

# Neutralisationspotential von Flugaschen – Restseesanierung Burghammer

Mandy Schipek<sup>1</sup>, Bastian Graupner<sup>2</sup>, Broder Merkel<sup>1</sup>, Christian Wolkersdorfer<sup>1</sup>, Florian Werner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09596 Freiberg/Sachsen, mandy.schipek@geo.tu-freiberg.de

<sup>2</sup>Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Meraner Straße 12, 01217 Dresden

Die Grundidee des Projektes CDEAL (Carbon dioxide elimination by using acid mine lakes and calcium oxide suspensions) ist es, die Kohlendioxidemission in die Atmosphäre durch die Speicherung im Untergrund zu verringern und gleichzeitig die Wasserqualität in den vom Braunkohlenbergbau schwerwiegend beeinflussten Gebieten zu erhöhen. Die Speicherung des Kohlenstoffdioxids (CO<sub>2</sub>) erfolgt in Form von Carbonat im Sediment der Restseen und ist somit nachhaltig. Durch das Projekt CDEAL soll gezeigt werden, dass Abfallprodukte (CaO aus Braunkohlekraftwerksaschen) sowie das Treibhausgas (CO<sub>2</sub>) genutzt werden können, um die Wasserqualität von Tagebaurestseen zu verbessern und somit zur Aufwertung ehemaliger Braunkohlenbergbaulandschaft beitragen. Der Tagebaurestsee Burghammer (Lausitz) ist prädestiniert für die Untersuchungen, da in ihm von 1973 bis 1997 die Einspülung von Kraftwerksaschen aus dem Kraftwerk „Schwarze Pumpe“ erfolgte. Der augenblickliche Stand der Untersuchungen soll dargestellt werden und zeigen, inwieweit diese Methode zur Sanierung von Tagebaurestseen geeignet ist.

The aim of this project is to reduce the emission of carbon dioxide into the atmosphere by underwater storage, accompanied by improving the water quality in areas seriously affected by lignite mining. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is precipitated sustainably as calcite (CaCO<sub>3</sub>) in the sediments of the open cast lignite lakes. The project CDEAL (Carbon dioxide elimination by using acid mine lakes and calcium oxide suspensions) is designed to show that by-products (CaO from fly ashes) as well as greenhouse gases (CO<sub>2</sub>) can be used to improve the water quality of open cast lakes and thus contributing to an environmental protection of areas affected by lignite mining operations. The lake Burghammer (Lusatia) is an ideal investigation case as it received fly ashes from the power plant „Schwarze Pumpe“ from 1973 to 1997. The current state of the investigations is presented and shows to what degree this method can be used to remediate open cast lignite lakes.

## 1 Das Lausitzer Bergbaurevier

Im Lausitzer Bergbaurevier hat der intensive Bergbau im zurückliegenden Jahrhundert riesige Mengen von Flugaschen, Carbonat- und Eisen-schlämmen (aus der Behandlung des sauren Grubenwassers) produziert, die sich nun in den verlassenen und gefluteten Tagebauen befinden. Einer dieser früheren Tagebaue ist der saure Restsee Burghammer, der in seinem Seesediment große Mengen dieser eingebrachten Reststoffe enthält.

Der Tagebaurestsee Burghammer befindet sich 5 km östlich der Stadt Hoyerswerda, in Sachsen. Ab 1957 wurde das Gebiet entwässert und der Abbau im 8,6 km<sup>2</sup> großen Braunkohletagebau begann im Jahr 1959. 1963 wurde die erste Braunkohle abgebaut und 10 Jahre später der Tagebau geschlossen, da die Lagerstätte voll-

ständig abgebaut war. Ab Schließung des Tagebaus bis 1997 erfolgte die Einspülung von Kraftwerksaschen aus dem Kraftwerk „Schwarze Pumpe“. Rekultivierungsmaßnahmen wurden seit 1996 ergriffen.

Der Tagebaurestsee Burghammer liegt im Einzugsgebiet der Spree. Ziel der Sanierung des ehemaligen Tagebaues ist, den Tagebaurestsee im Verbund mit Dreiweibern und Lohsa II als Speicherverbundsystem (Speicherverbund Lohsa) zu nutzen. Als letztes Speicherbecken innerhalb des Speicherverbundsystems erfolgt der Abfluss über den Restsee Burghammer in die Kleine Spree, die in die Spree mündet. Der See ist heute bei einem Wasserstand von 104 mNN zu 72% gefüllt. Im Endzustand soll der See über ein Wasservolumen von 36 Mio. m<sup>3</sup> verfügen.

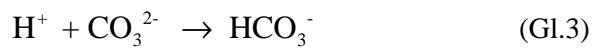
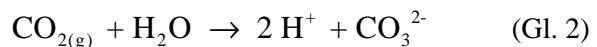
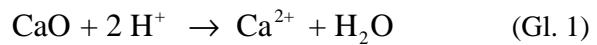
Aufgrund der geringen Pufferkapazität des Seewassers ist der pH-Wert von etwa 8 im Jahr 1997 auf etwa 2,9 (Stand April 2006) gefallen.

Für die Hauptinhaltstoffe wurde für das Epilimnion des Restsees Burghammer im Jahr 2006 folgende Werte gemessen: Na 2,4 mmol/L, K 0,2 mmol/L, Ca 8,5 mmol/L, Mg 2 mmol/L, C 0,15 mmol/L, S 13 mmol/L, Fe 0,4 mmol/L, Cl 2,3 mmol/L. Der pH betrug 2,9 und das Wasser des Sees wies eine Leitfähigkeit von 2400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf; die Acidität lag bei etwa 1 mmol/L. Der Restsee Burghammer ist sauerstoffgesättigt und weist ein entsprechend hohes Redoxpotential auf. Stickstoffverbindungen und Orthophosphat treten nur in sehr geringen Konzentrationen auf.

## 2 Alkalinitätserhöhung mittels $\text{CO}_2$ -Dosierung

Im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes CDEAL sollen saure Wässer aus Tagebaurestseen der Braunkohlengewinnung in Verbindung mit CaO-Suspensionen verwendet werden, um Kohlenstoffdioxid zu eliminieren. Abb. 2 stellt das Prinzip der stattfindenden Prozesse dar.

Ausgehend davon, dass die in die Tagebaurestseen verbrachten Kraftwerksachen bei der Flutung der Seen nur geringfügig mit den säurebildenden Edukten im See reagiert haben, kann der vorhandene bilanzmäßige CaO-Überschuss verwendet werden, um mit  $\text{CO}_2$  zu  $\text{CaCO}_3$  karbonatisiert zu werden. Die wesentlichen Reaktionsgleichungen für den Neutralisierungsprozess sind:



Die thermodynamische Begründung einer Calcitfällung ist gegeben, wenn das Aktivitätsprodukt von Calcium und Carbonat das temperaturabhängige Löslichkeitsprodukt LP erreicht. Aufgrund der starken pH-Wert-Abhängigkeit des Löslichkeitsproduktes von Calcit werden für die Calcitfällung neutrale bis alkalische Bedingungen benötigt. Bei einem sauren Wasser mit einer typischen hohen Calcium-Konzentration (3-10



Abb. 1: Luftbildaufnahme des Tagebaurestsees Burghammer (Foto: SCHOLZ 2005).

mmol/L) kommt es bei einer Basentitration zur Calcitsättigung wenn für  $\text{CO}_2$  ein Gleichgewicht mit der Atmosphäre zugelassen wird. Die Zugabe des  $\text{CO}_2$  soll über Injektionsleitungen im Bereich des Seebodens, d.h. im Sediment erfolgen. Dadurch wird eine längere Verweildauer und Reaktionszeit garantiert und es könnten somit höhere  $\text{CO}_2$ -Sequestrierungsraten angestrebt werden (MERKEL 2005). Das Fällungsprodukt Calcit wird im Sediment gespeichert. Diese Methode ist gegenüber anderen Methoden zur  $\text{CO}_2$ -Sequestrierung nachhaltig, da  $\text{CO}_2$  in Calcit überführt wird und nicht einfach zwischengespeichert wird. Ziel ist es dabei, die in den Flugaschen gebundenen Spurenmetalle mit auszufällen.

Zur Abschätzung der einzusetzenden Menge an  $\text{CO}_2$  wurde eine thermodynamische Modellierung mit dem Programm PhreeqC durchgeführt. Für alle Simulationen wurde der in PhreeqC verfügbare thermodynamische Datenbanksatz Minteq.v4 (2.2.2005) verwendet. Im ersten Schritt wurde im Wasser CaO (REACTION) und  $\text{CO}_2$  (EQUILIBRIUM\_PHASES) gelöst, wobei Calcitfällung zugelassen wurde.  $\text{CO}_2$  wurde mit einem Partialdruck von 2 bar angesetzt, basierend auf der Annahme, dass die Behandlung mit reinem  $\text{CO}_2$  in 10 m Wassertiefe stattfindet. Diese Annahme ergibt sich aus der durchschnittlich angestrebten Wassertiefe (8 m) des Tagebaurestsees Burghammer im Endzustand.

In einem zweiten Schritt wurde dieses Wasser mit dem derzeitigen atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Partialdruck von 378 Vppm ins Gleichgewicht gesetzt um ein Ausgasen des behandelten Wassers unter Atmosphärenbedingungen abzuschätzen.

Da spätere  $\text{CO}_2$ -Lieferanten ohne technische Anreicherungsverfahren lediglich  $\text{CO}_2$ -Gehalte von 10 bis 20 % liefern können, wurde ebenfalls eine Modellierung mit einem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck von 0,2 bar durchgeführt.

Wie schon in WERNER *et al.* (2006) und MERKEL (2005) beschrieben, hat der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck maßgeblich Einfluss auf den pH-Wert. Je geringer der verwendete  $\text{CO}_2$ -Partialdruck, desto weniger  $\text{CO}_2$  ent gast ungenutzt in die Atmosphäre nachdem das ganze System wieder ins Gleichgewicht mit dem atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Partialdruck gesetzt wird. Die Modellierung ergab eine 90-prozentige Effizienz des Verfahrens.

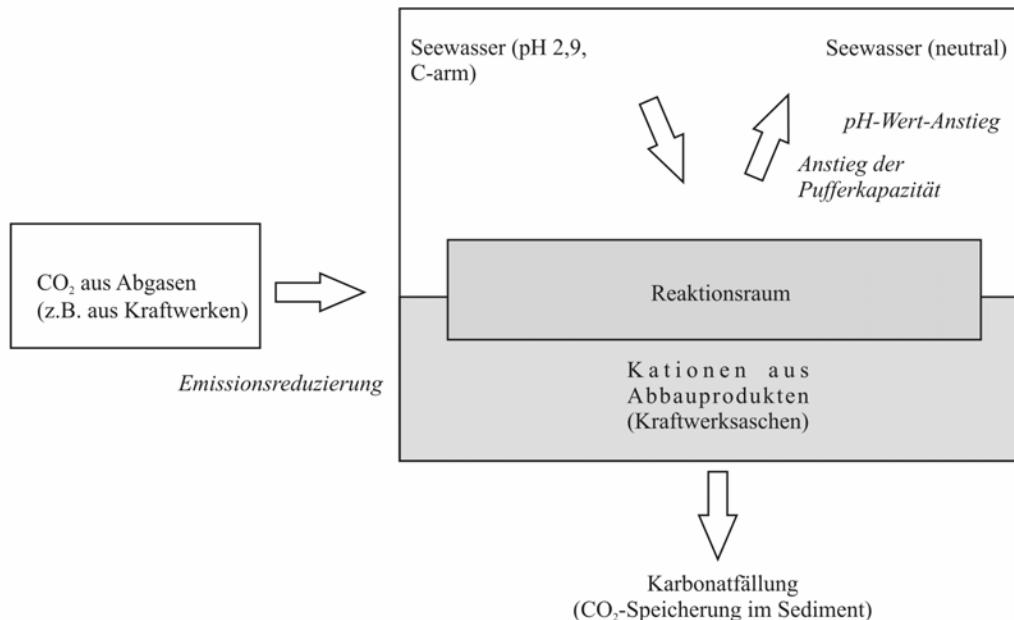


Abb. 2:  $\text{CO}_2$ -Speicherung durch Carbonatfällung.

**Tab. 1: Ergebnisse einer PhreeqC Modellierung mit einem CO<sub>2</sub>-Partialdruck von 2 bar (entspricht 100 % CO<sub>2</sub> in 10 m Wassertiefe).**

Schritt	CaO-Zugabe [mmol/L]	CO <sub>2</sub> -Partialdruck [bar]	CO <sub>2</sub> -Zugabe [mmol/L]	Calcite [mmol/L]	Ca <sub>gelöst</sub> [mmol/L]	C <sub>gelöst</sub> [mmol/L]	pH-Wert [-]
0	0	-	-	-	8,5	0,14	2,9
1	1000	2	1098	980,5	28	117,6	5,8
2	0	3,78· 10 <sup>-4</sup>	-99,1	17,6	10,3	0,7	7,8

**Tab. 2: Ergebnisse einer PhreeqC Modellierung mit einem CO<sub>2</sub>-Partialdruck von 0,4 bar (entspricht 20 % CO<sub>2</sub> in 10 m Wassertiefe).**

Schritt	CaO-Zugabe [mmol/L]	CO <sub>2</sub> -Partialdruck [bar]	CO <sub>2</sub> -Zugabe [mmol/L]	Calcite [mmol/L]	Ca <sub>gelöst</sub> [mmol/L]	C <sub>gelöst</sub> [mmol/L]	pH-Wert [-]
0	0	-	-	-	8,5	0,14	2,9
1	1000	0,4	1024	989,4	19,1	34,8	6,2
2	0	3,78· 10 <sup>-4</sup>	-25,4	8,73	10,4	0,8	7,8

### 3 Experimentelle Methodik

#### 3.1 Geochemische und mineralogische Untersuchungen

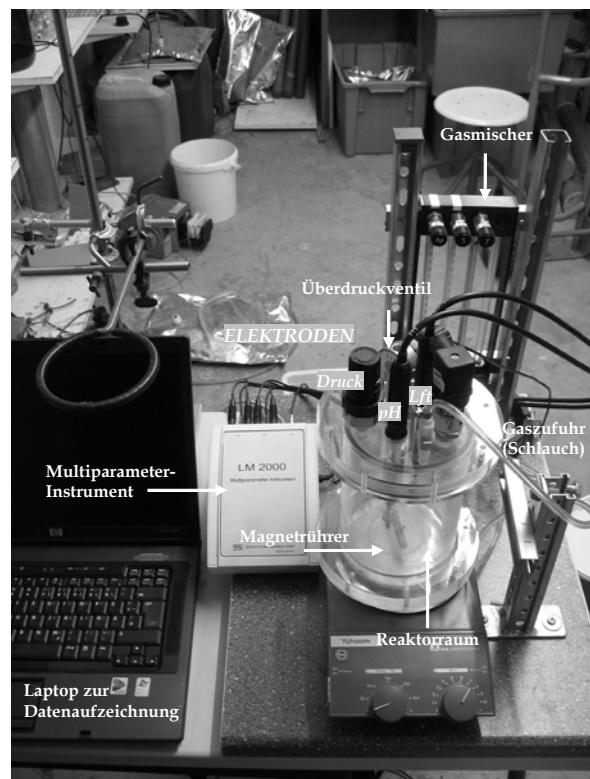
Im Rahmen von zwei Probenahmekampagnen konnte ausreichend Sediment aus dem Bereich des eingespülten Aschekörpers gewonnen werden. Das dabei gewonnene Probenmaterial wurde einerseits für geochemische und andererseits für mineralogische Untersuchungen genutzt. Das Probenmaterial wurde nach DIN 38 414, Teil 4 mit destilliertem Wasser eluiert. Das angefallene Eluat wurde angesäuert (HNO<sub>3</sub>) und mit der ICP-MS auf enthaltene Metalle und Metalloide untersucht. Um den für das Verfahren verfügbaren Anteil an CaO abschätzen zu können wurde eine sequentielle Extraktion nach ZEIN (1995) durchgeführt.

Darüber hinaus wurden mineralogische und phasenanalytische Untersuchungen an den Seesedimenten durchgeführt. In Anlehnung an die Empfehlungen vom Landesumweltamt Brandenburg (1996) fanden röntgendiffraktometrische sowie infrarotspektroskopische Untersuchungen statt.

#### 3.2 Experimentelle Methodik der Carbonatfällung an Aschen am DGFZ

Die Fällung von Carbonat durch Zugabe von CO<sub>2</sub> sollte zuerst detailliert in einer Batchversuchsanlage untersucht werden, bevor Versuche zur technischen Umsetzung erfolgen. Dafür wurde am DGFZ die in Abb. 3 dargestellte Anlage aufgebaut. Der Reaktorraum mit einem Volumen von  $1,284 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup> wurde aus Acryl hergestellt.

Die Bodenplatte ist mit dem Zylinder verklebt. Der Deckel ist abnehmbar und kann über 8 Schrauben fixiert werden, so dass auch Versuche bis 1 bar Überdruck möglich sind. Als Mehrparameter-Messsystem wird das LM 2000 von Meinsberg verwendet. Daran ist die pH-Einstabmesskette EGA 143 SMEK (geeignet für kontinuierliche Messungen) und Leitfähigkeits-Messzelle LTG 1/23 SMEK und jeweils 1 Temperaturfühler Pt 1000 angeschlossen. Zusätzlich wird das analoge Signal des Druckmessumformers DMP 331 (Absolutdruck) von Druck &

**Abb. 3: Batchversuchsanlage des DGFZ.**

**Tab. 3: Darstellung des angewandten sequentiellen Extraktionsverfahren und der damit erfassten Metall- / Metalloid-Bindungsformen (verändert nach Zeien 1995).**

<i>Fraktion</i>	<i>Bezeichnung und Bindungsform</i>	<i>Extraktionsmittel</i>
1.	S4-Elution	dest. H <sub>2</sub> O
2.	<u>Mobile Fraktion</u> Wasserlösliche und austauschbare (unspezifisch adsorbierte) Metall- / Metalloidanteile sowie leicht lösliche metallorganische Komplexe	1 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
3.	<u>Leicht nachlieferbare Fraktion</u> Spezifisch adsorbierte, oberflächennah okkludierte und an CaCO <sub>3</sub> gebundene Formen sowie metallorganische Komplexe geringerer Bindungsstärke	1 M NH <sub>4</sub> OAc (pH 6.0)
4.	<u>Residualfraktion</u>	HNO <sub>3</sub> + HCl (3 : 1)

Temperatur mit einer Genauigkeit von 0,25 % ausgewertet. Die Signale werden an einen Messcomputer weitergeleitet und kontinuierlich im 10-Sekunden-Takt aufgezeichnet.

Als Gas wird ein Gemisch aus N<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> verwendet. Der gewünschte Anteil von CO<sub>2</sub> kann über einen Gasmischer eingestellt werden. Die Genauigkeit der eingestellten Mischung liegt überwiegend zwischen  $\pm 3$  und 5 Vol-%. Besonders die höheren Abweichungen sind vermutlich durch die Gasprobenahme verursacht. Dies soll für die weitere Bearbeitung noch optimiert werden. Der Gaseintrag kann in die Gasphase oder mittels Schlauch in die wässrige Phase erfolgen. Zur Beschleunigung der Reaktionen wird ein Magnetrührer mit Heizplatte verwendet.

Neben der kontinuierlichen Aufzeichnung von Temperatur, pH, elektrischer Leitfähigkeit und Druck wurden während des Versuches mehrere Wasser- und Gasproben genommen. Das Gas wurde mittels Gaschromatographie auf CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> untersucht. Die Elementgehalte des Wassers wurden mit ICP-MS ermittelt. Zusätzlich erfolgte die Bestimmung von Sulfat über Ionenchromatographie und des gesamten anorganischen Kohlenstoffes (TIC) über das Austreiben mit Säure (TOC5000). Nach Beendigung des Versuches wurde die Feststoffprobe mit einem CSMAT auf TIC untersucht.

## 4 Stand der Untersuchungen

Das Verhalten von Metallen und Metalloiden in einer Sediment/Wassersuspension wird von zahlreichen Prozessen, so z.B. Sorption, Desorption, Ionenaustausch, Bindungs-, Redox- und Lösungsreaktionen bestimmt. Der tatsächlich in Wasser gelöste Anteil dieser Metalle und Metalloide wird durch eine Überlagerung der genannten Reaktionen bestimmt.

Abb. 4 stellt die bei der S4-Elution ermittelten Calcium-Gehalte der drei im Bereich der Ascheablagerungen abgeteuften Bohrungen dar. Bei den drei Bohrungen ist eine Schichtung der Sedimente zu erkennen. Die durchgeführte sequentielle Extraktion nach ZEIEN bestätigt diese Vermutung.

Abb. 5 zeigt die Calciumgehalte des Bohrkernes BGH-1412-P3. Ein Vergleich der Eluierbarkeit der Sedimente mit den in Tab. 3 aufgezeigten Extraktionsmitteln, ergab, dass die leicht nachlieferbare Fraktion (Fraktion 3) deutlich weniger Calcium-Gehalte lieferte als die mobile Fraktion (Fraktion 1). Die Residualfraktion lieferte Calcium-Gehalte von 1 – 8 %. PRASHANTH *et al.* (2001) berichtet von Calcium-Gehalten (als CaO) von 3 – 9 %. Untersuchungen von ZSCHIEDRICH *et al.* (2000) ergaben durchschnittlich 20 Masse-% CaO (LMBV).

Die quantitative Phasenzusammensetzung der Sedimente wurde röntgenographisch mit dem Rietveld-Verfahren ermittelt. Die Untersuchungen ergaben Calcitgehalte von 1 – 11 Masse-% und einen großen Anteil amorpher bzw. schlecht kristalliner Phasen (24 – 66 Masse-%). Quarz konnte mit stark variierenden Gehalten von 13 – 67 Masse-% nachgewiesen werden. Weiterhin wurden die Phasen Brownmillerit (2 – 5 Masse-%), Magnetit (3 – 5 Masse-%), Hämatit (1 – 2 Masse-%), Clinopyroxene (Spur – 3 Masse-%), sowie Kalifeldspat (Spur bis 2 Masse-%) berücksichtigt.

### 4.1 Experimentelle Methodik der Carbonatfällung an Aschen

Bisher wurden Versuche mit Braunkohlenfilteraschen durchgeführt. Dabei wurden 20 g Aschen und 1 Liter deionisiertes Wasser verwendet. Die Gasphase nimmt somit einen Raum von 284 ml ein. In der ersten Versuchssphase wurde die A-

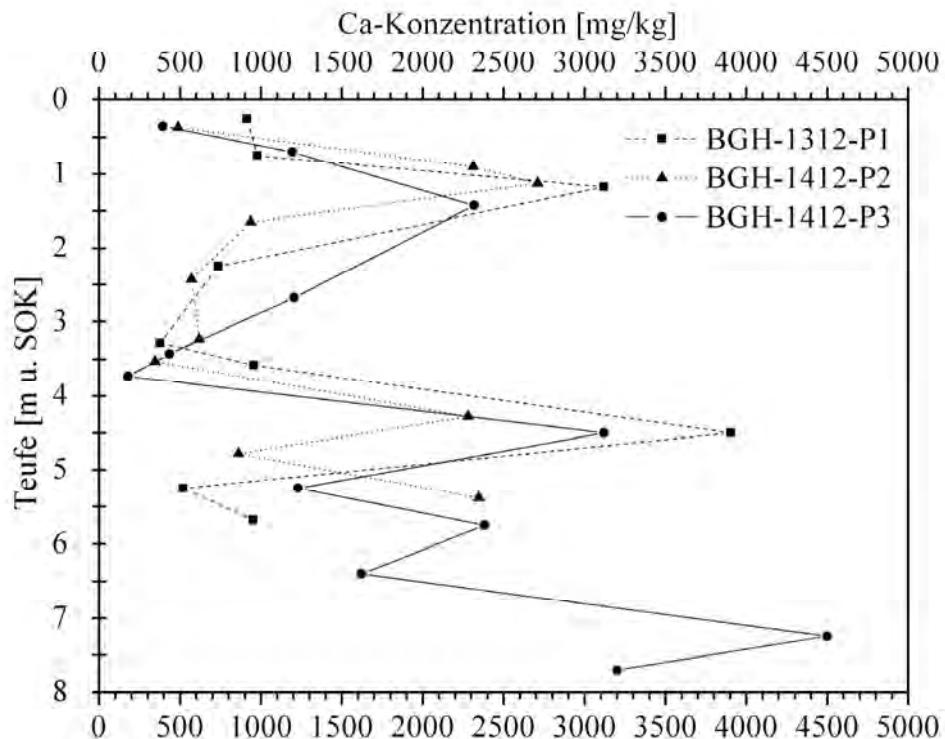
sche im Wasser gerührt, bis sich in etwa ein Gleichgewicht bezogen auf die elektrische Leitfähigkeit einstellte. Die Zusammensetzung und der Druck der Gasphase entspricht in Phase I (bis 94 Minuten nach Beginn des Versuches) atmosphärischen Bedingungen. Anschließend erfolgte die Gaszufuhr mit dem gewünschten CO<sub>2</sub>-Anteil (bis 101 Minuten nach Beginn). Beispielhaft sind die Messergebnisse in Abb. 6 dargestellt. Neben den kontinuierlich gemessenen Parametern sind die TIC-Gehalte des Feststoffes sowie die Calcium-Gehalte des Wassers aufgeführt.

Unmittelbar nach Beginn der Zufuhr des Gases (Phase II) kommt es zu einem rapiden Absinken der Leitfähigkeit. Der pH-Wert folgt langsamer und etwas später. Parallel dazu sinkt die Calciumkonzentration. Anschließend kommt es zur Nachlösung von Ionen aus dem Feststoff, weshalb die Leitfähigkeit, die Calciumkonzentration und auch der pH-Wert ansteigen. Bei der 2. Gaszufuhr (Phase IV: 201 bis 208 Minuten nach Beginn) überlagern sich vermutlich mehrere Prozesse. Neben der Ausfällung kommt es auf Grund des des pH-Wertes zur Freisetzung von Calcium aus der Asche. Der niedrige pH-Wert

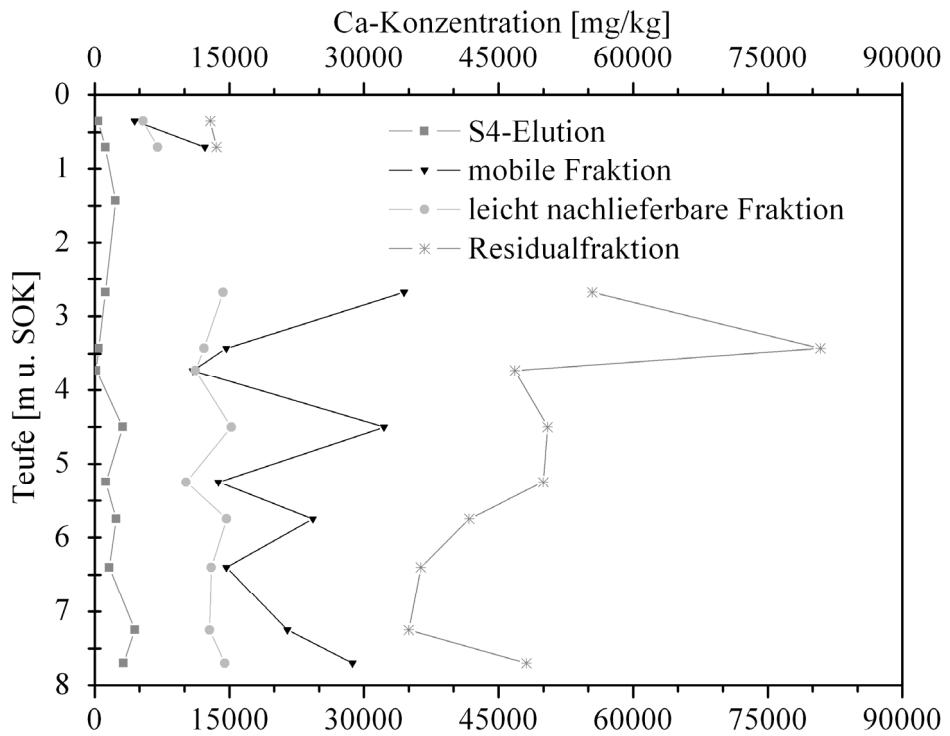
verhindert aber die weitere Bildung von Carbonaten.

Die aufgeführten TIC-Werte lassen den Schluss zu, dass Carbonate mit einem Masseanteil von 0,62 Masse-% gefällt wurden. Dabei zeigen verschiedene Experimente, dass etwa die Hälfte des TIC während des starken Abfalls der Leitfähigkeit (Phase II) entsteht. PhreeqC-Rechnungen zeigen in diesem Zeitraum auf eine Übersättigung bezüglich Calcit hin. Die Reaktionsrate ist in diesem Bereich sehr schnell und damit nicht limitierend. Nach Beendigung der Gaszufuhr fällt Carbonat vermutlich weiterhin aber mit deutlich geringeren Raten aus.

Die Gaszufuhr erfolgte in die Gasphase. Damit wird der Transport von CO<sub>2</sub> bis zum Ort der Reaktion durch Diffusion in der Gasphase, Übergang von der Gas- in die Wasserphase sowie durch die Verteilung in der wässrigen Phase beeinflusst. Die geringe Wasseroberfläche von  $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  im Vergleich zum Wasservolumen von rund  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  schränkt den Übergang zusätzlich ein. Trotz dieser hemmenden Faktoren für die CO<sub>2</sub>-Nachlieferung erfolgte in den Versuchen die Carbonatfällung unmittelbar auf den Gaseintrag.



**Abb. 4:** S4-Eluierte Ca-Gehalte der abgeteuften Sedimentkerne. SOK: Sedimentoberkannte. BGH-1312-P1 bis BGH-1412-P3 stellen die 3 Kerne der Probenahme vom 13./14.12.2005 dar.



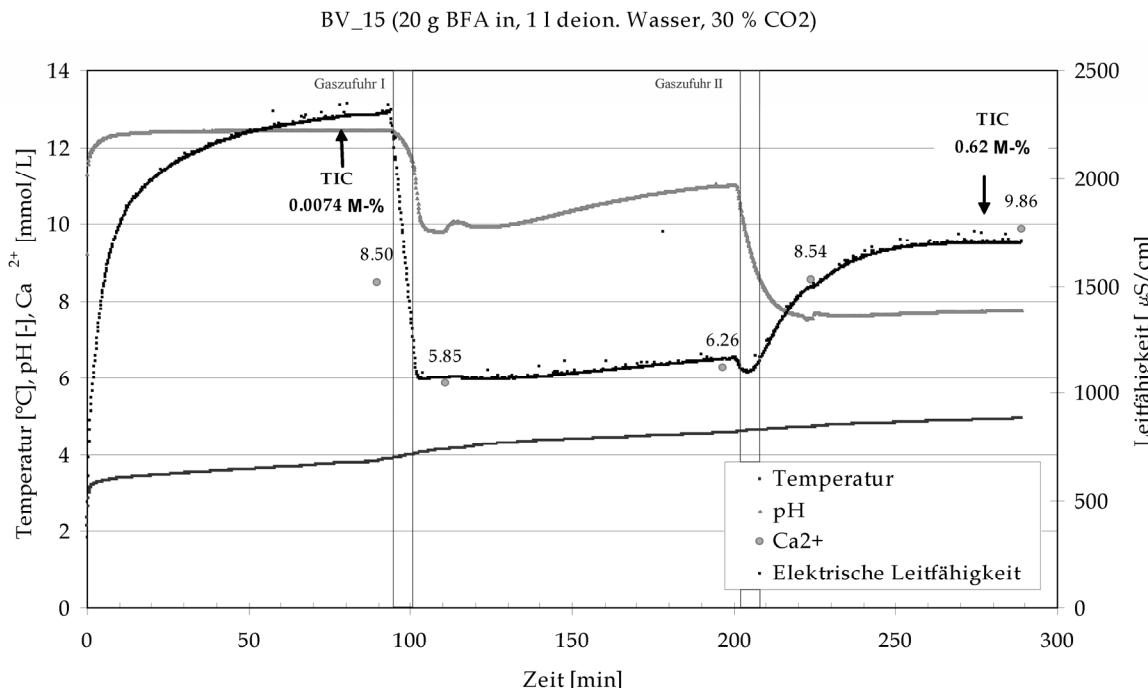
**Abb. 5:** Ergebnisse der geochemischen Untersuchung des Aschesedimentkernes BGH-1412-P3. SOK: Sedimentoberkante.

Daraus und aus der Entwicklungs des pH-Wertes wird geschlussfolgert, dass die Nachlieferung von  $\text{CO}_2$  nicht limitierend für die Carbonatfällung wirkt. Stattdessen muss die Gaszufuhr so dosiert werden, dass der pH-Wert nicht zu schnell und zu tief sinkt

In den weiteren Arbeiten werden die Versuche mit Sedimenten des Tagebaussees Burghammer durchgeführt, deren austauschbare Gehalte an Kationen und Anionen sich teilweise in der gleichen Größenordnung wie bei den bisher verwendeten Aschen bewegen.

## 5 Ausblick

Hauptaugenmerk weiterer Arbeiten liegt auf der Fortführung der Untersuchungen der Reaktionskinetik. Im Labormaßstab werden weitere Batch-Versuche stattfinden. Es werden Untersuchungen zur optimalen Injektion des Kohlendioxids stattfinden, die später im Feldmaßstab eingesetzt werden sollen.



**Abb. 6:** Ausgewählte Ergebnisse eines Versuches mit der Batchanlage des DGFZ (BV-15: 20 g BFA in 1 L deion. Wasser, 30 % CO<sub>2</sub>).

## 6 Literatur

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1984): DIN 38 414. Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).. – 12 S.; Berlin (Beuth).

LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (1996): Bergbaubedingte Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen - Analyse, Bewertung und Prognose - Untersuchungen im Lausitzer Braunkohlerevier. Studien und Tagungsberichte, Band 6., 86 S. Potsdam.

MERKEL, B. (2005): Alkalinitätserhöhung in sauren Grubenwässern durch CO<sub>2</sub>-Zugabe. – Wissenschaftliche Mitteilungen, **28**: 51-55, 3 Tab.; Freiberg.

PRASHANTH, J. P., SIVAPULLAIAH, P. V. & SRIDHARAN, A. (2001): Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in land fills. – Eng. Geol., **60** (1-4): 245-252; Amsterdam.

WERNER, F., GRAUPNER, B., MERKEL, B. & WOLKERSDORFER, C. (2006): Assessment of a Treatment Scheme for Acidic Mining Lakes Using CO<sub>2</sub> and Calcium Oxides to Precipitate Carbonates: ICARD 2006 **7**. – S. 2344-2353 [CD-ROM], 6 Abb., 2 Tab.; St. Louis (Proceedings, International Conference of Acid Rock Drainage (ICARD)).

ZEIEN, H. (1995): Chemische Extraktionen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden: Bonner bodenkundliche Abhandlungen **17**. – 284 S.; Bonn (Dissertation, Institut für Bodenkunde).

ZSCHIEDRICH, K., GOCKEL, G., SCHOLZ, G., RABE, W., APPELT, J., JESCHKE, A., MÖNCH, W., JAHN, M. & JANY, S. (2000): Abschlußbericht "Einsatz von Kraftwerksaschen der Lausitz zur Verbesserung der Wassergüte des Tagebaurestsees Burghammer". – Für: LAUSITZER UND MITTELDEUTSCHE BERGBAU-VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH. – 54 S.; Spremberg (eta Aktiengesellschaft).