

Optimierung der Kalkung von Tagebaufolgeseen

Broder Merkel¹, Mandy Schipek¹, Günter Scholz², Wolfgang Rabe²

¹TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09599 Freiberg/Sachsen, broder.merkel@geo.tu-freiberg.de

²MOVAB-D GmbH, Straße der Freundschaft 92, 02991 Lauta

Der innovative Kern des Vorhabens OILL (Optimizing In-Lake Liming) besteht in der Entwicklung einer rohrleitungsgestützten Vorrichtung und eines Verfahrens zum Einbringen von Alkalinität in einen sauren See unter Nutzung von windinduzierten Strömungen zur energie- und kostensparenden Erschließung großer Anteile des Seevolumens als Reaktionsraum für den Neutralisationsprozess. Mittels des Einsatzes von Online-Sensorik und einem intelligenten Algorithmus soll die Zugabe zeit- räumlich optimiert werden. Damit wird die Menge an Chemikalien minimiert und die Stabilität der Seewasserqualität optimiert.

The innovative aim of OILL (Optimizing In-Lake Liming) is the development of a pipeline based device for introducing alkalinity in acidic mining lakes. Wind-induced currents will be used to gain large portions of the lake volume as reaction space for the neutralization process in an energy- and cost effective way. By means of online sensors and intelligent algorithm liming will be optimized in time- and space. Thus, the amount of chemicals will be minimized while lake water composition and the ecosystem will benefit.

1 Einleitung

Die Versauerung von Oberflächen- und Grundwässern stellt weltweit ein großes Problem dar (Gray 1997). Atmosphärische Deposition stellt dabei eine Ursache der Versauerung oberflächennaher Wasser dar – besonders in Einzugsgebieten mit niedrigen Pufferkapazitäten (Dickson 1981; Svenson, Dickson et al. 1995). Neben der atmosphärischen Beeinflussung kann auch der Bergbau eine Quelle für Acid mine drainage (AMD) darstellen. Acid mine drainage aus der Pyritverwitterung führt in vielen Tagebaufolgeseen in Braunkohlerevieren (z.B. im Lausitzer Revier) unter anderem zu so niedrigen pH-Werten, dass eine Behandlung des Seewassers notwendig ist (Chen, Soulsby et al. 1997; Blodau, Hoffmann et al. 1998; Kuyucak 1998; Banwart and Evans 2002; Kuyucak 2002; Mudroch, Stottmeister et al. 2002; Aykol, Budakoglu et al. 2003; Blodau and Gatzek 2006; Sheoran and Sheoran 2006; Kuyucak 2007).

Verschiedene Konzepte zur Sanierung saurer Grubenwässer und entstandener Tagebaufolgeseen existieren: Pump and Treat (Hedin, Watzlaf et al. 1994; Gazea, Adam et al. 1996; Kuyucak 1998; Cravotta and Trahan 1999; Cravotta 2003; Batty and Younger 2004; Watten, Sibrell et al. 2005; Kalin, Fyson et al. 2006; Kuyucak 2006), Erzeugung von Alkalinität durch sulfat-reduzierende Bakterien (Vile and Wieder 1993; Bailey, Driscoll et al. 1995; Castro and Moore 2000; Koschorreck, Herzsprung et al. 2002; Kopacek, Hejzlar et al. 2003; Fauville, Mayer et al. 2004; Koschorreck, Wendt-Potthoff et al. 2007) oder auch die Anwendung von in-situ-Sanierungsmethoden wie Kalkung (Blette and Newton 1996; Driscoll, Cirimo et al. 1996; Brouwer and Roelofs 2002; Lydersen, Lofgren et al. 2002). Neben der Verwendung von industriellen Beiprodukten wie Flugaschen und LDS (low density sludge) aus Grubenwasserreinigungsanlagen (Ozturk and Kavak 2005; Gitari, Petrik et al. 2006; Perez-Lopez, Nieto et al. 2007; Gitari, Petrik et al. 2008) wurden auch umfangreiche Untersuchungen der kombinierten Anwendung der industriellen Beiprodukte mit CO₂ untersucht (Schipek and Merkel 2008; Schipek and Merkel 2008; Schipek 2009; Schipek and Merkel 2009; Schipek and Merkel 2009; Schipek and Merkel 2009; Unger-Lindig, Merkel et al. 2009).

Im Vergleich der o.g. Sanierungsmethoden stellt die direkte Kalkung versauerter Oberflächengewässer die kostengünstigste Behandlungsmethode dar. Erfahrungen in der direkten Kalkung von Seen über mehr als drei Jahrzehnte liegen vor allem in Schweden, Norwegen und Finnland vor. Allerdings stammt

bei den nordeuropäischen Seen die Säurefracht überwiegend aus der Atmosphäre und wird nicht über das Grundwasser aus der Pyritoxidation eingetragen. Seit über 30 Jahren wird dort Kalk zur direkten Seesanierung eingesetzt, wobei das Ausbringen durch Kalkung von Einzugsgebieten, Aufbringen auf Eisflächen im Winter, bzw. per Boot oder per Hubschrauber erfolgt (Sverdrup 1983; Henrikson, Hindar et al. 1995). Es existieren eine Anzahl an Publikationen, die sich mit den Eigenschaften der verwendeten Neutralisationsprodukte und deren Einfluss auf den Erfolg der Sanierungsstrategie beschäftigen (z.B. (Nyberg and Thornelof 1988)). Positive Effekte wurden nicht nur hinsichtlich der Wasserchemie sondern auch für das gesamte Ökosystem konstatiert (Iivonen, Jarvenpaa et al. 1995; Driscoll, Cirno et al. 1996; Guhrén, Bigler et al. 2007). Es existieren aber durchaus auch Überlegungen und Erfahrungen mit der Sanierung von Bergbaurestseen durch Kalkung, z.B. aus den USA (Castro and Moore 2000; Dowling, Atkin et al. 2004), Finnland (Ahtiainen, Sandman et al. 1983). Für saure Seen in Deutschland ist trotz erheblicher Forschungsaktivitäten bislang relativ wenig zu diesem Thema in der internationalen Literatur verfügbar (Hemm, Schlundt et al. 2002; Bozau, Bechstedt et al. 2007; Koschorreck, Bozau et al. 2007).

Es ist nicht unproblematisch, im Zusammenhang mit der Sanierung von sauren Tagebaufolgeseen von Nachhaltigkeit zu sprechen, denn jede Sanierung eines sauren Tagebaufolgesees ist im strengen Sinne des Wortes nicht nachhaltig, da diese Seen an Grundwasserströme gekoppelt sind, die saures Wasser ständig in den See eintragen (Merkel and Wolkersdorfer 2005). Solange es nicht gelingt, den kontinuierlichen Säurestrom zu unterbinden, muss die Seewasserqualität quasi kontinuierlich nachgebessert werden. Die einzige wirklich nachhaltige Sanierung wäre demnach die Sanierung der Kippen und der Bereiche im Untergrund, die eine Sulfidoxidation durch den Bergbau erfahren haben. Dies würde nach bisherigem Kenntnisstand exorbitante Kosten verursachen.

Das F&E Projekt OILL (Optimizing In-Lake Liming) hat die Entwicklung von Verfahrensverbesserungen bei der Anwendung von Kalkungsmaßnahmen zum Ziel, wobei folgende Aspekte Berücksichtigung finden:

- Minimierung der Chemikalien-Einsatzmenge durch zeitlich-räumliche Optimierung der Zugabe des Neutralisationsmittels
- Kontinuierliche Seewasserqualitäts-Stabilisierung, und damit einen erhöhten Nachhaltigkeitsfaktor
- Nutzung von windinduzierten Strömungen zur energie- und kostensparenden Erschließung großer Anteile des Seevolumens als Reaktionsraum für den Neutralisationsprozess

2.1 Allgemein

Im Rahmen des F&E Projektes OILL werden umfangreiche Untersuchungen folgender Forschungsschwerpunkte durchgeführt:

- Einsatz und Vergleich unterschiedlicher Neutralisationsprodukte im Hinblick auf Neutralisationseffizienz und ggf. Spurenmetallfreisetzung (Laborversuche)
- Verbesserung der Wasserqualität im Hinblick auf toxische Elemente (z.B. Mn, As, Cd, Hg, U, ...) durch Mitfällung und Sorption (Labor- und Feldversuche)
- Laborversuche und Feldversuche zur Carbonatlösungskinetik und dem Einfluss von Störionen durch Oberflächenpassivierung
- Erhöhung der Effizienz durch CO₂-Dosierung bei der Ausbringung von CaCO₃ bei pH-Werten > 6 (Labor- und Feldversuche)
- Seeströmungsmodellierung und Vergleich mit Seeströmungsmessungen
- Gezielte Nutzung von windinduzierten Strömungen im See und damit die Erschließung großer Reaktionsräume bei minimalen Einsatz von Energie und Neutralisationsprodukte (siehe Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3)

- Untersuchung des Einflusses von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Applikation auf Uferbewuchs und das sich entwickelte Ökosystem (Freilandbecken-/Aquariumsversuche)

2.2 Nutzung windinduzierter Strömungen 1 – Schiffstechnik

OILL sieht die Optimierung der schiffsgestützten Inlake-Technik für die Initialneutralisation sowie die Nachsorge im pH-Bereich von 5 bis 8 mit der gezielten Nutzung der windinduzierten Strömungen und der damit möglichen Erschließung großer Reaktionsräume im See mit hohen Reaktionswirkungsgraden vor.

Die Erfassung und zeitnahe Modellierung der großräumigen Strömungs- und Transportvorgänge im behandelten Tagebaufolgesee sind eine unerlässliche Kenngröße im F&E Projekt. Seeweite interne Strömungen und Wassermassenbewegungen werden vom Wind als dominierende Antriebskraft angefaht. Durch die Windwirkung entstehen interne Strömungen im See, welche von der temperaturbedingten Dichteschichtung, von der Topographie des Seebodens und der Uferbereiche beeinflusst werden. Zusätzlich wirken sich Zuflüsse lokal auf das Strömungsfeld aus. Das komplexe dreidimensionale Strömungssystem muss für den gesamten See im numerischen Modell erfasst werden, wobei alle maßgeblichen Prozesse hinreichend genau nachgebildet werden. Als Modell wird AquaSea (Vatnaskil Consulting Engineers, USA) verwendet. Die Positionierung entsprechender Sensoren an bestimmten Stellen im See zur Erfassung der realen Wassergeschwindigkeiten und der wesentlichen Wasserqualitätsparameter dient der Prozessoptimierung bei unterschiedlichen Wetter/Windverhältnissen. Mit Verringerung der Windgeschwindigkeit erfolgt eine Reduzierung und mit Erhöhung der Windgeschwindigkeit eine Erhöhung der Einsatzstoffmenge. Die mit den Sensoren gewonnenen Daten dienen der Steuerung der Alkalinitätszufuhr (und der Einsatzmenge von CO_2) in den See nach Menge und Qualität und damit einem optimalen, ressourcenschonendem Stoffeinsatz. Abbildung 1 stellt das Prinzip der angestrebten Lösung dar.

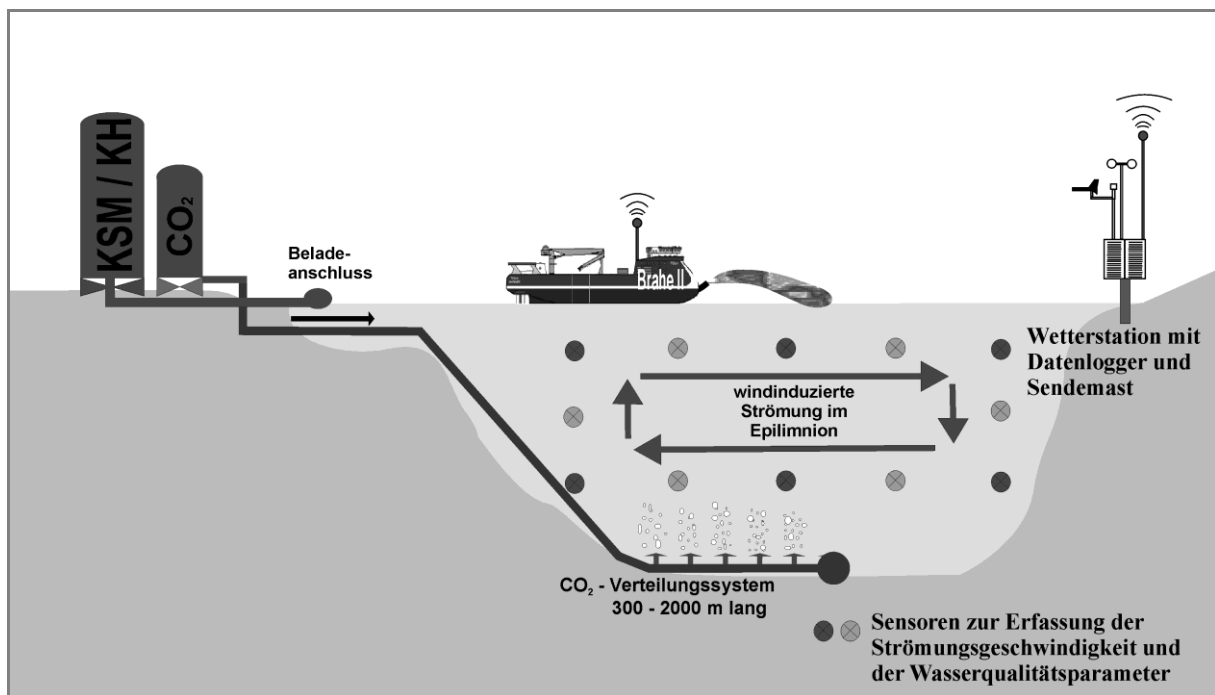
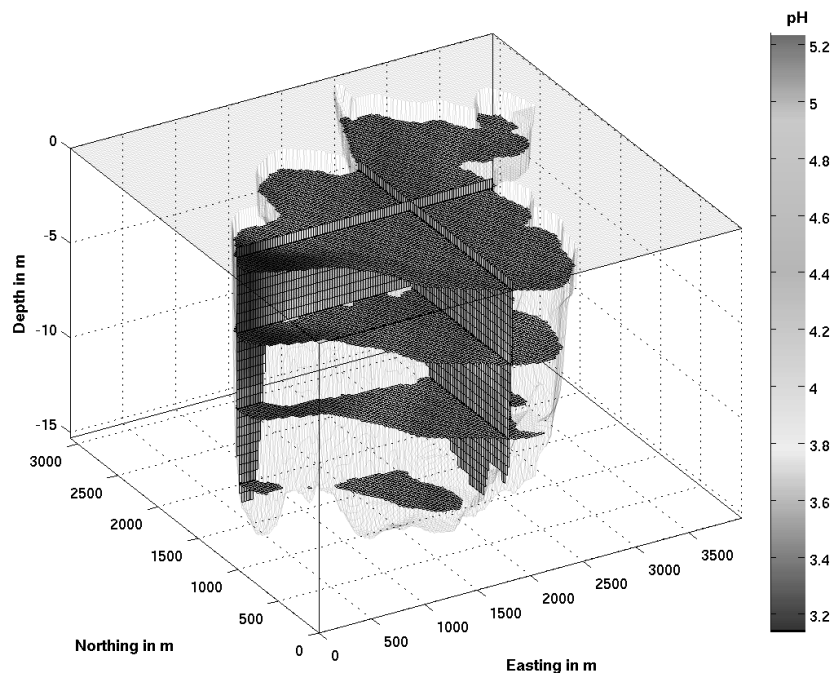


Abb. 1: Inlakeverfahren mit Nutzung windinduzierter Strömung mittels Schiffstechnik

Im Rahmen der Untersuchungen wird ein Visualisierungs-Tool mit Matlab © weiterentwickelt werden, welches automatisiert Tiefen- und Profilschnitte des Seekörpers in Hinblick auf bestimmte wasserchemische Parameter (pH, elektr. Leitfähigkeit, etc.) darstellen kann (Abbildung 2). In einem weiteren Schritt sollen diese dann mit aktuellen Tracks der schiffsgestützten Inlake-Technik kombiniert

werden und somit zu einer innovativen, effizienteren Schiffsroutenplanung beitragen. In einem 3. Schritt soll das Seeströmungsmodell zur Prognose mit einbezogen werden.



Origin: Easting 5454575, Northing 5702311

Abb. 2: Interpolierte Tiefen- und Profilschnitte eines Seekörpers

2.3 Nutzung windinduzierter Strömungen 1 – Rohrleitungssystem

Um die Kosten für notwendige Nachbehandlungen (durch den ständigen Zutritt von Kippengrundwasser) minimal zu halten, wird im Rahmen des F&E Projektes eine Strategie zur Nachbehandlung entwickelt, die aus Kostengründen nicht vom Boot aus erfolgen soll.

Für die Nachbehandlung von zur Wiederversauerung neigenden Seen ist der Stress für die sich bildende Biozönose möglichst gering zu halten. Dies bedeutet, dass die pH-Wert-Schwankungen nicht im Bereich von 5 bis 9, sondern eher im Bereich von 6.5 bis maximal 8 liegen sollten. Dies kann mit einem neuartigen Nachhaltigkeitssystem ggf. in Kombination mit Kohlendioxid und in Verbindung mit dem verbesserten Monitoringsystem bewirkt werden. Der innovative Gedanke des Vorhabens besteht in der Anwendung eines rohrleitungsgestützten Vorrichtung und eines Verfahrens zum Einbringen von Alkalinität in einen sauren See unter Nutzung der windinduzierten Strömungen.

Unter Beachtung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Haupteintragspfade der Acidität durch Zufluss sauren Grundwassers in einen Tagebaufolgesee ist zunächst die optimale Positionierung eines automatisierten Kalkungssystems festzulegen. Entsprechend der vorhandenen örtlichen Gegebenheiten ist die Infrastruktur des rohrleitungsgestützten vollautomatisierten Einspeisesystems zu gestalten (Vgl. Abbildung 3). Hauptkomponenten des Systems sind: Energieversorgung, CO₂-Tank, CO₂-Verdampfer, CO₂-Verteil-/Dosierleitung, Kalksilo, Seewasserpumpe, Disperser, Mischsystem, Dosierleitung mit Verteilsystem, Sensor-/Messtechnik.

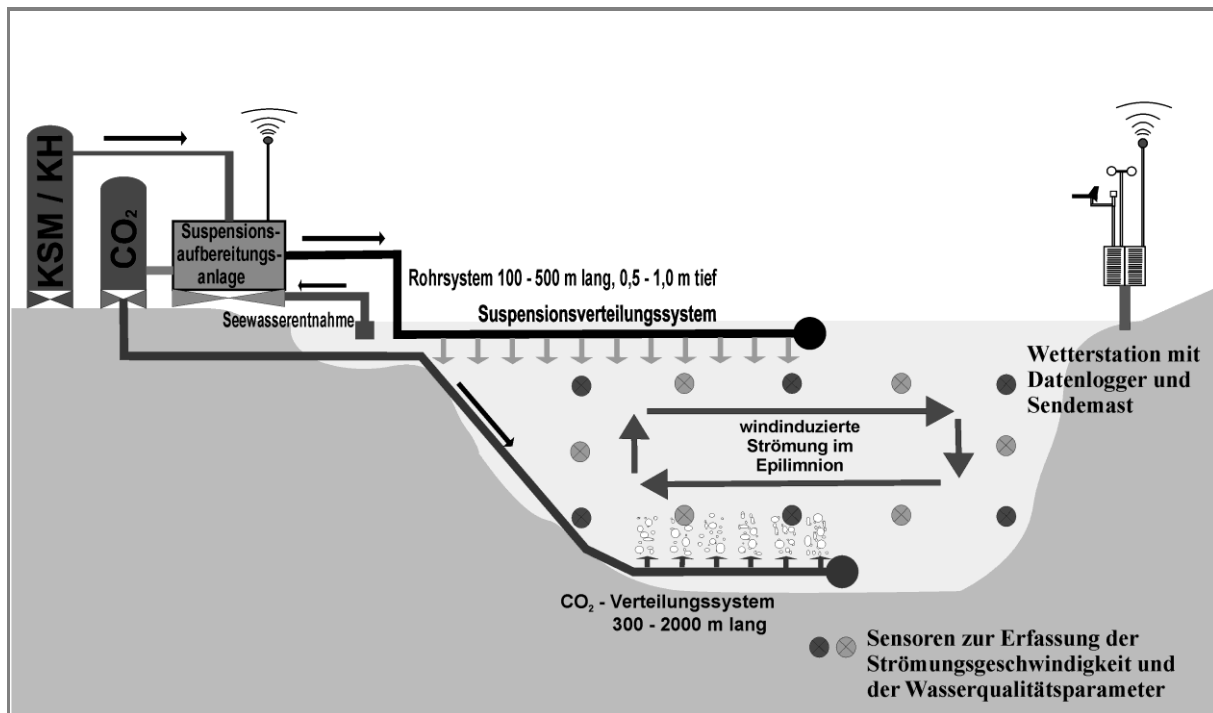


Abb. 3: Inlakeverfahren mit Nutzung windinduzierter Strömung mittels Rohrleitungssystem

2.4 Effizienzerhöhung durch CO₂-Dosierung

Die Lösungskinetik von Carbonat ist relativ schnell bei niedrigen pH-Werten respektive, wenn das Wasser weit vom Kalkkohensäuregleichgewicht entfernt ist. Sind also TFS sehr sauer, so kann die erste Phase der Neutralisierung mit CaCO_3 erfolgen. Die finale Einstellung des Ziel-pH-Wertes wird effizienter mit Ca(OH)_2 erreicht, weil die Kinetik hier wesentlich schneller ist. Ca(OH)_2 ist aber für eine Nachbehandlung insofern ungünstig, weil es möglicherweise unerwünschte Auswirkungen auf das Ökosystem haben kann (Teien, Kroglund et al. 2006; Leoni, Morabito et al. 2007). Daher soll die Nachbehandlung der Tagebaufolgeseen, wenn möglich, durch Dosierung von Carbonat erfolgen. Da sich die Lösungskinetik in der Nähe des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts drastisch verringert (Dreybrodt, Lauckner et al. 1996) und diese zudem durch Oberflächenkomplexierung (z.B. durch Mn, Fe) inhibitiert werden kann (Cubillas, Kohler et al. 2005; Arvidson, Collier et al. 2006; Vinson, Arvidson et al. 2007) soll im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht werden, ob die Kombination mit gasförmigen CO₂ eine Lösung sein kann. Dazu werden Labor- und Technikumsversuche mit variablen Carbonatmengen und CO₂-Konzentrationen durchgeführt, die eine Beeinflussung und Effizienzerhöhung durch CO₂-Dosierung zeigen (Schipek and Merkel 2010).

Von Seiten der LMBV mbH wird ab dem 3. Quartal 2010 ein Tagebaufolgesee zur Verfügung gestellt. Zum Zeitpunkt der Manuskript-Einreichung befanden sich die beteiligten Parteien in Verhandlungen zur vertraglichen Regelungen und Abstimmungen zur Nutzung des Gewässers.

4 Fazit

Für die Wirkung eines räumlich begrenzten Dosiervfahrens auf die Verteilung im Wasserkörper gibt es noch keine allgemein gültigen praktischen Erfahrungen. Die im vorgeschlagenen Verfahren genutzte natürliche Seeströmung ist abhängig von den herrschenden Winden. Das Risiko, dass über lange Zeit kein Wind weht, ist in unseren Breitengraden aber letztlich sehr gering und würde selbst dann nicht zu einer kritischen Situation führen.

Ziel des Forschungsprojektes OILL ist die Optimierung der Nachsorge für einen initial-neutralisierten Tagebaufolgesee durch die Kombination von Monitoring und schneller Reaktion (Kalkdosierung), um die Wasserqualität im See nur geringfügig variieren zu lassen.

5 Danksagung

Das dargestellte Projekt wird vom BMWI im Rahmen des AIF-ZIM Projektes OILL (Optimizing In-Lake Liming, FKZ KF2383401SA9) gefördert. Das Projekt findet inhaltliche Unterstützung von der LMBV mbH, der hier ebenfalls gedankt sei.

6 Literaturverzeichnis

- Ahtiainen, M., Sandman, O. and Tynni, R. (1983). "Sysmaijrvi - a lake polluted by mining wastewater." Hydrobiologia **103**: 303-308.
- Arvidson, R. S., Collier, M., Davis, K. J., Vinson, M. D., Amonette, J. E. and Luttge, A. (2006). "Magnesium inhibition of calcite dissolution kinetics." Geochimica Et Cosmochimica Acta **70**(3): 583-594.
- Aykol, A., Budakoglu, M., Kumral, M., Gultekin, A. H., Turhan, M., Esenli, V., Yavuz, F. and Orgun, Y. (2003). "Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide Mine, NW Anatolia, Turkey." Environmental Geology **45**(2): 198-208.
- Bailey, S. W., Driscoll, C. T. and Hornbeck, J. W. (1995). "Acid-Base Chemistry and Aluminum Transport in an Acidic Watershed and Pond in New-Hampshire." Biogeochemistry **28**(2): 69-91.
- Banwart, S. A. and Evans, K. A. C., S. (2002). Predicting mineral weathering rates at field scale for mine water risk assessment. Mine Water Hydrogeology and Geochemistry. P. L. Younger and S. Robins. London, Geological Society. **198**: 137-157.
- Batty, L. C. and Younger, P. L. (2004). "The use of waste materials in the passive remediation of mine water pollution." Surveys in Geophysics **25**(1): 55-67.
- Blette, V. L. and Newton, R. M. (1996). "Effects of watershed liming on the soil chemistry of Woods Lake, New York." Biogeochemistry **32**(3): 175-194.
- Blodau, C. and Gatzek, C. (2006). "Chemical controls on iron reduction in schwertmannite-rich sediments." Chemical Geology **235**(3-4): 366-376.
- Blodau, C., Hoffmann, S., Peine, A. and Peiffer, S. (1998). "Iron and sulfate reduction in the sediments of acidic mine lake 116 (Brandenburg, Germany): Rates and geochemical evaluation." Water Air and Soil Pollution **108**(3-4): 249-270.
- Bozau, E., Bechstedt, T., Friese, K., Fro?mmichen, R., Herzsprung, P., Koschorreck, M., Meier, J., Vo?lkner, C., Wendt-Potthoff, K., Wieprecht, M. and Geller, W. (2007). "Biotechnological remediation of an acidic pit lake: Modelling the basic processes in a mesocosm experiment." Journal of Geochemical Exploration **92**(2-3): 212.
- Brouwer, E. and Roelofs, J. G. M. (2002). "Oligotrophication of acidified, nitrogen-saturated softwater lakes after dredging and controlled supply of alkaline water." Archiv Fur Hydrobiologie **155**(1): 83-97.
- Castro, J. M. and Moore, J. N. (2000). "Pit lakes: Their characteristics and the potential for their remediation." Environmental Geology **39**(11): 1254.
- Castro, J. M. and Moore, J. N. (2000). "Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation." Environmental Geology **39**(11): 1254-1260.
- Chen, M., Soulsby, C. and Younger, P. L. (1997). "Predicting water quality impacts from future minewater outflows in an urbanized Scottish catchment." Groundwater in the Urban Environment - Vol I: 383-388
- Cravotta, C. A. (2003). "Size and performance of anoxic limestone drains to neutralize acidic mine drainage." Journal of Environmental Quality **32**(4): 1277-1289.
- Cravotta, C. A. and Trahan, M. K. (1999). "Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage." Applied Geochemistry **14**(5): 581-606.

- Cubillas, P., Kohler, S., Prieto, M., Causserand, C. and Oelkers, E. H. (2005). "How do mineral coatings affect dissolution rates? An experimental study of coupled CaCO_3 dissolution - CdCO_3 precipitation." Geochimica Et Cosmochimica Acta **69**(23): 5459-5476.
- Dickson, A. G. (1981). "An Exact Definition of Total Alkalinity and a Procedure for the Estimation of Alkalinity and Total Inorganic Carbon from Titration Data." Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers **28**(6): 609-623.
- Dowling, J., Atkin, S., Beale, G. and Alexander, G. (2004). "Development of the Sleeper pit lake." Mine Water and the Environment **23**(1): 2.
- Dreybrodt, W., Lauckner, J., Liu, Z. H., Svensson, U. and Buhmann, D. (1996). "The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$." Geochimica Et Cosmochimica Acta **60**(18): 3375-3381.
- Driscoll, C. T., Cirimo, C. P., Fahey, T. J., Blette, V. L., Bukaveckas, P. A., Burns, D. A., Gubala, C. P., Leopold, D. J., Newton, R. M., Raynal, D. J., Schofield, C. L., Yavitt, J. B. and Porcella, D. B. (1996). "The experimental watershed liming study: comparison of lake and watershed neutralization strategies." Biogeochemistry **32**(3): 143.
- Driscoll, C. T., Cirimo, C. P., Fahey, T. J., Blette, V. L., Bukaveckas, P. A., Burns, D. A., Gubala, C. P., Leopold, D. J., Newton, R. M., Raynal, D. J., Schofield, C. L., Yavitt, J. B. and Porcella, D. B. (1996). "The experimental watershed liming study: Comparison of lake and watershed neutralization strategies." Biogeochemistry **32**(3): 143-174.
- Fauville, A., Mayer, B., Frommichen, R., Friese, K. and Veizer, J. (2004). "Chemical and isotopic evidence for accelerated bacterial sulphate reduction in acid mining lakes after addition of organic carbon: laboratory batch experiments." Chemical Geology **204**(3-4): 325-344.
- Gazea, B., Adam, K. and Kontopoulos, A. (1996). "A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage." Minerals Engineering **9**(1): 23-42.
- Gitari, M. W., Petrik, L. F., Etchebers, O., Key, D. L., Iwuoha, E. and Okujeni, C. (2006). "Treatment of acid mine drainage with fly ash: Removal of major contaminants and trace elements." Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering **41**(8): 1729-1747.
- Gitari, W. M., Petrik, L. F., Etchebers, O., Key, D. L., Iwuoha, E. and Okujeni, C. (2008). "Passive neutralisation of acid mine drainage by fly ash and its derivatives: A column leaching study." Fuel **87**(8-9): 1637-1650.
- Gray, N. F. (1997). "Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem." Environmental Geology **30**(1-2): 62-71.
- Guhren, M., Bigler, C. and Renberg, I. (2007). "Liming placed in a long-term perspective: A paleolimnological study of 12 lakes in the Swedish liming program." Journal of Paleolimnology **37**(2): 247.
- Hedin, R. S., Watzlaf, G. R. and Nairn, R. W. (1994). "Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Limestone." Journal of Environmental Quality **23**(6): 1338-1345.
- Hemm, M., Schlundt, A., Kapfer, M. and Nixdorf, B. (2002). "Beispiele für Neutralisierungsversuche am Steinberger See (Bayern) und Zieselsmaar (Nordrhein-Westfalen) - aus der UBA-Studie „Tagebauseen in Deutschland“."
- Henrikson, L., Hindar, A. and Thornelof, E. (1995). "Freshwater liming." Water, Air, and Soil Pollution **85**(1): 131.
- Iivonen, P., Jarvenpaa, T., Lappalainen, A., Mannio, J. and Rask, M. (1995). "Chemical, biological and socio-economic approaches to the liming of Lake Alinenjarvi in southern Finland." Water, Air, and Soil Pollution **85**(2): 937.
- Kalin, M., Fyson, A. and Wheeler, W. N. (2006). "The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage." Science of the Total Environment **366**(2-3): 395-408.

- Kopacek, J., Hejzlar, J., Kana, J., Porcal, P. and Klementova, S. (2003). "Photochemical, chemical, and biological transformations of dissolved organic carbon and its effect on alkalinity production in acidified lakes." Limnology and Oceanography **48**(1): 106-117.
- Koschorreck, M., Bozau, E., Fro?mmichen, R., Geller, W., Herzsprung, P. and Wendt-Potthoff, K. (2007). "Processes at the sediment water interface after addition of organic matter and lime to an acid mine pit lake mesocosm." Environmental Science and Technology **41**(5): 1608.
- Koschorreck, M., Herzsprung, P., Wendt-Potthoff, K., Lorke, A., Geller, W., Luther, G., Elsner, W. and Mueller, M. (2002). "An In-lake Reactor to Treat an Acidic Lake: the Effect of Substrate Overdose." Mine Water and the Environment **21**(3): 137-149.
- Koschorreck, M., Wendt-Potthoff, K., Bozau, E., Herzsprung, P., Geller, W. and Schultze, M. (2007). In situ neutralization of acidic pit lakes: Processes in the sediment and limiting factors. IMWA Symposium 2007: Water in Mining Environments, Cagliari, Italy, Universita degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Scienze della Terra.
- Kuyucak, N. (1998). "Mining, the environment and the treatment of mine effluents." International Journal of Environment and Pollution **10**(2): 315-325.
- Kuyucak, N. (2002). "Acid mine drainage prevention and control options." Cim Bulletin **95**(1060): 96-102.
- Kuyucak, N. (2006). "Selecting suitable methods for treating mining effluents." Water in Mining 2006, Proceedings: 267-276
- Kuyucak, N. (2007). "Sources of mining effluents and suitable treatment options." Proceedings of the 20th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, No 133: 185-196
- Leoni, B., Morabito, G., Rogora, M., Pollastro, D., Mosello, R., Arisci, S., Forasacco, E. and Garibaldi, L. (2007). "Response of planktonic communities to calcium hydroxide addition in a hardwater eutrophic lake: results from a mesocosm experiment." Limnology **8**(2): 121-130.
- Lydersen, E., Lofgren, S. and Arnesen, R. T. (2002). "Metals in Scandinavian surface waters: Effects of acidification, liming, and potential reacidification." Critical Reviews in Environmental Science and Technology **32**(2-3): 73-295.
- Merkel, B. and Wolkersdorfer, C. (2005). Alkanitätserhöhungen in sauren Grubenwässern durch CO₂-Zugabe. Berg- und Hüttenmännische Tag, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie.
- Mudroch, A., Stottmeister, U., Kennedy, C. and Klapper, H. (2002). Remediation of abandoned surface coal mining sites. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Nyberg, P. and Thornelof, E. (1988). "Operational liming of surface waters in Sweden." Water, Air, and Soil Pollution **41**(1-4): 3.
- Ozturk, N. and Kavak, D. (2005). "Adsorption of boron from aqueous solutions using fly ash: Batch and column studies." Journal of Hazardous Materials **127**(1-3): 81-88.
- Perez-Lopez, R., Nieto, J. M. and de Almodovar, G. R. (2007). "Utilization of fly ash to improve the quality of the acid mine drainage generated by oxidation of a sulphide-rich mining waste: Column experiments." Chemosphere **67**(8): 1637-1646.
- Schipek, M. (2009). Carbon dioxide mineralisation by using acid mine lakes and industrial by-products: A specific solution for abandoned mining areas. International Forum-Competition of Young Researchers "Topical Issues of subsoil usage", St. Petersburg, Russia.
- Schipek, M. and Merkel, B. (2008). Carbon dioxide sequestration by using acid mine lakes and industrial by-products: Applicability of a niche solution. International Conference "Geo2008 – Resources and Risks in the Earth System" and 160th annual meeting of the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (DGG) and 98th annual meeting of the Geologische Vereinigung e.V. (GV), Aachen, Germany, Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.F. (DGG).

- Schipek, M. and Merkel, B. (2008). CDEAL - Results using CO₂ and dumped fly ash in AMD affected lakes. Geotechnologien Status-Seminar "Investigation, Utilization and Protection of the Underground", Stuttgart.
- Schipek, M. and Merkel, B. (2009). CO₂ sequestration in AMD affected areas: A case study. Goldschmidt2009 Conference "Challenges to Our volatile planet", Davos, Suisse, Geochemica et Cosmochimica Acta.
- Schipek, M. and Merkel, B. (2009). Combined carbon dioxide sequestration and mine water treatment as a specific solution for abandoned mining areas - Results of a case study. GeoDresden 2009, 161. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) Dresden, SDGG - Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften.
- Schipek, M. and Merkel, B. (2009). Mine water treatment - Results using CO₂ and dumped fly ash in AMD affected lakes. DAAD expert seminar "Mining and water", University of Windhoek, Namibia.
- Schipek, M. and Merkel, B. (2010). "Betrachtung der Carbonatlösungskinetik und möglichen Inhibitoren bei der Anwendung von Inlake-Verfahren – Erste Ergebnisse."
- Sheoran, A. S. and Sheoran, V. (2006). "Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review." Minerals Engineering **19**(2): 105-116.
- Svenson, T., Dickson, W., Hellberg, J., Moberg, G. and Munthe, N. (1995). "The Swedish liming programme." Water Air and Soil Pollution **85**(2): 1003-1008.
- Sverdrup, H. (1983). "LAKE LIMING." Chemica scripta **22**(1): 12.
- Teien, H. C., Kroglund, F., Salbu, B. and Rosseland, B. O. (2006). "Gill reactivity of aluminium-species following liming." Science of the Total Environment **358**(1-3): 206-220.
- Unger-Lindig, Y., Merkel, B. and Schipek, M. (2009). "Carbon dioxide treatment of low density sludge: a new remediation strategy for acidic mining lakes?" Environmental Earth Sciences: 12.
- Vile, M. A. and Wieder, R. K. (1993). "Alkalinity Generation by Fe(III) Reduction Versus Sulfate Reduction in Wetlands Constructed for Acid-Mine Drainage Treatment." Water Air and Soil Pollution **69**(3-4): 425-441.
- Vinson, M. D., Arvidson, R. S. and Luttge, A. (2007). "Kinetic inhibition of calcite (104) dissolution by aqueous manganese(II)." Journal of Crystal Growth **307**(1): 116-125.
- Watten, B. J., Sibrell, P. L. and Schwartz, M. F. (2005). "Acid neutralization within limestone sand reactors receiving coal mine drainage." Environmental Pollution **137**(2): 295-304.