

# Großräumige Sulfatfreisetzung durch sekundäre Pyritoxidation im Lausitzer Bergbaurevier

Bastian Graupner<sup>1</sup>, Christian Koch<sup>1</sup>, Florian Werner<sup>1</sup> & Friedrich-Carl Benthous<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Meraner Straße 10, 01217 Dresden,  
Email: Bastian.Graupner@web.de

<sup>2</sup> LMBV mbH, Knappenstraße 1, 01968 Senftenberg

Für die Alttagbaukippen der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft wurde der Umfang der Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen bis Ende des Jahres 1999 berechnet und als sekundäre Pyritoxidation bezeichnet. Die Berechnung basiert auf dem Sauerstoffverbrauch und dem Sauerstofftransport durch den Porenraum und Verwitterungsbereiche nach vorhandenen 1D Lösungen. Die Übertragung auf die Fläche erfolgte rasterorientiert. Für die meisten Tagebaukippen ergab sich eine Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen, die dem zwei- bis vierfachen dessen entsprach, was während der Phase des aktiven Bergbaus oxidiert ist (primäre Oxidation). Über eine lange Liegezeit ist mit einer Pyritoxidation bis in etwa 15 m Tiefe zu rechnen.

Extent of pyrite oxidation after mining activities, referred to as secondary pyrite oxidation, was calculated for the former mining area Lausitz till the end of the year 1999. Calculation is based on an available simulation code for 1D oxygen consumption and transport through the pore space and reacted coatings. Applying the program for the whole area was done with a raster based approach. Most of mining dumps showed twice to fourth time more pyrite oxidation after mining activities than there occurred immediately during mining (primary oxidation). Over a long period an oxidation depth of not more than 15 m is expected.

---

## 1 Einleitung

Der Braunkohlenbergbau im Lausitzer Revier hat zu einer Vielzahl an Tagebaukippen geführt, die einen flächenmäßigen Anteil von etwa 15 Prozent einnehmen (GRAUPNER ET AL. 2005). Auf Grund der mit dem aktiven Bergbau verbundenen Pyritoxidationsprozesse, z.B. durch Grundwasserabsenkung und Massenumlagerung, erfolgte die Freisetzung von Eisen, Sulfat und Protonen. Teilweise wurden diese wiederum in Sekundärmineralen gebunden (BILEK 2004, BERGER 2000). Die daraus resultierenden Stoffspeicher Kippen entwickelten sich durch das nach Beendigung des Bergbaues aufsteigende Grundwasser zu Stoffquellen. Ursache dafür ist die gute Löslichkeit der Reaktionsprodukte (JAMBOR 1994, JAMBOR & BLOWES 1998). Besonders relevante Parameter sind dabei Eisen, das unter oxidierenden Bedingungen Säure freisetzt sowie das schwer aus Wasser entfernbare Sulfat. Entsprechend der hydrogeologischen Bedingungen erfolgt ein Abstrom des hoch mineralisierten Kippengrundwassers in die Umgebung, wodurch eine Gefährdung von Schutzgütern, wie zum Beispiel Fließgewässer oder Trinkwasserfassungen auftreten kann und den natürlichen Abbauprozessen unterliegt.

Der Bestand an löslichem Eisen und Sulfat in der Kippe wird jedoch nicht nur durch die unmittelbar mit dem aktiven Bergbau verbundenen, hier entsprechend WISOTZKY (1994) als primäre Pyritoxidation bezeichneten Prozesse, gebildet. Stattdessen dringt auch nach Beendigung des Bergbaues Sauerstoff über die Kippenoberfläche in den Kippenkörper ein. Der mittlere primäre Pyritumsatz für einen Kippenkörper wurde von verschiedenen Autoren an mehreren Lausitzer Tagebaukippen untersucht. Er schwankt in der Lausitz zwischen 4 und 7 Prozent, siehe BERGER (2000), UHLMANN ET AL. (1999) und ROLLAND (2007). Dagegen gibt es kaum Angaben zum Einfluss der sekundären Pyritoxidation auf den Stoffbestand der Kippen.

Für die Abschätzung des zeitlichen und mengenmäßigen Stoffaustrages aus den Kippen ist es unerlässlich, das gesamte verfügbare Depot zu beschreiben. Die zur sekundären Pyritoxidation in einem Projekt der LMBV durchgeführten Arbeiten werden im Folgenden vorgestellt. Grundlage für die Bearbeitung bildet die Inventarisierung für die Lausitzer Kippen, die auch die primäre Pyritoxidation in Höhe von 7 Prozent einschloss. Methodik und Ergebnisse sind in GRAUPNER *et al.* (2005) und GRAUPNER *et al.*

(2006) dargestellt. Ziel der hier dargestellten Bearbeitung war die Erweiterung der Kenntnisse zum Einfluss der sekundären Pyritoxidation auf das für einen Stoffaustrag aus den Kippen relevante Stoffdepot. Dabei ging es weniger um die detailgenaue Bearbeitung eines einzelnen Objektes. Stattdessen sollte ein allgemeingültiges Schema entwickelt werden, welches für den Einsatz an einem sehr großen Untersuchungsgebiet mit einer Vielzahl an Tagebaukippen geeignet ist. Um diesen regionalen Ansatz zu ermöglichen, war zum Einen die Identifizierung der entscheidenden Prozesse und zum anderen deren Berücksichtigung in einer auf das Wesentliche reduzierten Form erforderlich.

## 2 Konzeptioneller Ansatz zur sekundären Pyritoxidation

Die sekundäre Pyritoxidation wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, siehe Wunderley 1994, Wisotzky 1994, Evangelou 1995. Dazu gehören die Sauerstoffnachlieferung betreffende Eigenschaften wie die Porengrößenverteilung und der Wassergehalt, Sauerstoffzehrende Eigenschaften wie der Pyritgehalt, der Bewuchs und der Gehalt an organischem Kohlenstoff sowie die Pyritoxi-dationsreaktion beeinflussende Faktoren wie der pH-Wert und die Bildung von Sekundärmineralschichten um die Pyritkörner.

Der Vielzahl an Einflussfaktoren steht die Fläche der zu bearbeitenden Tagebaukippen von 440 km<sup>2</sup> gegenüber. Die Größe des Untersuchungsgebietes und die begrenzten Daten erzwingen die Verwendung eines regionalen Berechnungsansatzes, der auf die wesentlichen Prozesse reduziert ist. In Abbildung 1 ist ein Bild mit wesentlichen Einflussfaktoren dargestellt.

Das Programm PYROX (WUNDERLEY, 1994) ermöglicht die 1D-Berechnung der Pyritoxi-dation für Kippen. Dabei kommt das Programm mit relativ wenigen Eingangsdaten aus. Die Sauerstoffnachlieferung erfolgt diffusiv in Abhängigkeit von der Porosität und dem Wassergehalt. Zusätzlich ist ein shrinking-core Ansatz implementiert, der die Behinderung der Pyritoxidation durch sich bildende Sekundärmineralschichten um die Pyritkörner berücksichtigt. Der für das ehemalige Bergbauegebiet relevante ansteigende Grundwasserspiegel bildet die untere Grenze der Pyritoxidation.

Auf Grund des robusten, einfach handhabbaren und begrenzte Eingangsdaten erfordernden Ansatzes wurde das Programm PYROX für die Ermittlung der sekundären Pyritoxidation ausgewählt. Für den geplanten Einsatz waren einige Veränderungen am Quellcode notwendig. So ist PYROX in der Originalversion nicht in der Lage, einen ansteigenden Grundwasserspiegel zu berücksichtigen, da auch bei Berechnungen über längere Zeiträume nur das zu Beginn der Berechnung definierte System verwendet wird. Veränderungen in der Porensättigung sind dabei nicht vorgesehen. Der in der Lausitz vorhandene Grundwasserwiederanstieg kann jedoch einen erheblichen Einfluss für die sekundäre Pyritoxi-dation haben, wenn er zu gesättigten Bedingungen im Bereich der Pyritoxi-dationsfront führt. Um diesen Einfluss berücksichtigen zu können, war eine Anpassung von PYROX erforderlich. Außerdem wurde die Ausgabe so verändert, dass die ermittelte Sauerstoffkonzentration und der verbliebene relative Radius der Pyritkörner an jedem Knoten ausgegeben werden. Diese Informationen werden als Eingangsdaten für den nächsten Berechnungsschritt verwendet, wobei

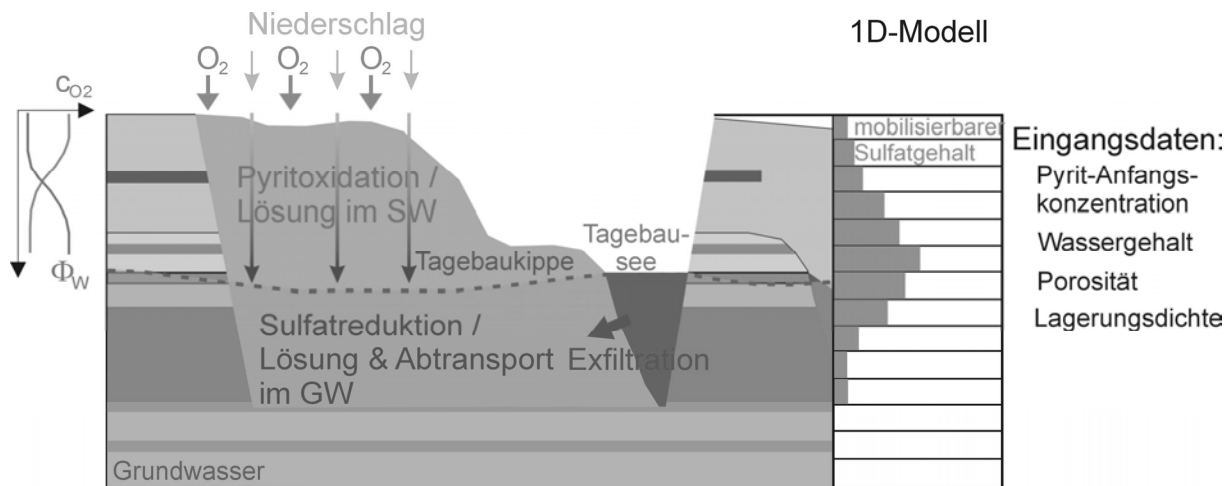
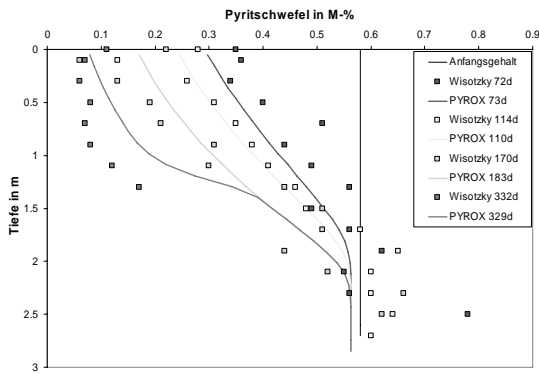


Abb. 1: Schematische Darstellung wesentlicher Faktoren für Veränderung der Stoffgehalte der Kippen während ihrer Liegezeit.



**Abb. 2: Vergleich der berechneten Veränderung der Pyritgehalte mit den Messwerten von WISOTZKY (1994).**

dann der Wassergehalt der Poren entsprechend dem veränderten Grundwasserspiegel angepasst werden kann. Als letzte Änderung wurde die Berechnung des von der Porenwassersättigung abhängigen Diffusionskoeffizienten korrigiert, da bisher keine völlige Sättigung der Poren in PYROX möglich war. Die bisherige Gleichung von REARDON & MODDLE (1985a) wurde durch die Gleichung von EBERLING & NICHOLSON (1995) ersetzt.

Die Eignung von PYROX für die Berechnung der Pyritoxidation wurde an 2 Benchmarkbeispielen untersucht. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den jeweiligen Messwerten. Beispielhaft sind die Ergebnisse für die Versuchsschüttung von WISOTZKY (1994) in Abbildung 2 dargestellt. PYROX war in der Lage, die Pyritkonzentration als auch den Sauerstoffgehalt korrekt wieder zugeben.

### 3 Umsetzung des Konzeptes im Programm „HistoGIS“

Für die Übertragung der 1D-Berechnung mit PYROX auf die Fläche wurde ein rasterbezogenes Verfahren durchgeführt, bei dem die Tagebaukippen des Untersuchungsgebiets in Rasterzellen mit einer Größe von 200 mal 200 m unterteilt wurden. Für die Berechnung der sekundären Pyritoxidation wurde eine zusätzliche vertikale Diskretisierung in 1-m-Schritten eingeführt. Das entwickelte Programm HistoGIS schreibt für jede Rasterzelle und jedes Jahr die Eingangsdaten für das Programm PYROX mit den jeweils aktuellen Informationen wie Grundwasserstand und verbliebener Pyritkonzentration.

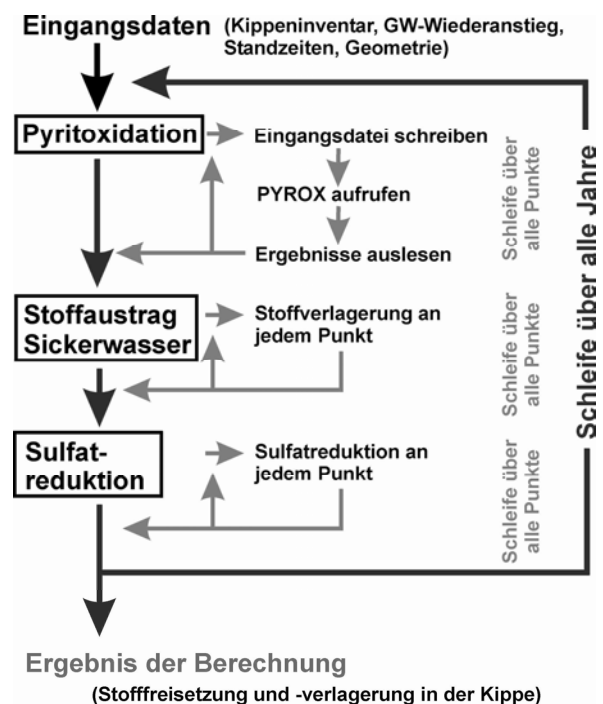
Dabei wird zu Beginn eine in der Kippeninventarisierung ermittelte einheitliche Pyritkonzentration

über die gesamte Tiefe der Rasterzelle verwendet. Anschließend erfolgen die Berechnung mit PYROX und das Auslesen der Ergebnisse. Das Anfangsjahr der Berechnung ist das Jahr der Kippenerstellung und damit individuell für jede Rasterzelle während die Berechnung mit dem Jahr 1999 endet. Neben der eigentlichen Pyritoxidation kann auch die Verlagerung des freigesetzten Sulfates mit dem Sickerwasser sowie die Sulfatreduktion im gesättigten Bereich berücksichtigt werden. Der Ablauf des Programmes ist in Abbildung 3 dargestellt.

Trotz des gewählten vereinfachenden Ansatzes ist eine Reihe von Eingangsdaten erforderlich. Informationen zum Pyritgehalt und zur Geometrie der Rasterzellen stammen aus der bereits erwähnten Kippeninventarisierung. Das Kippenalter und der Grundwasserstand wurden aus Altdaten der LMBV recherchiert. Die Porosität des Kippenmaterials jeder Rasterzelle wird aus den  $k_f$ -Werten der kalibrierten Strömungsmodelle der LMBV abgeleitet.

### 4 Ergebnisse der Berechnungen

Die Ergebnisse der Berechnung beziehen sich auf das zu Grunde liegende Berechnungsraster. Um die Interpretation der Ergebnisse bezüglich der Unterschiede zwischen den Kippen zu erleichtern, erfolgte zusätzlich eine Zusammenfassung zu Mittel- bzw. Summenwerten.



**Abb. 3: Ablaufschema des Programmes HistoGIS.**

In Abbildung 4 ist der berechnete Pyritumsatz in jeder Rasterzelle für den Liegezeitraum der Kippen dargestellt. Damit liegt erstmalig eine flächendeckende Information über den abgeschätzten Umfang der aufgetretenen Pyritoxidationsprozesse während der Liegezeit der Tagebaukippen vor. Der Umfang der Pyritoxidation wird dabei im Wesentlichen durch die Kippenmächtigkeit, die Pyritkonzentration, die Liegezeit und die Entwicklung des Grundwasserstandes beeinflusst. Deutlich sind zum Beispiel die niedrigen Umsätze im Raum Schlabendorf/Seese zu erkennen, die unter anderem durch die niedrige Pyritkonzentration und die zum Teil kurze Liegezeit verursacht werden. Dagegen sind die Umsätze z.B. in Sedlitz deutlich höher. Dort treffen hohe Pyritkonzentrationen und lange Liegezeiten aufeinander.

Um die Qualität der Berechnungsergebnisse aus der Kippeninventarisierung aber auch aus der

hier dargestellten Berechnung der sekundären Pyritoxidation bewerten zu können, wurden Vergleichsdaten gesammelt. Dabei handelt es sich um Kippenbohrungen, die auf Schwefel und Kohlenstoff untersucht wurden. Ergänzend zu bereits existierenden und in der Literatur dokumentierten Daten wurden in dem Projekt Kippenbohrungen in Schlabendorf, Meuro, Spreetal und Lohsa beprobt. In Abbildung 5 sind alle Kippenbohrungen aufgeführt, die für die Bewertung zur Verfügung standen. Mit dem gesammelten Datensatz ist eine Bewertung der Ergebnisse in nahezu allen Bereichen des Untersuchungsgebietes möglich.

An jeder der Bohrungen erfolgte der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Konzentrationen. Beispielhaft ist das in Abbildung 6 dargestellt.

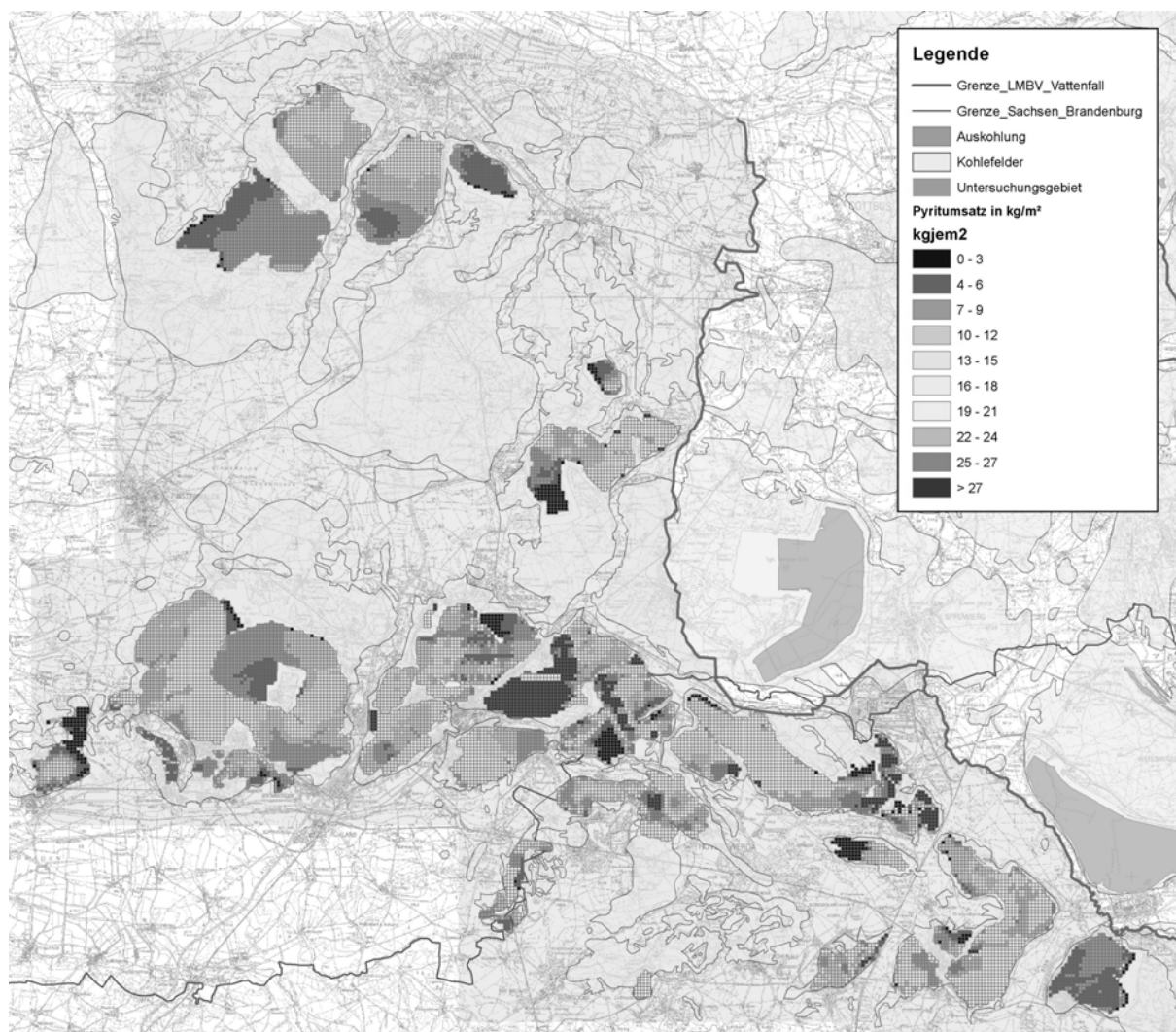


Abb. 4: Pyritumsatz während der Liegezeit der Kippen je Rasterzelle.

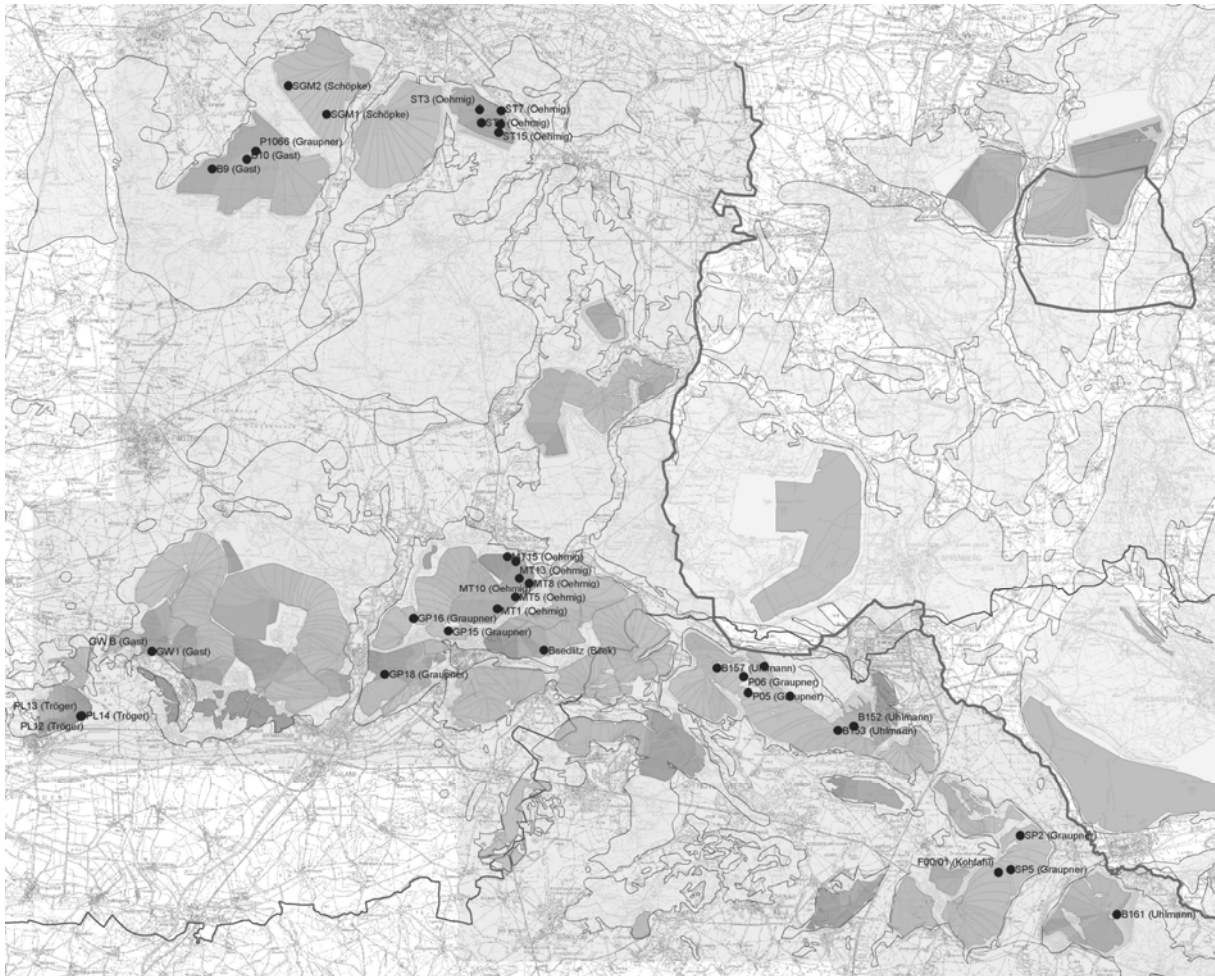


Abb. 5: Recherchierte und selbst beprobte Kippenbohrungen mit Analysen für Schwefel und Kohlenstoff im Untersuchungsgebiet.

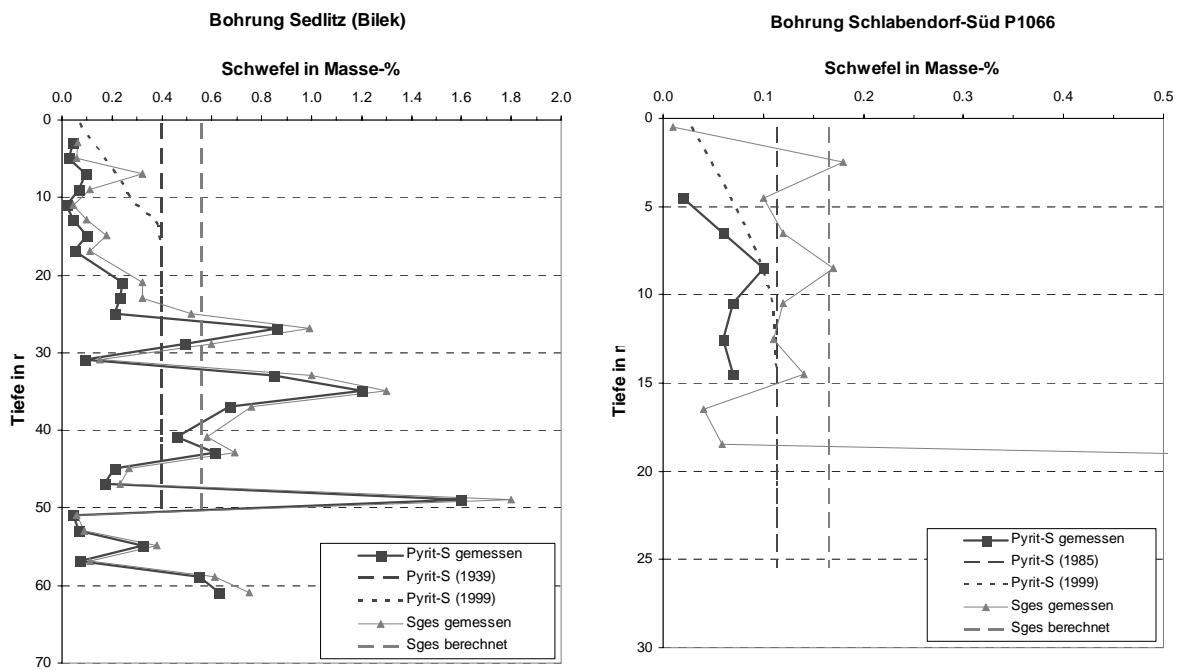


Abb. 6: Vergleich der berechneten Schwefelgehalte mit Messwerte an 2 Bohrungen.

Der Vergleich der Messwerte mit den berechneten Ergebnissen zeigte eine gute Übereinstimmung für das gesamte Untersuchungsgebiet. Die in Abbildung 6 beispielhaft dargestellten Ergebnisse unterstreichen diese Aussage. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Bohrungen eine vertikale Heterogenität der Schwefelgehalte zeigen, die modelltechnisch nicht abbildbar ist. Wesentlich ist die gute Übereinstimmung der mittleren Konzentrationen. Ursachen für Abweichungen zu den Messwerten sind in der Auflösung der Berechnungsergebnisse zu suchen. Da die Berechnungen auf einer Rasterweite von 200 m beruhen, kann die kleinräumige horizontale Heterogenität der Konzentrationen nicht aufgelöst werden. Genauere Ergebnisse könnten auch mit einer feineren Diskretisierung nicht erreicht werden, da die Dichte der geologischen und geochemischen Ausgangsdaten dafür nicht ausreicht. Unter Berücksichtigung der Größe des Untersu-

chungsgebietes, für das mit dieser Bearbeitung flächendeckend Aussagen zu den Stoffgehalten der Tagebaukippen getroffen werden, spielen diese Abweichungen eine zu vernachlässigende Rolle.

In der Einleitung wurde bereits erwähnt, dass die primäre Pyritoxidation mit einem mittleren Umsatz von 7 Prozent angesetzt wurde. Um den Einfluss der sekundären Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen gegenüber dem Pyritumsatz während des aktiven Tagebaues einschätzen zu können, wurde ein mittlerer prozentualer Umsatz je Tagebaukippe für die sekundäre Pyritoxidation ermittelt. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Berechnungsergebnisse schwanken zwischen 3 und 30 Prozent, wobei sich der überwiegende Teil zwischen 10 und 25 Prozent bewegt. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass für die meisten Tagebaukippen der Lausitz die Pyritoxidation während der

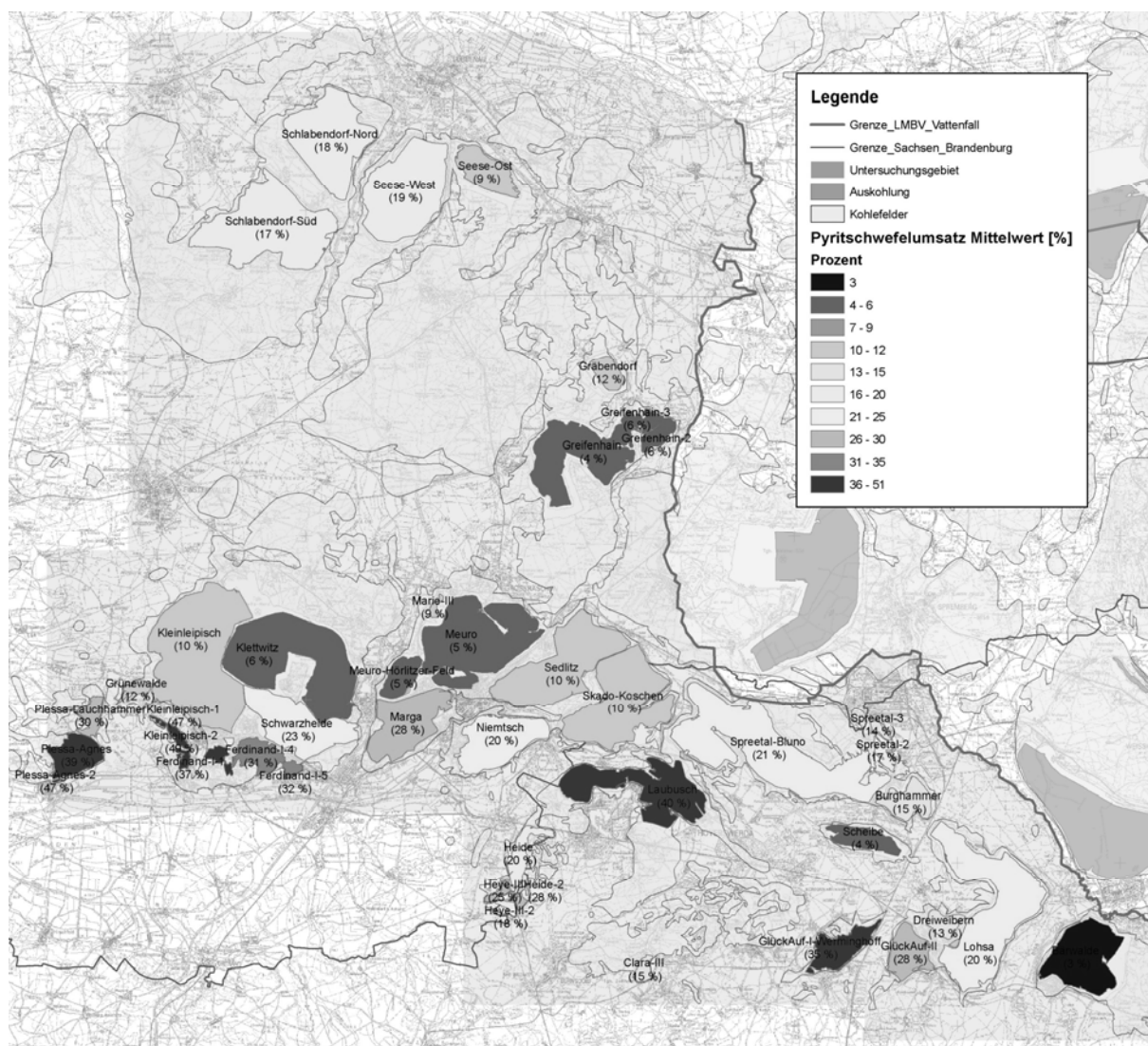


Abb. 7: Mittlere prozentuale Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen bis Ende des Jahres 1999.

Liegezeit eine eher größere Rolle als der primäre Umsatz während des aktiven Tagebaues spielt. Ursache dafür ist das relativ hohe Alter der Kippen, welches sich zwischen 1919 und 1999 mit Schwerpunkt zwischen 1960 und 1990 bewegt.

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit der vorgestellten Methodik war es möglich, für ein regionales Untersuchungsgebiet flächendeckend Aussagen zum Grad der Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen zu treffen. Dabei wurde vereinfachend eine komplette Durchmischung der ursprünglichen quartären und tertiären Schichten in der Kippe angenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Umfang der Pyritoxidation während der Liegezeit der Kippen mindestens dem des primären Pyritumsatzes entspricht. In vielen Tagebaukippen erreicht er das Doppelte bis Dreifache dessen. Die Oxidationsprozesse dauern an, so lange der Grundwasserspiegel niedrig ist und oberflächennah Pyrit vorliegt. Eine vollständige Oxidation des gesamten Kippenkörpers durch die Sauerstoffzufuhr über die Oberfläche ist aber nicht zu befürchten, selbst wenn der Kippenkörper sehr lange ungesättigt bleibt. Denn mit zunehmender Tiefe der Oxidationszone sinkt der Konzentrationsgradient von Sauerstoff. Damit verlangsamt sich die Sauerstoffnachlieferung mit fortschreitender Oxidation. Aus den Berechnungen geht hervor, dass ab einer Tiefe von 15 m nur noch ein geringer Pyritumsatz erfolgt. So haben nur etwa 12 Prozent aller Rasterzellen einen 20-prozentigen Pyritumsatz in einer Tiefe von 14 m oder tiefer erreicht. Dies stimmt mit Aussagen von WISOTZKY (1994) überein, der bei langer Standzeit (30 Jahre) einen intensiven Pyritumsatz bis in eine Tiefe von max 10 m beobachtet hat.

Da ein erheblicher Anteil der Schwefelfreisetzung erst nach der Verkipfung erfolgt, wären Maßnahmen empfehlenswert, die den Umfang der nachträglichen Pyritoxidation verringern. Der Pyritumsatz während des aktiven Tagebaus lässt sich dagegen vermutlich kaum beeinflussen, da die Grundwasserabsenkung und Massenumlagerung elementare Bestandteile des Bergbaus sind.

Maßnahmen, die zu einer Minimierung der sekundären Pyritoxidation führen, sind die selektive Verkipfung einer mächtigen quartären Deckschicht und ein schneller Grundwasseranstieg falls die Standsicherheit der Kippen dadurch nicht gefährdet wird.

In der vorgestellten Arbeit wurde die Eignung des ursprünglich für Tailings entwickelten Programmes PYROX für das Lausitzer Untersuchungsgebiet nachgewiesen. So zeigten die Ergebnisse für die Benchmarktests als auch für die eigentliche Berechnung eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten. Der in PYROX integrierte Berechnungsansatz berücksichtigt weder eine pH-Abhängigkeit der Oxidationsraten noch eine detaillierte Abbildung der Sauerstoffdiffusion. Damit scheinen diese Effekte eine eher untergeordnete Rolle für den hier betrachteten langjährigen und großräumigen Ansatz zu haben. Die hier gezeigte Reduzierung der Pyritoxidationsberechnung auf die wesentlichen Prozesse erscheint auch vor dem Hintergrund einer geringen Datendichte empfehlenswert.

Der Vorteil der vorgestellten Methodik liegt in der Anwendung eines 1D-Pyritoxidationsprogrammes auf die Fläche. Das Programm benötigt nur wenige Eingangsparameter, die alle in ausreichender Qualität für das Untersuchungsgebiet vorliegen. Wechselwirkungen zwischen den Rasterzellen sind bezüglich der Pyritoxidation nicht zu erwarten, so dass daraus keine Einschränkung für die Ergebnisse zu erwarten ist. Damit hat sich das Vorgehen als adäquat für die Größe des Gebiets und die Datenlage erwiesen.

Eine Einschränkung der Aussagen erfolgt durch die getroffene Annahme, dass die Kippen eine vollständige Mischung der Deckschichten darstellen. Der in der Kippeninventarisierung ermittelte Pyritgehalt wurde ohne Differenzierung über die Tiefe einheitlich angesetzt. Dieser Ansatz trifft für viele Tagebaukippen des Lausitzer Bergbaureviers zu, die zum Teil reine Förderbrückenkippen sind. Allerdings kamen teilweise auch Absetzer zum Einsatz, mit denen in einigen Tagebauen quartäres Material selektiv verkippt wurde. Für diese Bereiche überschätzt daher die verwendete Methodik den Umfang der sekundären Pyritoxidation. In zukünftigen Arbeiten soll eine Variantenuntersuchung dazu erfolgen, um die Auswirkungen einer quartären Deckschicht abschätzen zu können.

## 6 Danksagung

Wir danken der LMBV mbH für die Finanzierung des Projektes sowie für die vielfältige Unterstützung während der Bearbeitung.

## 7 Literatur

- BERGER, WOLFGANG (2000): Stoffinventar und Stoffänderung durch Redoxreaktionen in Sedimenten des Lausitzer Braunkohlereviere, in Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V.
- BILEK, FELIX (2004): Beschaffenheitsprognose für den Grundwasser-Abstrom aus Braunkohle-Tagebaukippen auf der Basis von experimentell bestimmten Parametern und geochemisch charakterisierten Sedimenten, Dissertation an der Christian-Albrechts Universität Kiel, in: Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., 26, ISSN 1430-0176
- ELBERLING, B. & NICHOLSON, R.V. (1996): Field measurements of oxygen diffusion and sulphide oxidation in mine tailings. *Water Resources Research* 32(6), 1773-1784.
- EVANGELOU, V.P. (1995): Pyrite oxidation and its control: Solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage (AMD), molecular oxidation oxidation mechanisms, microbial role, kinetics, control ameliorates and limitations, microencapsulation, CRC Press, Lexington
- GRAUPNER, B. J., BENTHAUS, F.-C., BÜRGER, S. & WERNER, F. (2005): Implications of EU-Water Framework Directive for the East German Postmining Landscape Lausitz: Coping with a sparse knowledge of the underground. – *Limnologica*, 35: 199-205
- GRAUPNER, B., WERNER, F., BÜRGER S. & BENTHAUS F.-C. (2006): Abschätzung der Sulfatgehalte Lausitzer Braunkohlenkippen mit Hilfe von Raum- und Stoffbilanzmodellen, *Wissenschaftliche Mitteilungen der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie*, Band 31, 263-270, ISSN: 1433-1284
- JAMBOR, J. (1994): Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. In J.L. Jambor and D.W. Blowes, Eds., *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*, Chapter 3, p. 59–122. Short Course Handbook, Ottawa, Ontario.
- JAMBOR, J.L. AND BLOWES, D.W. (1998): Theory and Application of Mineralogy in Environmental Studies of Sulfide-Bearing Mine Wastes, in *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy* (Cabri, L.J. and Vaughan, D.J., eds.), Mineralogical Association of Canada Short Course Vol. 27, p367-402..
- REARDON, E. J. & MODDLE, P. M. (1985): Gas diffusion coefficient measurements on uranium mill tailings: implications to cover design, *Uranium*, 2, 111-131
- ROLLAND, WOLFGANG (2007): Workshop: Management des Säurepotenzials an der TU BA Freiberg, 23.02.2007
- UHLMANN, W.; ARNOLD, I.; MIETZSCH, M. (1999): Abschlußbericht zur Kippenwassergüteentwicklung im Tagebau Jänschwalde, LAUBAG Hauptverwaltung, Abt. Wasserwirtschaft
- WISOTZKY, F. (1994): Untersuchung zur Pyritoxidation in Sedimenten des Rheinischen Braunkohlereviere und deren Auswirkungen auf die Chemie des Grundwassers, Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 58, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen
- WUNDERLY, MURRAY DEAN (1994): „A Multicomponent reactive transport model incorporating kinetically controlled pyrite oxidation“, Master Thesis, University of Waterloo, Canada.