

# ENTWICKLUNG DER GRUNDWASSERBESCHAFFENHEIT IM FLUTUNGSRAUM DES GRUBENGEBÄUDES RONNEBURG

Delf Baacke, Sergej Snagowski, Silvia Jahn<sup>1</sup>

**Kurzfassung:** Die Flutung des Grubengebäudes Ronneburg nahm fast ein ganzes Jahrzehnt in Anspruch. Danach wurde über ein weiteres Jahrzehnt Grubenwasser entnommen und der Wasserbehandlungsanlage Ronneburg zur Reinigung zugeführt. Innerhalb dieses Zeitraumes konnten signifikante Veränderungen der Stoffkonzentrationen beobachtet werden. Im vorliegenden Beitrag werden wichtige Ergebnisse des langjährigen Monitorings dargestellt, Ursachen und Wirkungen der dynamischen hydrochemischen und hydraulischen Prozesse diskutiert sowie Prognosen und die darauf basierenden Handlungsoptionen aufgezeigt.

**Abstract:** Flooding of the Ronneburg underground mine took almost one decade, thereafter mine water has been removed and treated in the Ronneburg water treatment plant for another decade. During that time significant changes of ion concentrations were observed. The article describes the major findings of the monitoring program, discusses causes and effects of hydrodynamic and hydrochemical processes, and discloses forecasts and derived options of technological measures.

## Einführung

Die Flutung des Grubengebäudes Ronneburg (vgl. Baacke et. al. 2010, Mann et. al. 2011, Baacke et. al. 2014) begann 1998. Zuvor wurde die Grube von wassergefährdenden Stoffen beräumt und durch gezielte Abdämmungen für die zukünftigen Strömungsverhältnisse vorbereitet. Dazu gehörte die Einrichtung von vier hydraulisch voneinander getrennten Teilflutungsräumen, drei isolierten Grubenfeldern im Norden und einem großen südlichen Teilflutungsraum aus mehreren Grubenfeldern im Süden. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem ca. 17 Mio. m<sup>3</sup> bergmännischen Hohlraum umfassenden südlichen (Teil) Flutungsraum.

Die während der Vollflutung bis zum Jahr 2006 gesammelten Monitoringdaten wurden mittels hydraulischer und geochemischer Modellierungen in einem Boxmodell zu einer mittleren Beschaffenheitsprognose zum Zeitpunkt der Vollflutung und der Prognose der weiteren stofflichen Entwicklung verdichtet (vgl. Paul et. al. 2003). Mittels eines Großraummodells wurden die Auswirkungen in den vorgesehenen Austrittsgebieten (Tallagen) prognostiziert. Die Mengen und Konzentrationsprognosen waren Grundlage für die Planung der Wasserfassung v. a. im Hauptaustrittsgebiet Gessental (Paul et al. 2006) und der daran angeschlossenen Wasserbehandlungsanlage Ronneburg.

Zu Beginn der finalen Flutungsphase in den Jahren 2006 bis 2011 konnte die faktische Entwicklung der passiv austretenden und mittels Grundwasserfassungssystem in der Talaue aufgefangenen Flutungswässer (Gesteins- und Bodenpassage) beobachtet werden. Aus technischen Gründen wird seit 2011 auch über zentrale Tiefbrunnen Flutungswasser entnommen (Baacke et al. 2010). Ziel ist eine geringfügige Flutungswasserspiegelabsenkung, die am generellen, vollständigen Einstau des Grubengebäudes jedoch praktisch nichts ändert. Dabei ist aber eine direkte Beobachtung der Entwicklung des entnommenen Wassers möglich.

Die Ergebnisse lassen sich zu einem Entwicklungsszenario abstrahieren. Im Detail muss die Interpretation die vielfältigen und variablen, teils temporären Einflussfaktoren

1 Wismut GmbH, Bereich Ingenieurwesen/Strahlenschutz, 09117 Chemnitz, Jagdschänkenstr. 29

auf den Flutungsprozess (Variabilität der Speisung, Eingriffe durch Pumpen, technisch bedingte Einleitungen usw.) sowie die Veränderungen der Strömungsverhältnisse je nach Systemzustand (zu den jeweiligen Entlastungspunkten) und, mit Blick auf die Frachten, die schwankenden Volumenströme berücksichtigen (Abbildung 1).

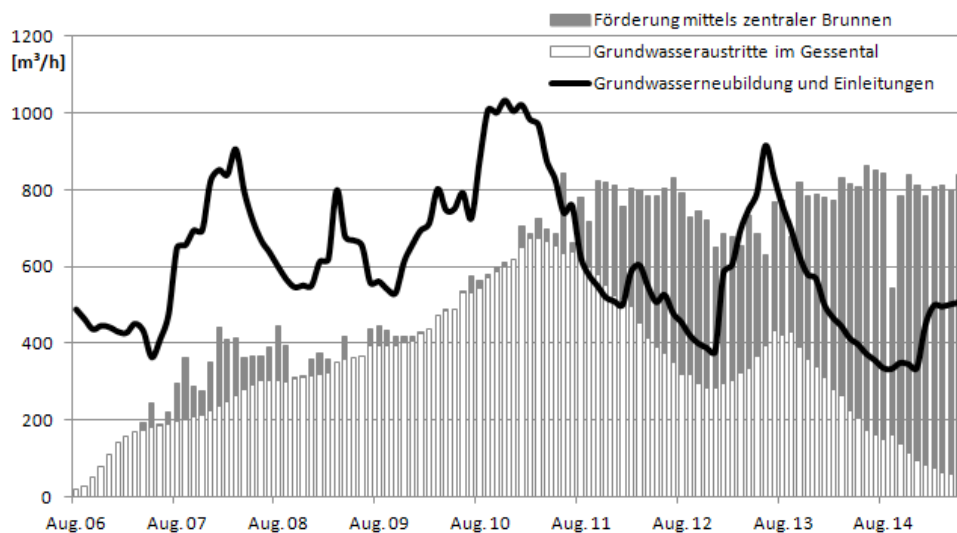


Abbildung 1: Variable Einflussfaktoren auf die Strömung (Richtung und Geschwindigkeit) während der finalen Flutungsphase, Förderung und Austritte ergeben die Gesamtentnahme, Grundwasserneubildung berechnet

## Ergebnisse des Monitorings

Die Ergebnisdarstellung beschränkt sich auf eine Auswahl der güterelevanten bzw. behandlungsrelevanten Inhaltsstoffe für die Zeitpunkte vor und nach der Flutung. Eine umfangreichere Parameterliste sowie ein Vergleich der aktuellen Konzentrationen mit denen im Grubenwasser der anderen gefluteten Uranbergwerke der Wismut GmbH ist in Paul et. al. 2015 (dieser Tagungsband) zu finden.

Für das Hauptaustrittsgebiet Gessental konnte gezeigt werden, dass die dort anfänglich deutlich höhere Konzentrationen der Auswaschung der unmittelbar im Abstrombereich gelegenen oberflächennahen Oxidationszone zuzuordnen sind. Hinzu kommt ein gespeichertes Stoffinventar, welches aus den ehemaligen Haldenkörpern stammt und in den oberen Bodenschichten gespeichert ist. Deshalb sind diese Monitoringergebnisse für die Bewertung des Flutungsraumes nur bedingt geeignet. Die Grubenwassermessstellen und der Brunnen 2 beschreiben die Flutungwasserbeschaffenheit am besten. Brunnen 2 besitzt einen höheren Stellenwert, weil die Ergebnisse mittlerweile einem dem Flutungsraum zuletzt kontinuierlich entnommenen Volumen von über 14 Mio.  $\text{m}^3$  Wasser zuzuordnen sind.

*Tabelle 1: Mittlere Konzentration für ausgewählte Stoffe des Flutungswassers vor und nach der Flutung anhand von Entnahmepunkten (Förderung) und Grundwassermessstellen (ca. 20) mit Anschluss an das Grubengebäude*

Stoff	Einheit	vor Beginn der Flutung, ca. 1997	nach Flutung, ca. 2006/2007		8 Jahre nach Flutung, ca. 2014	
		Abförderung	Messstellen überfluteter Sohlen	zentraler För- derbrunnen	Messstellen überfluteter Sohlen	zentraler För- derbrunnen
pH		6,4	6,8	5,1	7,0	6,3
Sulfat	mg/l	2400	2400	5800	1550	2950
Eisen	µg/l	65	200	730	75	200
Arsen	µg/l	20	35	250	140	260
Nickel	µg/l	1250	1000	4500	210	640
Uran	µg/l	690	1000	720	680	680

Grundsätzlich ist ein mit dem Einstau verbundener Konzentrationsanstieg während der Flutung ersichtlich. Der Flutungsraum wurde durch aufgehendes Grundwasser ohne Fremdzuspeisung aufgefüllt. Die großflächig als Grundwasserneubildung bzw. als Randzuflüsse auftretende Speisung hielt Strömungen in Grenzen, so dass von einem nahezu statischen, kontinuierlich wachsenden Reservoir auszugehen war. Mit Beginn der Grundwasserübertritte im am Rande des Grubenreviers gelegenen Gessental (ca. 240 m NN) nahmen die Strömungen dorthin zu. Mit Beginn des Brunnenbetriebs wurde die Strömungsrichtung allmählich wieder ins Zentrum des Teilflutungsraumes Ronneburg gelenkt. Unter beiden Bedingungen war ein generelles Abklingen der Stoffkonzentrationen zu beobachten, dem sich allerdings einige wenige Stoffe teilweise oder ganz entziehen.

In den Jahren 2006 bis 2014 wurden ca. 42 Mio. m<sup>3</sup> Grubenwasser ausgetauscht (Stand 2014). Dies entspricht einem 3fachen Austausch des gut durchströmbaren Hohlraumes ab der 345mSohle (50 m NN).

## Ursachendiskussion

Die Mobilisierung der klassischen Schadstoffe (Schwermetalle in Verbindung mit pH-Absenkung und Sulfatanstieg, saure Grubenwässer) aus den festen mineralischen Phasen hat seine Ursache während der aktiven Bergbauzeit in der Sauerstoffzufuhr infolge der zum Abbau notwendigen Grundwasserabsenkung und in der gewinnungsbedingten Vergrößerung der reaktiven Oberflächen. Die Karbonate der Ronneburger Lithologien (Dolomit, Kalzit u.a.) sorgen für eine gewisse Pufferung der Versauerung durch Oxidation von Sulfiden (Pyrit, Ausgangspunkt zahlreicher Folgeprozesse).

Unter den Bedingungen der Grundwasserabsenkung führt die Oxidation zwar zu einer beständigen Stoffnachlieferung, die Bildung von Sekundärmineralen in gesättigten Porenwässern jedoch auch zu einer Deponierung. Im Zuge des Grundwasserwiederanstieges werden die primären Stoffquellen durch Sauerstoffentzug weitestgehend inaktiv, während die Rücklösung aus den sekundären Quellen im nachströmenden Grundwasser bis zum

vollständigen Verschwinden der in der Regel leichtlöslichen Sekundärmineralphasen (eigene oder Wirtssekundärminerale wie z.B. Epsomit) zu einer Anreicherung führt. Strömungs- und diffusionsbedingt kann dieser Auswaschungsprozess stark verzögert sein.

Die klassischen Schwermetalle folgen dem beschriebenen Auswaschungsprozess sehr gut. So kann als Maß der für das auswaschungsbedingte Abklingen der Stoffkonzentrationen Nickel herangezogen werden. Es bildet keine schwer löslichen sekundären Phasen und seine Nachlieferung aus primären Quellen ist unmittelbar an die Pyritverwitterung gebunden (Vergesellschaftung der Sulfide bzw. Diadochie im Pyrit). Seit Beginn der Dynamisierung des Flutungsraumes 2006/2007 bis 2014 sind die Nickelkonzentrationen um 80 % bis 85 % gesunken.

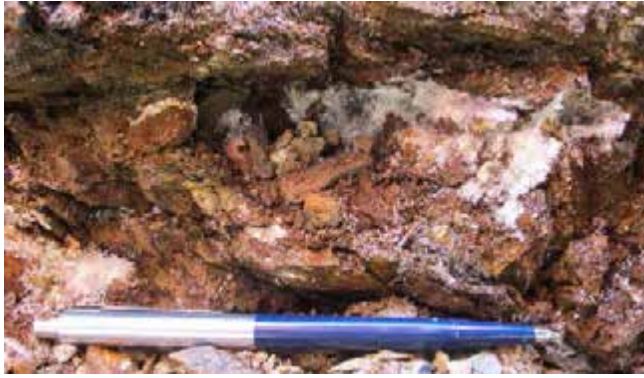
Die Eisenkonzentration folgt diesem Trend in abgeschwächter Form. Das etwas geringere Absinken der Konzentrationen im gleichen Zeitraum um 65 % bis 75 % muss mit weiteren Gleichgewichtsreaktionen des Eisens auf der Seite der Rücklösung (sekundäre amorphe Eisenhydroxide, Ferrihydrit, Schwertmannit, Siderit usw.) zusammenhängen. Da der Grubenraum nicht als homogen anzunehmen ist, sind Bereiche denkbar, in denen Eisen aus den sekundären Depots freigesetzt wird, was den Auswaschungsprozess überlagert. Dabei kann die Reduktion von in Festphasen gebundenem dreiwertigen Eisen zu leicht löslichem zweiwertigen Eisen nicht ausgeschlossen werden.

Die Sulfatkonzentration ist durch das Gipsgleichgewicht limitiert. Die guten Korrelationen mit bergbautypischen Stoffen wie Eisen, Nickel oder Uran sind davon unbeschadet. Es konnte anhand von Gleichgewichtsmodellierungen an langjährigen Analysenreihen gezeigt werden, dass in wenigen Jahren eine Annäherung an die Sättigungskonzentration von Gips im Grubenwasser unter den gegebenen hydrochemischen Bedingungen stattgefunden hat (Hoth & Wendler 2015). Dazu konnten Belege gefunden werden (Abbildung 2). Somit ist das verzögerte Abklingen, gemeinsam mit Magnesium, von nur 35 % bis 50 % erklärbar; die Kalziumkonzentration bleibt stabil. Die limitierte Nachlieferung aus der sekundär unter Bergbaubedingungen gebildeten Gleichgewichtsphase und der anzunehmende große Vorrat führen zu der Schlussfolgerung, dass die Auswaschung entsprechender Stoffmengenanteile also mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Die Urankonzentrationen haben sich unter den verschiedenen Randbedingungen nur unwesentlich verändert, ein Abklingen kann (noch) nicht eindeutig erkannt werden. Eine Hypothese geht von einer Überlagerung des auswaschungsbedingten Abklingens und eines infolge der steigenden Hydrogenkarbonatkonzentrationen komplexierungsbedingten Anstiegs der Konzentrationen aus. Die Erklärungen hierfür sind noch unzulänglich und Gegenstand weiterer Spezialuntersuchungen.

Ebenso unvollkommen sind die Vorstellungen zu den Ursachen der Entwicklung der Arsenkonzentrationen. Nach einem sukzessiven Konzentrationsanstieg während und nach der Flutung scheint seit wenigen Jahren eine Phase gleichbleibender Konzentrationen einzusetzen. Die zahlreichen möglichen, teils sensiblen Prozesse wie Komplexierung, Sorption und Remobilisierung angesichts der unterschiedlichen Wertigkeiten (gelöst als Arsenit und Arsenat) erschweren einfache Erklärungen.

Sämtliche Inhaltsstoffe betreffend wird darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Ursachen der hydrochemischen Signaturen wie die Nachlieferung (Lösung, Diffusion, Konvektion) Komplexierung, Gleichgewichtsreaktionen und selektive Präzipitation allein aufgrund der Inhomogenität des Flutungsraumes zu „Mischsignaturen“ führen.



*Abbildung 2: Gips als Sekundärbildung auf Klüften silurischer Tonschiefer, die einige Jahre von Flutungswasser durchströmt waren (Austrittsgebiet Gessental, 2015)*

## Prognosen und Handlungsbedarf

Die ursprünglichen Prognosen der Flutungswasserbeschaffenheit mittels Boxmodell lieferten eine gute Planungsgrundlage für die Auslegung der Wasserfassungs- und Behandlungsanlagen und schufen die Voraussetzung für die Genehmigung der Flutungsstrategie. Nach der Flutung und mit Beginn der faktischen Datenreihen mit sehr hohen, aber zuverlässig abtrennbaren Konzentrationen, gerieten weitere Vorhersagen zunächst in den Hintergrund. Seit wenigen Jahren zeichnet sich jedoch wieder wachsender Bedarf an belastbaren Vorhersagen ab. Zum einen sind bestimmte verfahrenstechnische Risiken hinsichtlich der Wasserbehandlung zu minimieren, zum anderen ist strategisch auf die veränderten Stoffgehalte zu reagieren. Verfahrensanpassungen und langfristig im besten Fall die Einstellung der Wasserbehandlung bedürfen belastbarer Prognosen.

In einem ersten Schritt wurde 2013 eine vertiefte fachliche Analyse der Beschaffenheitsentwicklung erarbeitet. In Verbindung mit einer Nachmodellierung des durch aktive Eingriffe in den Flutungsraum modellierten Grundwasserganges wurden die bisherigen Entwicklungen mittels Regressionsanalyse in eine quantitative Prognose überführt (Kahnt et al. 2014). Wo dies nicht möglich war, wurden qualitative Betrachtungen angestellt. In einem zweiten Schritt wurden 2014 einzelne Prozesse einer vertieften qualitativen Bewertung unterzogen, die die Prognosen stützen oder hinterfragen (Hoth & Wendler 2015). In einem dritten Schritt wurden in 2015 die Argumente der Studien, mittlerweile eingetretene Realitäten und eigene Bewertungen zusammengeführt und Fehlerbereiche abgeschätzt (Baacke 2015).

Die zukünftigen Abschaltkriterien für die Wasserbehandlung am Standort müssen nicht mit den aktuellen, behördlich vorgegebenen durchschnittlichen Gewässergütekriterien für die Vorfluter übereinstimmen. Aus den möglichen Anforderungen ergeben sich jedoch die zukünftigen Überschreitungsfaktoren. Diese helfen bei der Prioritätensetzung bei strategischen und verfahrenstechnischen Entscheidungen wie etwa möglichen Einleitpunkten, Reinvestitionen in bestehende Anlagen oder deren Ablösung.

*Tabelle 2: Prognose für die mittlere Konzentration für ausgewählte Stoffe des Flutungswassers im Vergleich mit aktuellen Daten und möglichen Abschaltkriterien; Überschreitungsfaktor bezüglich der möglichen Abschaltkriterien zur Schwerpunktfindung*

Stoff	Einheit	1 Jahrzehnt nach Flutung, ca. 2015	ca. 2 bis 3 Jahrzehnte nach Flutung, ca. 2025...2035			
		Fakt	Prognose	Fehler (Abweichung nach oben)	Mögliches Abschaltkriterium (Ziel)	Überschreitungsfaktor
Sulfat	mg/l	2700	1600...1300	20...30 %	(800)	-
Eisen	µg/l	160	40...30	50 %	3	10...15
Arsen	µg/l	200	100...70	50...100 %	30	2...4
Nickel	µg/l	560	95...75	100 %	100	≈ 1
Uran	µg/l	600	400...300	50...100 %	50	5...10

Die erwarteten Fehler sind höher, je schlechter das Verhalten eines Stoffes erklärt werden kann bzw. je geringer seine Restkonzentration ist. Die Überschreitungsfaktoren zeigen zukünftige Behandlungsschwerpunkte bei Fe, U und As. Dies wäre nur mit höheren Abschaltkriterien umgänglich, die allenfalls für leistungsfähigere Vorfluter diskutabel wären. Mit Blick auf verfahrenstechnische Belange ist es wichtig, dass angesichts erwarteter hoher Hydrogenkarbonatkonzentrationen die gelösten Uranspezies stabiler werden und entsprechende Gegenmaßnahmen für eine zuverlässige Abtrennung bei der Wasserbehandlung ergriffen werden müssten. Die Fokussierung auf die Schwermetallabtrennung schwindet langfristig.

## Ausblick

An die oben genannten Schritte zum Systemverständnis schließen sich in diesem Jahr bereits weitere Leistungen an, wie Detailuntersuchungen zu bestimmten Stoffen, Spezies bzw. Isotopen und die Aufarbeitung des Boxmodells (Kalka & Münze 2007). Unmittelbare Aufgabe ist es, einzelne Fragestellungen, die sich aus verschiedenen Hypothesen zur Genese des Flutungswassers ergeben, zu beantworten und das Modell zur Abbildung der hydrochemischen Prozesse für verbesserte stoffliche Prognosen zu ertüchtigen. Ziel ist die Schaffung von Grundlagen für die weiteren sanierungsstrategischen Entscheidungen.

## Literatur

- Baacke, D. (2015): Prognose des Behandlungserfordernisses für Grundwasser am Standort Ronneburg. Unveröffentlicht.
- Baacke, D., Jenk, U., Paul, M. (2014): Flooding of the Underground Uranium Mines at Ronneburg and Königstein – a drawn-out finish. - In: Markscheidewesen 121 (2014) Nr. 1.
- Baacke, D., Paul, M., Kuhn, W. (2010): Das finale Flutungsgeschehen am Standort Ronneburg. – In: Verein zur Förderung, Bewahrung und Erforschung der Traditionen des sächsisch/thüringischen Uranbergbaus e.V.: 14. Bergmannstag in Bad Schlema (Wismut GmbH).

- Hoth, N., Wendler, C. (2015): Überprüfung der Beschaffenheitsanalyse zur Hydrochemie des Flutungswassers der Grube Ronneburg. Unveröffentlicht.
- Kalka, H., Münze, R. (2007) Post-Flooding Processes – Hydraulics and Geochemistry. In: World of Mining – Surface & Underground 59 (2007) No. 5.
- Kahnt, R., Göhler, S., Martin, M., Helbig, M. (2014): Analyse der Beschaffenheitsentwicklung des Flutungswassers am Standort Ronneburg. Unveröffentlicht.
- Mann, S., Zimmermann, U., Jenk, U., Meyer, J., Baacke, D. (2011): Stand der Sanierung des ehemaligen Uranerzbergbaus unter besonderer Berücksichtigung der Flutung der Lagerstätten Schlema Alberoda, Pöhla, Gittersee, Königstein und Ronneburg. – In: Tagungsband Energie und Rohstoffe 2011 Beitrag des Markscheidewesens. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie (TU BAF).
- Paul, M., Gengnagel, M., Baacke, D. (2006): Integrated water protection approaches under the WISMUT project: The Ronneburg case. – In: Merkel, B. J., Hasche-Berger, A. (eds.): Uranium in the Environment. – Pages 912, Heidelberg (Springer). ISBN-13: 9783540283638, ISBN-10: 3540283633.
- Paul, M., Gengnagel, M., Eckart, M. (2003): Groundwater modelling approaches as planning tools for WISMUT's remediation activities at the Ronneburg uranium mining site. – In: Krásný, J., Sharo, J. M.: Groundwater in fractured rocks: selected papers from the Groundwater in Fractured Rocks International Conference, Prague, 2003. – 646 Seiten, Chapter 36 (Routledge). (ISBN-10: 0415414423, ISBN-13: 978-0415414425).
- Paul M, Meyer J, Jenk U, Kassahun A, Schramm A, Baacke D, Forbrig N, Metschies T (2015) Kernaspekte des langfristigen Wassermanagements an den sächsisch-thüringischen Wismut-Standorten.- In: Proceedings des Internationalen Bergbausymposiums WISSYM\_2015, dieser Band.