

SCHRIFTENREIHE FÜR GEOWISSENSCHAFTEN 15

NILS HOTH

Modellgestützte Untersuchungen zur Grundwassergüteentwicklung in
Braunkohleabraumkippen und deren Abstrom unter Berücksichtigung natürlicher
Rückhalt- und Abbauprozesse

Mit 83 Abbildungen, 15 Tabellen und 28 Anlagen

ISBN 3 – 937040 – 10 – 2

ISSN 9423 – 3443

Herausgegeben von der Gesellschaft für Geowissenschaften e. V., Berlin

VERLAG STÖRR, Ostklüne 2004

Anschrift des Autors:

Dr. NILS HOTH
Akademiestr. 4
D-09599 Freiberg

Die Drucklegung dieser Arbeit wurde von der Friedrich-Stammberger-Stiftung, Berlin, mit einem Druckkostenzuschuss gefördert.

Schriftenreihe für Geowissenschaften

Herausgegeben von der Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Berlin zur Publikation von Monographien, Konferenz-Beiträgen, Exkursionsführern und Sammelbänden zu Spezialthemen

Erschienen und hergestellt im Verlag Störr, Ostklüne 11, D-17406 Usedom

Alle Rechte liegen beim Verlag Störr

Bestellungen über den Buchhandel oder direkt beim

Verlag Störr
Ostklüne 11
D-17406 Usedom

Tel. (49) 038372-70212
Fax. (49) 038372-70710
e-mail: MStoerr@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	7
SUMMARY	9
1 EINLEITUNG	11
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	13
2.1 HYDROGEOCHEMISCHE UND HYDRAULISCHE CHARAKTERISTIK DES SYSTEMS „KIPPE – RESTSEE – GEWACHSENER GRUNDWASSERLEITER“	13
2.2 GEOGENER AUSGANGSZUSTAND	14
2.3 HYDRAULISCHES SYSTEM „KIPPE“	17
2.3.1 Kippenaufbau, Abbautechnologie und Modellvorstellung.....	17
2.3.2 Prozess der Wiederaufsättigung der Kippen	20
2.4 GEOCHEMISCHES SYSTEM „KIPPE“	22
2.4.1 Pyritverwitterung.....	22
2.4.2 Pufferungsreaktionen- und Sekundärmineralbildungen	26
2.4.3 Mikrobielle Redoxreaktionen	28
2.5 MIGRATIONSPROZESS	30
2.5.1 Herkömmliche Transportmodellierung	31
2.5.2 Reaktive Transportmodellierung	31
2.5.3 Hydrogeochemische Gleichgewichtsmodelle	32
2.6 ABGELEITETE UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE.....	35
3 CHARAKTERISTIK DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE.....	36
3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET ESPENHAIN.....	36
3.1.1 Geographische Lage und klimatische Verhältnisse.....	36
3.1.2 Geologische Verhältnisse	36
3.1.3 Tagebauentwicklung, Abbautechnologie und Kippenaufbau.....	38
3.2 UNTERSUCHUNGSGEBIET JÄNSCHWALDE	39
3.2.1 Geographische Lage und klimatische Verhältnisse.....	39
3.2.2 Geologische Verhältnisse	40
3.2.3 Tagebauentwicklung, Abbautechnologie und Kippenaufbau.....	42
4 HYDRAULISCHE MODELLIERUNGEN ZUR WIEDERAUFÄTTIGUNG VON KIPPEN.....	44
4.1 MODELLGRUNDLAGEN	44
4.2 MODELLANSÄTZE	46
4.2.1 Problemstellung.....	46
4.2.2 Modellierungsprogramm und Modellvarianten.....	47
4.2.3 Modellparameter	49
4.3 MODELLERGEBNISSE	51
4.3.1 Modellvariante 1	51
4.3.2 Modellvariante 2	51
4.4 DISKUSSION DER MODELLERGEBNISSE.....	55
5 VORFELDBILANZIERUNG UND KIPPENMODELLERSTELLUNG.....	56
5.1 VORGEHENSWEISE	56
5.2 DATENGRUNDLAGE BODENGEOLOGISCHE VORFELDGUTACHTEN	57

5.3	ERGEBNISSE ESPENHAIN.....	58
5.3.1	Datengrundlage.....	58
5.3.2	Vorfeldanalyse - Ergebnisse an ausgewählten Einzelbohrungen	59
5.3.3	Vorfeldanalyse – Flächenhafte Ergebnisse	61
5.3.4	Ergebnisse Kippenmodell	61
5.4	ERGEBNISSE JÄNSCHWALDE	63
5.4.1	Datengrundlage.....	63
5.4.2	Vorfeldanalyse - Ergebnisse an ausgewählten Einzelbohrungen	64
5.4.3	Vorfeldanalyse – Flächenhafte Ergebnisse	66
5.4.4	Ergebnisse Kippenmodell	69
6	KENNZEICHNUNG DER HYDROGEOCHEMISCHEN PROZESSE – KIPPE ESPENHAIN	71
6.1	VORGEHENSWEISE UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN	71
6.1.1	Festphase - Probenahme und Untersuchungsmethoden.....	71
6.1.2	Wasserphase – Probenahme und Untersuchungsmethoden	71
6.1.3	Gasphase – Probenahme und Untersuchungsmethoden.....	72
6.1.4	Charakterisierung von Wasseranalysen	72
6.2	KENNZEICHNUNG DER MOBILISIERBAREN STOFFPOTENTIALE	73
6.2.1	Verwitterungsversuche	73
6.2.2	Porenwasserbeschaffenheit der Restlochböschungen	74
6.2.3	Elutionsversuche.....	76
6.3	UNTERSUCHUNG DER SEKUNDÄREN VERWITTERUNGSZONE DER ABSETZERKIPPE	78
6.3.1	Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen der Wasser- und Festphase	78
6.3.2	Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen der Gasphase.....	82
6.4	UNTERSUCHUNGEN AN TIEFEN KIPPEN-BOHRUNGEN	82
6.4.1	Ergebnisse Feldelutionen	83
6.4.2	Ergebnisse Analytik Porenwasser	84
6.4.3	Mineralphasen-Sättigungszustände der Porenwässer	86
6.4.4	Tritiumuntersuchungen an den Porenwässern	87
6.4.5	Ergebnisse Gasphasenuntersuchungen	89
6.5	UNTERSUCHUNG DER REDUKTIVEN PROZESSKETTE	91
6.5.1	Untersuchungsergebnisse.....	91
6.5.2	Diskussion	94
6.6	BESCHAFFENHEITSPROGNOSE ZUM ABSTROMZEITPUNKT.....	96
6.6.1	Vorgehensweise	96
6.6.2	Ergebnisse	97
7	KENNZEICHNUNG DER HYDROGEOCHEMISCHEN PROZESSE – KIPPE JÄNSCHWALDE..	99
7.1	KENNZEICHNUNG DER STOFFPOTENTIALE UND DER VERWITTERUNGSPROZESSE	99
7.2	BESCHAFFENHEITSPROGNOSE ZUM ABSTROMZEITPUNKT.....	101
8	REAKTIVES STOFFTRANSPORTPROGRAMM PCGEOFIM.....	103
8.1	FUNKTIONSWEISE DES GEKOPPELTEN MODELLS.....	103
8.2	BENCHMARK-BEISPIEL 1 – KATIONENAUSTAUSCHPROZESSE	105
8.2.1	Problemstellung.....	105
8.2.2	Modellgrundlagen	105
8.2.3	Modellergebnisse.....	106
8.3	BENCHMARK-BEISPIEL 2 – ABSTROM VON AMD-WÄSSERN.....	106
8.3.1	Problemstellung.....	106
8.3.2	Modellgrundlagen	107
8.3.3	Modellergebnisse.....	108

8.4	BENCHMARK-BEISPIEL 3 – ABSTROM-SÄULENVERSUCH VON AMD-WÄSSERN.....	108
8.4.1	Problemstellung.....	108
8.4.2	Modellgrundlagen	109
8.4.3	Modellergebnisse.....	110
8.5	SÄULENVERSUCH ZUR ELUTION VON KIPPENWÄSSERN	111
8.5.1	Problemstellung.....	111
8.5.2	Modellgrundlagen	111
8.5.3	Modellergebnisse.....	112
8.6	ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION	114
9	REAKTIVE STOFFTRANSPORTMODELLIERUNG – BEISPIEL ESPENHAIN	115
9.1	MODELLGRUNDLAGEN	115
9.1.1	Strömungsmodell	115
9.1.2	Transportmodell	116
9.2	MODELLERGEBNISSE	117
9.2.1	Strömungsmodell	117
9.2.2	Transportmodell	117
9.2.3	Stoffbilanzen für Oberflächengewässer	121
9.3	DURCHSTRÖMUNG VON RESTLOCHVERWITTERUNGZONEN.....	124
9.3.1	Modellansatz	124
9.3.2	Modellergebnisse und Diskussion	124
10	REAKTIVE STOFFTRANSPORTMODELLIERUNG – BEISPIEL JÄNSCHWALDE	129
10.1	MODELLGRUNDLAGEN	129
10.2	MODELLERGEBNISSE	131
10.3	ABSTROM-SÄULENVERSUCHE	135
10.3.1	Versuchs- und Auswertungsdurchführung.....	135
10.3.2	Versuchsergebnisse Säulenauslauf.....	136
10.3.3	Auswertung der Vor- und Nachuntersuchungen.....	140
10.3.4	Modellierung der Abstrom-Säulenversuche	142
11	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DAS MITTELDEUTSCHE UND NIEDERLAUSITZER BRAUNKOHLENREVIER	144
	LITERATURVERZEICHNIS.....	148
	ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	158
	ANLAGENVERZEICHNIS.....	163
	ANLAGEN.....	165

Zusammenfassung

Die teilweise Verwitterung der im Braunkohlenabraum enthaltenen Sulfidminerale führt zur Bildung stark mineralisierter, saurer Kippengrundwässer. Eine Gefährdungsprognose für die umgebenden Grundwasserleiter (GWL) bedarf der Charakterisierung des Kippengrundwassers zum Abstromzeitpunkt. Weiterhin ist der Abstromprozess mit geeigneten Modellen zu simulieren. Es ist Ziel der Arbeit, eine Methodik zur Gefährdungsabschätzung zu entwickeln. Das Hauptaugenmerk liegt in der Charakterisierung der im Kippenkörper und im Abstrom ablaufenden Prozesse. Die Bearbeitung erfolgte für die Standorte Espenhain (Mitteldeutsches Revier) und Jänschwalde (Niederlausitzer Revier). Einführend werden die theoretischen Grundlagen zum geogenen Ausgangszustand, zum hydraulischen und geochemischen System „Kippe“ sowie zur reaktiven Stofftransportmodellierung dargestellt. Daraus werden Untersuchungsschwerpunkte abgeleitet. Einer kurzen Charakterisierung der Untersuchungsgebiete folgt die Bearbeitung der einzelnen Schwerpunkte.

Die exemplarische Simulation der Kippenwiederaufsättigung mit einem 2-Fluidphasensimulator zeigt, dass die Diskrepanz zwischen starken Anstiegen der Kippengrundwasserstände und geringen Versickerungsmengen aus der Bodenzone auf die Umverteilung des Anfangswassergehaltes zurückzuführen ist. Die Versickerung aus der Bodenzone und die Grundwasserneubildung sind bis zur Einstellung quasi-stationärer Verhältnisse völlig entkoppelt. Für beide Untersuchungsgebiete werden geochemische Kippenmodelle aus einer Vorfeldbilanzierung abgeleitet. Dies trägt wesentlich zum Verständnis der sich entwickelnden Kippengrundwasserbeschaffenheiten bei. Die intensiven Untersuchungen am Kippenstandort Espenhain zeigen, dass es nach längeren Kippeliegezeiten zu einer vertikalen geochemischen Zonierung innerhalb der Kippe kommt. Die sekundären Verwitterungszonen der Hangendbereiche der Absetzer- und Förderbrücken-Kippen weisen erhebliche mobile Eisen-, Sulfat-, Aluminium- und Spurenmetall-Gehalte auf. Im Liegenden dieser Verwitterungszonen kommt es hingegen zum Ablauf einer reduktiven Prozesskette bis hin zur Sulfatreduktion. Diese Prozesskette basiert auf der mikrobiellen Umsetzung tertiärer organischer Substanz. Die Abfolge der Redoxsequenz bis zum Sulfatreduktions-Stadium ist als wesentlicher Selbsthilfemechanismus anzusehen. Die weitere Untersuchung dieser Prozesskette und ihrer technischen Beeinflussbarkeit ist geboten, da dies eine Chance der mittel- bis langfristigen Minimierung der „Quellstärke“ des Emissionsherdes „Kippe“ darstellt.

Das reaktive Stofftransportprogramm PCGEOFIM (IBGW [2000]) wird an Hand von Benchmark-Beispielen und Säulenversuchen verifiziert. Die reaktiven Abstrommodellierungen der Kippengrundwässer zeigen, dass es in den gewachsenen GWL langfristig zur Entwicklung von quasi-stationären „Beeinflussungssäumen“ kommen wird. Hauptkennzeichen des Abstromprozesses ist die Ausbildung einer Sulfatfront. Die pH-Werte werden in karbonathaltigen GWL gut gepuffert. Der Rückhalt der Eisengehalte basiert auf Kationenaustausch bzw. Bildung von Eisenhydroxidphasen. Die effektive Wirksamkeit der benannten Puffersysteme wird an Hand von Säulenversuchen nachgewiesen.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen für das Mitteldeutsche und Niederlausitzer Revier werden in einem abschließenden Kapitel dargestellt.

Summary

The partial weathering of the reduced sulphur compounds in lignite overburden leads to highly mineralised, acidic dump groundwater. The problem of the future impact of these dump waters to the surrounding aquifers can be split in two parts. First a prognosis of the dump water composition is required until the time when discharge begins. In the second step the migration of the pollutants has to be calculated with an appropriate transport model. The goal of this work is to develop a methodology for long-term risk assessment of those dump sites. Therefore the main focus lies on the characterisation of the processes within the dump and the downstream area. The investigations were carried out at the dump sites Espenhain (Central German Lignite District) and Jänschwalde (Lower Lusatian Lignite District).

An introduction discusses the initial geogenic situation, basics of the hydraulic and geochemical system “dump” and of transport modelling. From this the investigation topics are derived. After a short characterisation of the investigation areas the achieved results related to these topics are represented.

Simulations of possible scenarios of the dump resaturation were carried out with a two-fluid phase code. The conclusion is that the discrepancy between the fast dump groundwater rise and small infiltration rates from the soil zone is caused by the process of redistribution of the initial dump water. The infiltration rates from the soil zone will be different from dump groundwater recharge, until a quasi-stationary hydraulic state is developed. Geochemical dump models were derived from a “fore field balance” for both investigation areas. This is an essential tool for the understanding of the developing dump water composition. The intensive investigations at the Espenhain-site show that depending on dump age (40 to 50 years) a vertical geochemical zoning inside the dump evolves. The secondary weathering zones of the upper parts of the covering dump and the conveyor bridge dump are characterised by considerable amounts of mobile iron, sulphate, aluminium and trace metals. However, the underlying parts of these weathering zones are affected by a sequence of reductive processes up to the sulphate reduction. This sequence is based on the microbial transformation of tertiary organic matter. If the sequence reaches the state of sulphate reduction/ sulphide formation, the process provides an important natural attenuation mechanism. Moreover, this redox sequence is of importance for the mid - to long-term minimisation of the emission source strength from dump sites.

The reactive transport model PCGEOFIM (IBGW [2000]) was verified by means of Benchmark examples and column flow tests. The reactive modelling of the dump water migration indicates that quasi-stationary impact areas will be established in the undisturbed aquifers. The sulphate content is thereby the main indicator of the migration front. The pH-values are well buffered in aquifers containing carbonates. The immobilisation of iron within the undisturbed aquifers is caused by cation exchange and formation of iron hydroxides. The effectiveness of the buffering processes is supported by the results of column flow tests.

The essential conclusions for the Central German and the Lower Lusatian Lignite District are summarised in a final chapter.

1 Einleitung

Die Gewinnung von festen Bodenschätzen führt durch den bergbaulichen Eingriff zu einem abrupten, drastischen Wechsel in den geochemischen Milieuverhältnissen der Lagerstätten. Die resultierende Exposition sulfidischer Minerale gegenüber Sauerstoff hat damit deren teilweise oder vollständige Verwitterung zur Folge. In Abhängigkeit vom vorhandenen Pufferpotential sinkt der pH-Wert und die Mineralisation der Porenlösung erhöht sich stark. Die Gesamtheit der Phänomene wird unter dem Begriff Acid Mine Drainage (AMD) bzw. Acid Rock Drainage (ARD) zusammengefasst.

Die Braunkohlegewinnung in Tagebauen ordnet sich in dieses Problemfeld ein. Die Gesamtheit aller kohlehangenden Sedimente des überbaggerten Bereiches wird während der Tagebauführung kurzzeitig den Atmosphären ausgesetzt. Dieser Prozess ist als drastischer Anschlag der sonst in geologischen Zeiträumen verlaufenden, erosionsbedingten Disulfid-oxidation zu verstehen. Es kommt zur starken Erhöhung der gelösten Eisen- und Sulfatgehalte. Bei ungenügender Pufferkapazität der verkippten Sedimente hat der fallende pH-Wert eine Verwitterung von Silikatphasen (z.B. Alumosilikate) zur Folge. Dies ist durch eine Erhöhung der Aluminiumgehalte und der Mobilität der Schwermetalle gekennzeichnet. Beim Wiederanstieg des Kippengrundwassers und dessen Abstrom werden die Produkte der Verwitterungs- und Pufferungsprozesse eluiert. Die Verfrachtung dieser Stoffe kann dann im Abstrom der Kippen gelegene Schutzobjekte/ Schutzgüter gefährden.

Die Bedeutung der Prozesse für die regionale Grundwasserbeschaffenheitsentwicklung der drei Hauptreviere Deutschlands wird aus der durch den Braunkohlenbergbau in Anspruch genommenen Fläche ersichtlich. Nach PFLUG [1998] betrug diese 1996 im Lausitzer Revier ca. 775 km², im Mitteldeutschen Revier ca. 500 km² und im Rheinischen Revier ca. 265 km². Die Fläche, innerhalb derer eine Beeinflussung des Wasserhaushaltes erfolgte, ist dabei noch weitaus größer. Weiterhin sind die zukünftigen Inanspruchnahmen durch die aktiven Bergbauunternehmen Vattenfall Europe Mining (vormals LAUBAG), MIBRAG und Rheinbraun AG zu berücksichtigen.

In den beiden ostdeutschen Revieren wurde nach 1989, im Zuge der politischen Wende die Braunkohleförderung, auf Grund der Umstellung der Hauptenergieträger schlagartig zurückgefahren. Während im Rheinischen Revier die Förderung zwischen 1989 und 1996 bei ca. 103 Mio. t konstant blieb, verringerte sie sich im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier von ca. 300 Mio. t (1989) auf ca. 80 Mio. t (1996)¹ (PFLUG [1998]).

Aus diesen drastischen Veränderungen resultiert die Aufgabe, innerhalb kurzer Zeit den beeinflussten Wasserhaushalt auszugleichen. Dabei sollen die hydrochemischen Auswirkungen auf die Nachbarschaft der Kippenareale so gering wie möglich gehalten werden. Es leitet sich daraus ein Untersuchungsbedarf für die Prozesse innerhalb der

¹ Nach DEBRIV [2002] betrug die Jahresförderung der beiden ostdeutschen Reviere in 2000/ 2001 70 – 75 Mio. t/a. Der Tiefststand der Förderung wurde 1998 mit ca. 64 Mio. t/a erreicht.

Kippenkörper und die langzeitige Prognose der Beeinflussung/ Gefährdung der angrenzenden Schutzobjekte/ Schutzgüter ab.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Prognose der zeitlichen Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Abstrom von Braunkohleabraumkippen. Dazu bedarf es der Bearbeitung zweier Hauptaspekte: Zum einen ist das Verständnis für die geohydraulischen und hydrogeochemischen Prozesse innerhalb der Kippe zu verbessern. Deren modellhafte Abbildung und Quantifizierung gestattet dann die Prognose der Kippengrundwasserbeschaffenheit zum Abstromzeitpunkt. Zum anderen bedarf es der Modellierung des Abstroms der Kippengrundwässer in die den Kippenkörper umgebenden Grundwasserleiter, unter Berücksichtigung der wesentlichen hydrogeochemischen Wechselwirkungen. Es soll dabei eine Methodik aufgezeigt werden, die auf die Spezifika des Mitteldeutschen und Niederlausitzer Braunkohlereviere ausgerichtet ist. Die Bearbeitung erfolgte an den Modellstandorten Espenhain (Mitteldeutsches Revier) und Jänschwalde (Niederlausitzer Revier). Der Modellstandort Espenhain kennzeichnet einen bereits stillgelegten Tagebau. Im Gegensatz dazu wird der Tagebau Jänschwalde noch bis ca. 2019 betrieben werden.

Die so abgeleitete Methodik hat auf Grund des internationalen Belangs der Energieerzeugung aus Braunkohle, jedoch auch eine über die ostdeutschen Reviere hinausgehende Bedeutung. MILOJCIC [2000] zeigt den Stellenwert der Energieerzeugung aus Braunkohle in Europa auf. Danach erfolgten 1998 in Griechenland, Bosnien-Herzegowina und Tschechien 75-50 % der Nettostromerzeugung aus Braunkohle. Weiterhin ist der Anteil an der Stromgewinnung in Polen (36%), Bulgarien (35%) der Türkei (30%) und Rumänien (24%) zu beachten. Diese vier Länder wiesen damit ein zu Deutschland (25%) vergleichbares prozentuales Niveau auf, wenn auch die absolute Fördermenge dieser vier Länder zusammen (179 Mio. t) nur geringfügig die deutsche Braunkohleförderung (166 Mio. t) überstieg.

Die vorliegende Drucklegung der Dissertation wurde durch einen Druckkostenzuschuss der Friedrich-Stammerger Stiftung ermöglicht, für den ich mich ebenso bedanken möchte, wie für die freundliche, konstruktive Zusammenarbeit beim Druck mit Herrn Prof. Dr. M. Störr.

Grundlage der Schrift ist meine Dissertation an der TU Bergakademie Freiberg die aus der Bearbeitung von Forschungsprojekten im Auftrag von BMBF, LMBV bzw. der LAUBAG, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau der TU Bergakademie Freiberg resultiert.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Entstehung der Dissertation durch Diskussionen, Zuarbeiten, Hilfestellungen, Schulterklopfen, ... unterstützt haben. Auf Grund des zur Verfügung stehenden Platzes ist dies nicht namentlich möglich, die zu benennenden mögen es mir nachsehen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. F. Häfner (Freiberg) sage ich Dank für den Rückhalt und Freiraum den er mir gab. Herrn Prof. Dr. L. Luckner (Dresden) und Herrn Prof. Dr. G. Teutsch (Tübingen) sei gedankt dafür, dass sie sich die Zeit zur Begutachtung dieser Arbeit nahmen.