Z. geol. Wiss., 23 (5/6), 795 - 808, Berlin, Dezember 1995

Die Flutung des ehemaligen Uranbergwerks Niederschlema/Alberoda der SDAG Wismut

von CHRISTIAN WOLKERSDORFER, Buntenbock

mit 4 Abbildungen und 6 Tabellen

Zusammenfassung

Die hydrogeochemischen und hydrodynamischen Verhältnisse im Grubenwasser des ehemaligen Uranbergwerks Niederschlema/Alberoda werden auf der Grundlage von Wasseranalysen und physikochemischen Messungen beschrieben. Aus der Menge des im Bergwerk verbliebenen Schadstoffinventars und der hydrogeochemisch-hydrodynamischen Situation werden Schlüsse für die künftige Entwicklung des Flutungsablaufs gezogen. Daraus läßt sich folgern, daß eine Wasseraufbereitungsanlage durch den Bau vertikaler Verdämmungen in Verbindung mit Wetlands vermeidbar ist.

Summary

This paper presents the results of hydrogeochemical and hydrodynamical investigations within the mine water of the former Niederschlema/Alberoda uranium mine, situated in the Saxonian Erzgebirge (Ore Mountains). On the basis of mineralogical and geological data together with the above mentioned results the future development of the mine water is predicted. By constructing vertical dams, groutings and wetlands, a water treatment plant, currently planned by the Wismut company, might be obsolete.

Einleitung

Das Bergwerk Niederschlema/Alberoda, in dem die SDAG Wismut (Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft) bis 1990 etwa 81.000 Tonnen Uran produzierte, liegt 30 km südwestlich von Chemnitz im Freistaat Sachsen (Abb.1). Aus ökonomischen und umweltpolitischen Gründen mußte die Wismut 1990 offiziell ihre Uranproduktion einstellen und begann damit, die Sanierung des etwa 2000 m tiefen Bergwerks Niederschlema/Alberoda zu planen (RUNGE & BÖTTCHER 1994). Ergebnis dieser Planung waren mehrere Sanierungskonzepte. In diesen schlug die SDAG Wismut bereits vor, das Bergwerk zu fluten und das Grubenwasser nach Flutungsende mittels einer Wasseraufbereitung zu reinigen (GATZWEILER & MAGER 1993; MAGER & VELS 1993).

Am 2. Juli 1990 stellte die Wismut die Sümpfung der Sohle -1800 ein (WISMUT 1993) und begann am 11. Januar 1991 mit der Sohle -1755 die kontrollierte Flutung des 36 Millionen m^3 Hohlraum umfassenden Bergwerks Niederschlema/Alberoda. Gleichzeitig gab die Wismut mehrere Gutachten in Auftrag, um die Flutung zu prognostizieren, Angaben zu regionalen CLARKE-Werten der Lagerstätte zu liefern oder Aussagen zu den hydrogeologischen Verhältnissen zu treffen. Ziel dieser Gutachten ist es, Daten für die physikalisch-chemische Behandlung des Grubenwassers (Wasseraufbereitung) nach Abschluß der Flutung zu gewinnen, um die Kapazität einer möglichen Wasseraufbereitungsanlage zu planen. Ein Teil der Gutachten soll nach Möglichkeiten suchen, den Schadstoffaustrag in die Anthroposphäre auf ein Minimum zu reduzieren (MERKEL & HELLING 1995).

Im folgenden Beitrag werden die wichtigsten Ergebnisse eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Forschungsprojekts an der TU Clausthal vorgestellt, das durch eine Kooperation zwischen der Wismut GmbH und der TU Clausthal entstand (REIK 1996; WOLKERSDORFER 1996a). Neben einer Darstellung der hydrogeochemischen Verhältnisse der Flutungswässer und der Schadstoffmobilisation sollen die prinzipiellen hydrodynamischen Vorgänge während der Flutung dargelegt werden. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Zusammenhänge ablesen, die eine Prognose des künftigen Flutungsverlaufs ermöglichen. Abschließend soll eine

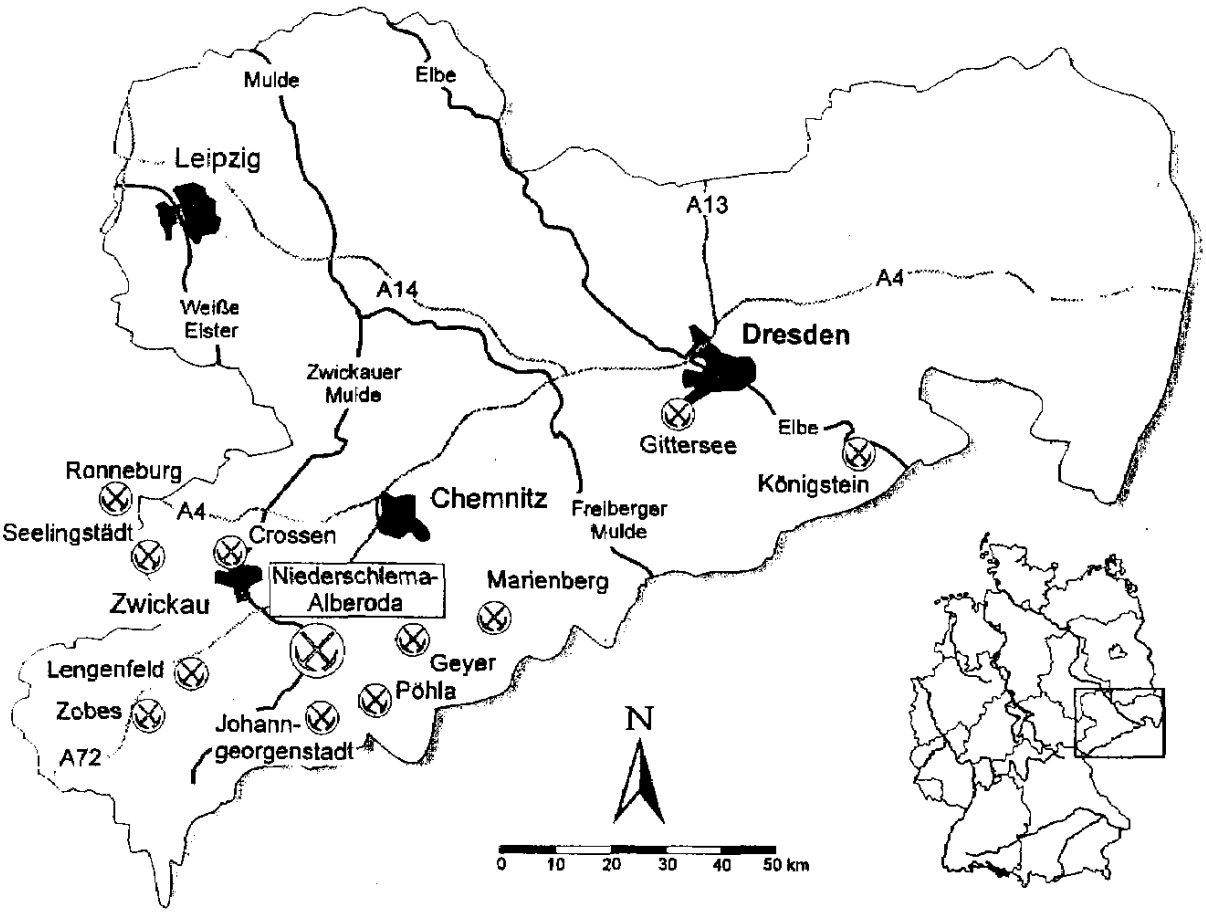

Abb. 1. Übersichtskarte Sachsens mit den wichtigsten Uranerzlagerstätten und der Lage von Schacht 371 des Bergwerks Niederschlema/Alberoda. Zusätzlich die Standorte der Erzaufbereitungen Seelingstädt und Crossen sowie des Tagebaus bei Ronneburg (aus WOLKERSDORFER 1996a)

Alternative zur geplanten Wasseraufbereitungsanlage der Wismut GmbH vorgestellt werden, die aus obigen Untersuchungen und Literaturrecherchen resultiert.

Weder in den von der Wismut selbst verfaßten Beiträgen noch in anderen Artikeln ist eine einheitliche Verwendung der Bergwerksbezeichungen festzustellen. Daher soll hier die Bezeichnung „Bergwerk Niederschlema/Alberoda" in dem Sinne verstanden werden, daß damit alle Grubenräume der ehemaligen Objekte 2 und 9 der SDAG Wismut gemeint sind. Im einzelnen handelt es sich um die vom Bergwerk Schlema/Alberoda aufgeschlossenen Lagerstätten Oberschlema und Niederschlema/Alberoda.

Flutungsablauf

Die Flutung des Bergwerks Niederschlema/Alberoda erfolgt aus wirtschaftlichen, geotechnischen und radiologischen Gründen. Zum einen kostet die Wasserhaltung jährlich einen beträchtlichen finanziellen Aufwand, zum anderen besteht durch die offenen Grubenbauten die Gefahr von Gebirgsschlägen und des Austritts von Radon in die Umwelt. Ein weiterer Grund für die Flutung des Bergwerks Niederschlema/Alberoda ist hydrogeochemischer Natur, da die Flutung prinzipiell die hydrogeologische Situation vor Bergbaubeginn wieder herstellt. Dies vermindert, infolge einer deutlich verringerten Sauerstoffzufuhr, die Disulfidoxidation und dementsprechend die Bildung saurer Grubenwässer (FERNANDEZ-RUBIO et al. 1987).

Im Gegensatz zu anderen Bergwerken, in denen der mögliche Flutungsverlauf vor Beginn genau untersucht wurde (z.B. AURADA 1970; BROWN 1982; HANZLIK & VYDRA 1985; ROGOŽ 1994; BANKS 1994; PFEUFER 1991; KESSERÜ et al. 1982), gab es für das Bergwerk Niederschle-

ma/Alberoda keinen Flutungsplan auf der Basis hydrogeologischer und hydrodynamischer Betrachtungen. 1989 und 1990 führte die SDAG Wismut zwar Laborversuche mit dem Ziel durch, die Schadstoffausträge nach dem Ende einer möglichen Flutung abzuschätzen (WISMUT 1991), ohne jedoch zu konkreten Zahlenwerten für das Flutungsende zu kommen.

Nachdem am 11. Januar 1991 die Grubenwasserpumpen für die untersten Sohlen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda abgeschaltet worden waren, begann der Wasserstand des Grubenwassers durch zulaufende Sickerwässer kontinuierlich anzusteigen. Diese meteorischen Wässer entstammen der bis 240 m mächtigen Infiltrationszone (Sickerzone) im tagesnahen Bereich und untergeordnet Störungen der Lagerstätte (WISMUT 1991; WOLKERSDORFER 1996a). Mitte 1994 erreichte die Wasseroberfläche die Hauptsohle -990, womit sich etwa 9 Millionen m³ Wasser im Bergwerk befanden. Voraussichtlich Ende 1996 soll die letzte umfassende Hauptsohle -540 und damit 19 Millionen m³ Hohlraum geflutet sein. Den bisherigen Prognosen zufolge wird die Flutung bis ins Jahr 2001/2 andauern (WISMUT 1993, BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT 1995).

Die derzeit praktizierte kontrollierte Flutung im Bergwerk Niederschlema/Alberoda besteht darin, so viel Sickerwässer wie möglich auf der Sohle -540 aufzufangen und nach übertage in das Bohrbachstaubecken zu pumpen. Von dort aus fließt es weiter in die Vorflut Zwickauer Mulde. Ziel dieser kontrollierten Flutung ist unter anderem, Zeit zu gewinnen, um die Vorbereitungen für eine Wasseraufbereitung zu treffen (WISMUT 1993). Ende 1995 flossen dem Bergwerk täglich insgesamt 9.000 ... 15.000 m³ Sickerwässer zu, von denen 5.000 ... 10.000 m³ nach übertage gepumpt werden konnten. Weitere 6.000 ... 8.000 m³ entstammen dem Einzugsgebiet des ehemaligen Betriebsteils Oberschlema und fließen über den Markus-Semmler-Stollen ebenfalls in die Zwickauer Mulde.

In zahlreichen gefluteten Bergwerken bildet sich im Grubenwasser eine stabile qualitative Schichtung aus (VESELIČ; NORTON; pers. Mitt.). Wie die Untersuchungen von LADWIG (1985) und ERICKSON et al. (1982) belegen, kommt in fünf von neun untersuchten Schächten qualitativ besseres über schlechterem Wasser zu liegen. Charakteristikum für die Schichtung des Wasserkörpers ist unter anderem eine plötzliche pH-Wert-Erniedrigung, an der zugleich der Sulfatgehalt ansteigt. Gründe für die Schichtung können Wasserzuflüsse in die jeweiligen Schächte oder eine Dichteschichtung ähnlich der in Seen sein (ERICKSON et al. 1982).

Tab. 1. Säureproduktionspotential (APP), Neutralisationspotential (NP) und Nettoneutralisationspotential (Net NP) von Gesteinen der Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. MgO, CaO, S-SO_4^{2-} und CO_2 (in %) aus ZETZSCHE (1994). Mit * gekennzeichnete Werte nach WILDNER (1995, pers. Mitt.). APP, NP und Net NP in g kg^{-1} $CaCO_3$. ud: homogener Metadiabas (Oberdevon), td: gebänderter Metadiabas (Oberdevon), sk: Hornfels (Kontaktmetamorphit), ks/l: Alaun- und Kieselschiefer (Untere Graptolithenschiefer, Silur), ks/k: Ockerkalk (Silur), ds: Dunkle Phyllite (Gräfenthal Gruppe), s: Helle Phyllite (Phycoden Folge), qs: Hauptquarzit (Gräfenthal Gruppe), G: Granit, Kb/Kh: Lamprophyr. MgO und CaO wurden ihrem Verhältnis und dem CO_2-Gehalt entsprechend in $MgCO_3$ und $CaCO_3$ umgerechnet (aus WOLKERSDORFER 1996a)

	ud	td	sk	ks/l	ks/k	ds	s	qs	G	Kb/Kh
MgO	5,30	4,30	1,70	1,68	5,70	2,94	2,11	1,30	0,64	4,14
CaO	8,40	11,75	0,59	1,64	28,88	0,95	0,51	0,56	1,28	5,84
S(ges)	0,2*	0,4*	0,05*	1,7*	1,2*	0,2*	0,1*	—	0,1*	0,2*
S-SO_4^{2-}	<0,10	<0,10	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	—		
CO_2	0,18	0,34	0,30	0,18	25,25	0,51	0,45	0,38	0,3*	6,43
Pyrit	0,3*	0,7*	—	3*	2*	0,3*	0,2*	—	0,2*	0,3*
$MgCO_3$	0,3	0,4	0,7	0,3	16,4	1,3	1,2	—	0,4	9,6
$CaCO_3$	0,3	0,8	0,2	0,3	70,8	0,3	0,2	—	0,6	11,6
APP	6	13	2	53	38	6	3	—	3	6
NP	6	12	11	6	903	18	16	—	11	230
Net NP	0	-1	9	-47	865	12	13	—	8	224

Hydrogeochemische Charakterisierung des Flutungswassers

Unter dem Begriff Flutungswasser sollen im folgenden alle Wässer zusammengefaßt werden, die dem Grubengebäude des Bergwerks zu- oder aus ihm abfließen. Im einzelnen handelt es sich dabei um die natürlich zufließenden, teilweise nach übertage gepumpten Sickerwässer (Typ S, die Wismut GmbH verwendet den Terminus „geologische Infiltrationswässer"), das ansteigende Grubenwasser in den Schächten, Strecken und den Abbauräumen (Typ G) sowie Sickerwasser, das sich an unterschiedlichen Stellen des Bergwerks ansammelt und nicht mit dem Grubenwasser in Verbindung steht (Typ I, intermediäres Wasser).

Solange in den Grubenhohlräumen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda ausreichend Sauerstoff und Wasser verfügbar ist, kommt es an den Oberflächen der Auffahrungen zur mikrobakteriell katalysierten Verwitterung der Minerale in den Gesteinen und Erzgängen (NORDSTROM 1977). Lösungs- und Redoxvorgänge führen dabei zur Bildung sekundärer Minerale, die teilweise leichter mobilisierbar sind als die Primärminerale. Wichtigster dieser Verwitterungsvorgänge ist die Oxidation sulfidischer Verbindungen (z.B. Pyrit, Markasit, Galenit) zu leicht löslichen Sulfaten, wobei der Pyritoxidation die größte Bedeutung zukommt (STUMM & MORGAN 1981). Gleichzeitig bildet sich Säure, die zur Lösung weiterer Minerale führt und zur pH-Wert Erniedrigung

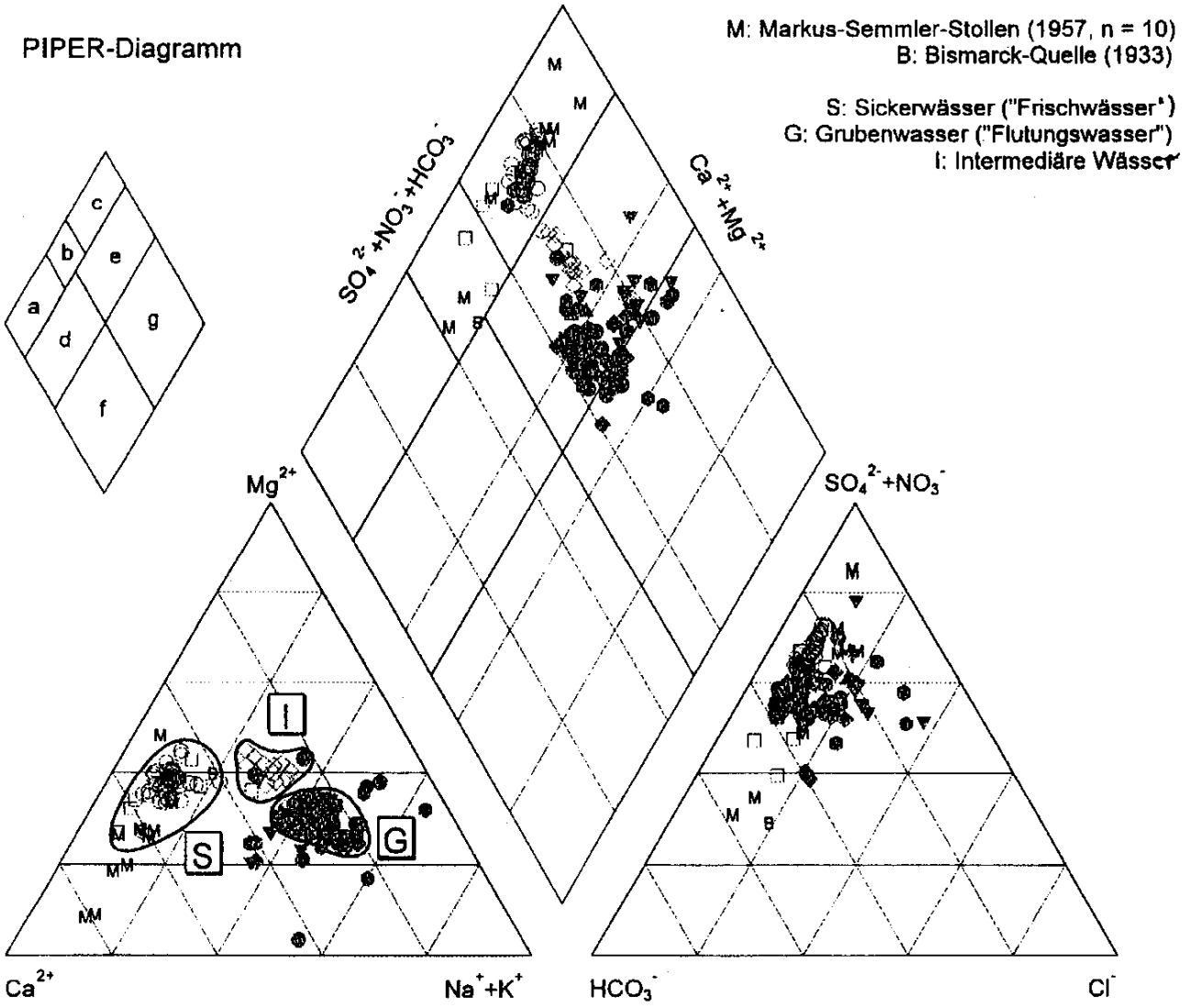

Abb. 2. PIPER-Diagramm der Wasseranalysen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda
212 Wertepaare, zusätzlich 10 ältere Analysen aus dem Markus-Semmler-Stollen und eine aus der Bismarckquelle (aus WOLKERSDORFER 1996a)
kleine Grafik: Typendiagramm nach FURTAK & LANGGUTH (dieses aus HÖLTING 1992); offene Symbole: Sickerwasser; gerasterte Symbole: Grubenwasser; offene Rauten: intermediäres Wasser

Tab. 2. Mittelwerte ($\bar{x}$), Probenzahl (n), Standardabweichungen (s) und Meßeinheiten der analysierten und ausreißerfreien Parameter von Niederschlema/Alberoda getrennt für Wässer der Typen S I, G Standardabweichungen wurde nur für $n \geq 3$ angegeben; bei $n = 1$ entspricht der Wert in der Spalte dem Meßwert; CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf. Anzahl der Dezimalstellen wurde so gewählt, daß der kleinste der drei Werte noch wenigstens eine gültige Stelle hat, minimal jedoch zwei Stellen (nach WOLKERSDORFER 1996a, Analysen großteils durch die Wismut GmbH zur Verfügung gestellt)

		Typ S			Typ I			Typ G		
Parameter	Einheit	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s	n	$\bar{x}$	s
Temperatur	°C	104	16,96	2,28	12	25,55	4,00	165	35,38	4,44
Leitfähigkeit	mS cm^{-1}	140	1,06	0,19	19	1,48	0,15	163	3,31	0,59
Eh-Wert	mV	8	404,13	14,00	5	242,60	140,54	46	282,57	132,11
pH-Wert	-	166	7,78	0,44	28	7,65	0,53	246	7,11	0,39
Filterrückstand	mg l^{-1}	98	21,23	31,08	13	29,95	39,70	130	61,09	85,76
Abdampfrückstand	mg l^{-1}	74	732,54	123,50	28	1101,57	431,37	199	2617,81	585,95
CSB	mg l^{-1}	—	—	—	—	—	—	66	70,92	10,90
Ca^{2+}	mg l^{-1}	75	120,08	18,20	29	109,92	43,97	213	222,19	61,27
Mg^{2+}	mg l^{-1}	75	57,18	15,37	29	78,33	12,50	213	148,36	46,40
Na^{+}	mg l^{-1}	49	30,63	8,54	18	137,80	69,23	141	378,48	105,91
K^{+}	mg l^{-1}	36	4,36	1,07	18	9,73	7,11	119	37,14	4,85
Fe gesamt	mg l^{-1}	53	0,10	0,13	9	0,33	0,37	98	2,66	2,31
Fe^{2+}	mg l^{-1}	5	0,02	0,01	10	0,11	0,07	51	2,46	2,18
Fe^{3+}	mg l^{-1}	4	0,04	0,02	8	0,59	0,87	34	1,60	1,95
Mn gesamt	mg l^{-1}	13	0,26	0,82	5	0,51	1,01	158	2,80	1,21
NH_4^{+}	mg l^{-1}	2	0,07	—	2	0,25	—	58	0,68	0,76
Sr^{2+}	mg l^{-1}	8	0,99	0,39	—	—	—	17	2,64	0,48
SO_4^{2-}	mg l^{-1}	150	354,03	57,57	29	519,93	105,28	213	1138,36	263,68
Cl^{-}	mg l^{-1}	156	37,68	7,40	29	63,98	44,58	212	142,36	33,38
HCO_3^{-}	mg l^{-1}	74	187,65	37,47	28	270,53	82,30	209	889,52	264,71
NO_3^{-}	mg l^{-1}	143	9,18	1,90	25	2,88	1,07	146	2,17	1,54
NO_2^{-}	mg l^{-1}	—	—	—	4	0,03	0,02	36	0,06	0,12
CO_3^{2-}	mg l^{-1}	9	20,62	15,48	9	18,04	4,78	7	23,14	17,47
PO_4^{3-}	mg l^{-1}	14	0,14	0,10	13	0,29	0,10	72	4,42	2,07
F^{-}	mg l^{-1}	12	0,68	0,28	7	1,63	0,11	19	2,08	0,10
Gesamthärte	°d	154	30,24	3,86	29	33,28	7,50	213	65,21	15,86
Karbonathärte	°d	41	8,53	1,44	16	12,04	0,90	106	42,09	8,41
Nichtkarbonathärte	°d	36	19,54	2,98	12	19,33	2,39	83	28,02	6,30
O_2	mg l^{-1}	74	10,50	3,88	12	7,96	5,03	84	2,54	2,64
Al	mg l^{-1}	21	0,21	0,02	11	0,26	0,25	62	0,37	0,22
As	mg l^{-1}	180	0,13	0,05	29	0,64	1,00	264	4,71	2,08
Ba	mg l^{-1}	3	0,039	0,001	1	0,020	—	12	0,138	0,179
Co	mg l^{-1}	2	0,01	—	1	0,01	—	18	0,02	0,02
Cr	mg l^{-1}	1	0,003	—	1	0,015	—	28	0,005	0,006
Cu	mg l^{-1}	11	0,02	0,03	6	0,03	0,03	38	0,03	0,03
H_2SiO_3	mg l^{-1}	16	15,89	1,23	16	15,48	2,26	75	32,49	7,06
Mo	mg l^{-1}	2	0,027	—	3	0,031	0,002	10	0,199	0,179
Ni	mg l^{-1}	15	0,029	0,007	5	0,020	0,001	28	0,030	0,021
Pb	mg l^{-1}	9	0,005	0,003	11	0,008	0,007	39	0,011	0,008
Ra	mBq l^{-1}	86	218,03	183,06	25	565,32	286,89	141	2094,09	1013,33
U	mg l^{-1}	176	0,78	0,30	28	2,07	0,50	260	2,82	0,90
Zn	mg l^{-1}	25	0,03	0,03	14	0,12	0,18	66	0,11	0,14

beiträgt. Wie die Untersuchungen zeigen, ist das Grubenwasser im Bergwerk Niederschlema/Alberoda gut gepuffert und wird auch langfristig nicht versauern (WOLKERSDORFER 1996a), da das gewichtete Nettoneutralisationspotential der Gesteine 75 g kg^{-1} $CaCO_3$ beträgt (Tab. 1). Von allen Schadstoffen, die im Grubenwasser des Bergwerks Niederschlema/Alberoda gelöst sind, gelten Arsen, Uran und Radium als besonderes Problem im Zusammenhang mit der Flutung.

Wie gezeigt werden kann, weisen die drei Wassertypen im Bergwerk charakteristische chemische Eigenschaften auf, die es erlauben, sie gegeneinander abzugrenzen. Aus statistischen Untersuchungen von 477 Wasseranalysen zwischen 12.4.1990 und 20.12.1994 ergeben sich Mischungslücken, die vor allem im Kationendreieck des PIPER-Diagramms (Abb. 2), aber auch im log-As-Ca-U-Diagramm deutlich werden. Besonders aus den Berechnungen zum log-As-Ca-U-Diagramm ist ersichtlich, daß es scheinbar keine kontinuierliche Entwicklung von Wässern des Typs S zu denen des Typs G gibt (WOLKERSDORFER 1996a).

Zwei Vorgänge führen zu den hohen Schadstoffkonzentrationen im Grubenwasser. Zum einen transportieren meteorische Wässer (Sickerwässer) die Reaktionsprodukte der Verwitterungsreaktionen in das Grubenwasser. Da diese Wässer bereits seit langer Zeit auf mehr oder weniger gleichbleibenden Fließwegen in das Grubengebäude sickern, sind die Reaktionsprodukte weitgehend abtransportiert und ist deren Beitrag entsprechend minimal. Gleichwohl geht aus Wasseranalysen der SDAG Wismut hervor, daß die Mineralisation der Sickerwässer zum Grubentiefsten hin von etwa 500 mg l^{-1} auf 4000 mg l^{-1} zunahm (WISMUT 1991). Zum anderen mobilisiert das ansteigende Grubenwasser die leicht löslichen, oxidierten Feststoffphasen an den Grubenwänden, wodurch sich die Massenkonzentrationen im Grubenwasser bis zur Sättigungskonzentration erhöhen. In den Bergwerksbereichen, die bereits geflutet sind, geht die Pyritoxidation auf ein Minimum zurück, sobald im Grubenwasser nicht mehr genügend Sauerstoff zur Verfügung steht (GARGA et al. 1983). Aus in-situ-Messungen im Grubenwasser, das 10 m unter der Wasseroberfläche entnommen wurde, sind O_2-Gehalte von durchschnittlich 2 mg l^{-1} bei Sättigungen um die 30 % bekannt. Im Blindschacht 1b und im Schacht 296 II b betrug der O_2-Gehalt sogar unter 1 mg l^{-1}, und in einem Laborversuch der SDAG Wismut zur Laugbarkeit stark mineralisierter Gesteine stellten sich durch O_2-Zehrung Gehalte von 0 mg l^{-1} ein (WISMUT 1991; WOLKERSDORFER 1996a).

Tab. 2 zeigt anhand ausgewählter Analysenparameter die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften der im Bergwerk Niederschlema/Alberoda analysierten Wassertypen. Wasser des Typs S entspricht im wesentlichen den Wässern, die 1957 aus dem Markus-Semmler-Stollen analysiert wurden (LEUTWEIN & WEISE 1962) und größenordnungsmäßig den heutigen Hintergrundwert darstellen dürften. Sie entsprechen außerdem den behördlich genehmigten Ablaufwerten der Wasserbehandlungsanlagen Pöhla und Helmsdorf (LUDEWIG 1996; Tab. 3).

Tab. 3. Behördlich genehmigte Ablaufwerte der Wasserbehandlungsanlagen Pöhla und Helmsdorf (LUDEWIG 1996), Mittelwerte der Wassertypen S und G sowie prognostizierte Durchschnittswerte des Grubenwassers für das Jahr 2000 (WOLKERSDORFER 1996a); FR: Filterrückstand

		Wasserbehandlung in		Niederschlema/Alberoda		Prognose
Parameter		Pöhla	Helmsdorf	Typ S	Typ G	Typ G 2000
U	mg l^{-1}	0,2	0,5	0,8	2,8	6
Ra	mBq l^{-1}	300	200	220	2100	5000
As	mg l^{-1}	0,1	0,3	0,1	4,7	1
Fe	mg l^{-1}	2,0	--	0,1	2,7	--
Mn	mg l^{-1}	2,0	--	0,3	2,8	--
FR	mg l^{-1}	20,0	--	21,2	61,1	--

Bei der zeitlichen Entwicklung der Massenkonzentrationen des Grubenwassers ist den wichtigsten Parametern ein kontinuierlicher, parabelähnlicher Anstieg von Anfang 1991 bis Ende 1994 gemeinsam, wobei die Konzentrations-Zeit-Kurven denen von Laborexperimenten ähnlich sind (MATTHESS 1994). Seit dem ersten Quartal 1994 sind die starken Anstiege auf hohem Niveau prinzipiell abgeschlossen. Hingegen ist beim Arsen und Phosphat bereits ein Rückgang erkennbar, während Uran bis zum Ende des Untersuchungszeitraums anstieg. Verantwortlich dafür ist neben dem geochemischen Verhalten dieser Elemente (z.B. Komplexierung oder Sorption) eine Abnahme der Arsengehalte in den Erzgängen der oberen Sohlen, wohingegen Uran in etwa gleichbleibenden Mengen vorkommt (WISMUT 1991). Ca-, Mg- und Hydrogenkarbonatgehalte waren seit Anfang 1994 in etwa konstant, was auf eine Gleichgewichtseinstellung hindeutet, die sich in ähnlicher Weise aus den chemisch-thermodynamischen Berechnungen des Sättigungskoeffizienten von Calcit und Gips ergibt (WOLKERSDORFER 1996a, 1996b).

Tendenziell nähern sich neben Calcit und Gips auch andere Feststoffphasen asymptotisch einer Gleichgewichtseinstellung. Anders jedoch bei den Arsen- und Uranphasen, die im Grubenwasser in jeweils unterschiedlichen Spezies vorliegen, wobei Arsen im Mittel um die 30 % kolloidal gebunden ist (Tab. 4). Obgleich sich die am wenigsten untersättigten Arsen- und Uranminerale

Tab. 4. Verhältnis von Arsen(III) zu Arsen(V) und von kolloidal sowie kationisch und anionisch gebundenen Arsen spezies im Grubenwasser des Bergwerks Niederschlema/Alberoda
Arsenbestimmung mit Perklin Elmer Hybrid AAS, Kolloide mit Ultrafilter Amicon 500 D, Kationen/Anionenaustauscher Dowex III/IV, n.b.: nicht bestimmt (verändert aus WOLKERSDORFER 1996a)

Datum	Schacht	As ges mg l^{-1}	As^{3+}	As^{5+}	Arsen kolloidal	Arsen anionisch	Arsen kationisch	pH	Eh mV
25.01.93	366 II b	11,95	4,2 %	95,8 %	21,8 %	92,2 %	7,8 %	6,4	150
26.10.93	372 b	8,41	12,0 %	88,0 %	55,2 %	85,9 %	14,1 %	7,0	n.b.
26.10.93	371 II b	7,96	6,0 %	94,0 %	42,5 %	81,5 %	18,5 %	7,0	n.b.
26.10.93	366 II b	8,28	9,4 %	90,6 %	39,7 %	82,8 %	17,2 %	7,0	n.b.
15.03.94	366 II b	11,75	1,8 %	98,2 %	29,1 %	68,5 %	31,5 %	6,8	n.b.
15.03.94	372 b	11,08	1,8 %	98,2 %	23,9 %	68,3 %	31,7 %	n.b.	n.b.
01.12.94	366 II b	2,861	5,9 %	94,1 %	24,9 %	67,7 %	32,3 %	7,0	360

asymptotisch einem bestimmten Sättigungskoeffizienten nähern (SI $\approx$ -4), sind sie bei den gemessenen pH- und Redox-Werten nach wie vor weit davon entfernt, mit dem Grubenwasser im Gleichgewicht zu stehen. Dies ist ein Hinweis darauf, daß für die Uran- und Arsenkonzentrationen im Grubenwasser weniger chemisch-thermodynamische Gleichgewichtseinstellungen als Lösung und Sorption eine Rolle spielen (WOLKERSDORFER 1996a).

Insgesamt zeigen die chemisch-thermodynamischen Berechnungen, daß sich fast alle für die chemische Zusammensetzung des Grubenwassers maßgeblichen Phasen (begrenzende bzw. kontrollierende Phasen) nahe dem Sättigungsgleichgewicht befinden. Da das Nettoneutralisationspotential auch künftig eine gute Pufferung des Grubenwassers nahelegt, keine Änderung des Redoxpotentials zu erwarten ist, die meisten Wasserinhaltsstoffe nahe ihrer Sättigungskonzentration sind und ein genügend großes Stoffpotential zur Mobilisierung vorhanden ist, muß infolgedessen nicht mit wesentlichen Änderungen des Grubenwasserchemismus gerechnet werden.

Hydrodynamische Vorgänge während der Flutung

Es soll an dieser Stelle nicht auf Details und geringfügige Unterschiede des hydrodynamischen Verhaltens in den verschiedenen Schächten eingegangen werden, wie sie anderenorts beschrieben

sind (WOLKERSDORFER 1994; 1996a). Auch nicht die Ergebnisse von teilweisen Modellierungen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda sind Gegenstand dieses Abschnitts. Vielmehr sollen Gemeinsamkeiten herausgestellt werden, die sich aus den Auswertungen der in-situ-Messungen ergeben und die Schlußfolgerungen für eine mögliche Wasserreinigung ermöglichen.

Um diese hydrodynamischen Verhältnisse und damit die Transportvorgänge im Bergwerk zu klären, veranlaßten die Wismut GmbH und die TU Clausthal zahlreiche physikochemische Messungen (Temperatur, Leitfähigkeit, Redoxpotential, pH-Wert) und zwei Tracerversuche mit Sporen von *Lycopodium Clavatum* (Bärlapp). Diese basieren auf einem Untersuchungskonzept, das der Wismut Anfang Juni 1992 vom Autor vorgelegt wurde und ein kontinuierliches Monitoring des Flutungsablaufs gewährleisten sollte. Zwischen dem 5.9.1992 und dem 2.12.1994 fielen über 200 Meßreihen in sieben Schächten an, die auf ihre räumlichen und zeitlichen Veränderungen hin untersucht wurden.

Wie in anderen Bergwerken beobachtbar (UERPMANN 1980; HERBERT 1989; ERICKSON et al. 1982), gibt es auch im Bergwerk Niederschlema/Alberoda neben Bereichen mit vertikal mehr oder weniger gleichbleibenden physikalisch-chemischen Zuständen solche, in denen sich die Meßwerte kontinuierlich oder sprunghaft ändern. BAU & TORRANCE (1981a, 1981b) wiesen in Laborversuchen nach, daß Bereiche, in denen die Temperatur und die Strömungsrichtung an einem festgelegten Ort um einen bestimmten Mittelwert oszillieren, durch konvektiven Transport gekennzeichnet sind. In Laborexperimenten mit Farbstoffen zeigte UERPMANN (1980), daß sich in Zonen gleicher Temperatur relativ schnell eine einheitliche Farbstoffkonzentration einstellt. Ein solches Verhalten ließ sich durch Temperaturmessungen im Bergwerk Niederschlema/Alberoda in ähnlicher Weise belegen. Zwei Tracerversuche zeigen, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in den Bereichen mit konvektivem Transport im Mittel 6 ... 8 m min^{-1} erreichen (WOLKERSDORFER & TREBUŠAK in Bearbeitung) und die homogene Durchmischung des Grubenwassers in relativ kurzer Zeit sowie über weite Teufenbereiche stattfindet (WOLKERSDORFER 1996a). Als Motor dieser freien Konvektion ist in erster Linie die geothermische Tiefenstufe anzusehen, die im Grubentiefsten zu Gebirgstemperaturen um die 70 °C führt.

Auch Bereiche, die Wismutangaben zufolge abgemauert oder mit Brandtüren verschlossen sein sollen, wurden scheinbar durchströmt, wie der Tracerversuch im November 1995 zeigt. Es muß daher an der Wirksamkeit solcher statisch wenig belastbarer Maßnahmen gezweifelt werden (WOLKERSDORFER & TREBUŠAK in Bearbeitung). Aus den Ergebnissen der Tracerversuche erklärt sich, daß bei gleichzeitiger Wasserbeprobung in weit auseinanderliegenden Schächten (bis zu 4 km) fast immer ähnliche chemische und physikalische Verhältnisse vorhanden waren.

Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Meßreihen, bei denen sich der gemessene Parameter von einer bestimmten Sohle ausgehend nach oben hin ändert. Wie sich aus dem Studium der markscheiderischen Unterlagen ergab, ist die Sohle, ab der die Änderung eintrat, stets die letzte, die mit anderen Grubenbereichen in Verbindung steht. Im Schacht 372 b war dies am 31. März 1993 die Sohle -1305 (Abb. 3), ab der die Leitfähigkeit und die Temperatur kontinuierlich abfallen. Dies ist ein Zeichen dafür, daß der großräumige Transport durch freie Konvektion oberhalb solcher Sohlen unterbunden ist.

UERPMANN (1980) beobachtete in seinen Laborexperimenten mit Farbstoffen, daß in Übergangszonen diffusiver Transport vorherrscht. In solchen Übergangszonen findet bei Dichteunterschieden über 2 g cm^{-3} keine Mischung der über- und unterlagernden Schicht statt (KRANAWETTREISER 1989); sie wirkt gewissermaßen als Barriere. Die Strömungsgeschwindigkeiten in diesen Übergangszonen lagen stets um Größenordnungen unter denen der Konvektionsbereiche.

Prognosen für das Flutungsende

Die Prognose für das Flutungsende dient zwei Zielen. Zum einen sollen die potentiell durch das Grubenwasser laugbaren Restmassen abgeschätzt, zum andern die maximalen Schadstoffgehalte

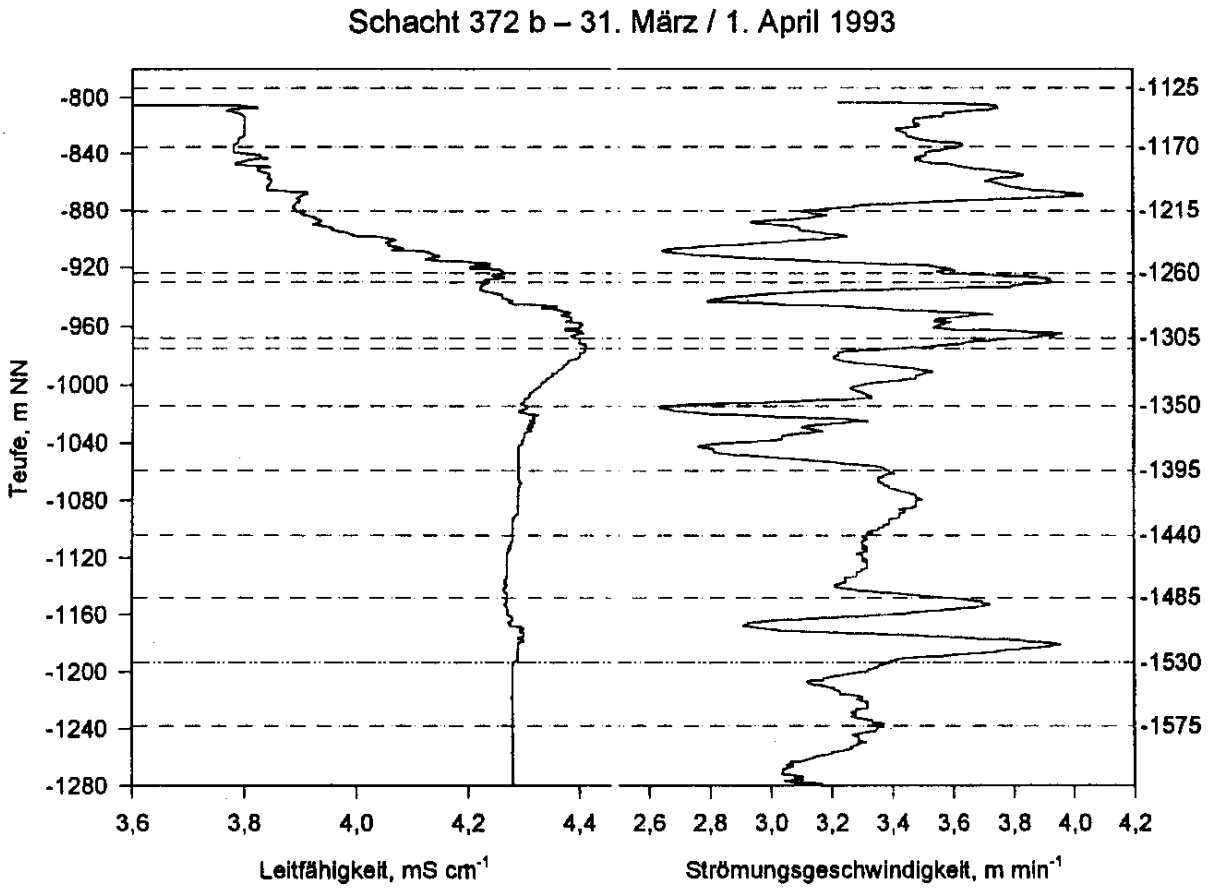

Abb. 3. Strömungsgeschwindigkeit und Leitfähigkeit im Schacht 372 b am 31. März und 1. April 1993. Grafik aus gleitenden Mittelwerten von jeweils 10 Einzelmessungen im Abstand von 0,1 m zusammengestellt (aus WOLKERSDORFER 1996a, verändert nach DFA/C&E 1993/94); Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit spiegeln sich in Änderungen der Leitfähigkeit wider

des Grubenwassers vorhergesagt werden. Exakte Angaben der maximalen Schadstoffmengen im Grubenwasser sind nur schwer möglich, da die genauen Freisetzungsraten nicht bekannt sind. Wichtig für die Stofffreisetzung sind die Größe der Kontaktfläche zwischen Wasser und Gestein, die Kontaktzeit und Temperatur, wobei große Kontaktflächen und lange Kontaktzeiten bei hohen Temperaturen hohe Stoffkonzentrationen nach sich ziehen (MATTHESS 1994).

Um die mobilisierbaren Stoffmengen abzuschätzen, wurden von der SDAG Wismut (WISMUT 1991) überschlägige Rechnungen vorgenommen, die WOLKERSDORFER (1996; die Radiummenge der Auflockerungszone in der dortigen Tab. 55 muß 0,3 g anstatt 0,3 t lauten) präzisierte und ergänzte (Tab.5). Anders als bei der ursprünglichen Wismutprognose, die alle verbliebenen Restmassen als mobilisierbar ansah, wurde davon ausgegangen, daß mittelfristig lediglich die Stoffe in einer 1 mm dicken Verwitterungsrinde um das 5 cm Durchmesser messende Haufwerk, die Versatzmassen, Auffahrungsinnen- und Kluftflächen mobilisierbar sind. Da die Wismut als Durchmesser des Haufwerks und Versatzes 2 cm angibt und nach Beobachtungen im Bergwerk eine 1 mm dicke Verwitterungsrinde als unterer Wert anzunehmen ist, werden die mobilisierbaren Schadstoffmengen der Tab. 5 vermutlich bis um das doppelte höher liegen. Realistische Mengen für das mobilisierbare Uran sind 800 ... 900 t, für Arsen 1.300 ... 1.400 t und für Radium 226 etwa 100 g. Aus diesen Zahlen folgt, daß ein ausreichend großes Schadstoffpotential vorhanden ist, das ins Grubenwasser freigesetzt werden kann. Es muß daher nicht damit gerechnet werden, daß die maximalen Stoffkonzentrationen mittelfristig durch ungenügende Stoffpotentiale begrenzt würden. Vielmehr ist davon auszugehen, daß allein chemisch-thermodynamische Vorgänge, Lösung und Sorption die Stoffkonzentrationen im Grubenwasser begrenzen werden, wobei eine ausreichend große Reaktionskinetik und ein genügend großer Konzentrationsgradient in die Lösung hinein anzunehmen sind.

Tab. 5. Mobilisierbare Schadstoffvorräte im Bergwerk Niederschlema/Alberoda in t, letzte Stelle gerundet (WISMUT 1991; WOLKERSDORFER 1996a). Für das Haufwerksmaterial wurde eine Korngröße von 5 cm und eine Dicke der Verwitterungsrinde von 0,1 cm angenommen. In der Verwitterungsrinde befinden sich dann etwa 11 % der mobilisierbaren Stoffmengen. „Haufwerksmaterial" bezeichnet die gesamten im Haufwerksmaterial, „davon mobilisierbar" die in der Verwitterungsrinde des gebrochenen Materials und „Auflockerungszone" die in der Auflockerungszone um die Grubenbaue vorhandenen Schadstoffgehalte

Element	Haufwerks-material	davon mobilisierbar	Auflockerungs-zone	Summe M_{max}, t
Uran	7000	810	20	830
Arsen	11000	1270	100	1370
Nickel und Kobalt	630	70	260	340
Wismut	70	10	10	20
Zink	1000	120	310	430
Kupfer	700	80	100	180
Blei	300	40	60	100
Antimon	300	40	10	50
Selen	50	10	10	20
Radium 226	0,001	0,0001	$2{,}74 \cdot 10^{-7}$	0,0001

Wie aus verschiedenen Untersuchungen zur Reaktionskinetik bekannt ist, erfolgt die Stofffreisetzung bei Lösungs- bzw. Verwitterungsvorgängen anfänglich relativ schnell, um sich dann zu verlangsamen und asymptotisch der Sättigungskonzentration zu nähern (MATTHESS 1994). Ein entsprechendes Verhalten zeigen die Konzentrations-Zeit-Kurven wichtiger Wasserinhaltsstoffe des Grubenwassers. Zur Prognose künftiger Konzentrationen im Grubenwasser wurden, in Anlehnung an die Vorgehensweise von MARTIN & CRAWFORD (1987), und trotz methodisch bedingter Unsicherheiten, Regressionsanalysen durchgeführt, bei denen Kurvenverläufe mit hohem Regressionskoeffizienten ausgewählt wurden, die vorgenannte Charakteristika widerspiegeln. Die prinzipielle Vorgehensweise ist anderenorts beschrieben worden (WOLKERSDORFER 1996a).

Die Ergebnisse zeigen, daß die schnellen Anstiege der Massenkonzentrationen 1994 (neuere Daten liegen dem Autor aus den verschiedensten Gründen nicht vor) größtenteils abgeklungen waren und sich die Konzentrations-Zeit-Kurven zumeist im Bereich des langsamen asymptotischen Anstiegs befinden (Abb. 4, Tab. 6).

Schlußfolgerungen

Im Bergwerk Niederschlema/Alberoda gibt es neben Bereichen, in denen über große Entfernungen und Höhenunterschiede konvektiver Transport vorherrscht, Bereiche, die nur durch diffusiven Transport gekennzeichnet sind. Die bisherigen in-situ-Maßnahmen der Wismut GmbH, Sohlen mittels Abmauern und Schließen von Brandtüren sowie Wettertüren zu hermetisierten, unterbinden nicht die großräumige Konvektion.

Wie die Prognosen verdeutlichen, ist ein großes, mobilisierbares Schadstoffpotential im Bergwerk verblieben. Wegen des konvektionsbedingt ausgeprägten Konzentrationsgefälles zwischen dem Gestein oder den Restmassen einerseits und dem Grubenwasser andererseits, werden die Schadstoffe ins Wasser hinein mobilisiert. Dadurch erreicht das Grubenwasser mittel- bis langfristig hohe Schadstoffkonzentrationen, denn „free convection loops provide a means for circulating fluids without the use of pumps" (BAU & TORRANCE 1981a).

Oberhalb der Hauptsohle -540 ändert sich die Geometrie des Grubengebäudes, und Hauptsohlen, die viele Schächte gleichzeitig miteinander verbinden, sind nicht mehr vorhanden. Infolge dieser schlechteren hydraulischen Verbindung ist eine *großräumige* freie Konvektion ausgeschlossen, auch wenn Teilbereiche im Niveau der oberen Sohlen (z.B. -60, -30, Markus-Semmler-Stol-

Tab. 6. Prognostizierte Konzentrationen ausgewählter Wasserinhaltsstoffe im Grubenwasser des Bergwerks Niederschlema/Alberoda innerhalb des 95%-Vorhersageintervalls (nach WOLKERSDORFER 1996a)

Parameter	Massenkonzentration Ende 2000	Regressionskoeffizient
Uran	5 ... 7 mg l^{-1}	–
Arsen	max. 4 mg l^{-1}	0,630
Radium 226	3 ... 6 mg l^{-1}	0,256
Abdampfrückstand	3400 ... 4100 mg l^{-1}	0,819
Sulfat	1500 ... 1900 mg l^{-1}	0,826

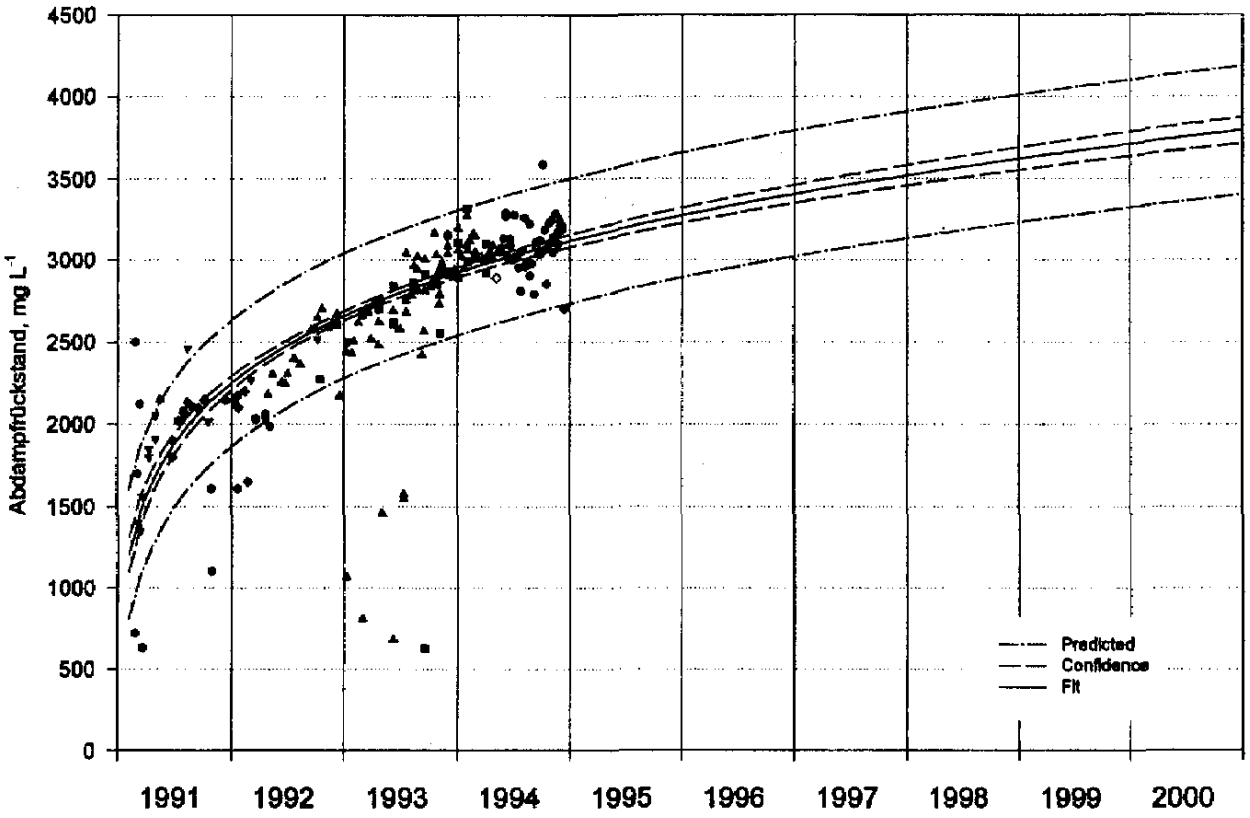

Abb. 4. Regressionskurve des Abdampfrückstands bezüglich der Zeit für Wasser des Typs G bis Ende des Jahres 2000 - 199 Wertepaare (aus WOLKERSDORFER 1996a)
„Fit": Kurvenanpassung; „Confidence": 95%-Konfidenzintervall; „Predicted": 95%-Vorhersageintervall; innerhalb des 95%-Vorhersageintervalls liegen 95 von 100 Werten, die bei Wiederholungsmessungen bestimmt würden; im 95%-Konfidenzintervall kämen 95 von 100 Kurvenanpassungen dieser 100 Wiederholungsmessungen zu liegen

len) eine gute hydraulische Verbindung aufweisen. Es ist daher davon auszugehen, daß der Stofftransport frühestens ab der Hauptsohle -540 weniger gut ausgeprägt sein wird als unterhalb. Zwar sind die Sohlen über Abbaue miteinander verbunden, doch bewirken die verfüllten Restmassen eine Erniedrigung der Strömungsgeschwindigkeit, was eine konvektive Durchmischung verhindert oder sogar unterbindet. Dadurch bilden sich zwischen der Sohle -540 und dem Niveau des Markus-Semmler-Stollens Übergangsschichten aus, wie sie im Schacht 372 b oder in anderen Schächten zwischen dem Überfluten zweier Sohlen beobachtbar sind.

Folglich kommt es im Bergwerk Niederschlema/Alberoda zur Dichteschichtung des Wassers, bei der schwächer schadstoffhaltiges Wasser des Typs S über stark schadstoffhaltigem Wasser des Typs G liegt. Die Grenze zwischen den beiden Wassertypen wird sich dort einstellen, wo beide Typen miteinander im Dichtegleichgewicht stehen. Da die Menge der verbleibenden Wasserzuflüsse in tiefere Teile des Bergwerks über Störungen und Klüfte sowohl absolut als auch im

Verhältnis zum Gesamtvolumen des Grubenwassers relativ gering ist, kommt es nur zu lokalen Einflüssen auf die hydrodynamischen Verhältnisse. Eine Wasseraufbereitungsanlage würde daher Wasser reinigen, dessen Schadstoffgehalte dem geogenen Hintergrundwert entsprechen.

Durch den Einbau einer vertikalen Hermetisierung unterhalb der letzten zu flutenden Sohle kann der Vorgang der Dichteschichtung begünstigt werden. Das wesentliche einer solchen Hermetisierung ist es, die Ausbildung großräumiger Konvektionskreisläufe bis zum Niveau des Wasserlösungsstollens zu unterbinden. Das technische Know-how im Umgang mit den großen dazu notwendigen Betonmassen oder der Ausführung von Barrierebauwerken ist aus dem Bereich des Kavernen-, Tunnel- oder Staudammbaus sowie der Endlagersicherheit bekannt (z.B. GSF 1986, KIPKO et al. 1993).

Da die chemischen Parameter der Sickerwässer (Typ S) im wesentlichen den behördlich genehmigten Ablaufwerten der Wasseraufbereitungsanlagen Pöhla und Helmsdorf entsprechen, die vermutlich auch für das Bergwerk Niederschlema/Alberoda gelten werden, kann schon allein aus diesem Grund auf eine Wasseraufbereitungsanlage verzichtet werden. Zusätzlich können die ablaufenden Wässer, wie in anderen Bergwerken praktiziert (NORTON 1992, 1995), durch ein Wetland geleitet werden, um die Schadstoffe unter die Werte der heutigen Sickerwässer zu senken.

Mittels dieser Vorgehensweise erübrigt sich eine Wasseraufbereitungsanlage für das Bergwerk Niederschlema/Alberoda, wie sie die Wismut GmbH plant und die mehrerer Jahrzehnte zu betreiben wäre.

Danksagung

Ich danke den Mitarbeitern der Wismut GmbH und der C & E GmbH für ihre kritischen Stellungnahmen, die dem Stil dieses Beitrags zugute kamen. Der Verwaltung der Wismut GmbH danke ich für die Erlaubnis, die aus öffentlichen Mitteln bezahlten Primärdaten im Rahmen eines Kooperationsvertrages mit der TU Clausthal veröffentlichen zu dürfen.

Die Arbeit wurde finanziell und ideell gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) Bonn, der Wismut GmbH Chemnitz und der Hanns-Seidel-Stiftung München.

Literatur

AURADA, K. D. (1970): Berechnung des Wiederanstiegsprozesses im Grubengebäude des Kupferschieferbergbaus in der Mansfelder Mulde mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode. – Wasserwirtschaft Wassertechnik, **20**: 264-270.

BANKS, D. (1994): The Abandonment of the Killingdal Sulphide Mine, Norway: a Saga of Acid Mine Drainage and Radioactive Waste Disposal. – Mine Water and the Environment, **13**: 35-48.

BAU, H. H.; TORRANCE, K. E. (1981): On the stability and flow reversal of an asymmetrically heated open convection loop. – J Fluid Mech., **109**: 417-433.

BAU, H. H.; TORRANCE, K. E. (1981): Transient and Steady behavior of an open, symmetrically-heated, free convection loop. – Int. J. Heat Mass Transfer, **24**: 597-609.

BROWN, A. (1982): A validated theory of underground mine flooding. – Proceedings, 1st International Mine Water Congress, Budapest, Hungary: 411-428.

BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT (1995): Wismut - Fortschritte der Stillegung und Sanierung. – BMWI Dokumentation, **370**: 1-34.

C & E CONSULTING UND ENGINEERING GMBH (1994): Abschlußbericht (Teilleistung 6.2) über die Auswahl, Installation und Inbetriebnahme von Meßsystemen zur Flutungskontrolle und Durchführung zusätzlicher Kontrollmessungen. – 14 S.; Chemnitz (Unveröffentlichter Bericht zum Auftrag 1.3.1/8996/938/93).

DFA FERTIGUNGS- UND ANLAGENBAU-GESELLSCHAFT (1993): Bericht über die Durchführung physikalisch-chemischer Messungen im gefluteten Teil des Uranbergwerkes Schlema-Alberoda.– 19 S.; Chemnitz (Unveröffentlichter Bericht).

DFA FERTIGUNGS- UND ANLAGENBAU-GESELLSCHAFT (1994): Zwischenbericht (Teilleistung 6.2) über die Auswahl, Installation und Inbetriebnahme von Meßsystemen zur Flutungskontrolle und Durchführung zusätzlicher Kontrollmessungen. – 10 S.; Chemnitz (Unveröffentlichter Bericht zum Auftrag 1.3.1/8996/938/93).

ERICKSON, P. M.; KLEINMANN, R. L. P.; POSLUSZNY, E. T.; LEONARD-MAYER, P. J. (1982): Hydrogeochemistry of a large mine pool. – Proceedings, 1st International Mine Water Congress, Budapest, Hungary: 27-42.

FERNANDEZ-RUBIO, R.; FERNANDEZ-LORCA, S.; ESTEBAN ARLEGUI, J. (1987): Preventive techniques for controlling acid water in underground mines by flooding. – International Journal of Mine Water, **6**: 39-52.

GARGA, V. K.; SMITH, H. R.; SCHARER, J. M. (1983): Abandonment of acid generating mine tailings. – Proceedings of the Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation, **7**: 613-626.

GATZWEILER, R.; MAGER, D. (1993): Altlasten des Uranbergbaus - Der Sanierungsfall Wismut. – Die Geowissenschaften, **11**: 164-172.

GSF, GESELLSCHAFT FÜR STRAHLEN- UND UMWELTFORSCHUNG MÜNCHEN (1986): Untersuchungen endlagerrelevanter Vorgänge vor, während und nach der Flutung des Kalisalzbergwerkes Hope. Statusseminar zum FE-Projekt Hope am 31. Oktober 1985 in Braunschweig. – gsf-Bericht, 20/86: 286 S.

HANZLIK, J.; VYDRA, J. (1985): Liquidation of abandoned Mine Excavations by Flooding. – Proceedings, 2nd International Mine Water Congress, Granada, Spain: 953-965.

HERBERT, H-J. (1989): Geochemische Vorgänge bei der Flutung des Kalisalzbergwerkes Hope. Abschlußbericht des Teilvorhabens Geochemie des FE-Vorhabens Hope. – 62 S.; Neuherberg (gsf-Bericht).

HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. – 4. Aufl., 415 S.; Stuttgart (Enke).

KESSERÜ, Z.; KEMPF, J.; DUCKSTEIN, L.; CASTI, J. (1982): A bifurcation theory model of minewater inrushes. – Proceedings, 1st International Mine Water Congress, Budapest, Hungary: 346-375.

KIPKO, E.Y. (1993): Grouting of the St. Josef mine in Czechoslovakia.- Mine Water and Environment, **12**: 21-25.

KRANAWETTREISER, J. (1989): Dichteströmungen. – In: BOLLRICH, G. & PREISSLER, G.: Technische Hydromechanik. – 1. Aufl., 328-350 S.; Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).

LADWIG, K. J. (1985): Hydrologic aspects of acid mine drainage control. – Bureau of mines Information Circular, V: 12-18.

LEUTWEIN, F.; WEISE, L. (1962): Hydrogeochemische Untersuchungen an erzgebirgischen Gruben- und Oberflächenwässern. – Geochimica et Cosmochimica Acta, **26**: 1333-1348.

LUDEWIG, J. (1996): Fortgang der Wismut-Sanierung - Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Werner Schulz (Berlin), Antje Hermenau, Steffi Lemke, Vera Lengsfeld und der Fraktion BÜNDINS 90/DIE GRÜNEN. – Deutscher Bundestag Drucksache, 13: 46 S.

MAGER, D.; VELS, B. (1993): Wismut – an example for the uranium industry in eastern Europe? – Forschung, Planung und Betrieb - Preussag AG, **18**: 126-132.

MARTIN, J. D.; CRAWFORD, C. G. (1987): Statistical analysis of surface-water-quality data in and near the coal-mining region of southwestern Indiana, 1957-1980. – U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2291.

MERKEL, B.; HELLING, C. (1995): Proceedings Uranium-Mining and Hydrogeology 1995, Freiberg, Germany. – GeoCongress, **1**: 1-583.

NORDSTROM, D. K. (1977): Hydrogeochemical and microbiological factors affecting the heavy metal chemistry of an acid mine drainage system. – 230 S.; United States (Degree: Doctoral).

NORTON, P. J. (1992): The Control of Acid Mine Drainage with Wetlands. – Mine Water and the Environment, **11**: 27-34.

NORTON, P. J. (1995): Mine Closure and its Effects on Groundwater and the Environment related to Uranium Mining. – Proceedings Uranium-Mining and Hydrogeology, Freiberg, Germany; GeoCongress, **1**: 415-421.

PFEUFER, J. (1991): Maßnahmen zum Schutze des Trinkwassers im Nebengestein bei der Stillegung des Eisenbergwerkes Leonie in Auerbach (Opf.). – Erzmetall, **44**: 30-38.

REIK, G. (1996): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Hydrogeochemische und hydrodynamische Prozesse bei der Flutung von Uranbergwerken am Beispiel der Lagerstätte Niederschlema/Alberoda (Sachsen)" gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unter dem Förderzeichen Re 920/1-2. – 29 S.; Clausthal (Unveröffentlichter Bericht).

ROGOZ, M. (1994): Computer Simulation of the Process of Flooding up a Group of Mines. – Proceedings, 5th International Mine Water Congress, Nottingham, U.K., **1**: 369-377.

RUNGE, W.; BÖTTCHER, J. (1994): Stillegung und Sanierung des ostdeutschen Uranerzbergbaus. – Atomwirtschaft Atomtechnik, **39**: 194-190.

STUMM, W.; MORGAN, J. I. (1981): Aquatic chemistry - An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. – 2. Aufl., 780 S.; New York (Wiley & Sons).

UERPMANN, E-P. (1980): Hydrogeologische Fragen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. – 128 S.; Clausthal (Dissertation TU Clausthal).

WISMUT (1991): Untersuchungen zur Bewertung und Begutachtung der Flutung des Lagerstättenteils bis zur Sohle -990. – ohne S.; Chemnitz (Interne Projektskizze).

WISMUT (1993): Sanierungsfortschritt im Bergwerk Schlema/Alberoda.- Dialog - Werkszeitschrift der Wismut GmbH, **4**: 21-27.

WOLKERSDORFER, C. (1994): Changes in mine water hydrology during the flooding of an abandoned uranium mine in the Erzgebirge/Saxonia/Germany. – Proceedings, 5th International Mine Water Congress, Nottingham, U.K., **1**: 43-55.

WOLKERSDORFER, C. (1996a): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks - Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. – Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 50: 1-216.

WOLKERSDORFER, C. (1996b): Hydrogeochemical investigations of an abandoned uranium mine in the Erzgebirge/Germany. – Applied Geochemistry, 11: 237-241.

WOLKERSDORFER, C.; TREBUŠAK, I. (in Bearbeitung): Development of a Tracer Test in a flooded Uranium Mine using *Lycopodium clavatum*.

ZETZSCHE, C. (1994): Bestimmung regionaler Clarkewerte für die Lithosphäre und die Hydrosphäre im Gebiet Schlema-Alberoda. – ohne S.; Freiberg (Unveröffentlichter Abschlußbericht zum Vertrag 1/39-2/00151/93).

Anschrift des Autors: CHRISTIAN WOLKERSDORFER, Im Oberfeld 1, D-38678 Buntenbock

Errata

Seite 807: Folgende Literaturzitate müssen korrekt lauten:

KIPKO, E.J.; SPICHAK, Y.N.; POLOZOV, Y.A.; KIPKO, A.E.; HEPNAR, P. (1993): Grouting of Old Flooded Workings at M. Mayerova Mine in Czechoslovakia. - Mine Water and the Environment, 12: 21-26.

WISMUT GMBH (1993): Der Sanierungsbetrieb Aue gestern und heute. - Dialog - Werkzeitschrift der Wismut GmbH, 2: 16-21.