

Water Management – a Core Task of the Wismut Remediation Programme

Water management and conventional technical water treatment are by far the most cost-intensive long-term tasks of the Wismut remediation programme. Over the medium term, there is no viable alternative to the operation of active systems to catch and treat contaminated mine waters at the Ronneburg, Schlema, Königstein, Pöhla, Seelingstädt and Helmsdorf sites. Based on the status quo this paper outlines the key issues of the Wismut GmbH water management strategy over the medium and long term. It is focused primarily on achieving protection goals for potentially impacted water bodies in the surroundings of Wismut sites and on optimising associated remediation expenditure as well as on cre-

ating the prerequisites for achieving low post-remedial care and maintenance or walk-away system status over the long term. The topic of this paper is the presentation of priority tasks related to future water management at Wismut sites in Saxony and Thuringia. The reflections are based on experiences and lessons learned and take into account current statutory management requirements referring to ground and surface water bodies affected by Wismut. The paper is based on a presentation made at the International Mining Symposium WISSYM 2015 on 2nd September 2015 in Bad Schlema, Germany.

Kernaufgaben des langfristigen Wassermanagements an den sächsisch-thüringischen Wismut-Standorten

Wassermanagement und konventionell-technische Wasserbehandlung sind die mit Abstand kostenintensivste Langzeitaufgabe des Wismut-Sanierungsprogramms. An den Standorten Ronneburg, Schlema, Königstein, Pöhla, Seelingstädt sowie Helmsdorf ist der Betrieb aktiver Systeme zur Fassung und Behandlung bergbautypisch kontaminierter Wässer mittelfristig alternativlos. Ausgehend vom status quo umreißt der Beitrag Eckpunkte der mittel- und langfristigen Wassermanagementstrategie der Wismut GmbH. Diese ist primär gerichtet auf die Sicherstellung der Schutzziele für potentiell beeinflusste Wasserkörper im Umfeld der Wismut-Standorte und die Optimierung der diesbezüglichen Sanierungsaufwendungen, gleichzeitig jedoch auf die langfristi-

ge Schaffung von Voraussetzungen zur Erreichung nachsorgefreier bzw. nachsorgearmer Systemzustände. Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die Darlegung von Schwerpunktaufgaben des künftigen Wassermanagements an den sächsisch-thüringischen Wismut-Standorten. Die Überlegungen basieren auf den Erkenntnissen und Erfahrungen der bisherigen Betriebspraxis und nehmen Bezug auf die aktuellen Bewirtschaftungsvorgaben für die von Wismut beeinflussten Grund- und Oberflächenwasserkörper. Der Beitrag stützt sich auf einen im Rahmen des Internationalen Bergbau-Symposiums WISSYM 2015 am 2. September 2015 in Bad Schlema gehaltenen Vortrag.

1 Introduction

Mining practices of bygone times did not live up to the high standards of modern mining operations and their requirement to leave former production premises and deposited residues in a condition that was not only physically but also chemically stable. Rather the emission of mine and seepage waters laden with high acidity, metal and salt content is a frequent corollary and difficult legacy of historic mining and processing operations (1, 2). As a consequence, the control or mitigation, respectively, of environmental impacts associated with contaminated mine waters ties up enormous public resources worldwide (3, 4).

1 Einführung

Dem Anspruch modernen Bergbaus, ehemalige Betriebsstätten wie abgelagerte Rückstände in einem nicht nur physikalisch, sondern auch chemisch stabilen Zustand zu hinterlassen, wird die Betriebspraxis vergangener Epochen nicht gerecht. Vielmehr ist die Emission von mit hohen Aciditäts-, Metall- und Salzfrachten beladenen Gruben- und Sickerwässern häufige Begleiterscheinung und schwerwiegendes Erbe historischer Bergbau- und Aufbereitungstätigkeit (1, 2). Folgerichtig bindet die Beherrschung bzw. Minderung der mit kontaminierten Bergbauwässern einhergehenden Umweltauswirkungen weltweit erhebliche gesellschaftliche Ressourcen (3, 4).



Fig. 1. WTP Schlema-Alberoda.
Bild. 1. WBA Schlema-Alberoda.
Source/Quelle: Wismut GmbH

Uranium mining operations conducted from 1945 through 1990 in the Saxothuringian uranium province have by their sheer size – the total solid mass mined amounted to ca. 1.2 bn t and resulted in ca. 1 bn t of mine waste and some 175 m t of processing residues – and not least because of their rigid production methods left behind mining legacies of unprecedented dimensions, for the rehabilitation of which the Federal Republic of Germany has provided funds totalling more than 7 bn € (5, 6, 7). While all mines have been decommissioned and physical remedial work on mine dumps, tailings ponds and plant areas is to a large extent completed, long-term water management at former production sites will continue to require the provisions of considerable funds. According to current estimates, expenditure to be incurred for long-term water management during the post-remedial period will represent some 70% of the total working fund planned for the long-term tasks. As a consequence, optimisation of business procedures is one of the key management tasks facing the Wismut remediation company.

2 Status quo

In the overall context of the Wismut remediation programme, three basic tasks are assigned to water management:

- create prerequisites for the reuse of industrial premises with a view to obtaining release from mines inspectorate supervision in accordance with article 69 of the Federal Mining Act (§ 69 BBergG),
- decrease the existing radiation exposure having regard to the dose limit for an individual member of the public of 1 mSv/a in keeping with the Ordinance on Nuclear Safety and Radiation Protection (VOAS), and
- protect ground and surface water bodies in accordance with the prerequisites of the Federal Water Act (WHG), state water laws and applicable regulations (OGewV, GrwV).

In order to ensure compliance with protection goals for receiving streams and aquifers potentially affected by mine-related emissions downstream of production premises, Wismut GmbH currently operates six water treatment plants (WTP) and the associated systems for water catchment, delivery and discharge as

Der zwischen 1945 und 1990 in der saxothuringischen Uranprovinz umgegangene Uranbergbau hat aufgrund seiner Umfänge – aus den insgesamt ca. 1,2 Mrd. t an bergbaulicher Massenbewegung resultierten ca. 1 Mrd. t an Bergematerial und etwa 175 Mio. t Aufbereitungsrückstände – nicht zuletzt jedoch wegen seiner rigiden Produktionsmethoden zu einer Altlast singulären Ausmaßes geführt, für deren Sanierung die Bundesrepublik Deutschland Finanzmittel im Umfang von mehr als 7 Mrd. € aufwendet (5, 6). Während mittlerweile sämtliche Gruben verwahrt und die physischen Sanierungsarbeiten an Halden, Schlammteichen und Betriebsflächen zum überwiegenden Teil abgeschlossen sind, wurde spätestens nach der Jahrtausendwende evident, dass für das langzeitliche Wassermanagement an den ehemaligen Betriebsstätten auch zukünftig noch bedeutende Ressourcen bereitzustellen sind (7). Von den zwischen 1991 und 2014 für die Sanierungsarbeiten der Wismut GmbH aufgewendeten 5,8 Mrd. € wurden bereits mehr als 800 Mio. € für Maßnahmen zur Behandlung kontaminierter Wässer verausgabt. Aktuelle Abschätzungen zufolge wird das langzeitliche Wassermanagement in der Nachsorgephase etwa 70% der gesamten für Langzeitaufgaben geplanten Betriebsmittel beanspruchen. Somit ist die Optimierung der diesbezüglichen Betriebsprozesse eine der wesentlichen Managementaufgaben, denen sich das Sanierungsunternehmen Wismut gegenüber sieht.

2 Status quo

Im Gesamtkontext des Wismut-Sanierungsprogrammes dient das Wassermanagement drei Grundaufgaben:

- der Schaffung von Voraussetzungen zur Wiedernutzbarmachung der Betriebsflächen zur Erlangung des Endes der Bergaufsicht gemäß § 69 BBergG, einschließlich der Umsetzung sanierungsbedingt notwendiger Hochwasserschutzmaßnahmen,
- der Verminderung von vorliegenden Strahlenexpositionen unter Berücksichtigung des Individualdosisrichtwerts für die allgemeine Bevölkerung von 1 mSv/a gemäß VOAS sowie
- der Minderung bestehender konventioneller Stoffemissionen und dem Schutz von Grund- und Oberflächenwasserkörpern entsprechend den Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG), der Landeswassergesetze sowie der mit geltenden Verordnungen (OGewV, GrwV).

Zur Gewährleistung der Schutzziele für die durch bergbauliche Emissionen potentiell beeinflussten Vorfluter und Grundwasserleiter im Abstrom ihrer Betriebsstandorte betreibt die Wismut GmbH aktuell sechs Wasserbehandlungsanlagen (WBA) einschließlich der zugeordneten Systeme für Wasserfassung, -zuführung und -ableitung sowie Konditionierung und Ablagerung der Behandlungsrückstände. Die Anlagen in Schlema, Ronneburg, Königstein und Pöhla (Bilder 1 und 2) dienen der Reinigung anfallender Flutungswässer bei teilweiser Mitbehandlung von Haldensickerwässern. An den ehemaligen Aufbereitungsstandorten Crossen und Seelingstädt (Bild 3), an denen der Betrieb der WBAs neben der Gewährleistung der wasserwirtschaftlichen Schutzziele maßgeblich der Sicherstellung des Sanierungsfortschritts bei der Verwahrung der industriellen Absetzanlagen (IAA) dient, fallen Mischwässer an, deren Zusammensetzung sich im Zuge



Fig. 2. WTP Ronneburg and immobilised residues disposal.
Bild. 2. WBA Ronneburg und Ablagerung der Behandlungsrückstände.
Source/Quelle: Wismut GmbH

well as for the conditioning and disposal of treatment residues. The treatment units in Schlema and Ronneburg (Figures 1 and 2) as well as those in Königstein and Pöhla are used for the treatment of flood water and co-treatment of occasional waste rock seepage. At the former processing sites of Crossen and Seelingstädt, where the operation of WTPs in addition to ensuring compliance with water management compliance targets contributes substantially to achieve progress in the remediation of tailings management facilities (TMF), combined wastewaters are occurring the composition of which has changed distinctly over the remediation period (Figure 3). Following the complete removal of supernatant waters, what currently needs to be treated in the first place are seepage and pore waters alongside with heavily varying proportions of contaminated surface waters of increasingly discontinuous occurrence.

At all WTP currently operated by Wismut, the separation of key contaminants such as uranium, arsenic, radium-226 as well as of iron, manganese and other heavy metals involves a combination of aeration, precipitation/flocculation, solid-liquid separation as well as dewatering, immobilization and disposal of treatment residues. The principal core technology used is lime precipitation which is implemented in various modifications, sometimes



Fig. 3. TMF Culmitzsch and WTP Seelingstädt (in the right foreground).
Bild 3. IAA Culmitzsch und WBA Seelingstädt (im Vordergrund rechts).
Source/Quelle: Wismut GmbH

des Sanierungsfortschritts deutlich verändert hat. Nach vollständiger Beseitigung der Freiwasserlamellen sind aktuell vor allem Sicker- und Porenwässer bei stark schwankendem Anteil von zunehmend diskontinuierlich anfallenden kontaminierten Oberflächenwässern zu behandeln.

Die Abtrennung der Hauptschadstoffe Uran, Arsen, Radium-226 sowie von Eisen, Mangan und weiteren Schwermetallen beruht in allen derzeit betriebenen WBAs auf der Kombination von Belüftung, Fällung/Flockung, Fest-/Flüssigtrennung sowie Entwässerung, Immobilisierung und Deponierung der Rückstände. Wichtigste Kerntechnologie ist die Kalkfällung, die in verschiedenen Modifikationen – teilweise als HDS-Verfahren – zur Anwendung gelangt, wobei das entscheidende Know-how in der standortangepassten Verfahrensführung zur Erreichung der genehmigten Ablaufwerte liegt. In Schlema, Seelingstädt und Helmsdorf muss zur Erreichung der U-Ablaufwerte vor der Kalkdosierung gelöstes HCO_3 durch CO_2 -Strippung ausgetrieben werden. Zur Ra- und As-Abtrennung werden außer in Ronneburg zusätzlich BaCl_2 bzw. $\text{FeCl}_3/\text{FeClSO}_4$ eingesetzt. Analog zur klassischen Kalkfällung können somit in einem Behandlungsschritt neben Uran auch zahlreiche andere Schwermetalle wie Ni, Cd und Mn abgetrennt werden. In Pöhla wurde 2014 mit der Inbetriebnahme einer umgebauten konventionellen Fällungsanlage die Rückkehr zu dieser bewährten Technologie vollzogen und damit die seit 2004 betriebene passiv-biologische Anlage stillgelegt. Lediglich am Standort Königstein, dessen Grubenwässer im Hinblick auf ihre Beschaffenheit noch immer Ausnahmestatus besitzen ($\text{pH} \sim 3$, $\text{U} > 10 \text{ mg/l}$), ist der Kalkfällung ein Verfahrensschritt zur separaten Uranabtrennung mittels Ionenaustausch/Fällung vorangestellt, wobei das Urankonzentrat vermarktet wird. Im Jahr 2014 fielen hier prozessbedingt 37,6 t Uran an.

Insgesamt wurden im Zeitraum 2010 bis 2014 jährlich im Durchschnitt ca. 20 Mio. m^3 kontaminierte Wässer behandelt, wovon ca. 80 % des Gesamtwasseranfalls auf die drei bedeutenden Bergwerksstandorte Schlema, Ronneburg und Königstein entfielen (Tabelle 1). Die komplementäre Rückstandsmenge an entwässerten und immobilisierten Wasserbehandlungsschlamm betrug im gleichen Zeitraum rund 25.000 m^3 jährlich, davon nahezu 20.000 m^3/a allein am Standort Ronneburg. Die Rückstände werden in betriebseigenen Verwahrstandorten deponiert.

Infolge der Fassung und Behandlung kontaminierter Wässer konnten die Schadstoffemissionen von den Wismut-Standorten seit Sanierungsbeginn drastisch verringert werden. Die emittierte Uranlast aller Standorte betrug im Jahr 2014 mit 1,9 t nur noch ca. 7 % des Ausgangswerts von 1990 (Bild 4), die Gesamt-Radiumemission ging im gleichen Zeitraum um ca. 98,5 % zurück.

3 Hauptaufgaben des zukünftigen Wassermanagements

3.1 Vorflutanbindung sanierter Betriebsflächen

Die Auskoppelung sanierter Flächen aus dem betrieblichen Wassermanagement und deren Wiederanbindung an die natürliche Vorflut ist Kernziel bei der Sanierung kontaminierter Flächen und der Verwahrung von Halden und Absetzanlagen. Hierdurch wird die Mitbehandlung unbelasteter Oberflächenwasserteilströme vermieden und ein weitgehend natürlicher Wassermengenhaushalt wiederhergestellt. Die Vorflutanbindung von ehemals abflusslosen Teileinzugsgebieten erfordert regelmäßig den Ausbau

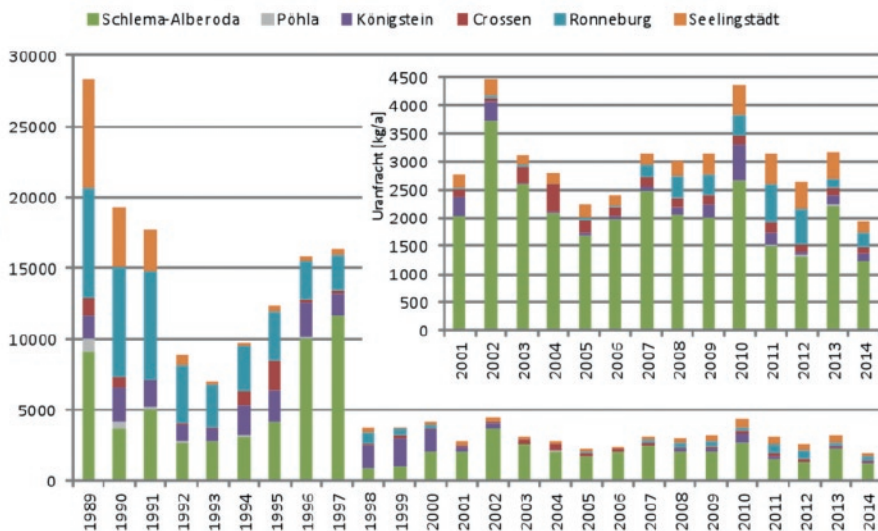


Fig. 4. Development of site-specific uranium loads 1989–2014.
Bild. 4. Entwicklung der standortspezifischen Uranfrachten im Zeitraum 1989–2014.

performed as HDS-process, with the site-specific process control system being the crucial know-how to achieve compliance with discharge standards. In Schlema, Seelingstädt and Helmsdorf dissolved HCO_3^- has to be removed by CO_2 stripping prior to lime dosing in order to comply with uranium concentration in effluents. With the exception of the Ronneburg WTP, additional BaCl_2 or $\text{FeCl}_3/\text{FeClSO}_4$, respectively, is applied for Ra and As removal. In so doing, a number of other heavy metals such as Ni, Cd, and Mn can be removed in addition to uranium in a single process step similar to precipitation by lime. The Pöhla WTP also returned to this proven technology when in 2014 a refurbished conventional precipitation unit went online and the passive-biological unit in operation since 2004 was decommissioned. Only at the Königstein site, where mine waters still have an exceptional status in terms of their quality ($\text{pH} \sim 3$, $\text{U} > 10 \text{ mg/l}$), a process step for the separate removal of uranium by means of ion exchange/precipitation is inserted prior to lime precipitation. The produced uranium concentrate is marketed. In 2014 the process generated 37.6 t of uranium.

Altogether, average annual throughput during the period 2010 to 2014 amounted to approximately 20 million m^3 of contaminated waters, with the three major mining sites of Schlema, Ronneburg and Königstein accounting for some 80% of the total feed water (Table 1). The corresponding volumes of dewatered and immobilised treatment sludges for the same period totalled some 25,000 m^3/a . The residues are deposited onsite in engineered cells.

Due to the collection and treatment of contaminated waters, contaminant emissions from Wismut sites were reduced dramatically since remediation was initiated. The uranium load emitted from all sites, for example, in 2014 totalled 1.9 t, a mere 7% of the 1990 baseline value (Figure 4).

3 Main tasks of future water management

3.1 Connection of reclaimed plant areas to receiving waters

Disconnection of reclaimed areas from onsite water management and their reconnection to natural receiving streams is a core objective in the process of remediating contaminated areas and reclaiming mine dumps and tailings management facilities.

bzw. die Herstellung von Gewässern, was komplizierte und langwierige Genehmigungsverfahren nach sich zieht (8). Wesentliches Kriterium für die Genehmigungsfähigkeit derartiger Maßnahmen ist die Vermeidung einer potentiellen Verschärfung der Hochwassersituation unterstromiger Gewässerabschnitte und Schutzgüter. Maßgebliche Verfahren betreffen die Vorflutanbindung der IAAs Culmützsch und Trünzich sowie Helmsdorf.

3.2 Sicheres Grubenwassermanagement

Das Management behandlungsbedürftiger Grubenwässer ist vor dem Hintergrund der anfallenden Wassermengen und Betriebskosten sowie der potentiellen Umweltauswirkungen wichtigste Kernaufgabe des Langfristwassermanagements des Wismut-Sanierungsprogramms. Wenngleich – außer in Königstein – die Flutung der Wismut-Bergwerke mit dem Erreichen quasi-stationärer Zustände seit nunmehr 8 (Ronneburg), ca. 10 (Schlema) bzw. 20 (Pöhla) Jahren vom Grunde her abgeschlossen und – im Wesentlichen auswaschungsbedingt – ein signifikantes Abklingen der Konzentrationen nahezu aller Wasserschadstoffe zu konstatieren ist (9, 10), liegen entscheidende Parameter (U, As, Ra-226, Fe, Mn sowie weitere Schwermetalle) auch mittelfristig in Konzentrationsbereichen vor, die eine konventionell technische Wasserbehandlung erzwingen (Tabelle 2).

Die Bewirtschaftung der Grubenwasserkörper von Ronneburg, Schlema, Pöhla und Königstein muss mittelfristig gewährleisten, dass

- direkte Grubenwasserübertritte bzw. nicht-tolerable stoffliche Beeinflussungen von Vorflutern und Grundwasserkörpern im Umfeld der gefluteten Gruben durch Aufrechterhaltung sowie ggf. Ertüchtigung von Emissionsbarrieren sicher verhindert,
- Gütekriterien in unterstromigen Wasserkörpern eingehalten sowie
- Bergschäden/Schäden an der Tagesoberfläche vermieden werden.

Für den Wasserabgriff genutzte technische Einrichtungen wie Tiefbrunnen/Gesenke (Königstein, Schlema, Ronneburg), Entwässerungstollen (Pöhla, Gittersee) und oberflächennahe Fassungen (Ronneburg) sind dauerhaft und redundant auszulegen und einschließlich ihrer Ausrüstungen und Abfördersysteme (Rohrlei-

This precludes the cotreatment of uncontaminated surface water flows and creates a widely-restored natural water balance. Reconnection to receiving streams of formerly isolated subcatchment areas requires periodically the development or creation, respectively, of waterways which involves complicated and lengthy licensing proceedings (8). An essential criterion for the approvability of such measures is to prevent that they might aggravate the flood situation of downstream waterway sections or that of protected resources. Connection of the Culmitzsch, Trünzig and Helmsdorf TMFs to receiving streams is a case in point.

3.2 Safe mine water management

Against the backdrop of water volumes involved and operating costs incurred as well as of potential long-term effects, management of mine waters requiring treatment is the number one core task of the long-term water management within the Wismut remediation programme. Even though, except for Königstein, flooding of the Wismut mines has basically come to an end by the establishment of quasi steady-state conditions for 8 (Ronneburg), ca. 10 (Schlema) and 20 (Pöhla) years now, and a significant attenuation – essentially due to eluviation – of the concentrations of almost all dissolved contaminants has been established (9, 10), key parameters for the medium term indicate that conventional technical water treatment will remain compulsory (Table 2).

Over the medium term, management of mine water bodies will have to ensure that

- direct mine water overflow or non tolerable impacts on receiving streams and ground water bodies in the surroundings of flooded mines are reliably prevented by the preservation or strengthening of emission barriers,
- quality criteria will be met in downstream water bodies, and
- mine damage/surface damage will be prevented.

Technical facilities used for water tapping such as deep wells/winzes (Königstein, Schlema, Ronneburg), dewatering adits (Pöh-

tungen) entsprechend zu unterhalten. Zur Kompensation von Schwankungen des natürlichen Wasserzulaufs, insbesondere bei Hochwasserereignissen oder längeren Nassperioden, sowie zur Absicherung von wartungs- und reparaturbedingten Einschränkungen der Anlagenverfügbarkeit müssen adäquat bemessene Grubenwasserspeicherräume vorgehalten werden; dies gilt in besonderem Maße für Schlema und Ronneburg aufgrund der an diesen Standorten großen Schwankungen der Zulaufmengen bzw. der besonderen ökologischen Sensibilität potentiell betroffener kleiner Vorfluter.

Unter Beachtung standortspezifischer Sachzwänge, wie der sicheren Verhinderung von unkontrollierten Wasserübertritten bzw. der Sicherstellung der Unterdruckbewetterung der Grube Schlema zur Beherrschung der Radon-Situation im Schlematal, ist langfristig grundsätzlich ein möglichst hohes Einstauniveau anzustreben, und zwar unter folgenden Gesichtspunkten:

- Verminderung der Mächtigkeit der ungesättigten/ungefulten Zone, in der es zur fortgesetzten oxidativen Schadstofffreisetzung kommt,
- Verringerung der zu behandelnden Volumenströme infolge Verminderung von Einzugsgebietsgrößen bzw. hydraulischen Gradienten für den Grundwasserzulauf,
- energetische Optimierung der Grubenwasserförderung.

3.3 Optimiertes Wassermanagement an den Standorten Seelingstädt und Crossen/Helmsdorf

Ungeachtet der Konsolidierung und Endabdeckung der IAAs Culmitzsch, Trünzig und Helmsdorf ist mit einem langfristigen Anfall von belasteten Sickerwässern zu rechnen. Auch unter Berücksichtigung der im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasser-rahmenrichtlinie zu erwartenden weiteren Verschärfung von in den Bewirtschaftungsplänen ausgewiesenen Qualitätsanforderungen in den Vorflutern besteht damit die Notwendigkeit einer langfristigen, über den Sanierungszeitraum hinausgehenden Fassung und Behandlung belasteter Sicker- und Grundwässer.

Site Standort	Type of water Wassertyp	Principal contaminants Hauptschadstoffe	Average water throughput 2010–2014 Mittlerer Wasserdurchsatz 2010–2014		Average residue produced 2010–2014 Mittlerer Rückstandsanfall 2010–2014	
			10 ⁶ m ³	%	10 ³ m ³	%
			Schlema-Alberoda	Mine water / Grubenwasser	U, As, Ra-226	6.62
Ronneburg	Mine water / Grubenwasser	Fe, Mn, Ni, Zn, U, As, Co, Cd	6.11	29.9	19.14	74.4
Königstein	Mine water / Grubenwasser	U, Ra-226, Fe, Mn, Ni	3.50	17.1	0.92	3.6
Seelingstädt	Mixed water / Mischwasser ³⁾	U, Ra-226	2.18	10.7	1.60	6.2
Helmsdorf	Mixed water / Mischwasser ³⁾	U, As, Ra-226	0.97	4.8	1.91	7.4
Pöhla ¹⁾	Mine water / Grubenwasser	As, Ra-226	0.11	0.6	0.14	0.6
Others / Andere ²⁾	Diverse	Diverse	0.95	4.6	0.30	1.1
Total / Summe			20.45	100.0	25.73	100.0

¹⁾ until 2014 passive-biological treatment unit, since 2014 retrofitted WTP
bis 2014 passiv-biologische Anlage, ab 2014 umgebaute WBA

²⁾ Dresden-Gittersee, discharging well FBL 1 and seepage treatment unit mine dump #371,
Dresden-Gittersee, FBL 1 sowie Anlage zur Sickerwasserbehandlung Halde 371

³⁾ composed of residual supernatant water, seepage, pore water and contaminated surface run-off with alternating rates.
bestehend aus restlichem Freiwasser sowie Sicker-, Poren- und kontaminiertem Oberflächenwasser in wechselnden Anteilen.

Table 1. Principal contaminants, throughput and residues produced by WTP, period 2010–2014.

Tabelle 1. Hauptschadstoffe, Durchsätze und Rückstandsanfall der WBA, Zeitraum 2010–2014.

	Schlema	Pöhla	Königstein	Ronneburg	Seelingstädt	Helmsdorf
pH_Feld	7.0	7.0	2.8	6.3	7.9	9.1
Eh_Feld [mV]	160	88	640	170	290	340
K [mg/l]	12.6	6.05	7.15	34.5	37.4	30
Na [mg/l]	120	33.5	108	48.2	1390	1760
Ca [mg/l]	155	48.1	311	470	326	60.1
Mg [mg/l]	101	17.1	28.5	471	954	52.8
Fe [mg/l]	4.43	4.87	105	195	0.69	1.56
Mn [mg/l]	1.97	0.19	17	6.56	7.27	0.167
SO ₄ [mg/l]	526	<5	1430	2940	8420	2250
HCO ₃ [mg/l]	581	321	<5	347	327	1690
Cl [mg/l]	51.8	3	139	63	1130	618
Ni [µg/l]	7	<0.52	572	643	<20	<20
Zn [µg/l]	<5	7.5	15300	380	9	31
Cu [µg/l]	<1	<0.5	87	<20	<20	45
Co [µg/l]	<10	n. b.	293	216	<40	n. b.
Cd [µg/l]	<1	<0.55	113	<1	<1	n. b.
As [µg/l]	1410	1930	51.5	265	59	524
U [mg/l]	1.53	0.0133	14.5	0.67	1.43	7.02
Ra-226 [mBq/l]	2190	4300	4730	393	571	156

Table 2. Current qualities of mine water in Schlema, Pöhla, Königstein (discharging well FBL Aneu) and Ronneburg (well #2) and of mixed waters at Seelingstädt and Helmsdorf. Median annual values for 2014, bold: median concentration > authorised discharge level.

Tabelle 2. Aktuelle Beschaffenheit der Grubenwässer in Schlema, Pöhla, Königstein (FBL Aneu) und Ronneburg (Brunnen 2) sowie der Mischwässer von Seelingstädt und Helmsdorf. Jahresmedianwerte 2014. Fett: Mediankonzentration > genehmigter Ablaufwert.

la, Gittersee) and near-surface catchment systems (Ronneburg) have to be designed in a way that is both durable and redundant and maintained including their equipment and piping. With a view to compensating for fluctuations in natural feed water volumes as well as for maintenance and repair-related reductions in plant availability adequately sized storage volumes have to be available; this specifically applies to the Schlema and Ronneburg sites because of the varying feed streams and of the specific ecological sensitivity of potentially impacted smaller receiving streams.

With due regard to site-specific factual constraints such as the reliable prevention of uncontrolled overflows or the safeguarding of exhaust ventilation of the Schlema mine in order to control the radon situation at the site, the rise of the flood level to the extent possible should be the long-term objective, as a matter of principle, in order to

- reduce the thickness of the unsaturated zone which is a source of continued oxidative contaminant release,
- diminish feed water volumes by reducing catchment area surfaces or hydraulic gradient of ground water flow,
- energetically optimise mine water pumping.

3.3 Optimised water management at the Seelingstädt and Crossen/Helmsdorf sites

Consolidation and final covering of the Culmützsch, Trünzig and Helmsdorf TMFs notwithstanding, generation of polluted seepage is to be expected over the long-term. Also, in consideration of the further tightening of receiving stream quality standards as specified in management plans which is expected in the context of translating the EU Water Framework Directive into national law, collection and treatment of impacted seepage and groundwater will be required over the long term, well beyond the remediation period. Focus of future remediation works at the Seeling-

Dabei bestehen auch sanierungsbegleitend spezifische Anforderungen an das Wassermanagement, so die Optimierung des bestehenden Fassungs- und Behandlungsprozesses sowie dessen Anpassung an sich mit der Sanierung ändernde hydraulische und hydrochemische Bedingungen.

Während der weiteren Sanierungsarbeiten am Standort Seelingstädt stehen der operative Betrieb der Wasserfassung/-behandlung unter Berücksichtigung der gegebenen Sanierungsanforderungen und die gezielte Verringerung des Stoffaustrags in die lokale Vorflut im Vordergrund. Die entsprechenden Optimierungen dienen der Sicherstellung dieses Betriebs während der Sanierungsphase sowie des weiteren Erkenntnisgewinns im Hinblick auf einen stabilen langfristigen Betrieb. Ausgehend von den derzeit gefassten Wässern sowie der Annahme, dass die unbelasteten Oberflächenwässer direkt in die Vorflut eingeleitet werden können, ist mit einem langfristigen Anfall zu reinigender Wässer in der Größenordnung von ca. 30 % der bestehenden WBA-Kapazität zu rechnen. Dabei werden die derzeit noch beträchtlichen Schwankungen von Menge und Wasserbeschaffenheit infolge der deutlichen Verringerung des Oberflächenwasseranteils reduziert, was eine weitere Optimierung der Anlagen ermöglicht und die Prozessstabilität erhöht. Mit dem Sanierungsfortschritt ist die weitere schrittweise Ausgliederung unbelasteter Oberflächenwasserströme vorgesehen, um die Behandlungskapazität insbesondere während Zeiten mit starkem Wasseranfall effektiv zur Reinigung belasteter Wässer nutzen zu können. Daneben soll mit den verfügbaren Reserven auch weiterhin eine aktive Beeinflussung der Stoffquelle möglich sein, indem zusätzliche Porenwässer gefördert und behandelt werden können. Die entsprechenden technologischen Voraussetzungen wurden mit der Errichtung einer Vorstripp-Anlage zur Verbesserung der Uranabtrennung sowie der Anlage zur Vorbehandlung/Enteisung von Porenwässern geschaffen. Langfristig stehen unter Beachtung

städt site will shift to water collection and treatment operations with due regard to established remediation requirements and to the targeted reduction of contaminant release to local receiving waters. Appropriate optimisations are applied with a view to safeguarding these operations during the remediation phase and to gaining new insights with regard to stable long-term operation. On the basis of currently collected waters and assuming that unimpacted surface waters are fit for direct discharge to receiving waters, the quantity of waters to be expected in need of treatment over the long term will be some 30% of the WTP's design capacity. In this process, currently still considerable fluctuations in water quantity and quality will be reduced as a consequence of the shrinking portion of surface water which in turn will allow to further optimise the facilities and improve process stability. As remediation progress continues, further splitting of unimpacted surface water flows is intended to effectively use full treatment capacity for impacted waters in particular during periods of feed water glut. Apart from that, uncommitted reserve capacities should allow to actively influence the contaminant source by pumping and treating additional pore waters.

3.4 Technological adaption, retrofitting of existing and construction of new water treatment plants

Motivation or necessity, respectively, to retrofit existing treatment plants or to build new ones result, also in the light of advances on state of the art, from one or several of the following three factors:

- changes in quantity and/or quality of waters to be treated,
- cost optimisation,
- tightening of treatment standards.

Projected technological adaptations in existing facilities are aimed first and foremost at improving uranium removal and optimising residue disposal over the medium term.

In view of the fact that the infrastructure at the Königstein site will be demolished, a new treatment plant will be built by 2020 with a view to significantly cutting operating costs. The HDS process shall be maintained as basic technology; the redesign will take account of decrease in standard throughput and changes in raw water qualities. During the same period the Helmsdorf WTP which has become considerably oversized as a consequence of remediation progress will be replaced by a new plant to treat seepage over the long-term. A process combination of ion exchange and fixed bed adsorption lends itself to being used as an alternative to the currently used lime precipitation. Just like the retrofitted Pöhla WTP, the new unit is to be operated by remote control and remote surveillance.

3.5 Studies on alternative uranium and arsenic removal

Downsides of the currently practiced precipitation methods include the high rate of chemical consumption due to the increase in hardness and salinity of the waters to be treated, the elevated quantities of residues, the limited adaptability of existing plants to changing boundary conditions as well as the great constructional effort. Therefore, alternative methods for flexible and modular applications are being explored for the removal of uranium, arsenic and radium which are contaminants of long-term

des zu erwartenden geringeren behandlungswürdigen Volumensstroms Technologie und Standort der WBAs auf dem Prüfstand.

3.4 Technologische Anpassung, Um- und Neubau von Wasserbehandlungsanlagen

Motivation bzw. Notwendigkeit zur Anpassung von Bestandsanlagen bzw. zum Anlagenum- bzw. -neubau resultieren, auch vor dem Hintergrund der Entwicklung des Stands der Technik, aus einem oder mehreren der folgenden drei Faktoren:

- Veränderung von Menge und/oder Beschaffenheit der zu behandelnden Wässer,
- Kostenoptimierung,
- Verschärfung von Behandlungsanforderungen.

Geplante Technologieanpassungen in den Bestandsanlagen zielen mittelfristig vor allem auf die Verbesserung der Uranabtrennung und die Optimierung der Rückstandsverbringung.

Der bis 2020 vorgesehene Neubau der Anlage in Königstein erfolgt vor dem Hintergrund des Rückbaus der Standortinfrastruktur und mit dem Ziel einer deutlichen Senkung der Betriebskosten. Am HDS-Verfahren als Grundtechnologie wird festgehalten, die Neuauslegung berücksichtigt die Verringerung des Regeldurchsatzes und Veränderungen der Rohwasserbeschaffenheiten. Da auch bei einer Optimierung der bestehenden Verfahrensstufe zur Uranabtrennung vor dem Hintergrund langfristig weiter rückläufigen Urananfalls eine Kostendeckung für die Uranverwertung nicht zu erwarten ist, wird die Erzeugung eines Urankonzentrats mit Inbetriebnahme der Neuanlage eingestellt werden.

Am Standort Helmsdorf ist im gleichen Zeitraum der Ersatz der mittlerweile wegen des Sanierungsfortschritts deutlich überdimensionierten WBA durch einen Neubau zur Behandlung der langfristig anfallenden Sickerwässer vorgesehen. Als mögliche Alternative zum gegenwärtig praktizierten Kalkfällverfahren bietet sich eine Verfahrenskombination aus Ionenaustausch und Festbettadsorption an. Die neue WBA soll, wie auch die bereits umgebaute WBA Pöhla, mittels Fernsteuerung und Fernüberwachung betrieben werden.

3.5 Untersuchungen zur alternativen Abtrennung von Uran und Arsen

Nachteile der gegenwärtig praktizierten Fällverfahren sind der zur Aufhärtung und Aufsalzung der behandelten Wässer führende hohe Chemikalienverbrauch, die großen Rückstandsmengen, die eingeschränkte Anpassbarkeit bestehender Anlagen an veränderte Randbedingungen sowie der hohe bauliche Aufwand. Für die an der Mehrzahl der Standorte langfristig relevanten Schadstoffe Uran, Arsen und Radium werden daher alternative Verfahren untersucht, die flexibel und modular einsetzbar sind. Zur Uranabtrennung wird derzeit die Anwendung von Ionenaustauscherharzen in Pilot- und Laboranlagen sowohl in Helmsdorf als auch für den Standort Seelingstädt vor dem Hintergrund der angestrebten weiteren Reduzierung der Uranemissionen im Einzugsgebiet der Weißen Elster untersucht (11). Zur alternativen Arsenabtrennung wird der Einsatz von Eisenhydroxidadsorbentien geprüft. Wesentlich für einen potentiellen Einsatz alternativer Verfahren sind deren Verfahrensstabilität bzw. Robustheit, die im

relevance at the majority of sites. At present, tests on the application of ion exchange resins are conducted in pilot and laboratory installations both at Helmsdorf and also for the Seelingstädt site in the context of efforts being undertaken for the further reduction of uranium emissions in the drainage area of the Weiße Elster River (11). The use of iron hydroxide adsorbents is being tested as a way of alternative removal of arsenic. Essential criteria for the potential application of alternative methods are their process stability or robustness, expenditure incurred for residue disposal as well as cost effectiveness.

3.6 Investigations on sulphate removal

Technologies for sulphate removal are primarily investigated with a view to reducing neutral salt loads in the drainage area of the Weiße Elster River. At the same time, the enormous quantities of residues and very high operating costs involved with precipitation techniques (precipitation as BaSO₄ or ettringite) make this approach appear unfeasible. Current investigations focus therefore on membrane-based techniques in combination with precipitation and/or evaporation of retentates. Residue storage/disposal will be the decisive factor; investigations also include the potential separation of useable components. Implementation of any potential technique, provided its technical feasibility has been proven, will have to consider the sulphate load to be removed in compliance with the statutory management requirements pertaining to the drainage area and the reasonableness of capital and operating costs.

3.7 Improving energy efficiency

In implementing an energy management system according to DIN EN ISO 50001 and analysing inplant flow of operations Wismut GmbH has established for the reference year 2014 that more than 50% of the company's total electric energy consumption was consumed by water management measures; consumption at the various sites are in the range of 40 to 60%. Thus, these processes get particular attention in the framework of improving energy efficiency; measures are aimed at

- optimising technological procedures in WTPs,
- optimising pumping operations and feed water flow,
- modifications to feed and distribution systems under fluid dynamical aspects,
- regular maintenance and inspection of key energy consumers, e.g. of feed pumps, and
- regular cleaning of pipelines.

In addition, the utilisation of renewable energies is also under review, such as the use of the geothermal potential of mine waters for heat supply of company buildings or the construction of inhouse facilities for the production of renewable energies with a view to providing electrical energy to water pumping and treatment.

3.8 Development of techniques for source term remediation

One of the sustainability goals of the Wismut remediation programme as specified in (6) stipulates that „... remedial operations shall lead to self-sustaining system status which will depend with

Zusammenhang mit der Rückstandsverbringung entstehenden Aufwendungen sowie die Wirtschaftlichkeit.

3.6 Untersuchungen zur Sulfatabtrennung

Technologien zur Sulfatabtrennung werden vor allem für den Standort Seelingstädt vor dem Hintergrund einer angestrebten Senkung der Neutralsalzfrachten im Einzugsgebiet der Weißen Elster untersucht. Dabei wird der Einsatz von Fällverfahren – Fällung als BaSO₄ oder Ettringit – vor dem Hintergrund des enormen Rückstandsanfalls und der sehr hohen Betriebskosten als nicht darstellbar angesehen. Gegenwärtige Untersuchungen konzentrieren sich auf Membranverfahren in Kombination mit Fällung und/oder Eindampfung der Retentate. Entscheidend ist die Verbringung/Deponierung der entstehenden Rückstände, die Untersuchungen beinhalten auch die mögliche Abtrennung verwertbarer Komponenten. Ein potentieller Verfahrenseinsatz wird bei Nachweis der technischen Machbarkeit unter Beachtung der für die Einzugsgebietsbewirtschaftung abzutrennenden Sulfatlast und der Verhältnismäßigkeit der Investitions- und Betriebskosten zu bewerten sein.

3.7 Verbesserung der Energieeffizienz

Im Zuge der Einführung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 hat die Wismut GmbH ihre Betriebsprozesse analysiert und für das Stichjahr 2014 ermittelt, dass mehr als 50% des Elektroenergieverbrauchs des Gesamtunternehmens für Maßnahmen des Wassermanagements aufgewendet wurden. An den einzelnen Standorten schwankt der diesbezügliche Anteil zwischen 40 und 60%. Dementsprechend liegt im Rahmen der Erhöhung der Energieeffizienz besonderes Augenmerk auf diesen Prozessen. Maßnahmen umfassen

- die Optimierung technologischer Abläufe in den WBAs, den Austausch überdimensionierter Aggregate und Anlagenteile sowie die Stilllegung nicht genutzter Gebäude und Anlagen,
- die Optimierung des Pumpbetriebs und der Wasserzuleitung,
- strömungstechnische Umbauten von Zuführ- und Verteilersystemen,
- die regelmäßige Wartung und Inspektion der Hauptenergieverbraucher, wie z. B. der Förderpumpen sowie
- die regelmäßige Reinigung von Rohrleitungen.

Geprüft wird weiterhin die Nutzung erneuerbarer Energien, beispielsweise des geothermischen Potentials der Grubenwässer zur Wärmeversorgung von Betriebsgebäuden oder die Errichtung eigener Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien zur Bereitstellung von Elektroenergie für die Wasserhebung und -behandlung.

3.8 Verfahrensentwicklungen zur Quelltermsanierung

Eines der von Mann & Paul (6) formulierten Nachhaltigkeitsziele für das Wismut-Sanierungsprogramm fordert, dass „... die Sanierungstätigkeit zu sich selbst erhaltenden Systemzuständen führen soll, die langfristig keiner aktiven Maßnahmen bedürfen und geringe Restrisiken bergen.“ Mit Blick auf Wassermanagement und Wasserbehandlung heißt das, sich dem Themenkomplex der Quelltermsanierung zuzuwenden. Konzeptioneller Grundansatz ist, die bergbaulich veränderten Grundwasserkörper in Richtung ihres prämontanen, in aller Regel durch sehr geringe Stoffflüsse

active measures in the long term and carry low residual risks.“ With regard to water management and water treatment that means to address the subject of source term remediation. The conceptual basic approach consists in modifying the mining impacted ground water bodies towards their premining condition which – as a rule – was characterised by very low contaminant flows and in achieving in this way a shortening of the period during water treatment is required or in simplifying the treatment process.

In addition to uranium and Ra-226, the relevant spectrum of contaminants to be considered for long term mitigation primarily includes As, Fe and SO_4 . Natural retention or natural attenuation processes can immobilise such inorganic contaminants by sorption, precipitation or encapsulation, respectively. In order to stimulate or enhance processes of that kind (ENA = Enhanced natural attenuation), one could imagine influencing the biogeochemical environment of the source term or of the underground plume with a view to carry contaminants into environments having low dissolution levels or to disrupt contaminant transportation pathways.

Given the host of scientific, technical and regulatory difficulties, ENA approaches to large, completely abandoned mine workings including industrial scale implementation requires an excellent knowledge of site conditions, comprehensive fundamental research efforts and appropriate boundary conditions. In the light of the longevity of contamination situations and the amount of funds to be earmarked for conventional water treatment techniques, indepth research was carried out for the benefit of the Wismut sites. For instance, a technology to inject alkaline and reducing solutions was developed for the remediation of the Königstein mine, successfully tested in a field test (12) and chosen to be a supportive measure in the license application to continue the flooding process. Another potential technological approach is based on stimulating a microbially catalysed autotrophic reductionoxidation process chain within a reactive zone (13, 14). Prospects to initiate and sustain a microbially catalysed reductive uranium immobilisation are indeed realistic as is impressively exemplified by the Pöhla mine: Spontaneous reductive uranium precipitation already began during mine flooding and produces uranium concentration levels of $< 50 \mu\text{g/l}$ in emerging flood water for almost two decades.

While microbial sulphate reduction leading to biogeochemical precipitation of sulphides and uraninite and the creation of a redox buffer produces considerable NA potential for uranium and chalcophile metals, it is exactly the opposite for radium and arsenic. Radium for example is released to a greater extent upon the occurrence of sulphate reduction due to the redissolution of Ra-bearing sulphates (gypsum, barite). Mobility of arsenic in ground water is significantly controlled by coprecipitation on Fe-hydroxides. At the same time, As(III)-species which prevail under reducing chemical conditions exhibit poorer sorption conditions which accounts for their higher mobility (15). As a consequence, for uranium mines having limited inventories of mobilisable iron and high inventories of reactive arsenic such as the Schlema and Pöhla mines, high levels of arsenic (and radium) over the long term are a characteristic feature, and their selfpurification potential is limited or deficient. Mines where parageneses contain

gekennzeichneten Zustands zu verändern und so zu einer Verkürzung der Wasserbehandlungsnotwendigkeit bzw. einer Vereinfachung des Behandlungsprozesses zu gelangen.

Das zu betrachtende, langfristig relevante Stoffspektrum umfasst neben U und Ra-226 vor allem As, Fe und SO_4 . Für diese anorganischen Schadstoffe zielen natürliche Rückhalte- oder NA-Prozesse (Natural attenuation) auf deren Immobilisierung durch Sorption, Fällung bzw. Einkapselung. Um derartige Prozesse zu stimulieren bzw. zu verstärken (ENA = Enhanced natural attenuation) ist eine Beeinflussung des biogeochemischen Milieus in der Schadstoffquelle bzw. des unterirdischen Transportwegs denkbar, um die Schadstoffe in Milieus mit geringen Lösungskonzentrationen zu bringen bzw. die Schadstofftransportpfade zu unterbrechen.

ENA-Ansätze für große, vollkommen abgeworfene Grubengebäude bis zur großtechnischen Umsetzung zu bringen, bedarf auf Grund der vielfältigen wissenschaftlich-technischen wie genehmigungsrechtlichen Schwierigkeiten exzellenter Standortkenntnisse, umfangreicher Grundlagenuntersuchungen und geeigneter Randbedingungen. Für die Wismut-Standorte wurden entsprechende Forschungsarbeiten vor dem Hintergrund der Persistenz der Kontaminationssituationen und der Höhe der für konventionelle Wasserbehandlung rückzustellenden Mittel intensiv betrieben. So wurde für die Sanierung der Grube Königstein ein Verfahren zur Injektion von alkalischen und reduzierenden Lösungen entwickelt, im Feldversuch erfolgreich getestet (12) und als unterstützende Maßnahme im Zuge des beantragten weiteren Flutungsprozesses vorgesehen. Ein weiterer möglicher Verfahrensansatz basiert auf der Stimulierung einer mikrobiell katalysierten autotrophen Reduktions-Oxidations-Prozesskette in einer reaktiven Zone (13, 14). Die Aussichten, eine mikrobiell katalysierte reduktive Uran-Immobilisierung zu initiieren und nachhaltig aufrecht zu erhalten, sind durchaus realistisch, wie das Beispiel der Grube Pöhla eindrucksvoll beweist: Bereits während des Einstaus der Grube setzte die reduktive Uranfällung spontan ein und bewirkt seit nunmehr nahezu zwei Jahrzehnten U-Konzentrationen im Flutungswasserüberlauf von $< 50 \mu\text{g/l}$.

Besitzt die mikrobielle Sulfatreduktion für Uran und chalcophile Metalle durch biogeochemische Fällung von Sulfiden und Uraninit sowie die Schaffung eines Redoxpuffers (FeS_2) erhebliches NA-Potential, so gilt für Radium und Arsen das Gegenteil. Radium wird beim Eintreten der Sulfatreduktion infolge Rücklösung von Ra-haltigen Sulfaten (Gips, Baryt) verstärkt freigesetzt. Die Arsen-Mobilität wird im Grundwasser maßgeblich durch Co-Präzipitation an Fe-Hydroxiden kontrolliert. Dabei weisen die unter chemisch reduzierten Bedingungen vorherrschenden As(III)-Spezies schlechtere Sorptionseigenschaften auf, was deren höhere Mobilität erklärt (15). Für Urangruben mit einem begrenzten mobilisierbaren Eiseninventar und hohen reaktiven Arsenvorräten wie Schlema und Pöhla ist ein langfristig hohes Niveau an Arsen (und Radium) charakteristisch und das diesbezügliche Selbstreinigungspotential offenkundig begrenzt bis unzureichend. Gruben, deren Paragenese größere potentiell mobilisierbare Eisenvorräte in Form von Pyrit/Markasit enthalten (Königstein, Ronneburg) sind hingegen eher in der Lage, die Mobilität von As und Ra-226 durch Mitfällung/Adsorption an Fe-Hydroxiden in bestimmten Grubenkompartimenten zu kompensieren.

larger potentially mobilisable iron inventories in the form of pyrite/marcasite (Königstein, Ronneburg) on the other hand are in a better position to compensate the mobility of As and Ra-226 by coprecipitation/adsorption on Fe-hydroxides within certain mine compartments.

In the light of the importance which the outlined biogeochemical processes have for long-term water quality trends, the metrological acquisition of their data has to be intensified on a site-specific basis, process understanding has to be further enhanced and relevant process developments have to be expedited.

4 Conclusions and outlook

The crucial long term task of the Wismut remediation programme in terms of financial requirements is to ensure site specific water management in the context of treating contaminated waters. Safeguarding of mine water management at the three long-term relevant mine sites of Königstein, Ronneburg and Schlema-Alberoda, optimisation of water management at the Seelingstädt site within the context of ongoing physical remediation work as well as the operation and optimisation of all water treatment plants number among priority tasks in the period up to 2025. With the exception of the Dresden-Gittersee site one will have to assume that the preservation of emission barriers and the continuation of measures to treat water by technical means will have to keep going at all sites well beyond 2025. In so doing, the water treatment plant operation has to be adapted to conditions changing over the long term, for instance with regard to quantities of water requiring treatment, raw water qualities as well as requirements on plant performance. Geochemical long term processes, their prerequisites, boundary conditions and modes of action need further investigation across scales and levels in order to detect and harness potential NA-processes (source term remediation). Directly related to the operation of the respective water treatment plant is the management of disposal facilities / engineered cells for the deposition of water treatment residues; when required, the issue of licensing and constructing new waste disposal facilities may arise.

In the light of applicable validation standards established pursuant to the Federal Water Act and State water laws and regulations, the future inhouse water management practice at all remediation sites of Wismut GmbH has to be guided by the goal to achieve the „Good condition“ status for all potentially impacted water bodies by the year 2027 at the latest. In the event that the achievement of that goal is not feasible or involves disproportionate costs, one can make advantage of the statutorily provided option to define less stringent management goals. This however requires ample considerations in terms of system engineering of the site involved, of the root causes for nonattainment as well as of the technical feasibility and proportionality of possible future remediation and management measures. From a current perspective, even if technical measures for the collection and treatment of contaminated waters were maintained, the achievement of compliance objectives for some components in certain water bodies has to be assessed as unrealistic; with the result that less stringent management objectives have to be established.

Significant changes in the water balance of all German river systems are predicted to occur by 2040 as a consequence of cli-

Vor dem Hintergrund der Bedeutung der skizzierten biogeochemischen Prozesse für die langfristige Wasserbeschaffenheitsentwicklung sind deren messtechnische Erfassung standortspezifisch zu intensivieren, das diesbezügliche Prozessverständnis weiter zu vertiefen und entsprechende Verfahrensentwicklungen voranzutreiben.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in Bezug auf den Finanzbedarf wesentlichste Langfristaufgabe des Wismut-Sanierungsprogramms besteht in der Absicherung des standortbezogenen Wassermanagements im Zusammenhang mit der Behandlung kontaminierter Wässer. Zu den Schwerpunktaufgaben im Zeitraum bis 2025 zählen insbesondere die Absicherung des Grubenwassermanagements an den drei langfristig bedeutsamen Grubenstandorten Königstein, Ronneburg und Schlema-Alberoda, die im Kontext der weiteren physischen Sanierungsarbeiten zu betreibende Optimierung des Wassermanagements am Standort Seelingstädt sowie der Betrieb und die Optimierung sämtlicher Wasserbehandlungsanlagen. Außer in Dresden-Gittersee ist davon auszugehen, dass die Aufrechterhaltung von Emissionsbarrieren und von Maßnahmen zur technischen Wasserbehandlung an allen Standorten bis weit nach 2025 notwendig sein werden. Dabei ist der Anlagenbetrieb den sich langfristig ändernden Bedingungen anzupassen, so im Hinblick auf die zu behandelnden Wassermengen, die Rohwasserbeschaffenheiten sowie die Anforderungen an die Reinigungsleistung der WBAs. In den o.g. Betrachtungszeitraum fallen der Abschluss der Optimierungsmaßnahmen zur langfristigen Bewirtschaftung des Flutungswasserkörpers am Standort Ronneburg, der Ausbau und die Optimierung der Wasserfassungsanlagen in Seelingstädt, der Umbau der WBA Königstein sowie der Neubau der WBA Helmsdorf. Die Voraussetzungen, Randbedingungen und Wirkmechanismen geochemischer Langfristprozesse sind auf allen Maßstabsebenen weiter zu untersuchen, um mögliche NA-Prozesse (Quelltermsanierung) zu erkennen und nutzen zu können. In unmittelbarem Zusammenhang mit dem Betrieb der jeweiligen WBA steht die Bewirtschaftung von Verwehrstandorten/Sondereinlagerungsbereichen für die Deposition der Wasserbehandlungsrückstände, ggf. wird die Beantragung und Errichtung neuer Abfallentsorgungseinrichtungen notwendig werden.

Vor dem Hintergrund der einschlägigen wasserrechtlichen Bewertungsmaßstäbe muss sich die künftige betriebliche Wassermanagementpraxis der Wismut GmbH an allen Sanierungsstandorten am Ziel der Erreichung des „Guten Zustands“ für alle potentiell beeinflussten Wasserkörper bis spätestens zum Jahr 2027 orientieren. Falls die Erreichung dieses Ziels nicht möglich oder unverhältnismäßig ist, kann von der gesetzlich gegebenen Möglichkeit zur Festlegung weniger strenger Bewirtschaftungsziele Gebrauch gemacht werden. Dies erfordert jedoch umfangreiche Betrachtungen zur Systemanalyse des jeweiligen Standorts, zu den maßgeblichen Ursachen der Nichterreichung sowie zur technischen Machbarkeit sowie Verhältnismäßigkeit von möglichen weiteren Sanierungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen. Selbst unter Aufrechterhaltung von technischen Maßnahmen zur Fassung und Behandlung kontaminierter Wässer ist die Zielerreichung für einige Komponenten in bestimmten Wasser-

matic change. Robust water management solutions will have to respond to such change in an appropriate way. The greatest remaining challenge facing the engineering science will ultimately consist in identifying and implementing sustainable solutions to successfully resolve water management issues of mining legacies at all sites and with due regard to the principle of proportionality.

körpern aus derzeitiger Sicht als unrealistisch einzuschätzen, so dass weniger strenge Bewirtschaftungsziele zu formulieren sind.

Infolge des Klimawandels werden bis zum Jahr 2040 deutliche Veränderungen des Wasserhaushaltes in allen deutschen Flusssystemen prognostiziert. Auch hierauf muss mit robusten Wassermanagementlösungen in geeigneter Weise reagiert werden. Die größte verbleibende ingenieurtechnische Herausforderung wird schlussendlich darin bestehen, für alle Standorte unter Beachtung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes nachhaltige Lösungen zur erfolgreichen und abschließenden Bewältigung der wasserhaushaltlich relevanten Bergbaufolgen zu suchen und in die Praxis umzusetzen.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Nordstrom D. K., Alpers C. N. (1999): Geochemistry of acid mine waters. *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A, Reviews in Economic Geology, Vol 6A*, p 133–160.
- (2) Younger P. L., Banwart S. A., Hedin R. S. (2002): *Mine Water – Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 442 pp.
- (3) Feasby D. G., Tremblay G. A. (1995): New technologies to reduce environmental liability from acid generating wastes. *Proc. Mining and the environment, Sudbury May 28–June 1*, p 643–647.
- (4) Sumi L., Gestring B. (2013): Polluting the future. How mining companies are contaminating our nation's waters in perpetuity. *EARTHWORKS*, May 2013, <http://www.earthworksaction.org/files/publications/PollutingTheFuture-FINAL.pdf> accessed 25/05/2015.
- (5) Gatzweiler R., Mager D. (1993): Altlasten des Uranbergbaus – Der Sanierungsfall Wismut. *Geowissenschaften* 11, 5/6, S. 164–172.
- (6) Mann S., Paul M. (2011): Zur Nachhaltigkeit des Wismut-Sanierungsprogramms (1991–2010). In: *Proc. Intern. Bergbausymposium WISSYM_2011*, S. 11–26.
- (7) Leupold D., Paul M. (2007): Das Großprojekt WISMUT – Nachhaltige Sanierung und Revitalisierung von Uranerzbergbaustandorten in Sachsen und Thüringen. *Bergbau*, 10, S. 438–444.
- (8) Paul M. (2014): Reliable water management as key success factor for the remediation of uranium production sites under humid conditions. In: *Proc. 7th Conf. Uranium Mining and Hydrogeology*, Springer 2014, p 433–442.
- (9) Paul M., Metschies T., Frenzel M., Meyer J. (2011): The Mean Hydraulic Residence Time and its Use for Assessing the Longevity of Mine Water Pollution from Flooded Underground Mines. In: *Proc. 6th Conf. Uranium Mining and Hydrogeology, Freiberg*, p 689–699.
- (10) Paul M., Meyer J., Jenk U., Baacke D., Schramm A., Metschies T. (2013): Mine Flooding and Water Management at Underground Uranium Mines two Decades after Decommissioning. In: *Reliable Mine Water Technology (Vol II)*, Denver, Colorado, USA, p 1081–1088.
- (11) Kassahun A., Lietsch C., Hoth N., Paul M. (2014): Speciation analysis based design of mine water treatment technologies. In: *Proc. 7th Conf. Uranium Mining and Hydrogeology*, Springer, p 599–608.
- (12) Jenk U., Zimmermann U., Uhlig U., Schöpke R., Paul M. (2014): In Situ Mine Water Treatment: Field Experiment at the Flooded Königstein Uranium Mine (Germany). *Mine Water Environ*, 33, p 39–47.
- (13) Wismut (2010): Nachhaltige Minimierung des langzeitlichen Stoffaustags aus unterirdischen anorganischen Schadensherden am Beispiel der gefluteten Uranerzgrube Königstein“. *Wismut GmbH/GFI Dresden GmbH, BMBF-Projekt 02WNO755*.
- (14) Kassahun A., Jenk U., Paul M. (2015): Investigation of microbial in-situ remediation of uranium mine site pollutants in the flooded mine Königstein. *Proc. 10th ICARD, Santiago de Chile*, 10 pp.
- (15) Paikaray S. (2015): Arsenic geochemistry of acid mine drainage. *Mine Water Environ* 34, p 181–196.

Authors / Autoren

Dr.-Ing. Michael Paul, Dr. Jürgen Meyer, Dr. Ulf Jenk, Andrea Kassahun, Andrea Schramm, Dr. Delf Baacke, Norbert Forbrig, Thomas Metschies, Bereich Ingenieurwesen/Strahlenschutz, Wismut GmbH, Chemnitz