumsatz verloren. Kalkhydrat ist demnach ein zu bevorzugender Einsatzstoff, wobei fein gemahlener Magnesiumbranntkalk ebenfalls wegen seiner hohen spezifischen Alkalität in die engere Auswahl zu ziehen ist. Durch eine großflächige Verteilung und dem Ausnutzen windinduzierter Strömungen werden die Weglängen der einzelnen Partikel bis zum Absinken auf den Seegrund erheblich verlängert. Des Weiteren kann damit

gerechnet werden, dass jedes Einzelpartikel bei saurer Umgebung stets mit dem Stoffumsatz einem Verkleinerungsprozess unterliegt und damit seine Sinkgeschwindigkeit stetig abnimmt.

## 2.2 Reaktionsteppiche

Als weitere aussichtsreiche Variante zur anteiligen Neutralisation von TBS und benachbarter Areale bzw. für die Sicherung der Nachhaltigkeit wird das Anlegen so genannter Reaktionsteppiche angesehen. Mit dem Einbringen alkalischer Stoffe in Uferbereichen bzw. angrenzenden Kippenarealen kann das dem TBS zufließende Grund – und Oberflächenwasser konditioniert werden ( Abb. 5 ).

**Abb. 5: Schema Reaktionsteppich im Uferbereich eines TBS.**

Der wirtschaftliche Anreiz für dieses Verfahren besteht im Folgenden:

- Die heute verfügbare Maschinentechnik aus dem Bereich Rekultivierung und Landwirtschaft gestattet das Einbringen definierter Stoffmengen auf großen Flächen bis zu Tiefen von 0,5 - 1,0 m.
- Bei noch zu realisierenden Ufergestaltungen können alkalische Produkte mit wenig Aufwand in die zur Hohlraum-/Böschungsgestaltung genutzten Massen eingemischt werden.
- Das Einbringen alkalischer Produkte ist ebenfalls in flüssiger Form über preiswert anlegbare Dränage- oder Injektionssysteme denkbar.
- Die einzusetzenden Produkte müssen nicht wie im Fall der Inlake-Technik hochreaktiv sein; für den Stoffumsatz stehen ausgedehnte Zeithorizonte zur Verfügung.

Bezüglich des zu erwartenden Wirkungsgrades für den Stoffumsatz und den sonstigen Risiken dieses Verfahrens stehen z.Z. noch keine belastbaren Ergebnisse im Pilotmaßstab zur Verfügung so dass eine wirtschaftliche Bewertung gegenüber Alternativlösungen nicht möglich ist

### 2.3 Kalkhaltiger Eisenhydroxidschlamm (EHS) aus GWRA

EHS nimmt bei der Verfahrensanwendung der Inlake-Technik eine Sonderstellung ein. Die wirtschaftliche Vorrangstellung dieser Verfahrensvariante ist wie folgt begründet:

- Alle im Bereich der Lausitzer Seenkette i.B. befindlichen GWRA liefern EHS als Abprodukt mit einem nutzbaren Alkalitätspotential.



Abb. 6: Einspülung EHS in den TBS Spreetal NO.

- Der damit verfügbare Rohstoff für die TBS-Neutralisation wird meist punktuell am Seegrund eines benachbarten TBS abgelagert so dass sein alkalisches Potential kaum genutzt wird.
- Die chemisch-physikalische Struktur dieses Feststoff-Wassergemisches ergibt in Kombination mit der Inlake-Technik ideale Voraussetzungen für einen hohen Wirkungsgrad.
- Anlagentechnisch ist lediglich ein bewegliches Rohrverteilungssystem auf dem betreffenden TBS als einmaliger Aufwand notwendig.

Auf Grund des hier quasi kostenlos bereitstehenden Einsatzstoffes ergibt sich z.Z. keine wirtschaftlich Alternative für diese Verfahrenskombination, wie nachfolgend weiter unterstellt wird.

Die Resuspension der kalkhaltigen EHS-Sedimente im TBS Koschen im Jahre 2004 belegt diesen Sachverhalt eindrucksvoll (DIETRICH u.a. 2005). Abb. 6 zeigt eine mögliche Anordnung von Inlake-Technik mit EHS-Einsatz der GWRA Schwarze Pumpe im TBS Spreetal NO.

Die simultane Nutzung von CO<sub>2</sub> bei dieser Verfahrensvariante zum Aufbau eines Hydrogencarbonatpuffers ergibt zusätzliche Effekte bezüglich Nachhaltigkeit und Verbringung von CO<sub>2</sub> im Untergrund (MERKEL 2005).

Die Position der reichlich vorhandenen GWRA`n im aktiven sowie Sanierungsbergbau in der Lausitzer Seenkette geht aus Abb. 7 hervor.

### 3 Bewertung der Verfahrensvarianten

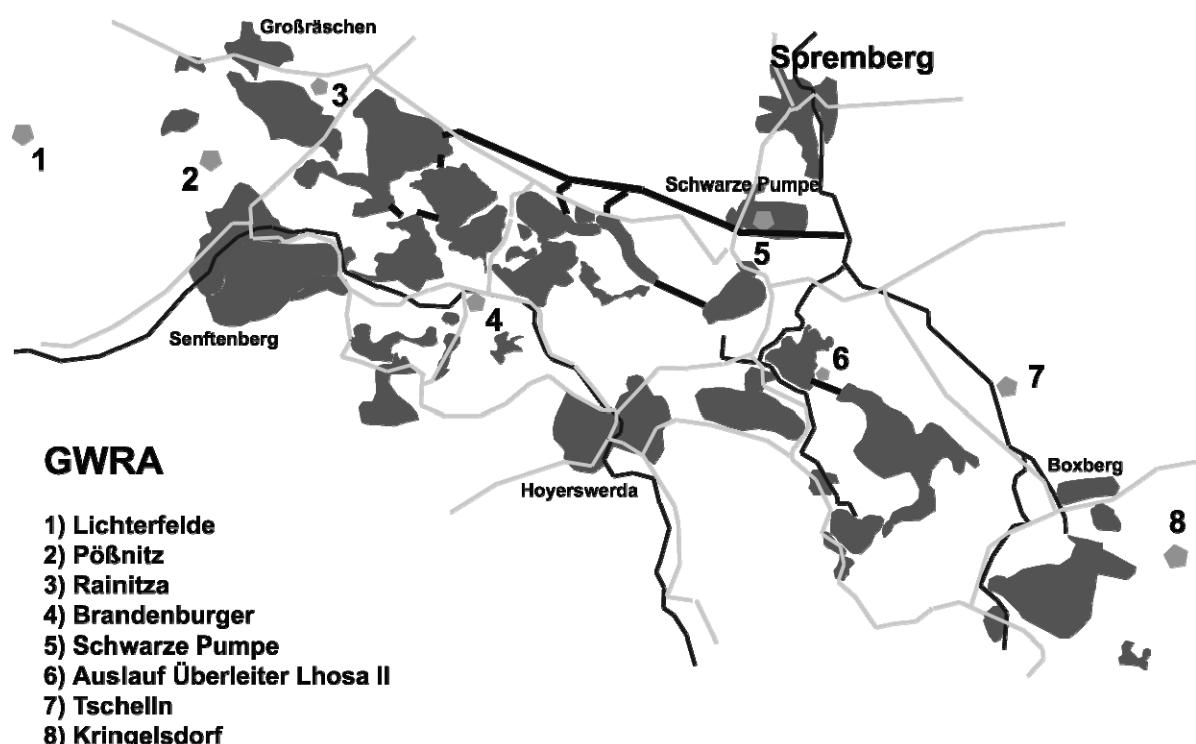
Um die Rangigkeit einzelner Verfahrensvarianten bezüglich ihrer wirtschaftlichen Chancen zu beurteilen sind folgende Faktoren maßgeblich:

- Theoretisch verfügbares Mol-Äquv./ Masseeinheit
- Der aktuelle Kaufpreis für den Einsatzstoff
- Der erzielbare Wirkungsgrad
- Die Reinheit des Stoffe
- Der geschätzte Aufwand an Energie ,Kapital, Arbeitszeit, Transport und Sonstiges

**Tab. 3: Kostenvergleich für pH-Wertanhebung.**

Verfahren	Mol.-Äquiv./kg	Cent/Kg	Wirkungsgrad	Anlagenkosten		Kostenfaktor
				Cent/moläquiv.	Cent/moläquiv.	
Verspülung von EHS-Kalksedimenten	14,0 *	0	90	0,2	0,3	1,0
			100			
Magnesium-branntkalk	41,5	7,5	75	0,3	0,5	1,7
			85			
BK-KW-Aschen	12,1 **	1,5	75	0,4	0,7	2,3
			100			
Löschkalk Ca(OH) <sub>2</sub>	27,0	7,5	75	0,3	0,8	2,7
			90			
Natronlauge	25,0	27	100	0,2	1,2	4,0
			100			
Soda	15,5	16	70	0,3	1,6	5,3
			100			
GWRA	27,0	7,5	60	2,0	2,5	8,3
			90			

\*, \*\* Laborwerte

**Abb. 7: Lage der GWRA in der Lausitz.**

In Tabelle 3 sind die Bewertungsergebnisse aussichtsreicher Verfahrensvarianten zusammengefasst dargestellt.

Klar ersichtlich wird der wirtschaftliche Vorteil einer EHS-Verteilung in TBS. Gleichfalls ist der Abstand aller Inlake-Varianten gegenüber der GWRA deutlich.

## 4 Ausblick

Mit der Verfügbarkeit kostengünstiger Verfahrensvarianten der Inlake-Technik steht ein effektives Werkzeug zur Lösung des Aciditätsproblems von sauren TBS zur Verfügung. Damit kann die dringend gebotene Flutung an vielen Stellen der Lausitzer Seenkette und anderswo effektiv ergänzt werden. Vorgesehene Speichernutzungen, Gewässeranbindungen und touristische Schwerpunkte können eher nutzbar gemacht werden.

Als wesentlichste Erkenntnis bleibt festzuhalten dass der Betrieb von GWRA wenn er ausschließlich der Wasserbehandlung von TBS dient zu überdenken ist und durch geeignete Inlake-Technik Varianten ersetzt werden sollte (MERKEL 2005).

Die Nutzung des Alkalitätspotentials von sümpfungsbedingten GWRA bringt eine besonders effektive Bilanz bei der Lösung der Gesamtaufgabe ein. Jede effektive Einzellösung trägt auch dazu bei, die bereitstehenden Flutungswassermengen optimaler zu nutzen.

## 5 Literatur

BENTHAUS F.-C. (2005): Umsetzung der Pilot-/Demovorhaben für die Gewässergüteentwicklung – Maßnahmenplan der LMBV für 2005/2006 – 3. Fachtagung Gewässergüte LMBV 2005

DIETRICH B. , RABE W. , WEHNER O., SCHOLZ G. (2005): Resuspendierung von Kalksedimenten im Tagebausee Koschen mittels Verteilersystem - 3.Fachtagung Gewässergüte LMBV 2005

HONIG H. (2006): Laboruntersuchungen zur Anhebung des pH-Wertes von Badeseen mit Kalk- und Dolomitprodukten (2006) Rheinkalk GmbH , unveröfftl. Laborbericht

MERKEL B. (2005): Alkalinitätserhöhung in sauren Grubenwässern durch CO<sub>2</sub>-Zugabe. Wissenschaftliche Mitteilungen, Institut für Geologie 28:51-55;Freiberg

NITSCHE C., TIENZ K. (2005): Bisherige Erfahrungen bei der Sodapulver-Applikation im Bockwitzer See – 3.Fachtagung Gewässergüte LMBV 2005

SCHOLZ G. (2005): Inlake-Technik - ein effizientes Verfahren zur Alkalinisierung und Sulfatreduzierung schwefelsaurer Tagebauseen. Wissenschaftliche Mitteilungen, Institut für Geologie 28: 75-80 ; Freiberg

ZSCHIEDRICH K. (2005): Stand der wasserwirtschaftlichen und bergbaulichen Sanierung, Schwerpunkte und Aufgaben weiterführender Maßnahmen. – 3.Fachtagung Gewässergüte LMBV.