



# **TAGUNGSBAND**

Internationale Konferenz  
11.- 14.07.2000  
in Schlema

**Wismut 2000 - Bergbausanierung**

# Umweltverträgliche Stilllegung und Verwahrung von Uranerzbergwerken - Fallbeispiel WISMUT

R. Gatzweiler, J. Meyer  
Wismut GmbH, Chemnitz

## Einleitung

Bergbau ist immer mit gravierenden Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden. Die bergbauliche Nutzung beeinträchtigt zeitweise die Nutzung anderer Ressourcen wie z.B. die Landoberfläche im Falle einer Tagebaugewinnung oder das Grundwasser. Diese Beeinträchtigungen sind generell temporärer Natur. Der berggesetzlich verankerte Grundsatz der Wiedernutzbarmachung zielt vorrangig auf eine gefahrlose Anschlussnutzung der durch den Bergbau in Anspruch genommenen Flächen ab. Die Begriffsbestimmung (§4 (1) BBG) lautet „Wiedernutzbarmachung ist die ordnungsgemäße Gestaltung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Oberfläche unter Beachtung des öffentlichen Interesses“. Der für die Zulassung eines Bergbaubetriebes sicher zu stellende Ausschluss von Gefahren für Leben und Gesundheit gilt auch noch nach Einstellung des Betriebes. Diese Maßgaben sind allesamt auf den *Schutz und zum Nutzen des Menschen* ausgerichtet.

Mit zunehmendem Umweltbewußtsein seit Beginn der siebziger Jahre und der seitdem eskalierenden Flut von gesetzlichen Regelungen zum Schutz der Umwelt hat sich der Bergbau verstärkt der Frage zu stellen, inwieweit der aus der bergbaulichen Tätigkeit erwachsende Nutzen für den Bergbauunternehmer und die Gesellschaft (d. h. die Bevölkerung) die Beeinträchtigungen, Gefahren und Schäden für *Menschen und Umwelt* übertrifft und inwieweit fortdauernde Schäden vermieden werden können. Diese im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen in neuerer Zeit abzuwägenden Fragen sind eigentlich nicht neu. Schon Georgius Agricola hat vor mehr als 500 Jahren in seiner Buchreihe „*De Re Metallica*“ [1] die Grundsatzfrage nach dem Nutzen des Bergbaus bei Betrachtung der durch ihn eintretenden Umweltschäden diskutiert. Von Agricola führt eine geistige Spur zu einem weiteren weitsichtigen Erzbergirler, Oberberghauptmann von Carlowitz. Hans Carl von Carlowitz veröffentlicht 1713 die „*Sylvacultura Oeconomica*“ [2] und prägt darin erstmals den Begriff der „*Nachhaltigkeit*“, der seitdem zu den Grundsätzen deutscher Forstwirtschaft gehört, die im Laufe des 19. Jahrhunderts weltweite Geltung erhält. Mit der UN Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED) 1992 in Rio de Janeiro und der Verabschiedung der Agenda 21 ist auch für den Bergbau ein fester Handlungsrahmen vorgegeben, was die Zielstellungen von Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit anbelangt. Gegenwärtig erarbeiten die UNDESA (UN Department of Economic and Social Affairs) und die UNEP (UNs Environmental Programs - Industry and Environment) Umweltrichtlinien für den Bergbau, die auch konkret die Stilllegung und Verwahrung von Bergwerken behandeln. Der Richtlinie vorangestellt ist eine Interpretation des Begriffs Nachhaltigkeit, so wie sie für umweltgerechte Bergbautätigkeit verstanden werden kann, sowie die Grundsätze der „Berlin Guidelines“ (1991) [3], die im November vergangenen Jahres im „Berlin Roundtable on Mining and the Environment“ fortgeschrieben wurden. Folgende Bedingungen werden u.a. für die Sicherung nachhaltigen Wirtschaftens im Bergbau genannt:

- das Aufnahmepotential („*carrying capacity*“) der durch den Bergbau beeinflussten Umwelt darf nicht überschritten werden, d. h. die Aufnahmekapazität von durch Bergbauaktivitäten freigesetzten Kontaminanten durch die Umweltmedien soll nicht überschritten werden;
- die Kapazität der Umweltfunktionen der Biosphäre, welche die Grundlage für die ökonomischen Aktivitäten der im Einflußbereich des Bergbaus lebenden Menschen ist, darf nicht reduziert werden;

Es erscheint geboten, sich sehr genau mit den inhaltlichen Konsequenzen des so gern, häufig und beliebig verwendeten Begriffs „*Nachhaltigkeit*“ auseinanderzusetzen, um nicht Gefahr zu laufen, an etwas gemessen zu werden, das man gar nicht erfüllen kann. Das besondere Problem besteht darin, daß sich die Kenntnisse über die „*Umweltfunktionen der Biosphäre*“ und ihre möglichen Beeinträchtigungen durch „*Kontaminanten*“ sehr schnell entwickelt haben und somit ein „*moving target*“ für den Umweltschutz darstellen. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass Umweltbehörden dazu tendieren

Maximalforderungen an den Bergbautreibenden zu stellen und sich mit Abwägungen der Verhältnismässigkeit von Maßnahmen relativ schwer tun.

Moderne Uranerzbergwerksanlagen erfüllen die modernen Anforderungen an den Umweltschutz in ganz besonderer Weise. Beispielhaft genannt seien die vergleichsweise geringe Inanspruchnahme von Flächen (Ranger, Olympic Dam, McArthur River), das „in pit“-Tailingsmanagement sowie ferngesteuerte bergmännische Gewinnungs- und Förderverfahren für Reicherzlagerstätten in Saskatchewan, Kanada und die in situ-Laugung mit parallel zur Produktion verlaufender Restauration des Grundwassers.

Dennoch trägt der Bergbau schwer an seinem schlechten Image, das stark durch die „Sünden der Vergangenheit“ geprägt wird. Wismut ist ein besonders prägnantes Beispiel für Umweltsünden der Vergangenheit. [4] Die Frage stellt sich nun: Kann ein über lange Zeit weitgehend nicht umweltgerecht betriebener Bergbau umweltgerecht stillgelegt und verwahrt werden? Die Antwort auf diese Frage ist „Ja“. Es erfolgt ein Ausschluß von Gefahren für die Öffentlichkeit und eine weitgehende Minderung von Risiken und Beeinträchtigungen für Mensch und Umwelt, wodurch eine Anschlußnutzung ermöglicht wird. Die Einschränkung, die zu beachten ist, beinhaltet, daß die Wiederherstellung der ursprünglichen Gegebenheiten, wie Landschaftsform, Hydrographie, Hydrologie, Infrastruktur etc. teilweise nur näherungsweise erfolgen kann, die Nachnutzungsmöglichkeiten z. T. eingeschränkt bleiben und die langfristigen Emissionen über den Luft- und Wasserpfad nur so weit verringert werden sollten, wie es dem Gemeinwohl dienlich ist und dem Grundsatz der Verhältnismässigkeit entspricht.

#### Grundsätze der Stilllegung und Verwahrung

Eine Entscheidung zur endgültigen Produktionseinstellung zieht notwendigerweise die ordnungsgemäße Stilllegung und Verwahrung eines Grubenbetriebes nach sich. Das sogenannte Abwerfen einzelner Grubenfelder oder Sohlen im laufenden Produktionsbetrieb nach der Auserzung von Lagerstättenteilen ist dem Prozeß der Stilllegung und Verwahrung des gesamten Grubengebäudes insofern verwandt, als vorab alle Konsequenzen des Abwurfs eines Teils der Grube für den Weiterbetrieb des Bergwerkes geprüft und bewertet werden müssen. Neben der Umstellung von Wetterführung und Wasserhaltung der jeweiligen Grube sind geomechanische, hydrologische, ökologische und nicht zuletzt wirtschaftliche Auswirkungen zu betrachten. Mit der zunehmenden Erschöpfung der von Wismut entdeckten und abgebauten Lagerstätten, den mit dem Aufschluß tieferer Lagerstättenteile steigenden Produktionskosten und dem nachlassenden Natururanbedarf der Sowjetunion gehörte insbesondere in den achtziger Jahren der geordnete Abwurf von Grubenteilen zur normalen Betriebsführung der Bergwerke. Dennoch war die gesamte offene und befahrene Grubenbaulänge zum Zeitpunkt der Produktionseinstellung 1990/91 mit 1395 km (hinzu kamen 56 Tagesschächte) gemessen an der Produktion der Jahre 1988, 1989 und 1990 von je rd. 3000 t Uran vergleichsweise hoch. Die Ursachen hierfür liegen einerseits in dem geringen Erzgehalt und der Absetzbarkeit der Lagerstätten und andererseits in den längerfristig festgelegten Aus- und Vorrichtungsplänen.

Ziel einer geordneten Stilllegung und Verwahrung von Bergwerksanlagen ist in jedem Falle der Ausschluß von Gefahren für Leben und Gesundheit aber auch die Minderung von Risiken und Beeinträchtigungen für Mensch und Umwelt sowie die Ermöglichung einer gefahrlosen Nachnutzung der Tagesoberfläche. Die bergbehördlich zuzulassenden Abschlußbetriebspläne bedingen folglich die Erarbeitung von Stilllegungs- und Verwahrungskonzeptionen zum Nachweis dafür, daß die genannte Zielsetzung erreicht werden kann. Diese konzeptionelle Planung wird in Folge mit Sonderbetriebsplänen für die Einzelmaßnahmen unterlegt.

Im Rahmen der konzeptionellen Planung erfolgt eine *Prüfung von Alternativen* und anschließend die Festlegung einer *Rückzugsstrategie*, d. h. die Klärung der technologischen Abfolge des Auflassens einzelner Grubenfelder und Sohlen.

Als prüfwürdige Alternativen bieten sich generell an:

- das Offenhalten des Grubengebäudes,
- die Verfüllung des Grubenhohlraumes durch Einlagerung bergbaulicher Abfälle,
- die Sicherung der Tagesoberfläche durch Verfüllung von Schächten und tagesnahen Hohlräumen sowie die kontrollierte und gegebenenfalls gesteuerte Flutung mit erforderlichenfalls Reinigung der an der Tagesoberfläche austretenden Flutungswässer.

Der letztgenannten Alternative entspricht in rudimentärer Form das ehemals übliche Absaufenlassen von Gruben. Die Verwahrung durch Flutung hat heutzutage jedoch hohe Ziele für das Schutzgut Wasser zu beachten, und zwar

- die weitgehende Wiederherstellung der ursprünglichen hydrogeologischen Gegebenheiten,
- den Schutz wasserwirtschaftlich genutzter Grundwasserleiter,
- den Schutz der Vorfluter durch Behandlung der übertretenden Flutungswässer,
- die Minimierung der anstehenden Wassermengen und Schadstofflasten.

Trotz unterschiedlicher Rahmenbedingungen in den Bergwerken werden die Flutungen durch ähnliche Vorgehensweisen bestimmt [5], und zwar:

- Erstellung einer Flutungsprognose und Modellierung der hydrodynamischen und hydrochemischen Bedingungen während und nach der Flutung,
- Klärung der technologischen Abfolge des Auflassens einzelner Grubenfelder und Sohlen (Rückzugsstrategie),
- Entsorgung von wassergefährdenden Stoffen aus dem Grubengebäude,
- Installation eines Monitoring-Systems,
- Flutung bis zu einem maximal möglichen Niveau,
- Reinigung gehobener/übertretender kontaminierter Wässer im Endstadium und nach Abschluß der Flutung,
- Prüfung der Steuerungsnotwendigkeit der Flutung und ggfs. Schaffung einer Rückfalloption.

Der technologische Ablauf der Flutung gliedert sich zumeist in

- ♦ Präventive Maßnahmen, wie die Entsorgung wassergefährdender Stoffe, die Verfüllung und Verwahrung tagesnaher Hohlräume und von Tagesschächten, den Einbau von Barrieren und Dämmen zur
  - Stabilisierung tektonischer Strukturen,
  - Verhinderung der Migration von Schadstoffen in Grundwasserleitern und zu den Entlastungspunkten,
  - Sicherung der Tagesoberfläche bzw. Vermeidung von Bergschäden durch Senkungen, Setzungen und Tagesbrüchen,
  - Reduzierung der Radonaustritte in den dicht besiedelten Gebieten.
- ♦ Einrichtung eines Meßsystems (Monitoring) zur Verfolgung der quantitativen und qualitativen Parameter der Flutung
  - Messung des Flutungsniveaus,
  - Bestimmung der Inhaltstoffe im Wasser des Flutungsraumes,
  - Verfolgung der möglichen Aktivierung abgeklungener seismischer Aktivitäten bei Wiederanstieg des Grundwasserspiegels,
  - Prognose zu Flutungspegelanstieg, max. -höhe, Übertrittsmengen und Chemismus

- ♦ Bereithalten der technischen Einrichtungen für Eingriffe in die Flutung (Steuerung), wie Wasserhaltung, Fahrung, Bewetterung.

### Ausgewählte Aspekte der Verwahrung und Flutung der WISMUT-Gruben

Zusammenfassend soll hervorgehoben werden, daß die Verwahrung und Flutung von Bergwerken einen mehrstufigen und vielschichtigen Prozeß darstellt, der idealerweise systemanalytisch erfaßt und gesteuert werden sollte, zumal wesentliche Einflußparameter nur mittels Prognosen, d. h. mit Unsicherheiten bestimmt werden können. Eckpunkte jeder Verwahr- und Flutungsstrategie sind einerseits:

- die umfassende Klärung der hydraulischen und hydrogeologischen sowie der geomechanischen Gegebenheiten der jeweiligen Grube/Lagerstätte vor Beginn der Flutung und die systematische Überprüfung mittels geeigneter Meßsysteme im Verlaufe der Flutung;
- die sorgfältige Prüfung von Einflußmöglichkeiten auf die Flutung zur Verringerung negativer Auswirkungen an der Tagesoberfläche sowie im Grundwasser und die Prüfung von Nutzungsmöglichkeiten, z. B. bergbaulicher Hohlräume zur Ablagerung bergbaulicher Abfälle.

Andererseits sollte die Verwahrung und Flutung so schnell wie möglich erfolgen, um die kostspielige Aufrechterhaltung des Grubenbetriebes und die mit dem Offenhalten der Gruben fortdauernden Schadstofffreisetzung und Emissionen über Luft- und Wasserpfad zu unterbinden. Bergmännische Verwahrarbeiten können dem gegenüber insbesondere in älteren tagesnahen Grubenbauen viel Zeit erfordern, so daß die Verwahrung oftmals parallel zur Flutung und unter dem Zeitdruck des ansteigenden Flutungspegels ausgeführt wird.

Eine weitere, ebenfalls kritische zeitliche Abhängigkeit besteht zwischen dem Flutungsverlauf und der rechtzeitigen Betriebsbereitschaft einer Wasserbehandlungsanlage ausreichender Kapazität und der Schaffung von Ablagerungsraum für die Rückstände dieser Anlage. Bei der kapazitiven Auslegung und zeitlichen Fixierung der Betriebsbereitschaft solcher Anlagen gibt es in Anbetracht der bestehenden Unsicherheiten in den meisten Fällen keine Alternative zum „worst case“.

Der Verwahr- und Flutungsprozeß ist bergrechtlich, wasserrechtlich und strahlenschutzrechtlich bezüglich einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen geregelt. Die entsprechenden Genehmigungsverfahren erfordern ein hohes Maß an Abstimmung und Koordination zwischen den am Verfahren Beteiligten und sind aufwendig, da jede Einzelmaßnahme bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtvorhaben geprüft wird, zumal diese Maßnahmen zumeist irreversible Bedingungen schaffen. Dieser Tatbestand und außerdem die Notwendigkeit zu prognostischen Aussagen ist Ursache dafür, daß die Verfahren oft schleppend verlaufen und seitens der Genehmigungsbehörden und deren Gutachter angesichts der vorgegebenen, zumeist naturbedingten Unsicherheiten die verständliche Tendenz besteht, Genehmigungen, Zulassungen und Erlaubnisse nur etappenweise zu erteilen und Rückfallalternativen zu fordern.

Die Gesamtproduktion der Wismut in Höhe von knapp 231.000 t Uran stammt zu etwa 90 % aus der untertägigen Gewinnung und zu etwa 80 % aus den 5 Bergwerken, die sich seit 1990/91 im Besitz der WISMUT GmbH befinden. Aus den Tagebauen Trünzig/Culmitzsch resultierten etwa 10.000 t Uran und aus dem Tagebau Lichtenberg etwa 13.000 t Uran. Während die Tagebaue Trünzig und Culmitzsch nach Auserzung als Schlammteich genutzt wurden, deren Sanierung in situ und in lagenweiser Abdeckung erfolgt (s. Beitrag Daenecke und Jakubick in diesem Band) ist die Verwahrung des Tagebaues Lichtenberg engstens mit der Haldensanierung am Standort Ronneburg verknüpft, indem das gesamte Haldenmaterial südlich der Autobahn in das Tagebaurestloch eingebaut wird (Abb. 1).



Die Verwahrung der fünf Bergwerke der WISMUT GmbH ist zu mehr als 90 % abgeschlossen. Lediglich in der Grube Schlema-Alberoda und in der Grube Königstein sind noch Verwahrarbeiten durchzuführen. Kenndaten zur Verwahrung der WISMUT-Gruben sind aus der Tabelle 1 ersichtlich.

Standort	Schächte		Geomechan. Stabilisierung und tagesnahe Hohlräume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Bemerkungen
	Anzahl (Stück)	Verfüllung (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )		
Ronneburg	40	1.161	4.604	Abschluß 2000
Schlema	6*	142	876	*weitere Schächte Nachverw.
Pöhla	-	14*	12	*Stollen und Überhauen
Gittersee	5	29	4	
Königstein	5	51	184	

Tabelle 1: Kenndaten zur Verwahrung von Bergwerken der WISMUT GmbH

Kenndaten zur Flutung der Bergwerke sind in Tabelle 2 aufgeführt. Während in der Grube Pöhla die Flutung bereits Ende 1995 auf den Endstand geführt wurde, laufen in der Grube Königstein letzte Vorbereitungen für den Beginn der ersten Flutungsstufe bis zum Niveau 140 m NN.

Standort	Offener Hohlraum (Mio. m <sup>3</sup> )	Flutung			Bemerkungen
		Beginn	Stand 6/00	Übertritt (Progn.)	
Ronneburg	22	1/98	50%	2002	Erreichen der MSS
Schlema	34	1/91	87%	2003	
Pöhla	1	1/92	100%	Nov 1995	
Gittersee	1	10/95	100%*	Aug 1999	*zur Zeit gen. Einstauhöhe
Königstein	13	1/01	0%	2012	

Tabelle 2: Kenndaten zur Flutung von Bergwerken der WISMUT GmbH

Nachfolgend werden ausgewählte Aspekte und gewonnene Erfahrungen bei der Verwahrung und Flutung der einzelnen Gruben bzw. Lagerstätten kurz dargestellt.

Das riesige Verbundbergwerk Ronneburg steht überwiegend in pyrithaltigen paläozoischen Schiefen, die bei Oxydation zur Selbstentzündung und Sauerwasserbildung neigen. Das Bergwerk erstreckt sich in SW/NE-Richtung über 15 km und eine Teufe von Tagesnähe bis knapp 900 m. Der Absenkungstrichter hat an der Oberfläche eine Ausdehnung von mehr als 50 km<sup>2</sup>. Das Bergwerk schlug in der Produktions-

und Nachproduktionsphase die Bergbauwässer nach Durchlauf von Absetzanlagen in die Wipse (kleiner Vorfluter der Weissen Elster) und die Sprotte (kleiner Vorfluter der Pleisse) ab. Nach Abschluss der Flutung muss mit Flutungswasserübertritten an insgesamt sechs Örtlichkeiten gerechnet werden. Die Hauptmenge der kontaminierten Flutungswässer wird im Gessental in einem Niveaubereich von 240 m NN bis 270 m NN zu Tage treten (Abb. 1).

Die Verwahrung der Schächte, der tagesnahen Grubenbaue sowie der hydrologisch relevanten Strukturen erfolgte mit selbsterhärtendem Versatz. Die Schächte wurden mit kohäsiven Versatzsäulen verwahrt. Die Versatztechnologie war während der Produktion auf ein sehr hohes Niveau entwickelt worden, so dass die umfangreichen Verwahrarbeiten (Tabelle 1) problemlos und effizient in eigener Regie durchgeführt werden konnten. Bezüglich Grundwasserschutz war die hydraulische Abdichtung der Crimmitschauer Störung zwischen den Grubenfeldern Beerwalde und Drosen von besonderer Bedeutung. Eine weitere Schwerpunktmaßnahme war der Bau hydraulischer Dämme zwischen den Grubenfeldern nördlich und südlich der Autobahn zum Schutz gegen das Eindringen stärker kontaminierter Flutungswässer aus dem Süden in den nördlichen Bergwerksbereich, der durch geringere Kontamination des Flutungswassers gekennzeichnet ist und in dem die Flutung erst zu einem späteren Zeitpunkt begonnen werden konnte als im südlichen Revier.

Von besonderer Bedeutung für die Flutung des Bergwerks Ronneburg ist die Prognose des zeitlichen Verlaufs der Flutung, die Bestimmung des sich natürlich einstellenden Flutungsniveaus und der Übertrittstellen sowie Menge und Qualität der in den Tagesbereich austretenden Flutungswässer. Zur Lösung dieser Aufgaben wurde die Entwicklung einer Kette von Modellen notwendig. [6, 7] Das Flutungsmodell erfasst den gesamten Raum innerhalb des Absenkungstrichters. Die Flutungsentwicklung wird in einem multiplen Boxmodell berechnet, in dem das umfangreiche bergbauliche Hohlraumssystem berücksichtigt wird und mit dem geologischen Feld (Porenmodell) verknüpft wird. Die anfänglich erstellten Prognosen über den zeitlichen Verlauf der Flutung mussten inzwischen gravierend korrigiert werden (Abb. 2). Eine von mehreren Ursachen hierfür war die *Einschätzung des flutbaren Hohlraums*. Außer dem offenen Grubenhohlraum wurde Porenhohlraum in den ausgedehnten Versatzmassiven, den Bereichen mit ehemaliger Gewinnung im Bruchbau sowie im entwässerten Gebirge in Ansatz gebracht. Hier bestehen jedoch große Unsicherheiten hinsichtlich einerseits des *Entwässerungsgrades* und andererseits bezüglich des *Auffüllverhaltens* der jeweiligen Porenräume. Als Folge des schnelleren Flutungsfortschritts laufen gegenwärtig unter hohem zeitlichen Druck die Planungen für eine Wasserbehandlungsanlage, ein Austrittsmonitoring sowie ein System zur Fassung und Ableitung von im Tagesbereich austretenden Flutungswässern. Diese Anlagen überschneiden sich örtlich teilweise mit dem Planungsbereich der für das Jahr 2007 in Vorbereitung befindlichen Bundesgartenschau. Hier besteht die Chance, das Thema der EXPO 2000 „Mensch-Natur-Technik“ für die Bundesgartenschau 2007 fortzuschreiben und in die Thematik der Bundesgartenschau zu integrieren. Die Steuerung der Flutung kann nach Fertigstellung der Wasserbehandlungsanlage durch einen Tiefbrunnen im zentralen Grubenfeld Schmirchau erfolgen.

Das Bergwerk Schlema-Alberoda steht in metamorphen Schiefem im Dachbereich eines Granitmassivs. Es besteht aus vier Förderkaskaden und reicht im NE bis in eine Teufe von -1470 m NN. Die Ausrichtung umfasst u.a. 54 Tagesschächte und 4200 km Strecken auf insgesamt 62 Sohlen. Der offene bergmännische Hohlraum beläuft sich auf rund 41 Mio. m<sup>3</sup>, davon liegen rund 39 Mio m<sup>3</sup> unterhalb der Markus-Semmler-Sohle, welche das maximal mögliche Flutungsniveau darstellt. Das vorherrschende Abbauverfahren war der Firstenstoßbau mit Versatz (Abb. 3 und 4). Die Grube befindet sich seit Juli 1990 in Flutung. [8] Aus dem Flutungsverlauf sind die Geometrie der Lagerstätte, die Struktur des Bergwerkes und die Eingriffe in den Flutungsprozeß zu erkennen (Abb. 5).

Die besondere Herausforderung bei der Verwahrung des Bergwerks Schlema-Alberoda liegt in der *Sicherung der Tagesoberfläche* und der Beherrschung von geomechanischen Instabilitäten, welche im Zuge der Flutung der oberen Sohlen des Bergwerks ausgelöst werden können. Das Problem ist durch den frühen WISMUT-Bergbau der vierziger und fünfziger Jahre verursacht, der mit grosser Intensität im tagesnahen Bereich begonnen und den Gängen in die Teufe folgend fortgesetzt wurde, ohne

ausreichende Sicherheitspfeiler. Ausserdem trägt die enge Scharung der Gänge, die notwendige *Nachverwahrung* wegen unzulänglicher Verwahrungsmethoden der frühen Bergbauphase sowie die seit 1979 offenkundige *Gebirgsschlagsgefährdung* der Grube zu den Problemen bei.

Grundlage für die Planung der Verwahrarbeiten bildet eine seit 1971 mehrfach aktualisierte *Bergschadenkundliche Analyse*. Bisher wurden darin insgesamt rund 2700 tagesnahe Grubenbaue und Tagesöffnungen (Schächte, Schürfe, Stollenmundlöcher und Gesenke) erfaßt und nach Art der von ihnen ausgehenden Gefährdung der Tagesoberfläche in drei Sicherungsstufen unterschieden. Verwahrungsarbeiten auf der Grundlage dieser *Bergschadenkundliche Analyse* erfolgen seit 1971. Durch die WISMUT GmbH wurden in diesem Rahmen seit 1991 75 Untersuchungs-gesenke - vorrangig zur Verwahrung von tagesnahen Grubenbauen der Sicherungsstufe 1 (Gefährdung durch Tagesbruch) - geteuft und 139 km Such- und Versatzbohrungen niedergebracht. Das in die aufgefundenen Hohlräume eingebrachte Volumen an Beton/Versatz beträgt rund 135.000 m<sup>3</sup>. Die Kosten der Verwahrarbeiten an tagesnahen Grubenbauen werden bis zu ihrem geplanten Abschluss im Jahr 2005 auf rund 290 Mio. DM geschätzt. - Dennoch verbleibt ein gewisses Restrisiko für Tagesbrüche und Bergschäden (Sicherungsstufe 2) aufgrund zu erwartender Setzungen mit aufsteigendem Flutungspegel und möglicherweise ausgelöst durch seismische Ereignisse.

Die umfangreichen Verwahrarbeiten auf den oberen Sohlen des Bergwerks und die Notwendigkeit den Flutungswasseranstieg insbesondere im tagesnahen Bereich zu steuern, führte zu frühzeitigem Bau und Inbetriebnahme einer Wasserbehandlungsanlage. Gegenwärtig wird die Kapazität dieser Anlage erweitert, um dem höher als erwarteten Wasserzufluss in die Grube Rechnung zu tragen. Bezüglich der Grubenzuflüsse ist zu bemerken, dass über der Grube kein geschlossener Grundwasserabsenkungstrichter existiert und die Infiltrationswässer zum Teil lokal in Bereichen tektonischer Störungen oder auch über tagesnahe Grubenbaue, die unterhalb von Vorflutern liegen, in die Grube eindringen. Die aufgrund des steigenden Flutungspegels bedingte Verringerung des hydraulischen Druckgradienten bzw. die anzunehmende flächenmässige Verkleinerung des Absenkungstrichters hat bisher nicht zu einer Reduzierung der Zuflussmengen geführt.

Das Bergwerk Pöhla mit der Lagerstätte Tellerhäuser steht in standfesten kontaktmetamorphen Schiefen im Hangenden eines Granitmassivs. Die Schiefer enthalten Einschaltungen von Skarnen, die teilweise vererzt sind (Zinnstein, Magnetit) und teilweise Karsthohlräume aufweisen. Die Grube wurde von der Stollensohle durch zwei Blindschächte und sechs Sohlen im Abstand von 60 m erschlossen. Der unterhalb der Stollensohle geflutete Hohlraum beträgt etwa 1 Mio. m<sup>3</sup>. Die Flutung begann im Januar 1992 und hatte im November 1995 die Stollensohle erreicht. Seitdem werden die überlaufenden Wässer (ca. 17 m<sup>3</sup>/h) behandelt und in die Vorflut abgestossen. Ein grosser Teil der Infiltrationswässer (35 m<sup>3</sup>/h) wird im Stollen gefasst und kann ohne Behandlung in die Vorflut abgeleitet werden (Abb. 6).

Die Entwicklung des Chemismus der Flutungswässer weist ein Phänomen auf, das bisher noch nicht zufriedenstellend erklärt werden kann. [8] Mit Abschluss der Flutung des Grubenhohlraums fiel der Sulfatgehalt der Wässer von einigen 100 mg/l in kurzer Zeit auf Werte von kleiner 5 mg/l ab. Gleichzeitig fiel der Urangehalt von 5 mg/l auf kleiner 0,2 mg/l, so dass inzwischen die Uranabscheidung in der Behandlungsanlage eingestellt werden konnte. Demgegenüber stieg im gleichen Zeitraum das Radium auf etwa das zehnfache an (7 bis 8 Bq/l). Das Arsen weist steigende Tendenz auf (Abb. 7). Es liegt nahe anzunehmen, dass es sich um Reduktionsprozesse handelt, die für die Verringerung der U-Gehalte und Sulfatgehalte verantwortlich sind. Das Verhalten von Radium steht weiterhin zur Diskussion.

Das Bergwerk Dresden-Gittersee ist Bestandteil des Steinkohlenreviers Freital, in dem mehr als 400 Jahre lang Steinkohle gewonnen wurde. Das Bergwerk ist über alte Stollen eng mit den umliegenden Grubenfeldern des aufgelassenen Steinkohlenbergbaus verbunden. Während der Uranproduktion (Einstellung 1989) wurden die gehobenen Grubenwässer nach Behandlung in den Kaitzbach abgeschlagen. Die Behandlung war und ist im wesentlichen auf die Reduzierung des Eisengehaltes



ausgerichtet. Radonnuklid-, Schwermetall-, Sulfat- und Mangangehalte der gehobenen Flutungswässer liegen für Einleitungen in die Vorflut im tolerablen Bereich.

Das Flutungskonzept sah bisher die Ableitung der Flutungswässer über den durch den Bergbau geschaffenen Grundwasserleiter („Alter Mann“) zum Elbstolln und damit in die Elbe vor (Abb. 8). Die angenommene hydraulische Verbindung hätte oberhalb des Niveaus des Elbstollns (110 m NN) wirksam werden müssen. Trotz Einstaus der Flutungswässer bis auf derzeit 160 m NN ist der Abfluss bisher nicht bzw. nur im geringem Umfang eingetreten (Abb. 9). [9, 10]

Der Flutungsprozess wird gegenwärtig über zwei Förderbohrlöcher gesteuert. Hiermit wird sicher gestellt, dass

- der genutzte Obere Grundwasserleiter nicht kontaminiert wird
- unkontrollierte Austritte von Flutungswasser an der Tagesoberfläche vermieden werden und
- der ehemalige Schurfschacht 60, in den 1958 wassergefährdende Stoffe ungeordnet eingelagert wurden, nicht überflutet wird.

Bei dem jetzigen Flutungsstand ist eine *Schichtung des Flutungswassers* erkennbar, d.h. weniger kontaminiertes Infiltrationswasser legt sich über stärker kontaminiertes tieferes Flutungswasser. Diese Schichtung lässt einen Überlauf auf möglichst hohem Niveau angeraten sein, um langfristige Wasserbehandlung zu vermeiden. Gegenwärtig laufen Untersuchungen zu Alternativen der Flutungswasserableitung zur Elbe und zur Weisseritz. Im ungünstigsten Fall könnten Investitionen für die Herstellung einer bergmännischen Verbindung in zweistelliger Millionenhöhe notwendig werden, um die Flutung erfolgreich zu Ende zu führen.

Die Flutung des Bergwerks Königstein befindet sich seit 10 Jahren in der Vorbereitung. Nach Auswertung von zwei groß angelegten Flutungsexperimenten, liegt jetzt der Antrag auf Flutung bis zum Niveau 140 m NN den Behörden zur Entscheidung vor. Mit dem Beginn des Einstaus wird ab Januar 2001 gerechnet.

Das Bergwerk steht in Sandsteinen mit zwischengelagerten Tonen und kristallinen Gesteinen im Liegenden. Es nimmt eine Fläche von etwa 6 km<sup>2</sup> ein. Der offene Grubenhohlraum beträgt etwa 3.3 Mio. m<sup>3</sup>. Etwa 250 Mio. m<sup>3</sup> Gestein sind von der untertägigen Laugung betroffen. Eine Kontrollstrecke im nördlichen Abstrom und an der Westflanke isolieren die Lagerstätte hydraulisch (gegenwärtig und in der ersten Etappe der Flutung) (Abb. 10).

Das Hauptziel der Verwahrung besteht bekannterweise darin, den 4. Grundwasserleiter, in dem der Bergbau umgegangen ist (anfangs konventioneller Abbau, später schwefelsaure Blocklaugung) so weit zu restaurieren, dass es mit dem aufgehenden Grundwasser zu keiner unzulässigen Belastung des 3. Grundwasserleiters kommt, der eine bedeutende Grundwasserressource darstellt. [11] Die untertägigen Verwahrarbeiten konzentrierten sich demzufolge auf tektonische Schwächezonen, die eine hydraulische Verbindung zwischen dem Grubenraum und dem 3. Grundwasserleiter ermöglichen könnten und auf einen Bereich, wo ehemals eingebrachter Versatz nach Auflösung eine Beeinträchtigung des Stauhizontes zwischen 4. und 3. Grundwasserleiter besorgen lassen.

Während der Flutung sollen einerseits so schnell wie möglich weitgehend natürliche Bedingungen eingestellt werden und andererseits der anfänglich hohe Schadstoffaustrag durch Reinigung der Drainagewässer eliminiert werden (Abb. 11). Die Flutungsexperimente lieferten u. a. wichtige Daten für das Mobilisations-, Transport- und Austragsverhalten der Kontaminanten aus dem schwefelsauer gelaugten Gestein. Diese Daten dienen u. a. zur Kalibrierung des Flutungsmodells, des Schadstofftransportmodells sowie detaillierter Prozeßmodelle. [12] Mit den entwickelten und angepaßten Modellwerkzeugen, ihrer Kalibrierung durch umfangreiche Meßdaten sowie einem teilweise automatisierten Monitoringsystem zur Überwachung der Flutung im Flutungsraum und außerhalb

wurden die Voraussetzungen für realistische Prognosen und eine effiziente *Steuerung des Flutungsprozesses* geschaffen. Zusätzlich wurden verschiedene Technologien zur Unterstützung des Flutungsprozesses erprobt (Hurst et al. in diesem Band) [13] über deren Einsatz im Rahmen von Kosten/Nutzen-Abwägungen bei zunehmender Erkenntnis bezüglich der Entwicklung des Flutungsprozesses zu entscheiden sein wird.

## Schlußfolgerungen

Die Stilllegung und Verwahrung von Bergwerken beinhaltet einen komplexen Prozeß, der einer systematischen Analyse und sorgfältigen Planung bedarf, um Gefahren für Menschen dauerhaft auszuschalten, eine nachhaltige Umweltverträglichkeit sicherzustellen und langfristige kostspielige Haftungsansprüche in Grenzen zu halten. Die Maßnahmen der Verwahrung betreffen i. w. die Sicherung der Tagesoberfläche und die Minimierung von dauerhaften Beeinträchtigungen von Grund- und Oberflächenwässern (durch Flutung) und der Atmosphäre (durch Gase: Radon, Methan). Die umweltgerechte Stilllegung und Verwahrung von über lange Zeiträume umweltunverträglich geführten Bergwerksbetrieben ist möglich, jedoch durch hohe Kosten gekennzeichnet [14], die oftmals zu einem hohen Anteil durch Altbergbau verursacht werden. Der höchste Aufwand bei der Stilllegung und Verwahrung der WISMUT-Bergwerke entfällt auf die Behandlung von kontaminierten Flutungswässern, die aus den gefluteten Gruben an der Tagesoberfläche austreten. Die optimale prozeßtechnische und kapazitive Auslegung solcher Behandlungsanlagen und ihre rechtzeitige Betriebsbereitschaft machen es erforderlich, den Flutungsprozess hydraulisch, hydrogeologisch und goechemisch zu kontrollieren und zu modellieren, um mittels Prognosen die Eckparameter für die Wasserbehandlungsanlage einschließlich Betriebsdauer festlegen zu können. Diese Modelle müssen mittels Monitoringdaten ständig nachkalibriert werden, um inherente Unsicherheiten abzubauen. Generell ist ein ausgewogenes Verhältnis von empirischen Beobachtungen und der Erhebung von Meßdaten hoher Qualität und deren sorgfältiger Interpretation einerseits und der umsichtigen Anwendung von Modellen, entsprechend Stand der Technik, andererseits zu beachten. Eine Steuerung der Flutung mittels Eingriff durch Wasserhebung sollte nur dann vorgesehen werden, wenn die Unsicherheiten betreffs negativer Umweltauswirkungen gravierend sind. Obgleich generell ein möglichst schnelles, kontinuierliches „Durchfluten“ die ökologisch-ökonomisch optimale Vorgehensweise darstellt, ist es in Anbetracht der prognostischen Unsicherheiten praktikabel, den Flutungsprozess in Etappen zu planen und erforderlichenfalls Experimentalflutungen vorzuschalten. Unsere bisherige Erfahrung lehrt uns, daß die Flutung von Bergwerken trotz sorgfältiger konzeptioneller und planerischer Vorbereitung und meßtechnischer Überwachung ein ständiger Lernprozeß ist.

## Referenzen

- [1] Agricola, G. (1556): *De re metallica libri XII* (Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen). Verlag Froben, Basel.
- [2] v. Carlowitz, H.C. (1713): *Sylvicultura Oeconomica* (Die Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht). Leipzig
- [3] Berlin Guidelines (1991): *Mining and environment guidelines adopted the international round-table on mining and the environment*. Berlin
- [4] Gatzweiler, R. und Mager, D. (1993): *Altlasten des Uranbergbaus - Der Sanierungsfall Wismut*. - *Die Geowissenschaften*, Nr. 5 - 6, S. 164 - 172.

- [5] Hagen, M. und Lange, G. (1995): Der Flutungsprozeß ehemaliger Uranerzgruben in Ostdeutschland als Sanierungsschwerpunkt der WISMUT GmbH. - *Erzmetall* 48, Nr. 11, S. 790 - 804
- [6] Gatzweiler, R. und Jakubick, A.T. (1998): Hydrogeologische Prognosen bei der Sanierung der stillgelegten Produktionsanlagen der WISMUT. - In: Merkel, B. und Helling, C. (Hrsg.): *Uranium Mining and Hydrology II, Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, Germany, September 1998*. S. 1 - 13; Verlag Sven von Loga, Köln 1998.
- [7] Paul, M., Sänger, H.-J., Snagowski, S., Märten, H., Eckart, M. (1998): Flutungsprognose Standort Ronneburg - Ergebnisse eines integrierten Modellansatzes. - In: Merkel, B. und Helling, C. (Hrsg.): *Uranium Mining and Hydrology II, Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, Germany, September 1998*. S. 130 - 139; Verlag Sven von Loga, Köln 1998.
- [8] Meyer, J., Jenk, U., Schuppan, W., Knappig, R. (1998): Hydrochemische Aspekte und Interpretationen der Grubenflutungen des Sanierungsbetriebes Aue der WISMUT GmbH. - In: In: Merkel, B. und Helling, C. (Hrsg.): *Uranium Mining and Hydrology II, Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, Germany, September 1998*. S. 124 - 129; Verlag Sven von Loga 1998.
- [9] Gatzweiler, R. (2000): Vorbereitung und Stand der Sanierungs- und Verwahrungsarbeiten der WISMUT GmbH am Standort Dresden-Gittersee. - In: Schauer, M. und Brause, H. (Hrsg.) *450 Jahre Steinkohlen- und Uranerzbergbau im Raum Freital und seine heutigen Auswirkungen. - Exkursionsführer und Veröffentlichungen, GGW Nr. 208, 66 S., Berlin, 2000*.
- [10] Sporbert, U. und Friedrich, J. (2000): Sanierung bzw. Verwahrung bergmännischer Hohlräume und bergbaulicher Anlagen am Standort Dresden-Gittersee. - In: Schauer, M. und Brause, H. (Hrsg.) *450 Jahre Steinkohlen- und Uranerzbergbau im Raum Freital und seine heutigen Auswirkungen. - Exkursionsführer und Veröffentlichungen, GGW Nr. 208, 66 S., Berlin, 2000*.
- [11] Schreyer, J. und Zimmermann, U. (1998): Das Flutungskonzept Königstein - Stand und Ausblick. - In: Merkel, B. und Helling, C. (Hrsg.): *Uranium Mining and Hydrology II, Proceedings of the International Conference and Workshop, Freiberg, Germany, September 1998*. S. 140 - 151; Verlag Sven von Loga, Köln 1998.
- [12] Zieenbalg, G., Schreyer, J.: In-situ-Fixierung von Schadstoffen in Sandsteinen der Lagerstätte Königstein. *DECHEMA Kolloquium*, Nov. 1996, Freiberg
- [13] Kahn, R., Abel, A., Luckner, L.: Prozeß- und Parameteridentifikationsprobleme bei der Prognose des Abstromes aus der Grube Königstein. 5. Workshop, Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus, 18./19. Mai 2000, Dresden
- [14] BMWI (1995): Kosten der Stilllegung und Sanierung von Urangewinnungsprojekten im internationalen Vergleich - Einflußgrößen und Abhängigkeiten (Auszug aus dem Abschlußbericht zum Forschungsauftrag Nr. 37/93) BMWI Studienreihe Nr. 90.



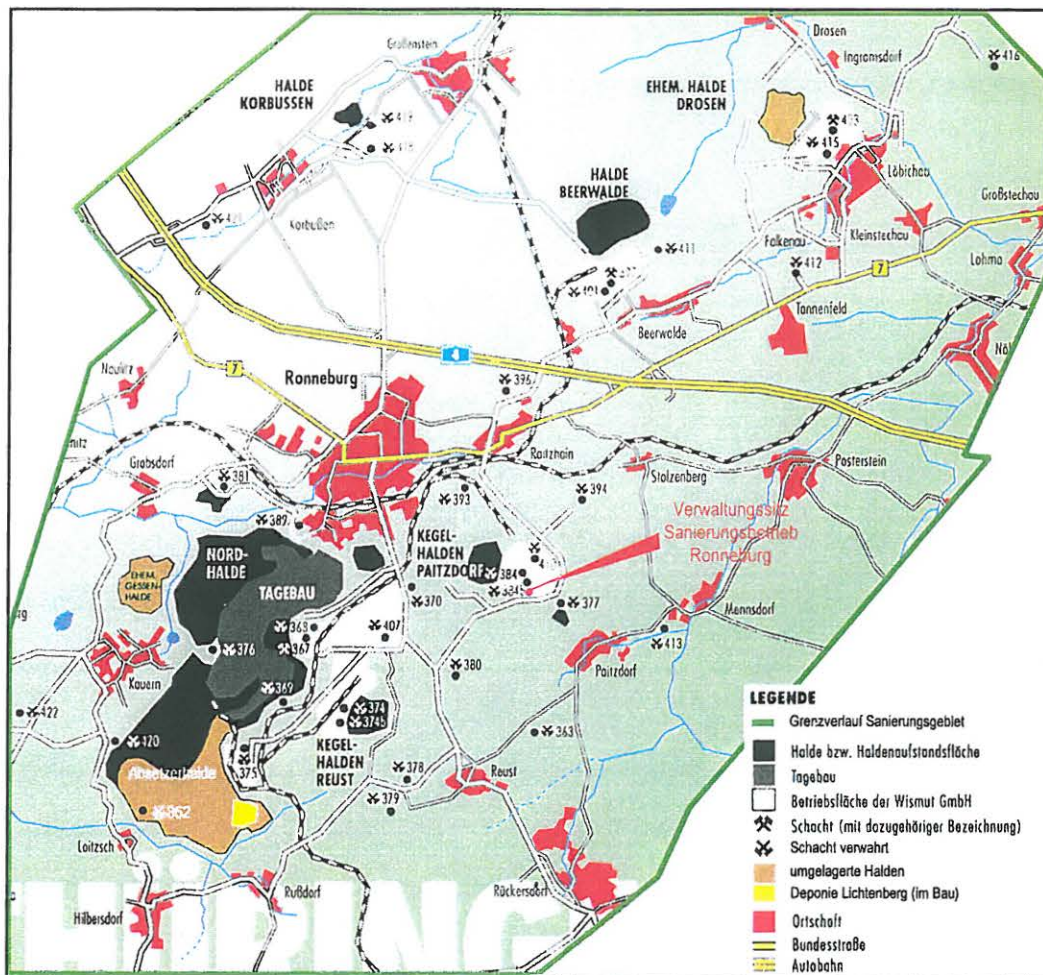


Abb. 1 Bergbaubetrieb Ronneburg

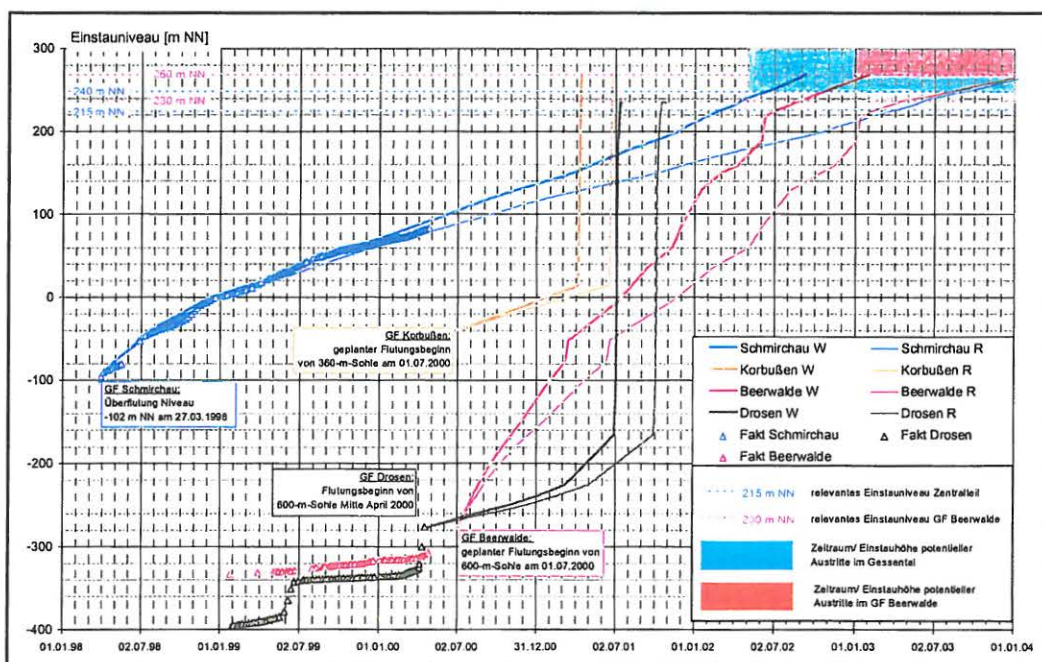


Abb. 2 Flutungsprognosen und -verlauf Ronneburg









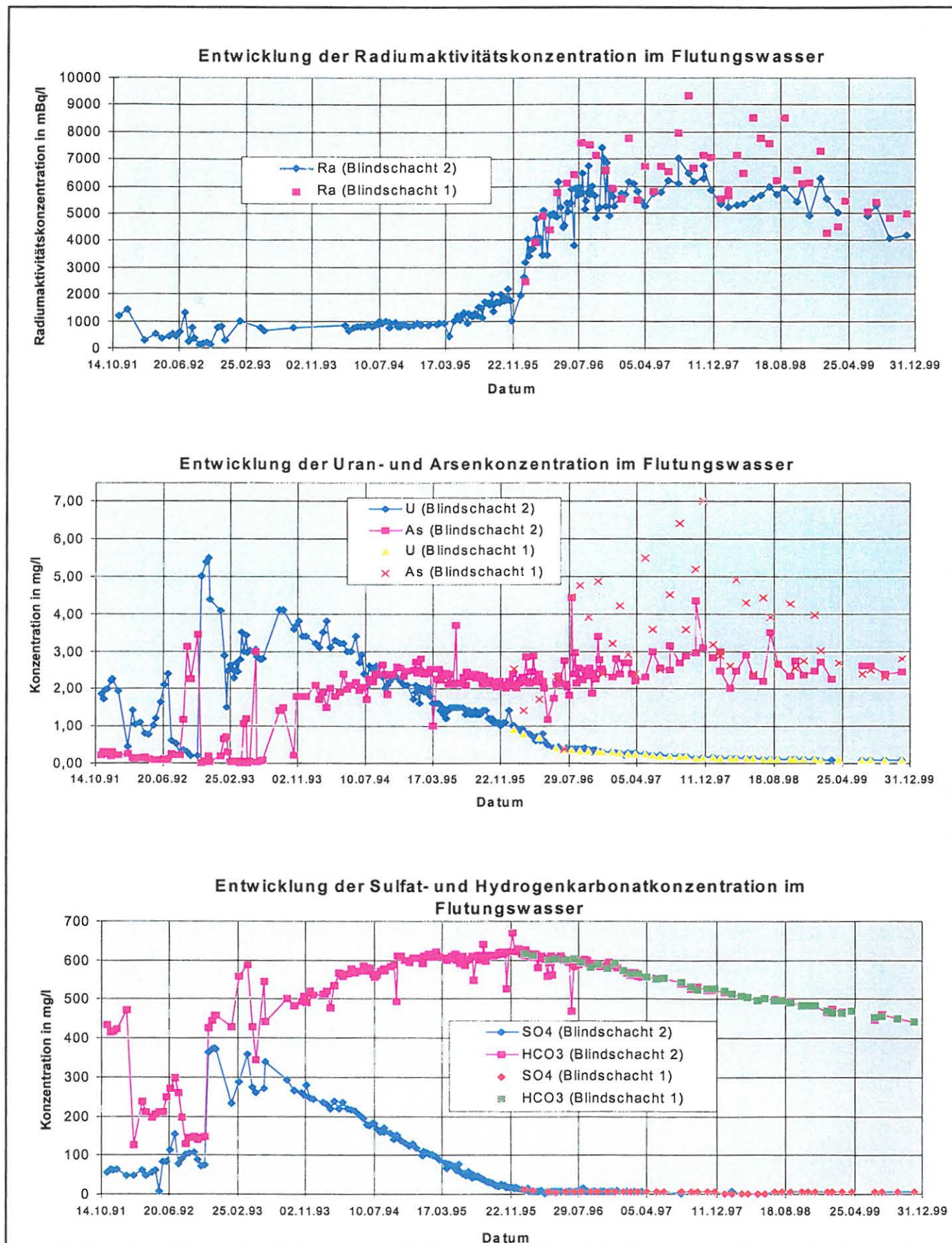


Abb. 7 Chemismus Flutungswasser Pöhla







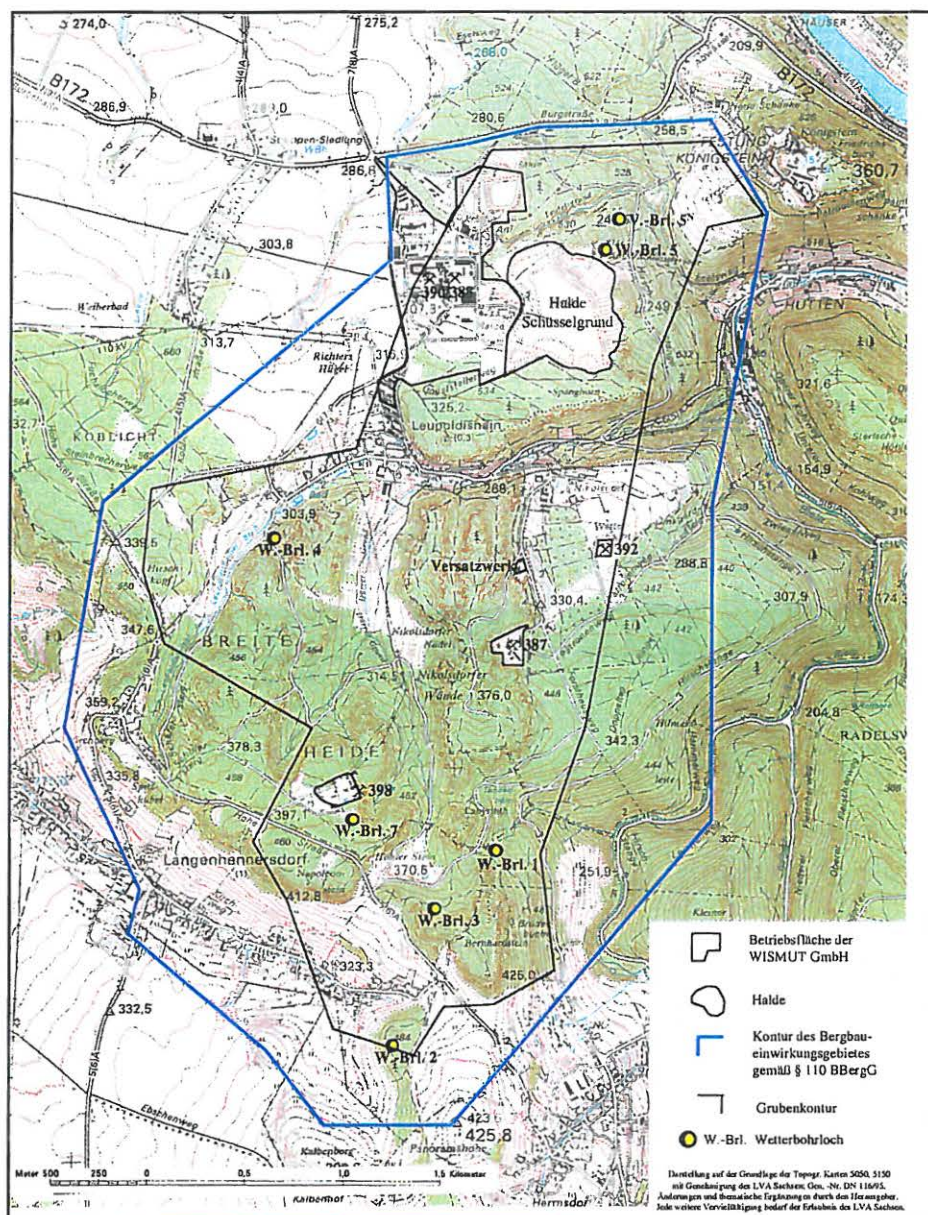


Abb. 10 Grubenfeld und Betriebsanlagen Königstein

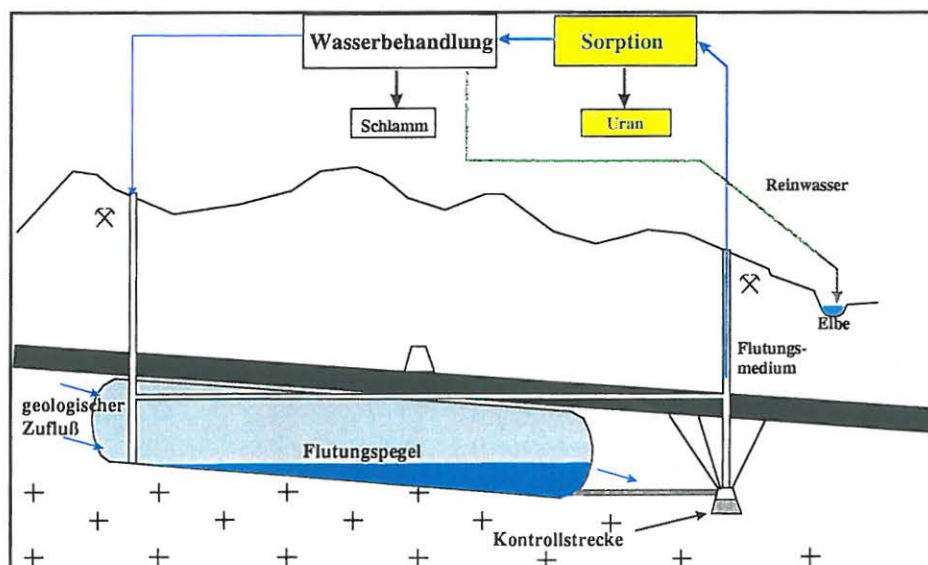


Abb. 11 Flutung Grube Königstein