

Neueste Trends zur aktiven Wasserbehandlung und Anwendungsbeispiele

Horst Märten

Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden, Zum Windkanal 21, 01109 Dresden, h.maerten@uit-gmbh.de

Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der aktiven Wasserbehandlung im Bergbau in den spezifischen Anwendungsgebieten

- Behandlung von sauren Bergbauwässern (AMD – acidic mine drainage) mit Schwerpunkt HDS-Technologie (HDS – high-density sludge)
- In-situ-Behandlung bergbaubeeinflusster Grundwasserkörper, insbesondere nach Anwendung der In-situ-Laugung (ISL)
- In-situ-Behandlung von Tagebaurestseen mit Schwerpunkt In-lake-Verfahren

werden hinsichtlich Machbarkeit, technologischer Kenngrößen und Effizienz bewertet und kommentiert.

Recent developments in the field of active water treatment technologies in the mining sector are reviewed. Application areas of interest include

- Treatment of acidic mine drainage (AMD) emphasizing HDS technology (HDS – high-density sludge)
- In-situ treatment of groundwater affected by mining, in particular after the application of in-situ leaching (ISL)
- In-situ treatment of lakes arising in former open-pit lignite mines, in particular the application of in-lake methods

The various applications are evaluated with regard to feasibility, technical characteristics and treatment efficiency.

1 Einführung

„Aktive Wasserbehandlung“ lässt sich definieren als die Verbesserung der Wasserqualität durch Methoden, die den kontinuierlichen Einsatz von Energie und/oder (bio-)chemischen Reagenzien erfordern (YOUNGER *et al.* 2002). Die zu Grunde liegenden elementaren physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sind in der Regel als Lehrbuchwissen bekannt. Die technologische Entwicklung der Verfahren ist jedoch fortlaufend. Sie richtet sich auf solche Schwerpunkte wie die Erhöhung der Effizienz bei der Ausnutzung elementarer Prozesse, die Kombination von Technologien, die Verbesserung der Reststoffeigenschaften u. a., jeweils mit dem Ziel der Minimierung der Kosten und der Erreichung der durch die Umweltlegislative bzw. -exekutive gesetzten Bedingungen.

Im Rahmen von Sanierungsaufgaben kommen zunehmend vielfältige passive Verfahren der

Wasserbehandlung zum Einsatz, die hinsichtlich Effizienz, Zeitverhalten und Langzeitstabilität verfahrens- und standortspezifischen Beschränkungen unterliegen, jedoch in weniger drastischen Anwendungen (insbesondere im Fall begrenzter Volumenströme und Schadstoffkonzentrationen) eine ökologisch akzeptable und ökonomisch sinnvolle Alternative zur aktiven Wasserbehandlung darstellen. In den „harten“ Fällen sind in der Regel die aktiven Verfahren unvermeidbar. Sie sind präzise und zuverlässig; Energie- und/oder Reagenzienverbrauch können den Zulaufbedingungen optimal angepasst werden. Wegen der meist erheblichen Investitions- und Betriebskosten für aktive Verfahren stehen technologisch hocheffiziente, ökologisch optimierte und ökonomisch günstige Verfahren der aktiven Wasserbehandlung im Mittelpunkt der Sanierungskonzeption, -planung und -durchführung.

2 Verbesserte HDS-Technologie

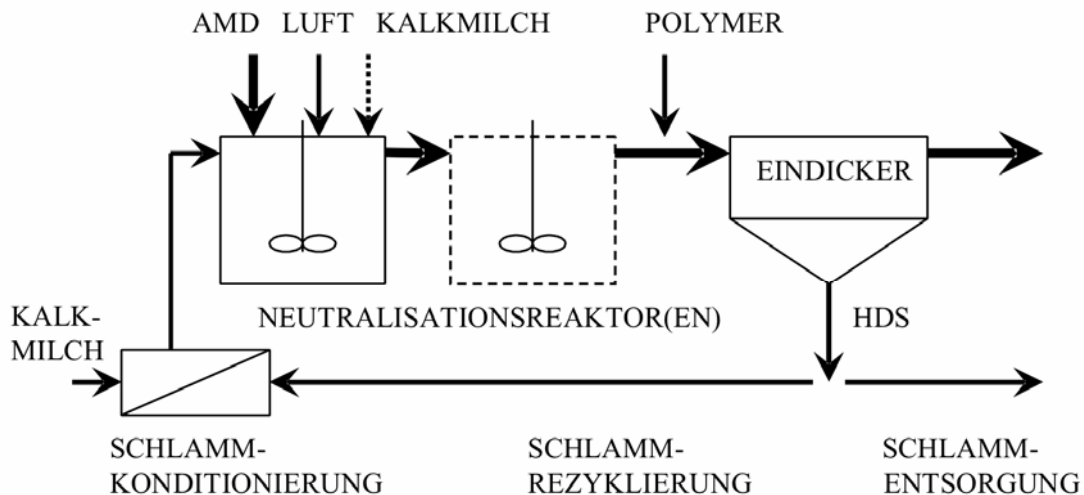
2.1 Traditionelle HDS-Technologie

HDS ist ein seit den 50er Jahren angewandtes Kalkneutralisationsverfahren mit partieller Schlammrückführung (ca. 80-95 %) und -konditionierung. Es gewährleistet die effiziente Neutralisation saurer Bergwerkswässer, die zuverlässige Abtrennung von Schwermetallen sowie deutlich bessere Reststoffeigenschaften (Schlammichte) als in einfachen Neutralisationsanlagen (LDS – low density sludge). Das HDS-Verfahren ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

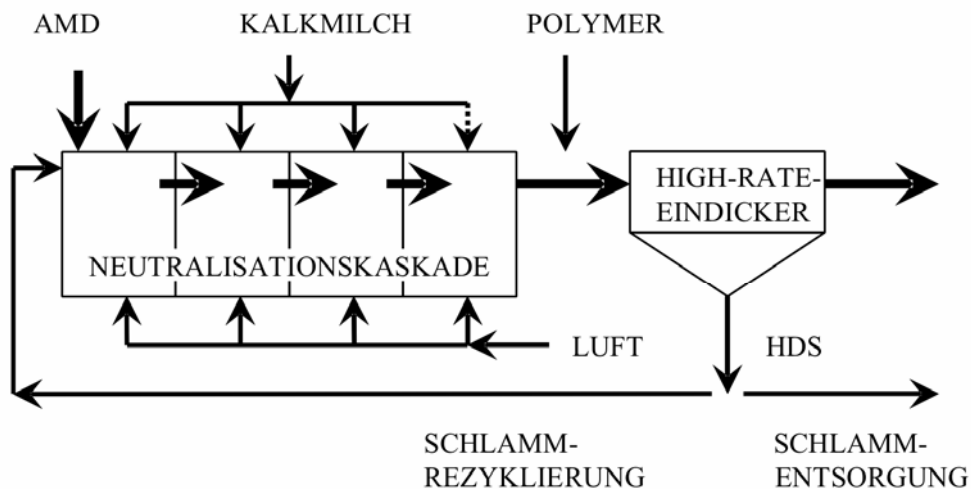
2.2 HDS mit gestaffelter Neutralisation

Ein neuartiger Kalkneutralisationsprozess wurde von (DEMOPOULOS *et al.* 1995) vorgeschlagen und im Labormaßstab mit NaOH (anstelle Kalk) getestet. Diese verbesserte HDS-Technologie mit gestaffelter Neutralisation (bzw. pH-Wertanhebung) ist ebenfalls in Abb. 1 dargestellt. In Anlehnung an diesen Technologievorschlag erfolgten durch (HEINZE *et al.* 2002) nach erfolgreichen Tests an einer Pilotanlage (1 m³/h AMD) die Entwicklung einer ausgereiften Technologie, die in zwei Großanlagen der WISMUT in Königstein und Ronneburg implementiert wurde (HEINZE *et al.* 2002).

Durch die verbesserte HDS-Technologie wird die Übersättigung der Suspension bezüglich der



HERKÖMMLICHE HDS-TECHNOLOGIE



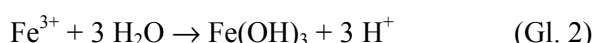
VERBESSERTE HDS-TECHNOLOGIE MIT GESTAFFELTER NEUTRALISATION

Abb. 1: Schemata der herkömmlichen sowie der verbesserten HDS-Technologie.

Feststoffphasen limitiert. Damit erreicht man anstelle der Ausfällung amorpher Phasen, insbesondere $\text{Fe}(\text{OH})_3$, die dominante Bildung kristalliner Phasen wie FeOHSO_4 oder weiterer komplexer Mischphasen wie Schwertmannit. Die Neutralisationskaskade wird in 3 bis 5 Stufen ausgeführt. Die pH-Werterhöhung erfolgt gestaffelt und ist zusammen mit der Schlammzyklirerate in Abhängigkeit von den Zulaufbedingungen zu optimieren. Je stärker die Bildung kristalliner Phasen gemäß der Fällungsreaktion



gegenüber der bekannten Fällreaktion zu (amorphem) Eisenhydroxid



überwiegt, umso geringer ist der Einfluss der Hydrolyse auf den pH-Wert, umso geringer ist auch der Verbrauch an Neutralisationsmittel. Die Ersparnis an Kalk zur Neutralisation saurer Flutungswässer liegt praktisch – wie in den nachfolgend beschriebenen Anwendungen nachgewiesen – im Bereich von bis zu 20 %.

Neben der Feststoffzusammensetzung an sich wird durch die HDS-Technologie die Partikelgröße wesentlich erhöht. Dies ermöglicht neben deutlich verbesserten Absetzraten im Eindicker (bevorzugt als Hochleistungseindicker) und damit reduzierter Baugröße auch die Erzeugung eines hochdichten Schlammes (HDS), der in der hier beschriebenen Technologieausführung mit gestaffelter Neutralisation und Hochleistungseindickung (mit Schlammbett) Schlamm-dichtewerte oberhalb 20 M% im Schlammabzug des Eindickers (bzw. des Klärers bei Betrachtung des

gereinigten Wasserstroms) ermöglicht. Entsprechend ist auch die Entwässerbarkeit des Schlammes gegenüber der herkömmlichen HDS-Technologie und natürlich dem LDS-Verfahren signifikant verbessert.

2.3 Anwendungsbeispiele

Die HDS-Technologie mit gestaffelter Neutralisation wurde in zwei Anlagen der WISMUT GmbH in Königstein und Ronneburg implementiert, jeweils zur Behandlung von Flutungswasser, jedoch für sehr verschiedene Zusammensetzungen des Zulaufs zur Anlage (HEINZE *et al.* 2002):

Königstein: pH = 2–3, $\text{SO}_4 = 1\text{--}6 \text{ g/l}$, $\text{Fe} = 0,2\text{--}1 \text{ g/l}$, $U = 10\text{--}60 \text{ mg/l}$,

Ronneburg: pH = 4–6, $\text{SO}_4 = 1\text{--}7 \text{ g/l}$, $\text{Fe} = 0,01\text{--}0,2 \text{ g/l}$, $U = 0,5\text{--}2 \text{ mg/l}$, HCO_3 bis $0,7 \text{ g/l}$.

Die Besonderheit der Königsteiner Anlage ($650 \text{ m}^3/\text{h}$, in Ausnahmefällen bis $1000 \text{ m}^3/\text{h}$) besteht vor allem in der vorherigen Abtrennung von Uran aus dem Flutungswasser mittels Ionenaustausch und der nachfolgenden Aufbereitung zu einem verwertbaren Produkt (anstelle der aus Gründen des Umweltschutzes bedenklichen Verbringung des Urans in einem Fällschlamm auf die Halde am Standort).

Im Falle der Ronneburger Anlage ist eine Entkarbonatisierung vorgeschaltet, damit einerseits die Fällung des Urans ermöglicht (es bleibt sonst als Uranylkarbonatkomplex in Lösung) und andererseits die Menge an Fällschlamm begrenzt wird.



Abb. 2: Ansichten der Neutralisationskaskaden in den HDS-Anlagen der WISMUT in Königstein (links) und Ronneburg (rechts) – jeweils vierstufig in zwei Straßen.

Die HDS-Technologie erweist sich als hocheffizient hinsichtlich der Entfernung von metallischen Kontaminationen sowie Radionukliden aus den natürlichen Zerfallsreihen von Uran und Thorium. Hierbei spielen adsorptive Prozesse am Eisenfeststoff (auch als Co-Fällung bekannt) eine wichtige Rolle, wodurch die typischen FällungspH-Werte insbesondere für Metalle abgesenkt werden.

In beiden Anlagen der WISMUT wird die Schlammmentwässerung mit Zentrifugen praktiziert. Im Fall der Königsteiner Anlage kann der entwässerte Schlamm aufgrund der ausreichenden geomechanischen Eigenschaften und Elutionsstabilität direkt auf die Halde am Standort verbracht werden. Im Ronneburger Fall erfolgt eine zusätzliche Immobilisierung.

Weitere Details zu beiden Anlagen der WISMUT sind in (HEINZE *et al.* 2002) beschrieben. Abbildung 2 zeigt die praktische Ausführung der Neutralisationskaskaden in den hier diskutierten Anwendungsfällen.

3 Neue elektrochemische Methode für Grundwassersanierung

3.1 Grundlagen

Die Grundlagen der Elektrodialyse sind seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Elektrolytische Zellen lassen sich durch geeignete Membranen in zwei Kompartimente trennen, den Kathoden- und den Anodenraum. Entsprechend werden salzhaltige Lösungen in den Kompartimenten chemisch

reduziert bzw. oxidiert – man erhält das alkalische, chemisch reduzierende Katholyt auf der einen Seite sowie das saure, chemisch oxidierende Anolyt auf der anderen Seite. Anolyt aus der elektrochemischen Behandlung von NaCl-Lösung wird zur Desinfektion eingesetzt, eignet sich aber auch zur Oxidation chemischer Spezies (z. B. Metalle) sowie zur oxidativen Zersetzung organischer Verbindungen in speziellen Wasserbehandlungsanlagen.

3.2 Anwendung im Bereich der In-situ-Laugung: Oxidation der Laugungslösung sowie Grundwassersanierung

Die australische Firma Heathgate Resources betreibt in Beverley, Südaustralien, ein Laugungsbergwerk zur Urangewinnung (MÄRTEN 2005). Die In-situ-Laugung (ISL) erfolgt dabei im schwach schwefelsauren Bereich unter Anwendung des Oxidationsmittels Wasserstoffperoxid. Das im Uranmineral Coffinit in vierwertiger Form vorliegende Uran wird oxidiert und damit als Uranylion bzw. dessen Sulfatkomplexe mobilisiert. ISL erfolgt im Kreislauf, das Uran wird mittels Ionenaustausch aus der Laugungslösung abgetrennt, die rezyklierende Lösung ist vor Injektion chemisch zu konditionieren (pH-Wertanpassung und Zugabe des Oxidationsmittels). Die Laugungslösung ist stark salzhaltig, bereits durch die ursprüngliche Qualität des salinen Grundwassers sowie durch den ISL-Prozess bedingt.

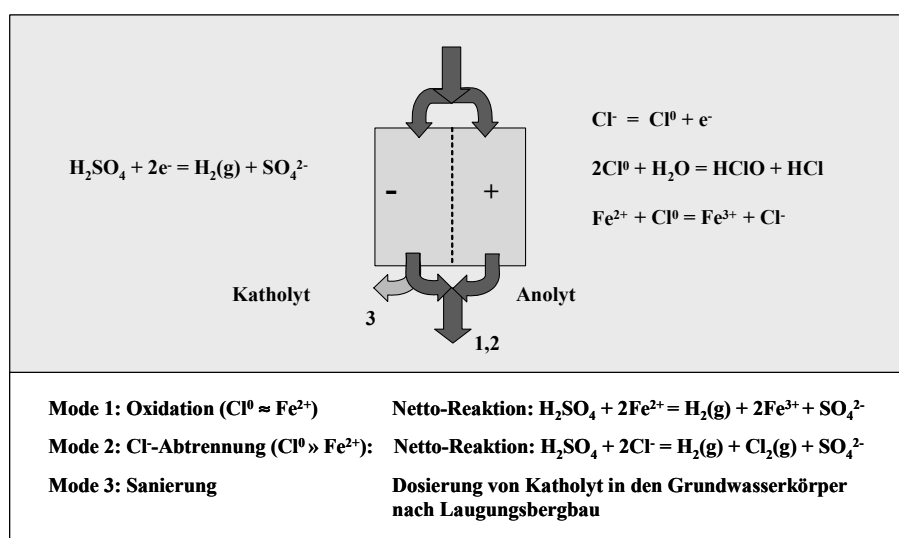


Abb. 3: Prinzipskizze des elektrochemischen Verfahrens mit Auflistung der Betriebsmoden.

Gegenwärtig werden Pilotversuche im industriellen Maßstab durchgeführt, um das Wasserstoffperoxid durch eine elektrochemische Oxidation der Laugungslösung abzulösen und um damit Betriebskosten signifikant zu reduzieren. Die Grundeinheit, eine Zelle für einen Durchsatz von ca. 2 l/s, wird in der künftigen Anwendung multipliziert (für einen Durchsatz von ca. 20 l/s). Das Prinzip ist in Abb. 3 dargestellt. Die Oxidation der Laugungslösung kann in zwei Moden erfolgen. Erstens in der Standardbetriebsart mit mäßiger Leistungsaufnahme zur alleinigen Oxidation. Zweitens in der Betriebsart mit hoher Leistungsaufnahme zur gleichzeitigen Entfernung von Chlorid, das bereits mit ca. 5 g/L im Grundwasser vorliegt, jedoch die Effizienz des Ionenaustauschs zur Uranabtrennung einschränkt.

Neben den beiden Betriebsarten, die auf die Erhöhung der Effizienz und die Senkung der Kosten der Urangewinnung abzielen, ergibt sich eine interessante dritte Anwendungsmöglichkeit. Nach Einstellung der Laugung verbleibt im Grundwasserkörper eine Wasserqualität bei pH 2,5 mit Urangelhalten von 10 bis 30 mg/L. Nach Abschluss des gesamten ISL-Bergbaus im isolierten Grundwasserleiter ist ein pH-Wert von mindestens 4 zu realisieren. Es ist vorgesehen, die neue Anlage zur elektrochemischen Oxidation künftig gleichzeitig zur Herstellung von Katholyt einzusetzen. Durch Injektion von Katholyt wird nicht nur eine Neutralisation des Grundwassers erreicht, gleichzeitig wird das Redox-Potenzial abgesenkt und das gelöste Uran immobilisiert. Damit erzielt man also ein chemisches Milieu, das dem ursprünglichen vor ISL-Anwendung nahe kommt und die weitere natürliche Abschwächung (Natural Attenuation) nachhaltig begünstigt. Die konzipierte Anlage zur Grundwassersanierung beruht auf einer Kreislaufauffahrt mit Dosierung des Katholyts, die so lange durchgeführt wird, bis die chemischen Zielbedingungen erreicht sind.

4 In-situ-Sanierung von Tagebaurestseen

4.1 Spannweite der Sanierungsprobleme und Lösungsansätze

Die Verbesserung der Wasserqualität in sauren Seen oder verbundenen Restlochketten ist eine der vorrangigsten Aufgaben im Rahmen des Sanierungsprogramms der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft

mbH (LMBV) im Osten Deutschlands. Die Flutung der meisten der früheren Tagebaue als Folge des fortschreitenden Grundwasserwiederanstiegs in den früheren Bergbauregionen ist im Gang und wird für einige der Seen nicht einmal in den nächsten 10 Jahren abgeschlossen sein. Durch die Flutung entstehen neue Landschaften mit einem erheblichen Potenzial für die künftige Nutzung, wobei ökonomische, soziale und ökologische Bedingungen eine bedeutsame Rolle spielen.

Der Entscheidungsprozess für die Festlegung der optimalen Sanierungslösungen ist ziemlich komplex. Grundlage hierfür ist die genaue Kenntnis des Wasserhaushalts bezüglich Hydrogeologie und Geochemie (insbesondere die Massenbilanz für die Kontaminationen). Andererseits sind verschiedene Technologien prinzipiell verfügbar. Jedoch hängt die Auswahl der optimalen technischen Ausführung von den Standortbedingungen, vom Grad des Einflusses der Wasserkontamination auf Umwelt und Mensch, von der Machbarkeit der verschiedenen Technologien im individuellen Anwendungsfall, von den definierten Sanierungszielen, vom Kosten-Nutzen-Verhältnis, von den Konzepten für die künftige Nutzung u. a. ab.

Sanierungstechnologien zur Verbesserung der Wasserqualität in Tagebaurestseen lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Fremdwasserflutung aus externen Quellen (Flüsse, Reservoirs) zur Beschleunigung der Flutung und Verdünnung des Seewassers. Optional kann der Zustrom zur Verbesserung der Seewasserqualität konditioniert werden (Zugabe von Neutralisationsmitteln).
- In-lake-Technologien mittels geregelter Zugabe von Neutralisationsmitteln. Zu präferieren ist ein Mehrstufenverfahren mit folgender Sequenz:
 - Primärneutralisation durch Kalkdosierung (pH-Anstieg von typischen Werten um 3 auf etwa 6 bis 7)
 - Weitere Neutralisation mittels Sodadosierung (zusätzlicher Carbonatpuffer für nachhaltige chemische Bedingungen)
 - Maßnahmen zur biologischen Aktivierung (Kontrolle von Nahrungsketten für die verbesserte Produktion von Biomasse, Zugabe von bioaktivierenden Substraten Bepflanzung mit Makrophyten u. a.)

- Untergrundreaktoren zur Verbesserung der Grundwasserqualität im Anstrom zu Tagebaurestseen. Der Entwurf derartiger Reaktoren ist ziemlich verschieden: (i) Reaktive Wände (passiv), (ii) Injektionswände (aktiv), und (iii) semiaktive Funnel-and-gate-Systeme.
- Elektrochemische Behandlung des Seewassers, insbesondere Reduzierung der Metall- und Sulfatkonzentrationen.

In Spezialfällen, insbesondere zur Konditionierung des Ablaufs (Überlaufs) aus kontaminierten Tagebaurestseen werden

- Konventionelle Wasserbehandlungsanlagen eingesetzt, um den Forderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zu entsprechen.

Während die Fremdwasserflutung von Tagebaurestseen (in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit in der Region) und die In-lake-Behandlung als bewährte Technologien mit einem vernünftigen Kosten-Nutzen-Verhältnis angesehen werden können, ist die Anwendung von Untergrundreaktoren nur in speziellen Fällen machbar und ökonomisch sinnvoll. Die elektrochemische Behandlung wurde bisher in Pilotversuchen erfolgreich getestet, jedoch wurde die Machbarkeit in großtechnischen Anwendungen bisher noch nicht überzeugend demonstriert.

Die Effizienz der oben genannten Methoden hängt in starkem Maße von der verwendeten Technik ab. Zum Beispiel ist die In-lake-Behandlung nur dann wirklich effizient, wenn das Neutralisationsmittel vollständig in das Seewasser eingemischt bzw. aufgelöst wird, wenn also das Absetzen von suspendierten Feststoffen (wie in Kalksuspensionen) verhindert wird. Die Dosierung des Neutralisationsmittels in fester Form ist prinzipiell nur im Falle des Sodaeinsatzes (mit strikten technischen Randbedingungen) machbar.

Die Konzeption von Untergrundreaktoren muss sehr gewissenhaft vorgenommen werden, gestützt auf systematischen Untergrunduntersuchungen und unter Berücksichtigung der im Allgemeinen sehr heterogenen Permeabilität in Grundwasserleitern. Fällprodukte als ein Ergebnis der stimulierten Reaktionen können solche Effekte verstärken, die die Effektivität der Methode selbst durch Strömungsbedingungen mit ungenügendem Kontakt des Grundwassers mit dem injizierten Reaktionsmittels einschränken.

4.2 Modellgestützte Sanierungskonzeption

Jeder Standort ist hinsichtlich der Stofftransport- und Umwandlungsdynamik einmalig. Die korrekte Widerspiegelung der hauptsächlichen Prozesse in einem mathematischen Konzept (Grundgleichungen) ist eine wesentliche Voraussetzung für die Zuverlässigkeit des Modells. Ein effizienter Ansatz hierfür ist das dynamische, mehrdimensionale Kompartimentsmodell (KALKA, MÄRTEN 2005), das die Simulation verschiedenartiger reaktiver Transportprozesse ermöglicht, insbesondere aber die Flutung von Bergwerken mit offenen Hohlräumen und Tagebauen in Kombination mit der Grundwasserströmung sowie technischen Maßnahmen. Jüngste Anwendungen zielen auf die Flutungsdynamik in individuellen Tagebaurestseen sowie verbundenen Restlochketten in Verbindung mit relevanten technischen Maßnahmen wie der Fremdwasserflutung aus benachbarten Flüssen und der Wasserbehandlung (insbesondere In-lake-Technologien).

Das dynamische Kompartimentsmodell beruht auf Differentialgleichungssystemen, die alle wesentlichen *hydrogeologischen, geochemischen und technischen* Effekte widerspiegeln. Durch Raum-Zeit-Diskretisierung wird das mathematische Modell in das numerische Modell als unmittelbare Grundlage für die Darstellung in einem effizienten C⁺⁺-Softwaretool transformiert. Das wohlbekanntes Geochemieprogramm PhreeqC der U.S.G.S. (PARKHURST, APPELLO 1999) fungiert als Subroutine und wird in typischen Computersimulationen zu o. g. Prozessen tausend- bis millionenfach aufgerufen. Gewöhnlich ist das Kompartimentsmodell in regionale Grundwasserströmungsmodelle eingebettet. Die zeitabhängige Masse $m(t)$ für alle relevanten chemischen Spezies (einschließlich Fest- und Gasphasen sowie Adsorptionseffekte) wird im gesamten Differentialgleichungssystem als Produkt aus Konzentration $c(t)$ und Volumen $V(t)$ behandelt. Folglich beruhen Masseänderungen explizit sowohl auf Konzentrationsänderungen dc/dt (chemischen Umwandlungen) als auch auf Volumenänderungen dV/dt (wie für Flutungen typisch), um alle Erhaltungssätze (Masse, Ladung) einzuhalten. PhreeqC ermöglicht die detaillierte Simulation solcher chemischen Prozesse wie Speziierung, Komplexbildung, Säure-Base-Reaktionen (H^+ -Transfer), Reduktions-Oxidations-Prozesse (e^- -Transfer), Mischung, Auflösung von Mineralphasen, Fällung von Festphasen, adsorptive

(Oberflächen-)Reaktionen etc. Die chemische Kinetik wird auf der Grundlage der kinetischen Ordnung und der relevanten kinetischen Parameter einbezogen (primär experimentell bestimmt). Für Seesysteme (oder Systeme verbundener Bergwerke) werden die individuellen Kompartimentsmodelle bei strikter Einhaltung der Masse und Ladung (wie bei individuellen Modellen) gekoppelt. Jede Modellanwendung beginnt mit der sorgfältigen Kalibrierung auf Grundlage der Standortdatenbank (Epignose). Für die zuverlässige Modellprognose ist die Prozessabfolge konsistent zu beschreiben, d. h. ohne jegliche Konflikte zwischen hydrologischen und geochemischen Variablen (im Rahmen des Unsicherheitsbereichs der Standortdaten).

Die wesentlichen Massenänderungen für alle berücksichtigten chemischen Spezies im See oder Seesystem sind: Advektion, Grundwasserzustrom/-abstrom, Oberflächenwasserzustrom/-abstrom (einschließlich Fremdwasserflutung), Aziditätseintrag (v. a. von Kippen und durch Böschungserosion), Zehrung, Fällung (inkl. Co-Fällungseffekte), Chemikaliendosierung etc. Jeder dieser Terme wird durch eine eigene Differentialgleichung dargestellt. Das Schicksal des Tagebaurestsees während der Flutung und danach wird in hohem Maße durch den Aziditätseintrag bestimmt. Empirische Gleichungen dienen der mathematischen Widerspiegelung, die standortspezifisch und im Zusammenhang mit der Epignose der Seentwicklung ermittelt werden. Effekte höherer Ordnung wie biologische

Prozesse werden bei Signifikanz einbezogen. Ein Beispiel der Simulation der aktiven Behandlung eines Tagebaurestsees hoher Acidität ist in Abb. 4 dargestellt. Hier wird der saisonale Eintrag von Neutralisationsmittel in frostfreien Perioden angenommen. Nach dreijähriger aktiver Sanierung mit der optionalen Nachsorge (insbesondere zur Kompensation des Eintrags sauren Kippen Grundwassers) wird der See neutral stabilisiert und für die künftige Nutzung verfügbar.

4.3 In-lake-Verfahren der aktiven Sanierung

Das Spektrum der sich herausbildenden Tagebaurestseen ist hinsichtlich Größe bzw. Volumen V und Chemismus (Gesamtacidität A) äußerst vielfältig. Die spezifische Acidität, ausgedrückt als $K_{B8,2}$, reicht von Werten unterhalb 1 mmol/l bis zu Werten nahe 20 mmol/l. Für eine überschlägige Einordnung und Dimensionierung der Anlagen lässt sich der Neutralisationsmittelbedarf für eine Sanierung grob aus der Gesamtacidität $A = V \cdot K_{B8,2}$ abschätzen (der genauere Bedarf ergibt sich natürlich aus der dynamischen Modellierung wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, insbesondere unter Berücksichtigung des weiteren Aciditätseintrags von verschiedenen Quellen).

Für Aciditätswerte im Bereich bis zu wenigen 10^4 kmol wird die Anwendung von quasimobilen Sanierungsstationen für saisonale Einsätze vorgeschlagen (s. Abb. 5). Eine solche Station be-

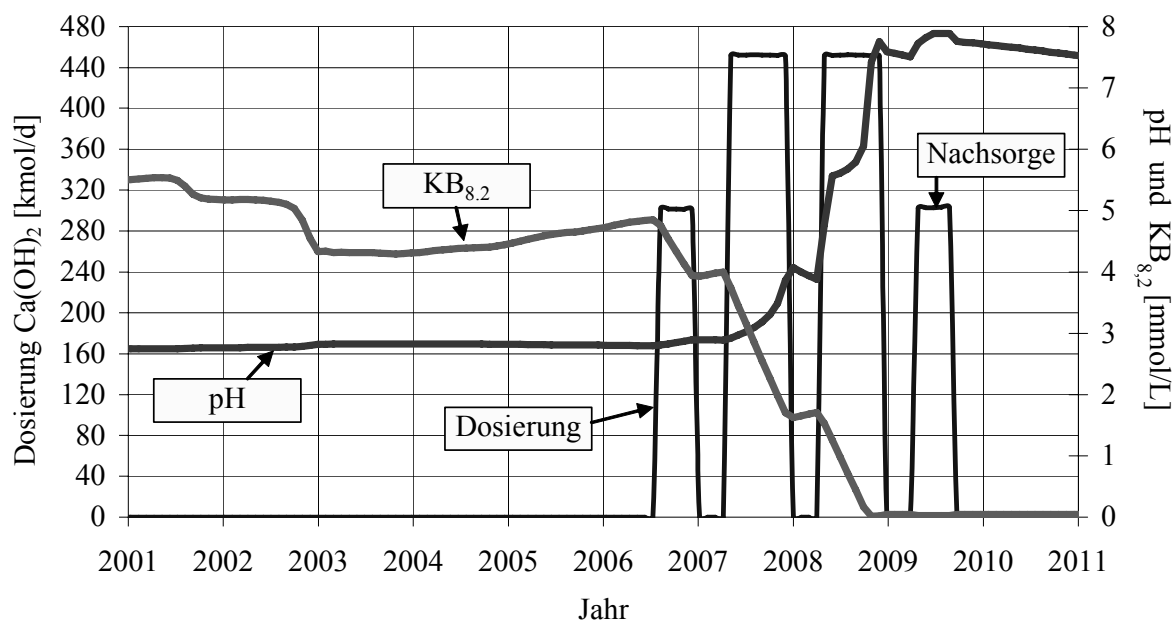


Abb. 4: Berechnetes Sanierungsszenario für einen extrem sauren Restsee (in saisonalen Kampagnen).

steht aus einer (containergestützten) Anlage für die Bereitung des Neutralisationsmittels und geregelter Dosierung, meist autarker Energieversorgung und Prozessautomatisierung. Die Kapazität einer solchen Grundeinheit sollte im Bereich 100 kmol/d liegen (regelbar), um für Seen kleiner Gesamtacidität eine chemische Grundsäuerung in möglichst einem saisonalen Einsatz zu erreichen. Der Eintrag des Neutralisationsmittels (bevorzugt Kalkhydroxid in der ersten Stufe der Neutralisation bis pH 6, Einsatz von Soda in der zweiten Stufe der chemischen Neutralisation bis pH 7–8) erfolgt über schwimmende Rohrleitung(en) und Ponton(s) in die bevorzugt tieferen Bereiche des Sees. Entscheidend für die Effektivität des Eintrags des Neutralisationsmittels sind eine hinreichend kleine Konzentration der Neutralisationslösung sowie der Eintrag von mechanischer Energie am Dosierpunkt für beste Einmischung in den Seewasserkörper. Hierbei ist die technische Auslegung in Abhängigkeit von den Standortbedingungen (Morphometrie, Gesamtacidität, fortlaufender Aciditätseintrag, Seedynamik, Chemismus) zu optimieren. Insbesondere kann die Verwendung von stark kontaminiertem Seewasser für die Dosierung des Neutralisationsmittels in den Lösungsstrom zur Eintragsstelle in den See aufgrund von Fällungsreaktionen kritisch sein.

Für höhere Aciditätswerte von mehreren 10^4 kmol bis zu einigen 10^5 kmol ist eine Kombination der oben beschriebenen Grundeinheiten (ggf. mit erhöhter Kapazität) und/oder der Einsatz der Anlagen über mehrere Jahre (siehe Beispiel im Abschnitt 4.2) in den jeweils frostfreien Perioden zweckmäßig. Falls verfügbar, ist die

Zugabe von Neutralisationsmittel in den Wasserstrom der Fremdwasserflutung anzustreben, da damit eine hohe Verdünnung und folglich eine hohe Effizienz der Dosierung erreicht wird.

Die aktive Behandlung von Seewasserkörpern durch chemische Neutralisation in den beiden beschriebenen Stufen ist grundsätzlich keine neuartige Technologie, die Anpassung an die jeweiligen Standortbedingungen stellt allerdings eine Herausforderung dar. Insbesondere ergeben sich aus der wechselseitigen Optimierung von modellgestützter Konzeption und angepasster Verfahrenskombination Möglichkeiten, die die ökonomisch und ökologisch günstigste Sanierung gewährleisten.

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Sanierung ist das begleitende Monitoring, dessen Auswertung unter fortlaufender Anwendung des dynamischen Seemodells (Abschnitt 4.2) eine Voraussetzung für die Steuerung des Sanierungsverlaufs und dessen weitere Optimierung ist. Das Monitoring betrifft die Prozessführung der Neutralisation, die Erfassung der Wasserqualität im Seewasserkörper (Verteilung über die Seefläche sowie Tiefenprofilmessungen) sowie die Überwachung der wesentlichen Zulauf- und Ablaufströme (wesentlich für Mengenbilanzen und Schadstofffrachten bei der Modellanwendung).

Gegenwärtig werden mehrere Planungsverfahren bei der LMBV zur aktiven Sanierung von Tagebaurestseen und Restseeclustern bearbeitet, so dass die Durchführung unter den beschriebenen optimierten Bedingungen zeitnah erfolgen kann.

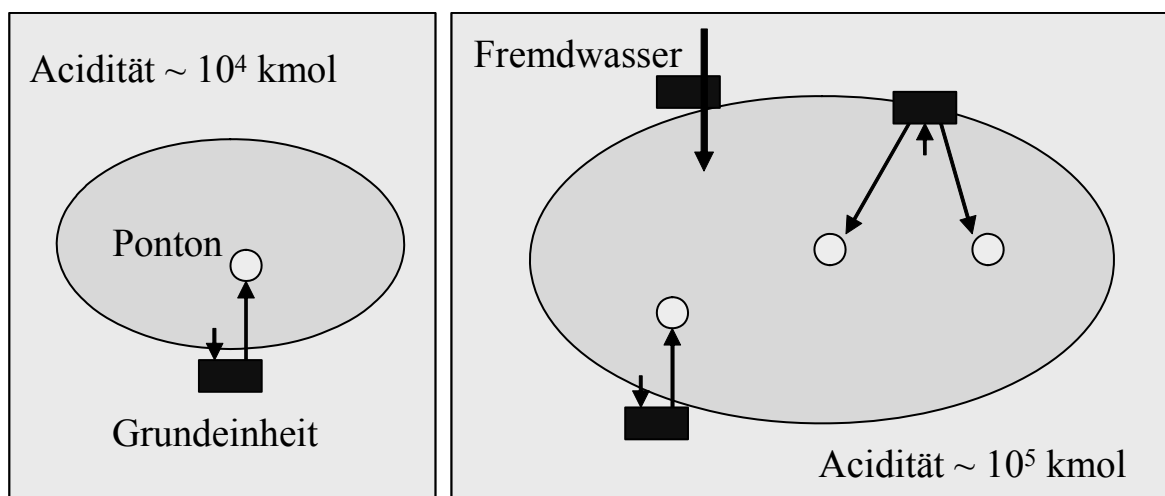


Abb. 5: Schematische Darstellung zur In-lake-Sanierung mit einer quasimobilen Grundeinheit im Falle kleiner Gesamtacidität (links) sowie zur Kombination von Grundeinheiten – optional mit mehreren Dosierstellen pro Grundeinheit sowie der Konditionierung des Fremdwasserzulaufs falls verfügbar (rechts)

Auf Maßnahmen der biologischen Aktivierung (optionale 3. Stufe der Seesanie rung) wird im vorliegenden Beitrag nicht eingegangen. Die geeigneten (effizienten) Maßnahmen sind in starkem Maße von den Standortbedingungen nach chemischer Sanierung abhängig und jeweils spezifisch zu wählen.

5 Zusammenfassung

Wie an Hand von drei Anwendungsfällen gezeigt, vollzieht sich eine fortlaufende Entwicklung im Bereich der Technologien zur aktiven Wasserbehandlung, die – in Anlehnung an die eingangs zitierte Definition – auf die Optimierung des Energie- und Reagenzieneintrags zur maximalen Ausnutzung der (bekannten) elementaren physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse und zur Minimierung der (die Effektivität beschränkenden) Nebenwirkungen ausgerichtet sind.

In all den diskutierten Anwendungen kamen bzw. kommen Modelltools zur Anwendung (wie am dritten Beispiel der Sanierung von Tagebaurestseen beschrieben, siehe Abschnitt 4.2), um die in der Regel komplexen Prozesse des Sanierungsablaufs zu systematisieren, zu quantifizieren und durch Varianten-/Szenarienvergleich eine Optimierung im Zuge der Sanierungskonzeption und Sanierungsdurchführung zu erreichen.

(i) HDS-Technologie:

Die fortgeschrittene Variante der HDS-Technologie mit gestaffelter Neutralisation, wie sie in den beiden Anlagen der WISMUT in Königstein und Ronneburg zur Anwendung kam, führt zu signifikanten Verbesserungen gegenüber der herkömmlichen HDS-Technologie hinsichtlich der Effizienz der Wasserbehandlung (Schadstoffabtrennung), des reduzierten Verbrauchs an Neutralisationsmittel (Kalk), der Feststoffzusammensetzung und –konsistenz (geomechanisch stabil, elutionsstabil), der höheren Schlammichte und verbesserten Entwässerbarkeit des Schlammes. Grundlage hierfür ist die Kopplung der Vorteile eines Schlammkontaktverfahrens (HDS) mit der hinsichtlich Übersättigung der Suspension (bezüglich der relevanten Feststoffphasen, besonders der des Eisens) kontrollierten (weil gestaffelten) pH-Wertanhebung.

(ii) Elektrochemische Grundwassersanierung:

Die weit reichenden Möglichkeiten der aktiven elektrochemischen Behandlung werden bisher recht selten ausgenutzt. Hierfür gibt es zahlreiche

Ursachen: neben den Investitions- und Betriebskosten spielen Materialprobleme eine Rolle. Im Falle der beschriebenen Anwendung im ISL-Bergwerk Beverley ist vorgesehen, die Anlage zur elektrochemischen Oxidation der Laugungslösung synergetisch gleichzeitig zur Herstellung von Katholyt zur Behandlung des Grundwassers in den außer Betrieb genommenen Laugungsfeldern einzusetzen. Neben der Neutralisation bewirkt Katholyt vor allem die Absenkung des Redox-Potenzials und damit Immobilisierung der im Zuge der aktiven Laugung in Lösung gegangenen Metalle, damit also die Schaffung von Bedingungen, die denen vor Laugung nahe kommen.

(iii) Tagebaurestseesanie rung:

Die Verbesserung der Wasserqualität in Tagebaurestseen ist eine Schlüsselaufgabe für die weitere Nutzung der Seen und erforderlich, um die Bedingungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie einzuhalten. Eine zuverlässige Methodologie für optimierte Sanierungskonzepte ist verfügbar. Sie beinhaltet:

- Modellgestützte Simulation des Wasserhaushalts im See in hydrogeologischer und geochemischer Hinsicht unter Berücksichtigung der möglichen Sanierungsszenarien als Voraussetzung für die Optimierung der Ausführung und zur Minimierung der Kosten
- Technologische Ausführungsoptionen, die in kombinierter und/oder angepasster Form eine maximale Effizienz garantieren (zusammen mit professionellem Engineering für beste technische Realisierung)
- Prinzipien der umfassenden Bewertung und Kosten-Nutzen-Analyse mit Berücksichtigung der relevanten ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte

Bisher realisiert LMBV eine regionale Flutungskontrolle hinsichtlich *Wasserbilanzen und Medienströme* (einschließlich der Fremdwasserflutung) erfolgreich. Dieses System lässt sich hinsichtlich der Steuerung der *Wassergüte* unter ausgewählter Anwendung von Sanierungsmassnahmen auf stark versauerte Tagebaurestseen in optimaler Weise ausbauen.

6 Literatur

- DEMOPOULOS, G.P., ZINCK, J.M., KONDOS, P.D. (1995): Proc. Int. Symp. on Waste Processing and Recycling in Mineral and Metallurgical Industries II. Vancouver, British Columbia, August 20-24, 1995, Ed. ROA, S.R. *et al.*
- HEINZE, G., MÄRTEN, H., SCHREYER, J., SEELIGER, D., SOMMER, K., VOGEL, D. (2002): Proc. Int. Conf. on Uranium Mining and Hydrogeology III, Freiberg, Germany, published in "Uranium in the Aquatic Environment" (Ed. by B.J. Merkel *et al.*), Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- KALKA, H., MÄRTEN, H. (2005): Proc. 10. Dresdner Grundwasserforschungstage, DGFZ e.V.
- MÄRTEN, H., HEINZE, G., KALKA, H., KÜPPERS, K., SOMMER, K. (2005): Int. Bergbau und Umwelt Sanierungs-Congress, September 2005, Berlin, Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV)
- MÄRTEN, H. (2005): Proc. Int. Conf. on Uranium Mining and Hydrogeology IV, Freiberg, Germany sowie www.heathgateresources.com.au
- PARKHURST, D.L., APPELO, C.A.J. (1999): PhreeqC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S.G.S. Report 99-4259, Denver, Colorado
- YOUNGER, P.L., BANWART, S.A., HEDIN, R.S. (2002): Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. The Netherlands: Kluwer Academic Press.