

# **Flutungsprognose eines Uranbergwerks <sup>1</sup>**

## **Hydrogeochemische und hydrodynamische Untersuchungen**

Gerhard Reik und Christian Wolkersdorfer

### **Einleitung**

Mit bergbaulichen Aktivitäten sind im allgemeinen anthropogene Veränderungen der geologischen Stoffströme verbunden (vgl. z.B. Allan 1995). Ein Teilaspekt solcher Veränderungen, nämlich Stoffmobilisation und -transport im Zusammenhang mit der Flutung des ehemaligen Uranbergwerks Niederschlema/Alberoda im sächsischen Erzgebirge, wurde im Rahmen eines DFG-Projekts an der TU Clausthal untersucht und von der Wismut GmbH unterstützt (Reik 1996, Wolkersdorfer 1996a). Die wichtigsten Ergebnisse sollen in diesem Beitrag vorgestellt werden.

Im Bergwerk Niederschlema/Alberoda hatte die Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft (SDAG) Wismut ab 1945 für 45 Jahre lang ca. 81.000 t Uran gefördert (Runge und Böttcher 1994). In den dabei entstandenen Grubenbauten konnten während der zurückliegenden Jahrzehnte durch die Schaffung großer, mit den Grubenwettern in Kontakt stehender Gesteinsoberflächen Verwitterungsprozesse ablaufen, die eine Stoffmobilisation in das Grubenwasser begünstigen.

Die Ergebnisse der hydrogeochemischen und hydrodynamischen Untersuchungen ermöglichen eine Prognose der künftigen physikochemischen Entwicklung des aufsteigenden Grubenwassers. Daraus lassen sich mittel- bis langfristige Sicherungsmaßnahmen ableiten, die dazu beitragen können, die Schadstoffausträge in die Anthroposphäre so gering wie möglich zu halten.

Gestützt auf umfangreiches Datenmaterial der Wismut GmbH, das auf Plausibilität geprüft und durch eigene Untersuchungen ergänzt wurde, konzentrierte sich die hier vorliegende Bearbeitung auf zwei Teilthemen:

- hydrogeochemische Entwicklung des Flutungswassers und
- Hydrodynamik des Grubenwassers.

Weitere im Rahmen des Projekts bearbeitete Aufgabenfelder waren die

- Messung von physikochemischen Parametern;
- Durchführung und Auswertung von Wasseranalysen;
- Durchführung und Auswertung von Sporenttriftversuchen;
- Berechnung umweltrelevanter Wasserinhaltsstoffe von Uranbergwerken unter Berücksichtigung der Druck-, Temperatur-, Eh- und pH-Änderungen während einer Flutung;

- CFD-Simulation der hydrodynamischen Prozesse in offenen Grubenbauten während des Flutungsverlaufs;
- Ermittlung des Stoff- und Wärmetransports in den Schächten und Strecken eines gefluteten Uranbergwerks;
- Ermittlung der Auswirkung von technischen Barrieren auf die hydrodynamischen Verhältnisse und den Stofftransport.

## Geologische Verhältnisse und bergbauliche Aktivitäten

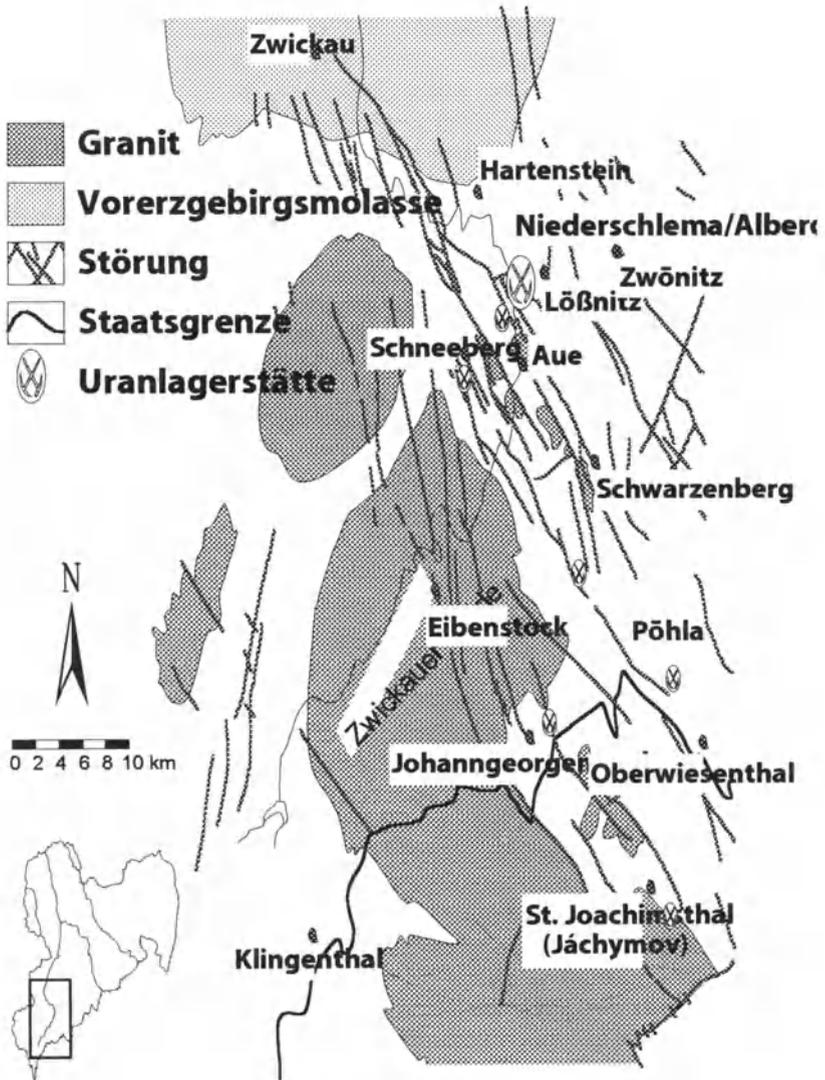
Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda gehört zum Lagerstättenrevier Schneeberg und liegt inmitten der Gera-Aue-Joachimsthal-Störungszone (Abb. 1), in der sich auch die Uranlagerstätten von Joachimsthal, Pöhla, Johanngeorgenstadt, Schneeberg und Oberschlema befinden. In nordwestlicher Richtung schließt die Lagerstätte Ronneburg in Thüringen an (Lange et al. 1991, Meinel 1993, Schuppan et al. 1994, Viehweg 1995).

Ihrem Charakter nach ist die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda eine polymetallische, hydrothermale Ganglagerstätte in kontakt- und regionalmetamorph überprägten Gesteinen der Lößnitz-Zwönitzer Zwischenmulde (Schuppan et al. 1994). Häufigste Gesteine sind Phyllite und Metadiabase, die zusammen etwa 70 % der vorkommenden Gesteine ausmachen und etwa 0,5...1 % Pyrit mit unterschiedlichen Anteilen (0,3...70 %) an Karbonaten enthalten (Wolkersdorfer 1996a). Stratigraphisch sind die Gesteine dem Ordovizium, Silur und Devon zuzuordnen. Nach Harlass und Schützel (1965) wurde das Haupturanerz – Uraninit (Pechblende:  $UO_2 \cdot U_2O_3$ ) – unter epithermalen Bedingungen gebildet.

Von den Querschlägen und Feldstrecken aus erfolgte der Abbau der nahezu 2000 m tief aufgeschlossenen Lagerstätte im Firstenstoßbau mit Versatz mittels Überhauen und Steigorten. Insgesamt wurden durch dieses Verfahren 4150 km an Auffahrungen geschaffen, die sich auf 50 Sohlen verteilen und ein Volumen von etwa 36 Millionen  $m^3$  ausmachen (Lange et al. 1991, Büder und Schuppan 1992, Wolkersdorfer 1996a). Der weitaus größte Teil der Sohlen befindet sich unterhalb des Niveaus der Vorflut Zwickauer Mulde (vgl. Abb. 1).

Durch den Eingriff des Menschen wurde das ursprüngliche chemisch-thermodynamische Gleichgewicht innerhalb des Gebirgskörpers gestört. Für die dadurch ausgelösten Stofffreisetzungsprozesse sind die neu geschaffenen Gesteinsoberflächen und der Zutritt von Luftsauerstoff und Luftfeuchtigkeit von besonderer Bedeutung, da auf diesen Oberflächen die exotherme Pyritoxidation sowie die oxidative Umwandlung der Primärminerale in zumeist leichter lösliche Sekundärminerale vorstatten geht. Diese werden durch das wiederansteigende Grubenwasser mobilisiert und erhöhen dessen Schadstoffkonzentrationen.

Infolge der geothermischen Tiefenstufe betragen die Gebirgstemperaturen im Grubentiefsten etwa 70 °C. Sowohl dieser Tatsache als auch der Energiezufuhr durch die exothermen chemischen Reaktionen ist die weiter unten beschriebene Konvektion des Grubenwassers zuzuschreiben.



**Abb. 1.** Vereinfachte tektonische Übersichtskarte der Gera-Aue-Joachimsthal-Störungszone zwischen St. Joachimsthal und Zwickau sowie der Erzgebirgs- und Gebirgsgranite in deren Umgebung (aus Wolkersdorfer 1996a, verändert nach Zentralinstitut für Physik der Erde 1989, Büder und Schuppan 1992)

## Prognose der Entwicklung umweltrelevanter Wasserinhaltsstoffe

Für die Prognose künftiger Massenkonzentrationen im Grubenwasser standen aus den Jahren 1991 bis 1994 etwa 500 Wasseranalysen der Wismut GmbH zur Verfügung, die mit unterschiedlichen Methoden untersucht wurden und in Tabelle 1 zusammengefaßt sind. Um eine qualitativ homogene Datenmenge zu erhalten, fand vor der Auswertung eine Plausibilitätskontrolle (vgl. Hölting 1996) und eine Ausreißereliminierung statt.

Mittels graphischer Auswerteverfahren (Piper-Diagramm, Durov-Diagramm) konnte gezeigt werden, daß sich alle Wasseranalysen drei Clustern zuordnen lassen (Abb. 2). Diese erhielten, entsprechend der Herkunft ihrer häufigsten Vertreter, die Bezeichnungen Typ S (Sickerwasser), Typ G (Grubenwasser) und Typ I (Intermediäres Wasser).

Ein weiteres Unterscheidungskriterium sind die empirisch ermittelten Logarithmen zweier Quotienten  $q_1$  und  $q_2$  aus den As-, U- und Ca-Stoffmengen. Gleichzeitig war es möglich, die Grenzkennzahlen  $Q_1$  und  $Q_2$  zu ermitteln, mit deren Hilfe die Wasser dem Typ S bzw. G zugeordnet werden können. Im log-As-Ca-U-Diagramm (Abb. 3) ist die Differenzierung beider Wassertypen zu erkennen. Die Definition der Kennzahlen lautet:

$$q_1 = \log\left(\frac{n_U}{n_{As}}\right) \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$q_2 = -\log\left(\frac{n_{As}}{n_{Ca}}\right) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Für die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda betragen die Grenzkennzahlen  $Q_1 = 2,5$ ,  $Q_2 = -0,3$ , wobei Analysen mit  $q_1 < Q_1$  und  $q_2 < Q_2$  dem Typ G zuzuordnen sind. Praktische Anwendung können die beiden Kennzahlen insofern erlangen, als das Grubenwasser dann als gereinigt gilt, wenn  $q_1$  und  $q_2$  regelmäßig über den Grenzkennzahlen liegen.

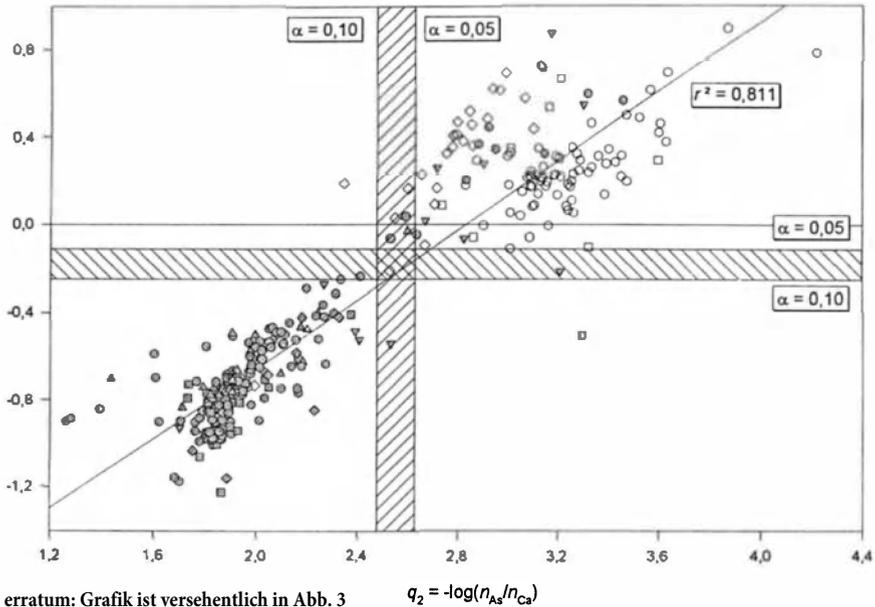
Keine Analyse zeigte Eigenschaften, die auf einen kontinuierlichen Übergang von Sickerwasser zu Grubenwasser hindeuten, vielmehr liegen breite Mischungslücken zwischen den Wassertypen vor (Wolkersdorfer 1995).

## Ergebnisse

Die Analysenergebnisse wurden mit statistischen Methoden jeweils getrennt für die drei Wassertypen untersucht, um zum einen die Ergebnisse der graphischen Analysen zu untermauern und zum anderen die zeitliche Entwicklung bestimmter Parameter aufzuzeigen.

**Tabelle 1.** Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), Probenzahl ( $\bar{n}$ ), Standardabweichungen ( $s$ ) und Meßeinheiten der 1991 bis 1994 analysierten, ausreißerfreien Parameter von Niederschlema/Alberoda getrennt für Wässer der Typen S, I und G. Standardabweichungen wurde nur für  $n > 3$  angegeben. Bei  $n = 1$  entspricht der Wert in der Spalte  $\bar{x}$  dem Meßwert. CSB Chemischer Sauerstoffbedarf; FR Filterrückstand; AR Abdampfdruckstand; NKH Nichtkarbonathärte. Die 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)

Parameter	Einheit	Typ S			Typ I			Typ G		
		$n$	$\bar{x}$	$s$	$n$	$\bar{x}$	$s$	$n$	$\bar{x}$	$s$
Temperatur	°C	104	16,96	2,28	12	25,55	4,00	165	35,38	4,44
Leitfähigkeit	mS cm <sup>-1</sup>	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
FR	mg L <sup>-1</sup>	98	21,23	31,08	13	29,95	39,70	130	61,09	85,76
AR	mg L <sup>-1</sup>	74	732,54	123,50	28	1101,57	431,37	199	2617,81	585,95
CSB	mg L <sup>-1</sup>	—	—	—	—	—	—	66	70,92	10,90
Ca <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	75	120,08	18,20	29	109,92	43,97	213	222,19	61,27
Mg <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	75	57,18	15,37	29	78,33	12,50	213	148,36	46,40
Na <sup>+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	49	30,63	8,54	18	137,80	69,23	141	378,48	105,91
K <sup>+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	36	4,36	1,07	18	9,73	7,11	119	37,14	4,85
Fe gesamt	mg L <sup>-1</sup>	53	0,10	0,13	9	0,33	0,37	98	2,66	2,31
Fe <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	5	0,02	0,01	10	0,11	0,07	51	2,46	2,18
Fe <sup>3+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	4	0,04	0,02	8	0,59	0,87	34	1,60	1,95
Mn gesamt	mg L <sup>-1</sup>	13	0,26	0,82	5	0,51	1,01	158	2,80	1,21
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	2	0,07	—	2	0,25	—	58	0,68	0,76
Sr <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	8	0,99	0,39	—	—	—	17	2,64	0,48
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	150	354,03	57,57	29	519,93	105,28	213	1138,36	263,68
Cl <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	156	37,68	7,40	29	63,98	44,58	212	142,36	33,38
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	74	187,65	37,47	28	270,53	82,30	209	889,52	264,71
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	143	9,18	1,90	25	2,88	1,07	146	2,17	1,54
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	—	—	—	4	0,03	0,02	36	0,06	0,12
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	9	20,62	15,48	9	18,04	4,78	7	23,14	17,47
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	14	0,14	0,10	13	0,29	0,10	72	4,42	2,07
F <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	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
NKH	°d	36	19,54	2,98	12	19,33	2,39	83	28,02	6,30
O <sub>2</sub>	mg L <sup>-1</sup>	74	10,50	3,88	12	7,96	5,03	84	2,54	2,64
Al	mg L <sup>-1</sup>	21	0,21	0,02	11	0,26	0,25	62	0,37	0,22
As	mg L <sup>-1</sup>	180	0,13	0,05	29	0,64	1,00	264	4,71	2,08
Ba	mg L <sup>-1</sup>	3	0,039	0,001	1	0,020	—	12	0,138	0,179
Co	mg L <sup>-1</sup>	2	0,01	—	1	0,01	—	18	0,02	0,02
Cr	mg L <sup>-1</sup>	1	0,003	—	1	0,015	—	28	0,005	0,006
Cu	mg L <sup>-1</sup>	11	0,02	0,03	6	0,03	0,03	38	0,03	0,03
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	mg L <sup>-1</sup>	16	15,89	1,23	16	15,48	2,26	75	32,49	7,06
Mo	mg L <sup>-1</sup>	2	0,027	—	3	0,031	0,002	10	0,199	0,179
Ni	mg L <sup>-1</sup>	15	0,029	0,007	5	0,020	0,001	28	0,030	0,021
Pb	mg L <sup>-1</sup>	9	0,005	0,003	11	0,008	0,007	39	0,011	0,008
Ra	mBq L <sup>-1</sup>	86	218,03	183,06	25	565,32	286,89	141	2094,09	1013,33
U	mg L <sup>-1</sup>	176	0,78	0,30	28	2,07	0,50	260	2,82	0,90
Zn	mg L <sup>-1</sup>	25	0,03	0,03	14	0,12	0,18	66	0,11	0,14



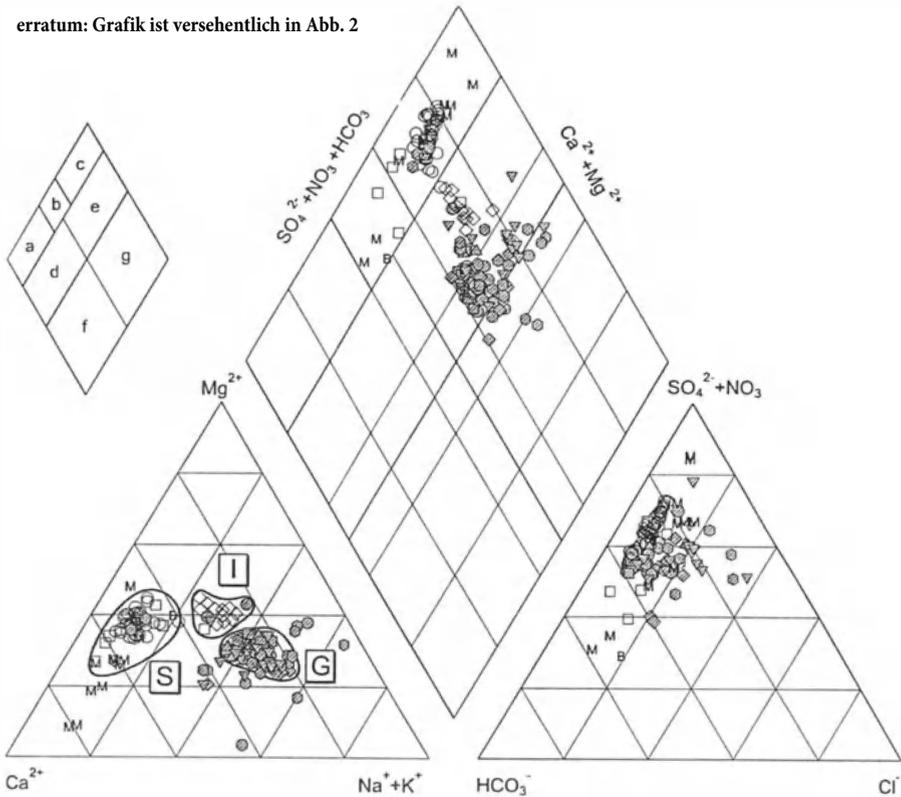
erratum: Grafik ist versehentlich in Abb. 3

**Abb. 2.** Piper-Diagramm der Wasseranalysen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda. Verwendet wurden 212 Wertepaare, zusätzlich 10 ältere Analysen aus dem Markus-Semmler-Stollen (M) und eine aus der Bismarckquelle (B). S: Sickerwässer (Frischwässer); G: Grubenwasser (Flutungswasser); I: Intermediäre Wässer. Kleine Grafik: Typendiagramm nach Furtak und Langguth (aus Hölting 1996). Offene Symbole: Sickerwasser, gerasterte Symbole: Grubenwasser, offene Rauten: intermediäres Wasser (aus Wolkersdorfer 1996a)

Wichtigste Einzelergebnisse der statistischen Untersuchungen sind die des Kruskal-Wallis- (Nichtparametrische Varianzanalyse) und des Dunn-Tests (Multipler Vergleich), da sie die Unterscheidung der drei Wassertypen auch statistisch belegen. Die Auswertungen zeigen, daß die drei graphisch bestimmten Wassertypen signifikant voneinander unterschiedlich sind und getrennt voneinander diskutiert werden können.

Um die künftige Entwicklung der Massenkonzentrationen, der Radiumaktivitäten oder Werte anderer Parameter des Wassers vom Typ G abschätzen zu können, wurden mathematisch-statistische Regressionen dieser Werte gegen die Zeit durchgeführt (Abb. 4). Die Regressionen erfolgten ähnlich der Vorgehensweise von Martin und Crawford (1987), die 16 Oberflächenwässer im Südwesten von Indiana (USA) auf ihre statistischen Gemeinsamkeiten hin untersuchten. Aus den Ergebnissen leiteten sie Vorhersagen zur Gewässerqualität ab. Während Martin und Crawford (1987) ihre Vorhersagen auf geochemische und physikalische Parameter im Rahmen der gemessenen Zahlenwerte basieren lassen, ohne deren zeitliche Variation zu untersuchen, soll im vorliegenden Fall hauptsächlich eine zeitliche Vorhersage getroffen werden. Prinzipiell handelt es sich bei dieser Vorgehensweise um eine Black-Box-Methode, da kein Wissen über das System selbst einfließt.

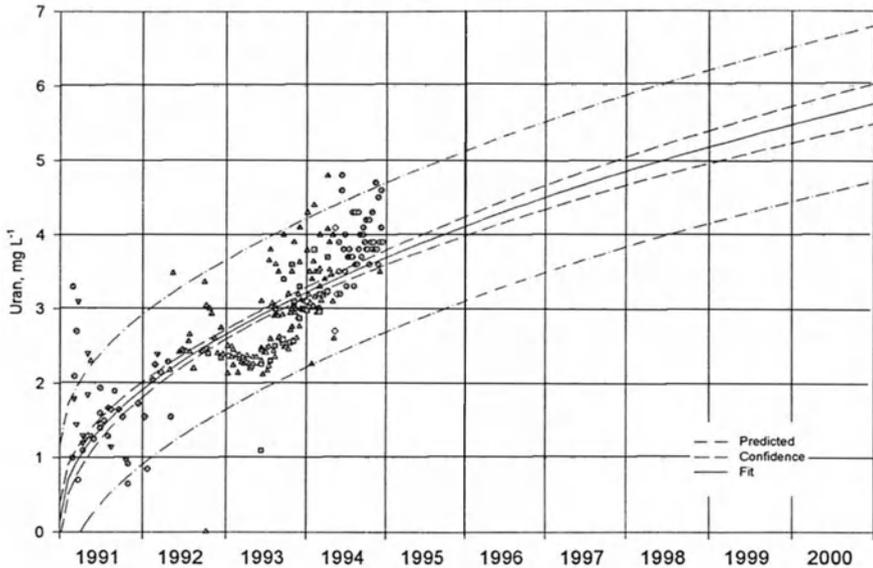
erratum: Grafik ist versehentlich in Abb. 2



**Abb. 3.** log-As-Ca-U-Diagramm der Wasseranalysen von Niederschlema/Alberoda zwischen 12.4.1990 und 20.12.1994. Dargestellt sind 312 Wertepaare.  $r^2 = 0,811$ . Grubenwasser ist durch seine Lage unterhalb der schraffierten Übergangsbereiche gekennzeichnet. Obere Grenzen des Grubenwassers:  $Q_2(0,10) = 2,48$ ,  $Q_2(0,05) = 2,63$ ,  $Q_1(0,10) = -0,25$ ,  $Q_1(0,05) = -0,11$ . Offene Symbole: Sickerwasser, gerasterte Symbole: Grubenwasser, offene Rauten: intermediäres Wasser. Erläuterungen im Text (aus Wolkersdorfer 1996a)

Da das Flutungswasser frühestens im Jahre 2000 bis zum Niveau des Markus-Semmler-Stollens angestiegen sein wird, erstrecken sich die Prognosen bis zum Ende des Jahres 2000. Um die Veränderung eines Parameters im Untersuchungszeitraum 1991 bis 1994 als Grundlage für die Prognose seiner künftigen zeitlichen Veränderung bis zum Jahr 2000 verwenden zu können, wurden folgende Annahmen getroffen, die auf den Ergebnissen der hier vorgestellten Untersuchungen beruhen:

- Stoffmobilisation wird bis zum Ende des Prognosezeitraums in der gleichen Größenordnung bleiben wie bisher;
- ausreichend großes Stoffreservoir;
- pH-, Eh-Wert und Temperatur werden sich nicht signifikant ändern;
- Art und Intensität des Stofftransports im Grubengebäude bleibt etwa gleich;



**Abb. 4.** Regressionskurve der Uranmassenkonzentration bezüglich der Zeit für Wasser des Typs G bis Ende des Jahres 2000. 260 Wertepaare. Erläuterungen im Text. Offene Symbole: Sickerwasser, gerasterte Symbole: Grubenwasser, offene Rauten: intermediäres Wasser. „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 (aus Wolkersdorfer 1996a)

- dem Grubenwasser werden außer den Sickerwässern keine anderen Stoffe hinzugefügt.

Wie sich aus den Berechnungen der Nettoneutralisationspotentiale der Hauptgesteine in der Lagerstätte ergibt, muß nicht mit einer Versauerung des Grubenwassers gerechnet werden (Tabelle 2). Es ist daher berechtigt, von keiner Änderung des pH-Werts auszugehen.

Die chemisch-thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen mit WATEQ4F (Version 2.0, 30.10.1991, Standarddatensatz) zeigen, daß die Karbonate, Gips und einige andere Mineralphasen im Grubenwasser gesättigt sind. Bei den Uran- und Arsenmineralen ist gegenüber dem Grubenwasser durchweg eine Untersättigung festzustellen (Tabelle 3).

Zwischen 1991 und 1994 haben sich die Sättigungskoeffizienten vieler Phasen asymptotisch einem Wert genähert, den sie gegen Ende des Bearbeitungszeitraums (Dezember 1994) nahezu erreicht haben. Tendenziell verlaufen die meisten Kurven in Richtung einer chemisch-thermodynamischen Gleichgewichtseinstellung (Wolkersdorfer 1996b).

**Tabelle 2.** Säureproduktionspotential (APP), Neutralisationspotential (NP) und Netto-neutralisationspotential (Net NP) von Gesteinen der Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. MgO, CaO, S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und CO<sub>2</sub> aus Zetzsche (1994). Mit \* gekennzeichnete Werte nach Wildner (1995, pers. Mitt.). APP, NP und Net NP in g kg<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>, und 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<sub>2</sub>-Gehalt entsprechend in MgCO<sub>3</sub> und CaCO<sub>3</sub> umgerechnet (aus Wolkersdorfer 1996a)

		du	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 <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	%	<0,10	<0,10	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	—	—	—
CO <sub>2</sub>	%	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 <sub>3</sub>	%	0,3	0,4	0,7	0,3	16,4	1,3	1,2	—	0,4	9,6
CaCO <sub>3</sub>	%	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

## Hydrodynamik

Obwohl die Mineralisation innerhalb des Grubengebäudes lokal stark variiert, sind die Zusammensetzung und die physikochemischen Parameter des Grubenwassers lediglich zeit- und teufen-, weniger hingegen ortsabhängig. In den Bereichen mit geringen Schwankungen der Parameter deutet dies auf eine gute Durchmischung des Grubenwassers hin. Um diese Hypothese zu belegen, wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- wiederholte Messungen physikochemischer Parameter in verschiedenen Bergwerksschächten (Temperatur, pH-, Eh-Werte, elektrische Leitfähigkeit);
- zwei Triftversuche mit *Lycopodium clavatum*;
- Messung der Strömungsgeschwindigkeit in einigen Schächten.

Zudem erfolgte an einem schematisierten Modell mit zwei Schächten, drei Sohlen und einem Pumpensumpf eine numerische Simulation der Strömungsvorgänge im Bergwerk Niederschlema/Alberoda.

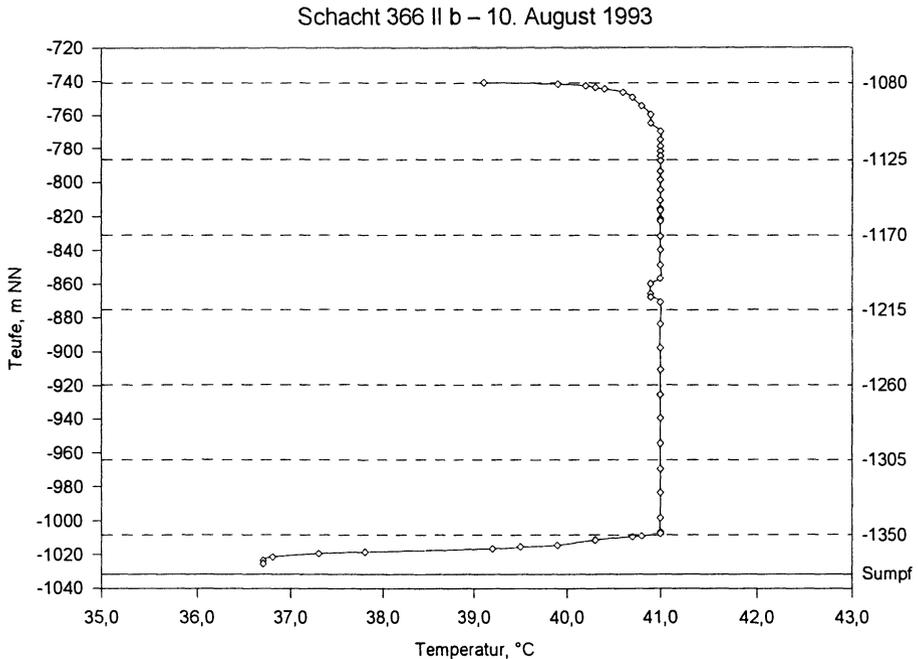
Die physikochemischen Messungen in den sieben Schächten zeigen, daß Änderungen in den physikochemischen Parametern des Grubenwassers in den Schächten in gleicher Weise stattfinden. Dies ist deutlich an den ähnlichen Temperaturverläufen erkennbar, aber auch an den Leitfähigkeits- oder pH-Messungen zu sehen. In jedem Schacht können zwei Schachtwasserkörper und, soweit die Messung

**Tabelle 3.** Minerale und Phasen, die aufgrund ihrer Sättigungskoeffizienten entscheidend für die chemische Zusammensetzung des Grubenwassers sind. SI: Sättigungskoeffizient. X: Mineral wurde für die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda bereits beschrieben.  $Mn_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$  kommt als Mineral nicht vor; Mangan-Hörnesit ist  $(Mn, Mg)_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$  (Strunz 1982). —<sup>1</sup> Phase kommt nicht als Mineral vor. Berechnungen der Sättigungskoeffizienten mit WATEQ4F (Version 2.0, 30.10.1991) und dessen Standarddatensatz (aus Wolkersdorfer 1996a)

Mineral	Formel	Beschrieben	SI
Calcit	$CaCO_3$	X	+0,5 ... +1
Dolomit	$CaMg(CO_3)_2$	X	0 ... +2
Magnesit	$MgCO_3$		0 ... +0,5
Siderit	$FeCO_3$	X	± 0
Strontianit	$SrCO_3$		-1,4 ... -0,4
Rhodochrosit	$MnCO_3$	X	± 0
Huntit	$CaMg_3(CO_3)_4$		± 0
Gips	$CaSO_4$	X	-1 ... -0,5
Baryt	$BaSO_4$	X	+0,4
Coelestin	$SrSO_4$		-1 ... -0,6
Jarosit	$KFe_3[(OH)_6(SO_4)_2]$		-2 ... +2
Alunit	$KAl_3[(OH)_6(SO_4)_2]$		0 ... +2
Fluorit	$CaF_2$	X	-0,5
Goethit	$FeOOH$	X	+8
Gibbsit	$Al(OH)_3$		+2
— <sup>1</sup>	$CuFe_2O_4$		+16
— <sup>1</sup>	$Fe_3(OH)_8$		0 ... +4
Quarz	$SiO_2$	X	+0,4 ... +0,6
Greenalit	$Fe_2[(OH)Si_4O_{10}]$		± 0
Hydroxiapatit	$Ca_3[OH](PO_4)_3$	X	-1 ... +5
Mansfieldit	$AlAsO_4 \cdot 2H_2O$		-5
Skorodit	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$	X	-4 ... -3
Mangan-Hörnesit	$Mn_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$		-4
Ianthinit	$b-[UO_2](OH)_2]$		-4
Schoepit	$[UO_2](OH)_2 \cdot H_2O$		-4
Rutherfordin	$[UO_2]CO_3$		-5 ... -3
Na-Autunit	$Na_2[UO_2]PO_4$	X	-4

tief genug hinabreichte, ein Sumpfwasserkörper unterschieden werden. Während letzterer nur lokale Bedeutung für das Strömungsgeschehen hat, sind die ersteren das Teilresultat der großräumigen konvektiven Strömungsverhältnisse (Abb. 5).

Charakteristisch für den unteren Schachtwasserkörper sind relativ gleichbleibende Werte in den physikochemischen Parametern, was auf gute konvektive Durchmischung zwischen den Schächten hindeutet. Im oberen Schachtwasserkörper hingegen ändern sich die Werte zur Wasseroberfläche hin graduell. Konvektive Strömung ist im allgemeinen durch regelmäßige oder unregelmäßige Änderung der Strömungsrichtung und beispielsweise der Temperatur gekennzeichnet. („Oszilla-



**Abb. 5.** Temperaturprofil des 10. August 1993 im Schacht 366 II b des Bergwerks Niederschlema/Alberoda. Oberhalb der letzten vollständig überfluteten Sohle (-1125) fällt die Temperatur kontinuierlich zur Oberfläche hin ab („oberer Schachtwasserkörper“), wohingegen sie zwischen den Sohlen -1350 und der letzten vollständig überfluteten Sohle konstant bleibt („unterer Schachtwasserkörper“). Das Wasser unterhalb der Sohle -1350 („Sumpfwasserkörper“) hat noch die ursprüngliche Temperatur der Sickerwässer, da der Sumpfwasserkörper nicht in die großräumige Konvektion eingebunden ist. Die Temperaturerniedrigung im Niveau der Hauptsohle -1215 ist durch Turbulenzen im Niveau der Schwenkbühnengrube und durch seitlich zufließendes Wasser bedingt (aus Wolkersdorfer 1996a)

tion“; Gebhart et al. 1988). Alle stationären Messungen in den Schächten des Bergwerks Niederschlema/Alberoda zeigen im unteren Wasserkörper derartige Temperatur- oder auch Leitfähigkeitsoszillationen.

Temperaturschichtungen in gefluteten Bergwerken untersuchte Uerpman (1980; die Namen der Bergwerke unterlagen aufgrund der damaligen Aufgabenstellung der Geheimhaltung). Er beobachtete in ergänzenden Laborversuchen Strömungsgeschwindigkeiten von 6 bis 30 m min<sup>-1</sup>, die in Zonen gleichbleibender Temperatur auftraten. In den Zonen der Temperatursprünge hingegen war der Transport durch Diffusion bestimmt, lag somit um Größenordnungen unter den vorgenannten Geschwindigkeiten, und erklärt, warum zwischen Sumpfwasserkörper und Schachtwasserkörper kein Temperatenausgleich stattfinden kann.

Bei den beiden Triftversuchen im Bergwerk Niederschlema/Alberoda wurden eingefärbte Bärlappsporen (*Lycopodium clavatum*) mittels speziell konstruierter Sonden an unterschiedlichen Stellen im Bergwerk freigesetzt. Im ersten, 49 Tage

**Tabelle 4.** Ergebnisse des zweiten Tracerversuchs im Bergwerk Niederschlema/Alberoda mit *Lycopodium clavatum* im November 1995. Sporenzugabe in den Schächten 296IIb, 366b, 371 und 383, Probenahmepunkte in den Schächten 296IIb und 366b (nach Wolkersdorfer et al. 1997)

Fließweg	Länge	Gesamtzeit	16%-Quantil	mittlere Geschwindigkeit	64%-Quantil
	m	h	m min <sup>-1</sup>	m min <sup>-1</sup>	m min <sup>-1</sup>
296IIb → 296IIb	216	14,1	0,3	0,5	1,6
366b → 296IIb	776	16,2	1,0	1,6	5,0
371 → 296IIb	2159	13,1	3,4	5,7	18,1
383 → 296IIb	736	15,8	1,1	1,8	5,7
296IIb → 366b	780	12,8	1,2	2,0	6,4
366b → 366b	220	14,9	0,3	0,5	1,6
371 → 366b	2723	11,9	4,7	7,9	25,0
383 → 366b	173	14,5	0,2	0,4	1,3

andauernden Versuch konnte nachgewiesen werden, daß nach dieser Zeit das zahlenmäßige Verhältnis der zurückgewonnenen Sporen beider zugegebener Farben dem der zugegebenen Sporenmengen entsprach. Im zweiten, 14 Tage langen Versuch zeigte sich, daß die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers zwischen 1 und 8 m min<sup>-1</sup> betrug und daß sowohl die Sporen von weit entfernten (2.700 m) als auch nahegelegenen Zugabepunkten (170 m) nach weniger als 16 Stunden aufgefunden werden konnten (Wolkersdorfer 1996a, Wolkersdorfer et al. 1997: dort mit detaillierter Beschreibung des Sporenriftversuchs und der Auswertung).

Aus beiden Versuchen läßt sich folgern, daß alles Wasser innerhalb des Untersuchungsbereichs bereits nach wenigen Tagen gut durchmischt ist. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten legen eine gute konvektive Durchmischung nahe und erklären damit die chemischen Ähnlichkeiten der Wasseranalysen in den unterschiedlichen Schächten (Tabelle 4).

## Modellierung der Strömungsverhältnisse

Zur Modellierung der Strömungsverhältnisse im Bergwerk Niederschlema/Alberoda wurde das Programm FIDAP 7.52 der Firma fdi (Bensheim) verwendet. Es erlaubt die numerische Modellierung von Fluidströmen und Transportvorgängen, nicht aber chemischer Reaktionen, auf der Grundlage von Finite-Element-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics CFD). Wegen der komplexen Grubengeometrie des Bergwerks beschränkte sich die Modellierung auf einen Teilbereich des Grubengebäudes mit zwei Schächten (einschließlich Sumpf) und drei Sohlen. Ziel dieses Modells war es, die gemessenen physikochemischen Parameter, vor allem den Temperatursprung im Schachtsumpf, und die Temperaturschwankungen im Niveau der Füllorte zu verstehen.

Die Ergebnisse zeigen, daß sich unter den derzeitigen Temperaturverhältnissen temperaturabhängige Wasserkreisläufe über zwei oder mehrere Sohlen ausbilden. Die Schachtsümpfe und der Bereich oberhalb der letzten gefluteten Sohle sind nicht in die großräumigen Konvektionskreisläufe eingeschlossen. Auch zeigte sich, daß die Fließrichtung des Wassers nicht von dem Gefälle der Strecken ins Feld hinein oder aus ihm hinaus abhängig ist, sondern ausschließlich von der Wasserdichte. Im Bereich der Schwenkbühnengruben der Füllorte kann es zur Ausbildung kleinräumiger Konvektionszellen kommen.

Bei den numerischen Modellierungen wurden Strömungsgeschwindigkeiten von 3 bis 36 m/min<sup>-1</sup> ermittelt (Hähne gelangte mit 1-10 m min<sup>-1</sup> zu ähnlichen Ergebnissen; pers. Mitt. 1997). Regelmäßig traten die hohen Geschwindigkeiten in den horizontalen Strecken mit einem gegenüber den Schächten kleinen Durchmesser auf, die kleinen Geschwindigkeiten hingegen in den vertikalen Schächten. Diese gegenüber den Triftversuchen höheren Geschwindigkeiten erklären sich vor allem daraus, daß im Modell kein Strecken- und Schachtverbau modelliert wurde. Vielmehr wurden im Modell Röhren mit einer Wandrauigkeit verwendet, die der von Beton entspricht. Darüber hinaus mußte auf eine Modellierung turbulenter Strömung verzichtet werden, da die Rechenkapazität der verwendeten Workstation (SUN Workstation, 64 MB Hauptspeicher) für dieses einfache Modell nicht ausreichte (nach einer Erniedrigung der Zellenzahl kam das Modell zwar zum Laufen, entsprach aber nicht mehr den geometrischen Vorgaben, so daß die Ergebnisse nicht mit herangezogen werden können).

## **Stoffmobilisierung**

Zur überschlägigen Abschätzung der kurz- bis mittelfristig mobilisierbaren Schadstoffmengen wurde davon ausgegangen, daß das Wasser im Grubengebäude die Schadstoffe in einer maximal 1 mm dicken Verwitterungsrinde der gesamten verfügbaren Kontaktfläche vollständig mobilisiert und seine Strömungsgeschwindigkeit hinreichend groß ist, um stets einen Konzentrationsgradienten in die Lösung hinein aufrecht zu erhalten (Wolkersdorfer 1996a). Die Dicke der Verwitterungsrinde ergab sich aus Beobachtungen an Handstücken und offenen Strecken im Bergwerk Niederschlema/Alberoda.

Als verfügbare Kontaktflächen wurden zur Abschätzung der Schadstoffmengen das im Bergwerk verbliebene Haufwerk, die Oberfläche der Grubenräume (Schächte, Strecken, Abbauräume) und die Trennfugen im Bereich der Auflockerungszone um die Grubenräume angesehen.

Betreffend der Reinigung des Grubenwassers stellt sich die Frage, welche Zeit notwendig ist, um das gesamte Grubenwasser einschließlich der maximal löslichen Schadstoffe auf ein annehmbares Niveau zu reinigen. Diese Zeit ist vor allem davon abhängig, bis zu welcher Sohle das Grubenwasser ansteigen soll und ob das Wasser aktiv oder passiv zur Wasserbehandlungsanlage geleitet wird. Derzeit ist geplant, bis zur Sohle -60 (ca. 270 m NN) zu fluten und das Grubenwasser über

eine Wasserhaltung im Schacht 208 nach Übertage zur Wasserbehandlungsanlage zu pumpen (Rudolph 1997).

Unter vereinfachenden Annahmen bei der Berechnung der maximal mobilisierbaren Schadstoffmengen (Tabelle 5) und bei Vermeidung von technischen Barrieren im Grubengebäude errechnen sich Reinigungszeiten, die je nach Schadstoff zwischen mehreren Jahrzehnten und Jahrhunderten liegen. Dies steht im scheinbaren Widerspruch zur Reinigungsdauer des Grubenwassers in Pöhla, wo bereits nach weniger als zwei Jahren keine Wasserreinigung mehr notwendig war, da das austretende Grubenwasser die Qualitätskriterien erfüllte (pers. Mitt. S. Hurst, Dr. Wolters, beide Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung Dresden). Da die Grubengeometrie des Bergwerks Niederschlema/Alberoda jedoch weitaus komplexer ist als die in Pöhla, kann nicht davon ausgegangen werden, daß sich die Schadstoffe nach Flutungsende ebenso rasch verringern und damit eine Reinigungsanlage für Niederschlema/Alberoda nur für kurze Zeit notwendig wäre. Insbesondere die im Tracerversuch nachgewiesene Konvektion läßt ein schnelles Absinken der Schadstoffgehalte unwahrscheinlich werden.

Um den Schadstoffaustrag und -transport aus den tieferliegenden Bereichen des Bergwerks Niederschlema/Alberoda zu unterbinden, wäre ein möglichst vollständiger Verschuß des Grubengebäudes unterhalb der letzten zu flutenden Sohle notwendig. Über Erfahrungen des Verschlusses eines Bergwerks in der Tschechischen Republik berichten Kipko et al. (1993). Dort konnte der Schadstoffaustrag und die

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

Element	Haufwerks- material	davon mobilisierbar	Auflocke- rungszone	Summe $M_{\max}$ , t
	t	t	t	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

Wassertemperatur signifikant reduziert werden, was auf einen *unterbrochenen Wasserkreislauf* hindeutet. Wesentlich beim Verschluß ist, die oberhalb der Vertikalverschlüsse zuzitenden Sickerwässer nicht in die konvektiven Kreisläufe im darunterliegenden Grubengebäude einzubeziehen. Dazu ist es nicht notwendig, *alle* vertikalen Verbindungen zu unterbrechen, sondern nur die hydraulisch wirksamsten. Obwohl im Bergwerk Niederschlema/Alberoda Mauern gesetzt wurden, um den Schadstoffaustausch zu stoppen (z.B. Sohle -990 oder -540), ist dort ein Wasserkreislauf möglich. Offensichtlich greift das Grubenwasser die Mauern an, da beim zweiten Tracerversuch Sporen auch durch vermeintlich abgemauerte Bereiche flossen. Der Tracerversuch belegte somit, daß der im Bergwerk Niederschlema/Alberoda praktizierte horizontale Verschluß durch Abmauern der Füllorte unwirksam ist.

## Schlußfolgerungen und Zusammenfassung

Die Ergebnisse der hydrogeochemischen und hydraulischen Untersuchungen haben ergeben:

- Angetrieben durch die große Temperaturdifferenz des Gebirges bilden sich offene und geschlossene Konvektionskreisläufe mit Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 1 und 8 m min<sup>-1</sup> aus.
- Die Schadstoffgehalte im Grubenwasser des Bergwerks erhöhen sich im Verlauf der Flutung bis zu ihrer Sättigungskonzentration.
- Eine Versauerung des Grubenwasser ist wegen des positiven Nettoneutralisationspotentials nicht zu erwarten.
- Mit einer weitergehenden starken Zunahme der Massengehalte im Grubenwasser ist nicht zu rechnen, da sich viele Mineralphasen bereits ihrer Sättigung nähern. Sollte kein vertikaler Verschluß des Grubengebäudes durchgeführt werden, muß das abzuführende Wasser in der Wasserbehandlungsanlage gereinigt werden. Hierbei fallen voraussichtlich über mehrere Jahrzehnte fortdauernd viele Jahrestonnen an hochtoxischen Aufbereitungsrückständen an.

Durch eine Unterbindung der konvektiven Strömung im Grubengebäude mittels vertikaler Verschlüsse in den hydraulisch wirksamen Schächten (vgl. Scott und Hays 1975) könnte auf eine Wasserbehandlungsanlage verzichtet werden, zumindest wäre der Anfall von Aufbereitungsrückständen ungleich geringer.

Um Fragen im Zusammenhang mit der technischen Machbarkeit und der wirtschaftlichen Optimierung des Verschlusses und der Wasserbehandlung zu beantworten, sind verschiedene hier getroffene Annahmen zu überprüfen. Unsicherheit besteht vor allem in Hinblick auf die Abschätzung des Vorrates an leicht mobilisierbaren Schadstoffen und damit verbunden der Dauer einer möglichen Wasserbehandlung.

## Danksagung

Wir danken allen Mitarbeitern der Wismut GmbH, die uns bei dem Projekt hilfreich unterstützt haben. Für die hilfreichen Anmerkungen danken wir Prof. M. Veselic, M. Huch und einem anonymen Rezensenten. Die Arbeit wurde finanziell gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) Bonn und der Wismut GmbH Chemnitz. Ch. Wolkersdorfer erhielt ein Stipendium der Hanns-Seidel-Stiftung München.

## Anmerkung

1 Geänderte Version eines Vortrages auf der Tagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft 1996 in Bonn zum Thema „Geologische Stoffkreisläufe und ihre Veränderung durch den Menschen“.

## Literatur

- Allan RJ (1995) Impact of Mining Activities on the Terrestrial and Aquatic Environment with Emphasis on Mitigation and Remedial Measures. In: Salomons W, Förstner U, Mader P. Heavy metals – Problems and Solutions. 119-140, Springer Berlin
- Büder W, Schuppan W (1992) Zum Uranerzbergbau im Lagerstättenfeld Schneeberg-Schlema-Alberoda im Westerzgebirge. Schriftenreihe Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute, 64, 203-221 Clausthal-Zellerfeld
- Gebhart B, Jaluria Y, Mahajan RL, Sammakia B (1988) Buoyancy-Induced Flows and Transport. 1001 S., Springer Berlin
- Harlass E, Schützel H (1965) Zur paragenetischen Stellung der Uranpechblende in den hydrothermalen Lagerstätten des westlichen Erzgebirges. Z.f.angew.Geol., 11, 569-582 Berlin
- Hölting B (1996) Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Aufl., 441 S., Enke Stuttgart
- Kipko EJ, Spichak YN, Polozov YA, Kipko AE, Hepnar P (1993) Grouting of Old Flooded Workings at M. Mayerova Mine in Czechoslovakia. Mine Water and the Environment, 12, 21-26 Wollongong
- Lange G, Mühlstedt P, Freyhoff G, Schröder B (1991) Der Uranerzbergbau in Thüringen und Sachsen – ein geologisch-bergmännischer Überblick. Erzmetall, 44, 162-171 Weinheim
- Martin JD, Crawford CG (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, 1-89 Washington
- Meinel G (1993) Mögliche Beziehungen zwischen Uranlagerstätten und der Kratonisierung am Beispiel Thüringens. Geowiss. Mitt. von Thüringen, 1, 59-63 Weimar
- 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., Unveröffentlichter Bericht Causthal

- Rudolph C (1997) Die untertägige Sanierung der abgebauten Uranerzlagerstätte Niederschlema-Alberoda als komplexer Sanierungsprozeß. Glückauf, 133, 250-254 Essen
- Runge W, Böttcher J (1994) Stilllegung und Sanierung des ostdeutschen Uranerzbergbaus. Atomwirtschaft Atomtechnik, 39, 194-190 Düsseldorf
- Schuppan W, Büder W, Lange G (1994) On Uranium mineralization in the vein deposits of the Western Erzgebirge, Germany. Monograph Series on Mineral Deposits, 31, 191-207 Berlin
- Scott RL, Hays RM (1975) Inactive and abandoned Underground Mines – Water Pollution Prevention and Control. 338 S. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-440/9-75-007, Washington D.C.
- SDAG Wismut (1991) Untersuchungen zur Bewertung und Begutachtung der Flutung des Lagerstättenteils bis zur Sohle -990. ohne S., Interne Projektskizze Chemnitz
- Strunz H (1982) Mineralogische Tabellen. 8. Aufl., 621 S., Akademische Verlagsanstalt Leipzig
- Uerpmann EP (1980) Hydrogeologische Fragen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. 128 S., Dssertation TU Clausthal Clausthal
- Viehweg M (1995) Regionale Verteilung der Uranlagerstätten Sachsens und Thüringens. Z. geol. Wiss., 23, 547-552 Berlin
- Wolkersdorfer C (1995) Die Flutung des ehemaligen Uranbergwerks Niederschlema/Alberoda der SDAG Wismut. Z. geol. Wiss., 23, 795—808 Berlin
- Wolkersdorfer C (1996a) Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks – Die Lagerstätte Niederschlema/Alberoda. Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 50, 1-216 Clausthal
- Wolkersdorfer C (1996b) Hydrogeochemical investigations of an abandoned uranium mine in the Erzgebirge/Germany. Applied Geochemistry, 11, 237-241 Oxford
- Wolkersdorfer C, Trebušak I, Feldtner N (1997) Development of a Tracer Test in a flooded Uranium Mine using *Lycopodium clavatum*. In: Kranjc A. Tracer Hydrology 97. 377-385. Balkema Rotterdam
- Zentralinstitut für Physik der Erde (1989) Silicic Magmatism and Metallogenesis of the Erzgebirge. Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, 107, 1-316 Berlin
- Zetzsche C (1994) Bestimmung regionaler Clarkewerte für die Lithosphäre und die Hydrosphäre im Gebiet Schlema-Alberoda. ohne S. Unveröffentlichter Abschlußbericht zum Vertrag 1/39-2/00151/93 Freiberg