

# **FORSCHEN FÜR DIE UMWELT / 4. AUSGABE**

## **BAKTERIEN SANIEREN SAURE SEEN**

Katrin Wendt-Potthoff und Matthias Koschorreck

# BAKTERIEN SANIEREN SAURE SEEN

Katrin Wendt-Potthoff und Matthias Koschorreck

Geflutete Tagebaue – eine Naherholungslandschaft? In Deutschland gibt es mehr als 200 Bergbauseen. Durch die Schließung vieler Braunkohletagebaue befindet sich der Großteil davon in den neuen Bundesländern; besonders in Mitteldeutschland und der Lausitz bestimmen sie das Bild der Landschaft. Die vollgelaufenen Seen sollten eigentlich ein Paradies für Wassersportler und Angler werden. Leider ist das, was momentan in den Baggerlöchern steht, eher verdünnte Säure als Wasser eines Badesees. Jahrmillionen haben hier Eisen- und Schwefelminerale zusammen mit der Braunkohle in der Erde geruht. Vom Bagger an die Luft geholt, bilden sie bei der Berührung mit Wasser Säure, die fast jedes Leben unmöglich macht. Das Wasser vieler dieser Seen ist mit pH-Werten um 2,5 bis 3,5 extrem sauer und enthält große Mengen an Eisen und – bedingt durch die Schwefelhaltigkeit der Braunkohle – Sulfat. Summiert ergeben diese schwefelsauren Wässer zirka drei Kubikkilometer, was in etwa der Wassermenge des Starnberger Sees entspricht. In Deutschland stellen sie derzeit eines der schwerwiegendsten aktuellen Umweltprobleme dar.

## *Autoren:*

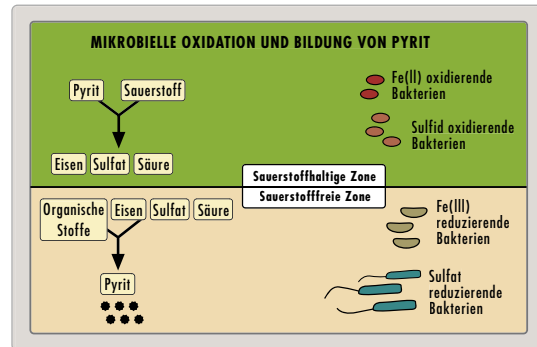
*Katrin Wendt-Potthoff, Dr. rer. nat., und  
Matthias Koschorreck, Dr. rer. nat.,  
sind Mitarbeiter der Sektion  
Gewässerforschung am UFZ  
in Magdeburg.*



Viele der Seen, insbesondere in der Lausitz, sind schon seit Jahrzehnten sauer und bieten keinen Lebensraum für Fische oder andere höhere Organismen (Bild 1). Nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand ist es bisher gelungen, solche sauren Bergbau-seen zu sanieren und so für Fischerei und Freizeitgestaltung nutzbar zu machen. Das Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle hat sich in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen in einem langfristigen Projekt das Ziel gesteckt, eine Neutralisierung mit möglichst einfachen und kostengünstigen Verfahren zu erreichen. Die Wissenschaftler wollen ihr Ziel durch die Anregung natürlicher Säure verbrauchender Prozesse im See selbst erreichen, indem sie den Säure zehrenden Mikroorganismen organische Substrate als Nahrung zur Verfügung stellen. Solche »sanften« Verfahren haben gegenüber der chemischen Entsäuerung, wie beispielsweise mit Soda, den Vorteil, dass sie nachhaltig sind. Das heißt, auch die weiterhin aus der Umgebung in den See sickende Säure kann »abgefangen« werden.

### Wie kommt die Säure in den See?

Für die Versauerung verantwortlich ist das Schwefeleisen Pyrit oder Markasit aus dem Kippenmaterial. Der Pyrit oxidiert beim Zusammentreffen mit dem Luftsauerstoff im Abraummateriale und bildet Schwefelsäure und Eisen(II) (Bild 2). Mit dem Ansteigen des Grundwassers nach Stilllegung des Tagebaus werden



*Bild 2: Prinzip des Kreislaufs Versauerung – Pyritbildung an einer oxisch-anoxischen Grenzfläche. Um den Kreislauf in Richtung Pyrit zu beeinflussen, also biologisch durch Eisen- und Säurereduktion zu entsäuern, ist geeignete organische Substanz notwendig, die im See wegen geringer Besiedlung und schwacher Primärproduktion nicht ausreichend gebildet wird.*

diese Stoffe in den See gespült. Das gelöste Eisen reagiert mit den Wassermolekülen im Tagebausee zu Eisenhydroxid, welches im Sediment ausfällt. Die dabei frei werdenden Protonen setzen den Versauerungsprozess weiter fort. Eisen und Sulfid oxidierende Bakterien in den Kippen und im See beschleunigen diesen Prozess um Millionenfache. Um eine Neutralisierung des Wassers zu erreichen, muss deshalb auch das Eisen aus dem Wasser entfernt werden. Je nach den hydrogeologischen Verhältnissen strömt noch über Jahrzehnte stark saures Grundwasser in den See.



*Bild 1: Tagebausee in der Lausitz – Das Restloch 111 (Quelle: Dr. Matthias Koschorreck, UFZ)*



*Bild 3: Bei Flaschenversuchen im Labor zur Neutralisierung des sauren Wassers und Sedimentes erwies sich eine Mischung aus Stroh und Carbokalk, einem Abfallprodukt aus der Zuckerindustrie, als die am besten geeignete. Der Carbokalk enthält alle Nicht-Zuckerstoffe der Rüben, die im Laufe der Zuckergewinnung durch Kalkfällung abgetrennt werden. Die damit versorgten Bakterien neutralisierten das Wasser in den Versuchsgefäßen vollständig. (Quelle: Dr. René Frömmichen, UFZ)*

### *Prinzip der biologischen Neutralisierung*

Das Ziel der Gewässerforscher war es nun, genau diese Versauerungsvorgänge wieder umzukehren. Dazu nutzten sie in den Sedimenten der Seen vorhandene Eisen und Sulfat reduzierende Bakterien (Bild 2). Diese »atmen« in Abwesenheit von Sauerstoff mit Eisen oder Sulfat und reduzieren dabei Sulfat und Eisenoxide. Solche Prozesse finden zum Beispiel regelmäßig im natürlichen

Meeresboden statt. Die Sulfatreduzierer nehmen Sulfat und Protonen auf und scheiden Schwefelwasserstoff aus. Die Eisenreduzierer verwandeln  $Fe^{3+}$  zu  $Fe^{2+}$ . Das freie Eisen reagiert mit dem von den Sulfatreduzierern ausgeschiedenen Schwefelwasserstoff zu Eisensulfid ( $FeS$ ) und schließlich zu Pyrit ( $FeS_2$ ). Durch die Ausfällung von Pyrit im Sediment werden dem Wasser Sulfat, Eisen und Säure entzogen. So kann es schrittweise wieder den neutralen Zustand erreichen. Leider sind die Bakterien bei den extrem niedrigen pH-



*Bild 4a, b und c: Installation der kleinen Enclosures im See (Quelle: Sektion Gewässerforschung, UFZ)*



*Bild 4b*



Bild 4c

Werten der Seen gehemmt. Für Stoffwechsel und Vermehrung brauchen sie außerdem organische Substanz, die in den sauren Tageauseen wegen des geringen Algenwachstums Mangelware ist. Hier setzt die Strategie zur biologischen Neutralisierung an: Im Labor wurden das saure Sediment und Seewasser des Restsees 111 – ein Tageausee in der Lausitz – mit verschiedenen Kohlenstoffquellen versetzt und pH-Wert, Eisen- und Schwefelverbindungen gemessen. Als am besten geeignet erwies sich eine Mischung aus Stroh und Carbokalk, einem Abfallprodukt aus der Zuckerindustrie. Der Carbokalk enthält alle Nicht-Zuckerstoffe der Rüben, die im Laufe der Zuckergewinnung durch Kalkfällung abgetrennt werden. Die damit versorgten Bakterien neutralisierten das Wasser in den Versuchsgefäßen vollständig (Bild 3).

### Vom Laborversuch zur Seensanierung

Nach den Laborversuchen wurden diese Substanzen im Freiland, im Restsee 111 bei Lauchhammer, getestet. Dieser mittelgroße (10,5 Hektar) See wurde als Modellobjekt gewählt, weil er keine oberirdischen Zu- und Abflüsse besitzt. Die Experimente finden in so genannten Enclosures statt. Das sind große Röhren aus Folie,

die mit einem Ende fest im Seeboden verankert sind und einen definierten Teil des Wassers vom restlichen See abtrennen. Die ersten Enclosures waren mit einer Grundfläche von zwei mal zwei Metern relativ klein, so dass ihr Sediment nur selten beprobt werden konnte, ohne den Versuch zu zerstören (Bild 4a, b, c). Es zeigte sich, dass auch im Freiland hohe Eisen- und Sulfatreduktionsraten erreicht wurden und – von der Sedimentoberfläche ausgehend – eine nach oben und unten fortschreitende Neutralisierung stattfand.



Bild 5b

Um die mikrobiellen und geochemischen Reaktionen besser untersuchen und steuern zu können, wurden vom GKSS Forschungszentrum Geesthacht und der Firma Umweltschutz und Flachdachabdichtung GmbH Fehrbellin zwei große (30 Meter Durchmesser, 5000 Kubikmeter Inhalt) Enclosures gebaut, die nun ein Prozent des gesamten Seevolumens fassen (Bild 5a, b). Dass auch unter Wasser alles richtig installiert und dicht ist, überwachen Forschungstaucher.

Beim Ausbringen der Substrate mussten die Wissenschaftler auch körperlich kräftig zupacken: Sechs Tonnen Stroh und 4,2 Tonnen Carbokalk wurden in ein Enclosure eingebracht.



Bild 5a und b: Die beiden großen Enclosures (30 Meter Durchmesser, 5000 Kubikmeter Inhalt) – vom GKSS Forschungszentrum Geesthacht und der Firma Umweltschutz und Flachdachabdichtung GmbH Fehrbellin gebaut – fassen ein Prozent des gesamten Seevolumens. (Quelle: Dr. Matthias Koschorreck, UFZ)





*Bild 6a, b und c: Beim Ausbringen der Substrate mussten die Wissenschaftler auch körperlich kräftig zupacken: Sechs Tonnen Stroh und 4,2 Tonnen Carbokalk wurden in ein Enclosure eingebracht. (Quelle: Michael Beyer, UFZ)*





Bild 6c: (Quelle: Michael Beyer, UFZ)

Während der Carbokalk einfach ausgestreut wurde und schnell zu Boden sank, mussten die Strohballen zunächst auf die Oberfläche der Enclosures gebracht und mit Eisenplatten beschwert werden. Nach einer Woche waren sie so vollgesaugt, dass sie auf den Grund absanken (Bild 6a, b und c).

### Bisherige Ergebnisse

Die Gewässerforscher vom UFZ überwachen den Großversuch regelmäßig. Dazu werden dem See und den Enclosures Sedimentkerne entnommen, um die chemische Beschaffenheit, die Eisen- und Sulfatreduktionsraten und die Zahlen der beteiligten Bakterien zu bestimmen (Bild 7). Während die Eisenreduktion schon eine Woche nach Substratzugabe messbar ist, läuft die Sulfatreduktion langsamer an und erreicht zunächst auch nicht so hohe Raten. Dadurch kann es passieren, dass gelöstes  $\text{Fe}^{2+}$  in die Wassersäule diffundiert und dort mit Sauerstoff zurückoxidiert wird, wodurch ein Teil der gebildeten Alkalinität wieder verloren geht. Für die Effizienz des Verfahrens ist es wichtig, diese Rückoxidation zu begrenzen und speziell die Sulfatreduktion zu fördern. Die fortschreitende Neutralisierung ist gut erkennbar: Das Sediment am Grund der behandelten Enclosures ist tief schwarz von den neu gebildeten Eisensulfiden und hat pH-Werte über 6.



Bild 7: Zur Überwachung der Versuche entnehmen die Gewässerforscher dem See und den Enclosures regelmäßig Sedimentkerne, um die chemische Beschaffenheit, die Eisen- und Sulfatreduktionsraten und die Zahlen der beteiligten Bakterien zu bestimmen. (Quelle: Colin Brookland)



**Bild 8:** Die fortschreitende Neutralisierung ist gut erkennbar: Das Sediment am Grund der behandelten Enclosures ist tief schwarz und der pH-Wert über sechs, im Vergleich dazu ist das unbehandelte Sediment aus den Tiefen des Sees rostbraun und mit pH-Werten unter drei so sauer wie das Seewasser. (Quelle: Dr. Matthias Koschorreck, UFZ)

Im Vergleich dazu ist das unbehandelte Sediment aus den Tiefen des Sees rostbraun und mit pH-Werten unter drei so sauer wie das Seewasser (Bild 8).

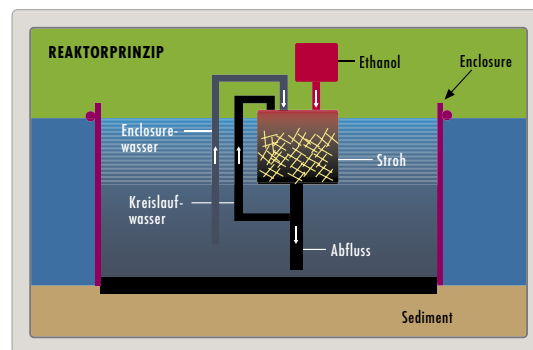
Die zahlreichen Versuche haben Aufschluss darüber ergeben, wie die Substrate Carbokalk und Stroh wirken: Carbokalk dient nicht nur als Nährstoffquelle, sondern sorgt mit seinem Carbonatanteil auch dafür, dass der pH-Wert örtlich angehoben und die Aktivität der Sulfat reduzierenden Bakterien erleichtert wird. Das Carbonat bewirkt auch, dass  $\text{Fe}^{2+}$  im Sediment gebunden und so seine Rückoxidation verhindert wird. Das Stroh ist eine langfristige Kohlenstoff- und Nährstoffquelle und verursacht Algenwachstum in der Wassersäule. Die so gebildete Biomasse sedimentiert und dient den Bakterien im Sediment als leicht verfügbare Kohlenstoffquelle. Außerdem behindert das Stroh die Durchmischung des Wassers über dem Sediment und sorgt so dafür, dass die Sedimentoberfläche sauerstofffrei bleibt.

Aus den Daten zur chemischen Beschaffenheit von Wasser und Sediment und den mikrobiellen Umsatzraten kann mithilfe

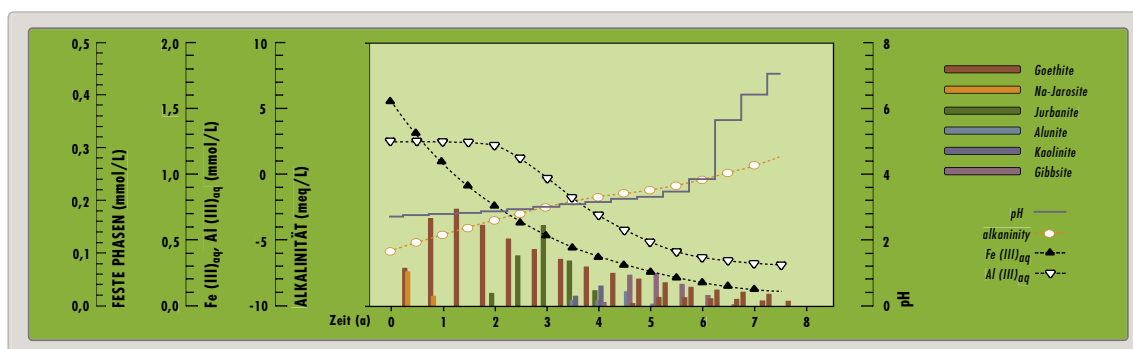
einer geochemischen Computermodellierung der Neutralisierungsverlauf prognostiziert werden (Bild 9). Dabei fällt auf, dass der pH-Wert des Seewassers über mehrere Jahre kaum messbar steigt, um dann nach etwa acht Jahren den Neutralpunkt zu erreichen. Dieser Verlauf wird verständlich, wenn man bedenkt, dass der pH-Wert eine logarithmische Größe ist. Auf Basis der bisher verfügbaren Daten gehen die Wissenschaftler von einer Sanierungsdauer von acht Jahren für den gesamten See aus. Diese Prognose ständig zu überprüfen und zu verfeinern ist eine wichtige Aufgabe des Projektes.

### *Geht es vielleicht noch etwas schneller?*

Die Geschwindigkeit des biologischen Sanierungsverfahrens ist dadurch begrenzt, dass die Sulfatreduktion auf einen im Vergleich zur gesamten Wassersäule kleinen Teil des Sedimentes beschränkt ist. Um diese aktive Zone zu vergrößern, wurden in das zweite En-



**Bild 10:** In das zweite Enclosure wurden Reaktoren eingebaut, in denen das saure Wasser unter kontinuierlicher Zuführung von Nährlösung durch Strohbällen gepumpt wird, die als Reaktionskörper dienen. Die ganze Anlage wird über Solarzellen und eine Windkraftanlage – unabhängig von äußerer Energiezufuhr – betrieben. (Quelle: Ulrike Müller)



**Bild 9:** Aus den Daten zur chemischen Beschaffenheit von Wasser und Sediment und den mikrobiellen Umsatzraten kann mithilfe einer geochemischen Computermodellierung der Neutralisierungsverlauf prognostiziert werden. Dabei fällt auf, dass der pH-Wert des Seewassers über mehrere Jahre kaum messbar steigt, um dann nach etwa acht Jahren den Neutralpunkt zu erreichen. (Quelle: Dr. René Frömmichen, UFZ)





closure Reaktoren eingebaut, in denen das saure Wasser unter kontinuierlicher Zuführung von Nährlösung durch Strohhallen gepumpt wird, die als Reaktionskörper dienen (Bild 10). Die ganze Anlage wird über Solarzellen und eine Windkraftanlage – unabhängig von äußerer Energiezufuhr – betrieben. Auch in den Reaktoren finden hohe Eisen- und Sulfatreduktionsraten statt. Eine weitere Möglichkeit, die Sanierung zu beschleunigen, können unterstützende Maßnahmen im Kippenbereich sein, die den Säurezustrom in den See vermindern.

### *Ausblick*

Die Enclosures sind die Vorstufe vor dem großen Ziel der Gewässerforscher: Die Sanierung eines kompletten Sees nach diesem Verfahren. Läuft alles nach Plan, soll in den nächsten Jahren in Zusammenarbeit mit der Lausitzer- und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) und den Forstbehörden der gesamte Restsee 111 saniert werden. Ist ein See einmal neutral, wachsen auch die für normale Seen typischen Algen, die ihn nachhaltig in diesem Zustand erhalten, wenn der Säurezustrom durch das Grundwasser nicht zu groß ist. Damit wäre auch ein anderes Problem gelöst: Einige saure Seen in der Lausitz haben Abflüsse in die nahe gelegene schwarze Elster und die Spree. Mit der Sanierung der Seen wäre dann auch die Wasserqualität dieser Flüsse – zumindest hinsichtlich dieser Problematik – nicht mehr gefährdet. Darüber hinaus ist die Versauerung von Tagebauseen nicht nur ein deutsches Problem: Auch die USA, Kanada und die ehemaligen Ostblockstaaten haben damit zu kämpfen. Ob das biologische Sanierungsverfahren Erfolg versprechend ist, hängt von den hydrogeologischen Verhältnissen des einzelnen Gewässers ab und muss jeweils durch Voruntersuchungen geklärt werden. Da der Restsee 111 mit seinem stark versauerten Wasser und dem ständigen Säurenachstrom aus den Kippen bereits ein schwieriger Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Verfahren weithin übertragbar ist, wenn es gelingt, den Restsee 111 zu sanieren.



*Bild 11a,b und c: Ein weiterer saurer See in der Lausitz – Restsee 107 (Quelle: André Künzelmann)*