

Wasserwirtschaftliche Sanierung von Bergbaukippen, Halden und Deponien

Freiberger Forschungsforum
Vorträge und Posterbeiträge
zum 51. Berg- und Hüttenmännischen Tag 2000

Leitung:

F. Häfner, J. Schmidt, B. Merkel

Bearbeiter:

A. Pohl

Feldversuche zur in-situ Entfernung von Uran_(NAT.) und Ra-226 aus Berge- und Flutungswässern

1. EINLEITUNG

Die Sanierung von kontaminierten Flächen, Halden, Bergbautechnik und Schächten sowie aus diesen austretenden Sicker- und Flutungswässern stellt eine vordringliche Aufgabe für die Sicherung bzw. Beseitigung der radioaktiven Folgelasten des Uranerzbergbaus in Mitteldeutschland dar. Klassische Wasseraufbereitungsmethoden und Sanierungsmaßnahmen vor Ort (Reduktion, Neutralisation, Flockung, Fällung, Ionenaustausch) zur Reinigung radionuklidhaltiger Berge- und Haldenwässer sind technisch außerordentlich aufwendig und daher sehr teuer. Zudem führen sie zu einer Aufkonzentrierung der Wasser- und Umweltschadstoffe im Aufbereitungsverfahren, was eine sichere Verbringung der radionuklid-, schwermetall- und arsenhaltigen Konzentrate erfordert.

Aus diesen Gründen wurde die Entwicklung, Einsatztestung und Praxisanwendung speziell von in-situ Sanierungsverfahren als alternative Maßnahmen besonders in den USA und Kanada vorangetrieben. Diese Methoden lassen sich nach ihren Wirkprinzipien wie folgt einordnen (STARR und CHERRY, 1994):

- reaktiv-permeable Barrieren, z. B. aus Fe(0), Oxiden des Ca und Ba bzw. Hydroxylapatit
- Funnel-and-Gate-Systeme
- Wetlands (konstruierte Feuchtraumbiotope)
- selbstständig Alkalinität produzierende Systeme (SAPS)
- Systeme mit sulfatreduzierenden Mikroorganismen (Schadstoffabscheidung als Sulfide)
- Injektionsverfahren.

2. EINIGE ASPEKTE ZUM STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Grundlagenuntersuchungen zur in-situ Entfernung von gelösten Uranverbindungen aus der Wasserphase gehen auf Arbeiten von BAES (1953), LANGMUIR (1978) und VENKATARAMANI et al. (1978) zurück. Erste Konzepte und Ergebnisse von Pilotversuchen mit in-situ Barrieren wurden der Fachwelt bereits 1985 von McMURTHY und ELTON vorgestellt. Eine Übersicht zu möglichen Einsatzmaterialien wurde 1992 von MORRISON und SPANGLER veröffentlicht. Neuere Untersuchungen speziell zum Einsatz von elementarem Eisen für die in-situ U(VI)-Reduktion zu schwerlöslichem U(IV) und dessen Adsorption an sich ausbildenden Fe(II)-Fe(III)-Oxid-Hydroxid-Phasen gehen auf GU et al. (1998) und FARRELL et al. (1999) zurück. Im internationalen Maßstab konzentriert sich auch gegenwärtig der Einsatz von

in-situ Verfahren auf die Beseitigung organischer Schadstoffe. Schadensfälle hinsichtlich Chrom(VI) oder As(V) gewinnen aus Sanierungssicht an Bedeutung (LOYAUX-LAWNICZAK et al., 2000).

In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1995 von DAHMKE eine aktuelle Übersicht zur Thematik erarbeitet, die 1997 aktualisiert worden ist. Dort wird allein für die USA in den nächsten zehn Jahren der Bau von ca. 100 Reaktionswänden (Barrieren) genannt, wodurch nach Schätzungen der US-Environmental Protection Agency etwa 750 Mio. Dollar durch reduzierte Betriebskosten bei derartigen Sanierungsmaßnahmen eingespart werden können.

In den Proceedings zum Fachgespräch „*Sanierung von Altlasten mittels durchströmter Reinigungswände*“, welches im Oktober 1997 im Umweltbundesamt stattgefunden hat, wurden für die Bundesrepublik Deutschland insgesamt 14 Projektstandorte zur Anwendung innovativer Grundwasser-Sanierungstechnologien vorgestellt, die zu der Zeit in der Planung bzw. im Bau waren (TEUTSCHH, 1997). Dabei handelt es sich ausschließlich um Technologieansätze zur Reinigung von Standortwässern, die mit organischen Substanzen wie Mineralölkohlenwasserstoffe, halogenierte Kohlenwasserstoffe, PAK's, Nitroaromaten aus Rüstungsaltslasten oder Pflanzenschutzmitteln belastet sind. Großmaßstäbliche in-situ Sanierungsverfahren für radioaktiv kontaminierte Berge- oder Haldenwässer unter Einsatz von elementarem Eisen oder Eisen- (III)-Verbindungen sind in der BRD bisher noch nicht zum Einsatz gekommen. Dagegen wird an der naturnahen Demobilisierung von konventionellen Schwermetallen aus Grubenwässern intensiv gearbeitet (DAHMKKE et al., 1996; CALMANO und ZOOMIS, 1998).

Hinsichtlich deutschsprachiger Tagungsbeiträge oder Review-Artikel zum Problemkreis kann auf die vorliegenden Arbeiten u. a. von TEUTSCH et al. (1996), WEISS et al. (1997), WEGGERLE und PEIFFER (1998), PFEIFFER et al. (1999) ZOOMIS et al. (1999), EBERT et al. (1999) sowie WEISSMAHR et al. (1999) verwiesen werden.

Ausgehend vom bestehenden Defizit hinsichtlich der in-situ Sanierungsmethoden für radionuklid- und arsenbelastete Berge- und Haldenwässer wurde vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung im Jahre 1997 ein Forschungsvorhaben initiiert und mit der Zielstellung auf den Weg gebracht, moderne in-situ Sanierungsverfahren auf deren Anwendbarkeit und Wirksamkeit hinsichtlich der gelösten bzw. partikulär gebundenen Radionuklidionen wie U_{nat} , Ra-226, Pb-210 sowie der Wasserschadstoffe As und Pb unter Labor- und Feldbedingungen zu testen. Die Feldversuche wurden von den Autoren dieses Beitrags durchgeführt, die Laborarbeiten an der TU BA Freiberg unter Leitung von B. Merkel. Zum Stand der Untersuchungen liegen drei Zwischenberichte vor (SCHNEIDER et al., 1998/99).

3. STANDORTAUSWAHL, MODELLANLAGEN, REAKTIVMATERIALIEN UND VERSUCHSBEDINGUNGEN

3.1 STANDORTAUSWAHL

Für die Durchführung der geplanten Feldversuche wurde ein Standort im Erzgebirge gesucht, dessen Stollnaustrittswasser ausreichende Konzentrationen an $U_{nat.}$ (Konzentration $> 1,0$ mg/l) und Ra-226 (Aktivität > 300 mBq/l) hinsichtlich der sanierungstechnischen und analytischen Randbedingungen aufweist. Trotz umfangreicher Standorterkundungen unter Verwendung von Unterlagen des Bundesamtes für Strahlenschutz konnte kein geeigneter Einzelstandort gefunden werden. Aus diesem Grund wurden die Modellversuche auf zwei Standorte aufgeteilt. Ausgewählt wurden die Standorte Stolln 216 (Bärenstein, OT Niederschlag) hinsichtlich Uran und der Glück-Auf-Stolln (Johanngeorgenstadt) bezüglich Ra-226. Vorfluter in Johanngeorgenstadt ist das Schwarzwasser, in Niederschlag der Pöhlbach.

3.2 MODELLANLAGEN UND REAKTIVMATERIALIEN

Am Standort Niederschlag wird das Flutungswasser aus dem Stollnmund (Absetzbecken) über eine Rohrleitung zur Modellanlage geführt. In Johanngeorgenstadt ist die Modellanlage direkt im Stolln installiert. Teilströme der austretenden Bergewässer werden direkt durch die Reaktorsäulen geleitet. Diese bestehen aus Plexiglas mit regelbarem Ablauf, besitzen ein Leervolumen von 3,9 l und sind mit Reaktivmaterial gebüllt. Die Auswahl an Barrierematerialien erfolgte auf der Grundlage von zuvor durchgeführten geochemischen Modellierungen. Dabei handelt es sich um Fe(0) in Form von Eisenschrott (Gußspäne, s. Tabelle 1), eisen- und manganoxidhaltigen Wasserwerksschlamm (Zusammensetzung s. Tabelle 2), gemischt mit Feinsand, sowie Filtertorf in drei pro Standort jeweils separat betriebenen Säulen. Die Einsatzmengen an Reaktivmaterialien sind in der Tabelle 3 angegeben.

Probe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Zn
Sorte 69	3,30	2,11	0,53	0,097	0,072	n. b.	n. b.

Tab.1: Begleitelemente der Eisengußspäne, Material der Metallaufbereitung Zwickau GmbH, Filiale Freiberg, „Sorte 69“ (Angaben in %)

Kennwert	Angabe als	Bezugsgröße	Masseanteil (g/kg)	Masseanteil (%)
Feuchte	-	Feuchtmasse	-	3,20
Eisenoxid	als Fe ₂ O ₃	Trockenmasse	627,7	62,77
Manganoxid	als MnO	Trockenmasse	14,40	1,44
Magnesiumoxid	MgO	Trockenmasse	8,25	0,83
Calcium	als Ca	Trockenmasse	65,32	6,53
Kupfer	als Cu	Trockenmasse	0,15	0,02
Arsen	als As	Trockenmasse	0,07	0,01
Nickel	als Ni	Trockenmasse	0,02	< 0,01
Chrom	als Cr	Trockenmasse	0,01	< 0,01

Tab.2: Zusammensetzung des Wasserwerksschlammes in entwässerter Form (Abprodukt aus der Flockungsstufe der Trinkwasseraufbereitung des Wasserwerks Torgau-Ost der Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH, Weißnig (aus Wasserwerkslabordaten)

Anm.: Die Uran-Konzentrationen des Wasserwerksschlammes waren geringer als die Bestimmungsgrenze von 0,1 µl U_{nat.} mittels ICP-MS-Methode.

Reaktivsäule	Reaktivmaterial	Zusatzstoffe
Eisenschrottspäne	4,15 kg Fe-Späne	0,2 kg Feinkies (Zu- und Ablauf; 3-5 mm Buntquarz)
Wasserwerksschlamm	1,5 kg WW-Schlamm + 1,5 kg Feinsand (vermischt)	0,2 kg Feinkies (Zu- und Ablauf; 3-5 mm Buntquarz)
Filtertorf	0,3 kg	ohne Zusätze

Tab. 3: Einsatzmengen an Reaktivmaterialien

Anm.: Als Filtertorf kam die handelsübliche Sorte „Ehfitorf“ (Filtertorf zur KH-Senkung) der Fa. Eheim zum Einsatz.

3.3 VERSUCHSBEDINGUNGEN

Die hydrochemischen und radionuklidspezifischen Verhältnisse der austretenden Wässer sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Bei den Wässern handelt es sich um Stollnwässer des Erdalkali-Sulfat-Hydrogencarbonat-Typs, die durch relativ neutrale pH-Werte und eine mäßige Mineralisierung (eLf ~ 360 µS/cm) charakterisiert sind. Die Wässer sind hinsichtlich der Uran- und Arsengehalte sowie der Ra-226-Aktivität als kritisch einzustufen. Als Basiswerte für die relevanten Sanierungsziele können einerseits der As-Grenzwert der EU-Trinkwasserrichtlinie (10 µg/l) sowie der Empfehlungswert des Bundesamtes für Strahlenschutz für Uran im Trinkwasser (< 0,3 mg/l) herangezogen werden.

Die in-situ Sanierungsversuche wurden im Frühjahr 1999 begonnen und dauern noch an. Für die Reaktorsäulen wurden Durchflußraten von 3 bis 15 l/h eingestellt. Die Zeit für den einmaligen Austausch des Wasservolumens bei einer mittleren Porosität von 0,4 liegt theoretisch zwischen 6 und 24 min.

Kennwert (Maßeinheit)	Modellstandort Niederschlag (n = 18)	Modellstandort Johann- georgenstadt (n = 24)
Reaktorsäulenvordruck (kPa)	70	3
pH-Wert (ohne)	7,3	6,8
elektrische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	361	368
Sauerstoffgehalt ($\text{mg O}_2/\text{l}$)	4,6	2,9
Säurekapazität $K_{S\ 4,3}$ (mmol/l)	2,47	1,71
Basenkapazität $K_{B\ 8,2}$ (mmol/l)	2,05	4,81
U, gesamt (mg/l)	1,273 (+/- 0,260)	0,011 (+/- 0,001)
Ra-226 (mBq/l)	180 (+/- 80)	240 (+/- 65)
Pb-210 (mBq/l)	0,094 (n= 3)	0,093 (n= 3)
Pb, gesamt ($\mu\text{g}/\text{l}$)	6,6	9,7
As, gelöst ($\mu\text{g}/\text{l}$)	6,5 (+/- 3,0)	97,5 (+/- 43)
Na^+ (mg/l)	3,1	11,5
K^+ (mg/l)	2,9	2,8
Mg^{2+} (mg/l)	17,7	17,6
Ca^{2+} (mg/l)	48,9	35,1
Mn, ges. (mg/l)	0,02	1,28
Fe, ges. (mg/l)	0,32	2,49
Cl ⁻ (mg/l)	5,7	19,3
NO_3^- (mg/l)	7,6	2,9
SO_4^{2-} (mg/l)	74,4	75,8
HCO_3^- (mg/l)	168	91,0
DOC (mg C/l)	1,9	1,3

Tab. 4: Hydraulische, hydrochemische und radiochemische Daten der zur Speisung der Modellanlagen genutzten Flutungswässer (Auswahl an Milieudaten als Mittelwerte)

Anm.: n Beprobungsanzahl, Werte in Klammern: absolute Standardabweichung der Datengesamtheit des Kennwerts

Als Maximalwerte wurden am Standort Niederschlag für Uran 1,9 mg/l gefunden (15.02.2000), in Johannegeorgenstadt für Ra-226 eine Aktivität von 400 mBq/l und eine Arsen Höchstkonzentration von 222 µg/l.

4. EINGESETZTE ANALYSENVERFAHREN

Die Bestimmung der hydrochemischen Kennwerte sowohl der Flutungswässer als auch der Reaktorsäulenauslaufwässer erfolgte nach den aktuellen DIN-Verfahren für die Wasseranalytik. Pb-210 wurde im Radiologischen Labor Dr. Buheitel (Schweitenkirchen) nach einer hausinternen Methode bestimmt. Die Analytik des Urans erfolgte mittels ICP-MS (Bestimmungsgrenze: 0,1 µg/l) und die für Ra-226 emanometrisch nach dem Verfahren UGL 4/91 (Bestimmungsgrenze: 10 mBq/l) im Umweltlabor der C&E GmbH in Gröna bei Chemnitz.

5. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

Wie die Tabelle 5 und die Abbildungen der Konzentrationsverläufe an beiden Standorten zeigen, konnte durch das eingesetzte elementare Eisen in Form von Gußspänen durchgängig die höchsten Eliminierungsleistungen hinsichtlich Uran und Blei erzielt werden. Dabei ist die Eliminierung von 96% des gelösten Uran-Inputs durch das elementare Eisen sehr bemerkenswert. Auf Grund der hohen Reduktionskraft des elementaren Eisens bei der Reaktion mit Wasser stellen sich stark reduzierende Verhältnisse ein, was die Eliminierungsdaten für die Anionen Nitrat und Sulfat belegen. Die sich bei dieser Reaktion ausbildenden Fe-Oxidhydroxid-Phasen können zudem adsorptiv wirksam werden, was durch Literaturdaten bestätigt wird (FIEDOR et al., 1998). Nach der Reduktion der mobilen U(VI)-Spezies zu schwerlöslichen U(IV)-Verbindungen kann deren Adsorption an den oben genannten Phasen erfolgen.

Kennwert	Standort Niederschlag		Standort Johannegeorgenstadt	
	Wasserwerks-schlamm	Fe(0)-Späne	Wasserwerks-schlamm	Fe(0)-Späne
Uran, gesamt	38%	96%	70% ⁽²⁾	80% ⁽²⁾
Radium-226	73%	50%	52%	43%
Blei, gesamt	57%	77%	53%	65%
Arsen, gelöst	85%	84%	55%	70%
Sulfat	0%	52%	13%	3%
Nitrat	1%	55%	25%	56%

Tab. 5: Eliminierungsleistungen ⁽¹⁾ der eingesetzten Reaktorsäulen für ausgewählte Flutungswasserinhaltsstoffe auf der Basis der Mittelwerte

Anm.: ⁽¹⁾ Berechnung der Eliminierungsleistung: $[1 - \text{Output/Input}] \times 100\%$

⁽²⁾ Eliminierungsleistungen auf Grund des sehr niedrigen Inputs an Uran nur als Richtwert

JGS-0: Flutungswasser

JGS-Fe: Elem. Eisen

JGS-WW: Wasserwerksschlamm

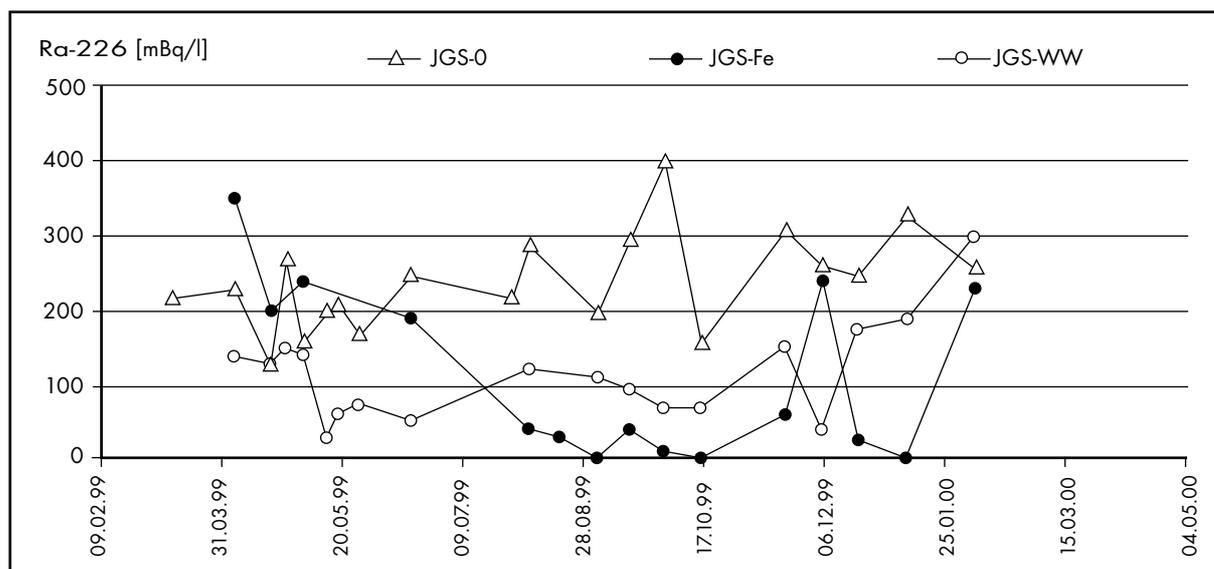
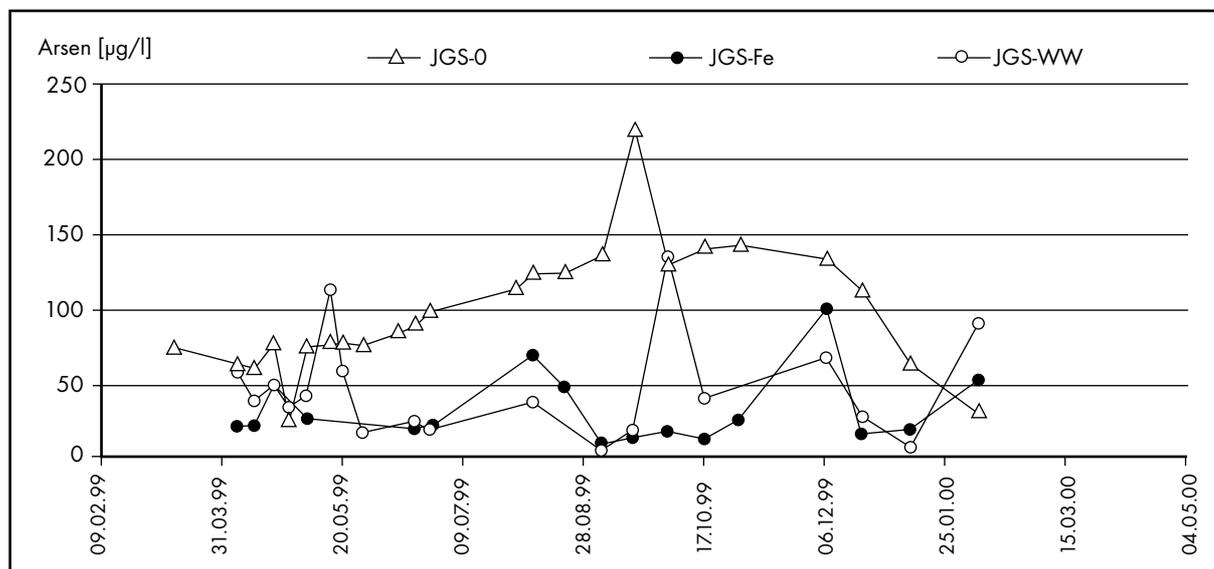
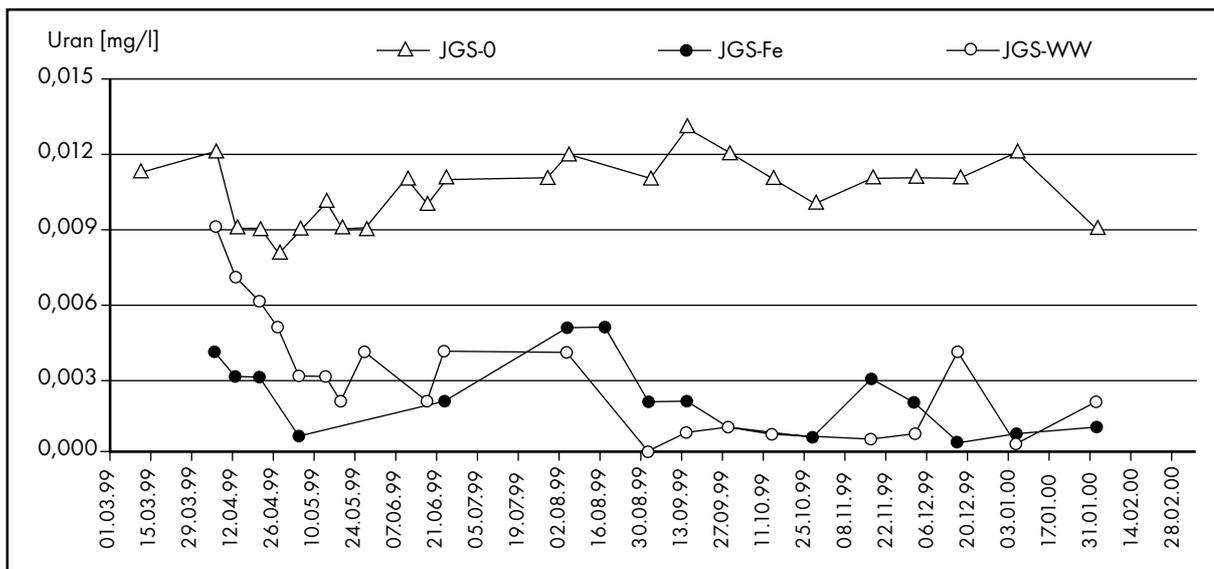


Abb.1: Ganglinien der Wasserschadstoffe Uran, Arsen und Ra-226 am Standort Johanngeorgenstadt

Im Verlauf der Versuche zeigte sich in der Fe(0)-Reaktorsäule eine deutliche Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit, was zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit führte.

Ursache dafür ist die Bildung von gemischten feindispersen Eisenoxidhydroxiden. Bezüglich Ra-226 zeigte sich, daß für dessen Eliminierung aus der Wasserphase weniger die Reduktionskraft des elementaren Eisens als vielmehr die Adsorptionskraft der Eisen- und Manganoxid-Spezies, sowohl im Wasserwerksschlamm als auch in situ aus Fe(0) gebildet, von Bedeutung ist.

Hinsichtlich Arsen waren Fe(0)-Späne und Wasserwerksschlamm in etwa von gleicher Wirksamkeit, wobei die Eliminierungsleistung am Standort Niederschlag mit 84% bis 85% auf Grund des geringeren Inputs (Quotient etwa 15) gegenüber dem am Standort in Johanngeorgenstadt deutlich höher ist. Der eingesetzte Filtortorf verhielt sich dagegen weitgehend inaktiv, also weder reduktiv noch adsorptiv und wurde inzwischen substituiert. Die Einzelverläufe der Kennwerte von Uran, Arsen und Ra-226 an beiden Standorten sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie der Stand der Untersuchungen verdeutlicht, können mit elementarem Eisen in Form von Gußeisenspänen aus Flutungswässern in großem Umfang gelöste Uran-Verbindungen in-situ abgetrennt werden. Zur Entfernung von Ra-226 ist dagegen der eingesetzte Wasserwerksschlamm besser geeignet. Für die Beseitigung von gelösten As-Spezies sind beide Einsatzmaterialien gut geeignet, während der eingesetzte Filtortorf inaktiv blieb.

Die Versuchsanlagen sollen noch bis zum Spätsommer 2000 weiterbetrieben werden. Nach Abschluß der Modellversuche mit den Reaktorsäulen ist vorgesehen, die aus den Barrierematerialien gebildeten Reaktivphasen auszubauen und im Labor zu charakterisieren. Nachfolgend sollen an diesen Materialien Remobilisierungstests durchgeführt werden. Außerdem sind nach Versuchsende summarische Fracht- und Masseabscheidungsbilanzen hinsichtlich der Radionuklid-Spezies und des Arsens zu erstellen.

Es ist vorgesehen, nachfolgend am Standort Johanngeorgenstadt direkt im Flutungsstolln eine reaktive Fe(0)-Barriere im höherskaligen Maßstab zu errichten. Diese soll im Rahmen eines Langzeitversuchs auf ihre Standfestigkeit, Freisetzung von Fe(II)/(III)-Ionen in Richtung Vorfluter und Wirksamkeit hinsichtlich der relevanten Wasserschadstoffe getestet werden.

KVNS-0: Flutungswasser

KVNS-Fe: Elem. Eisen

KVNS-WW: Wasserwerksschlamm

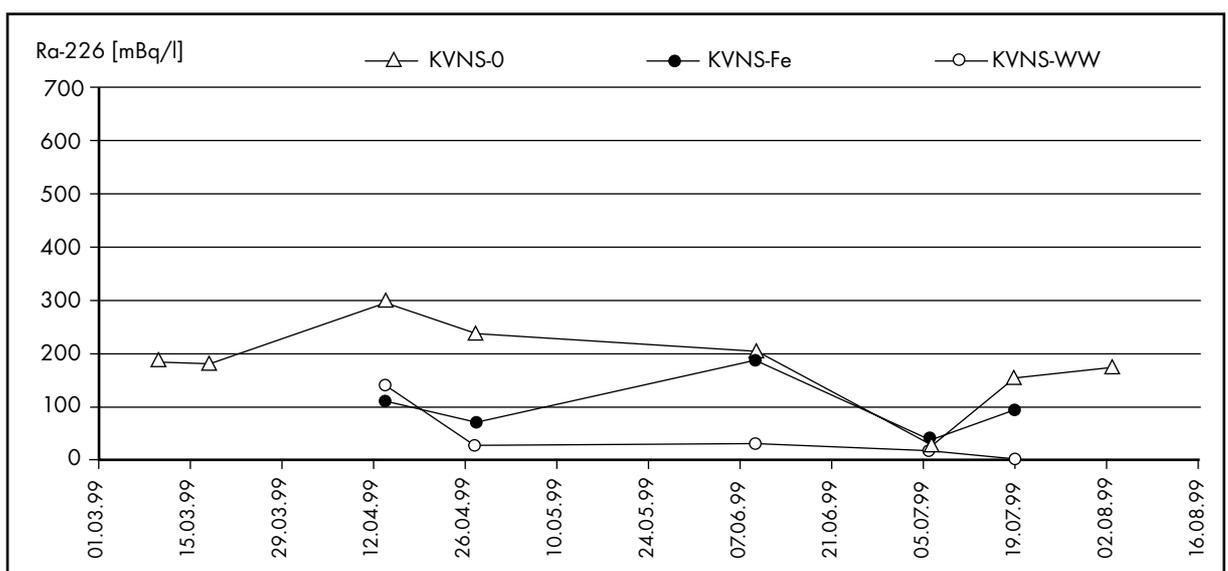
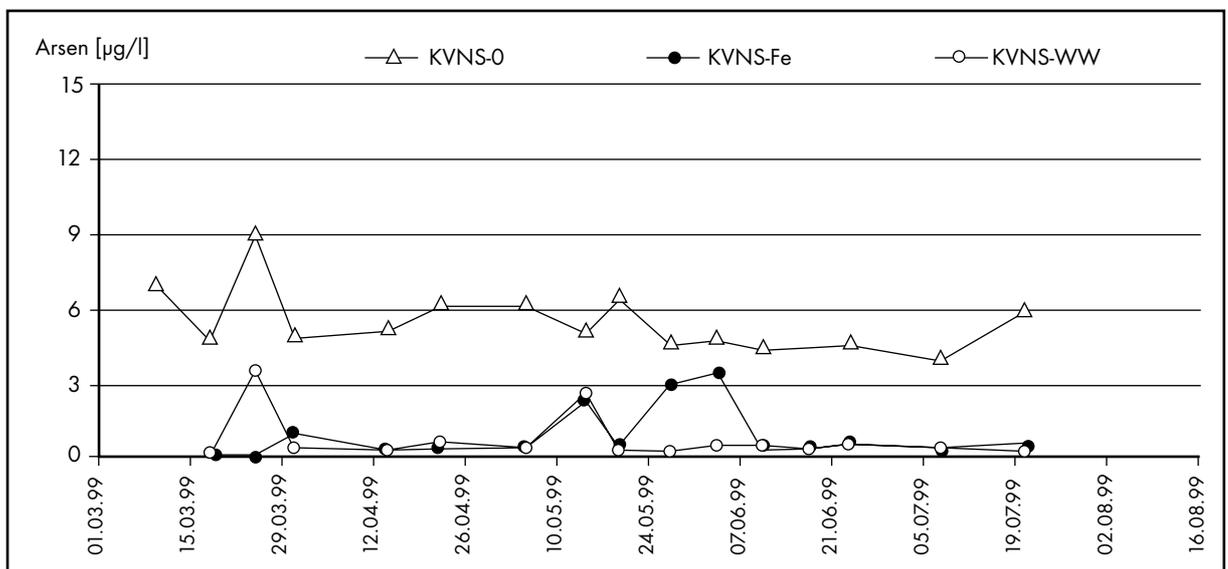
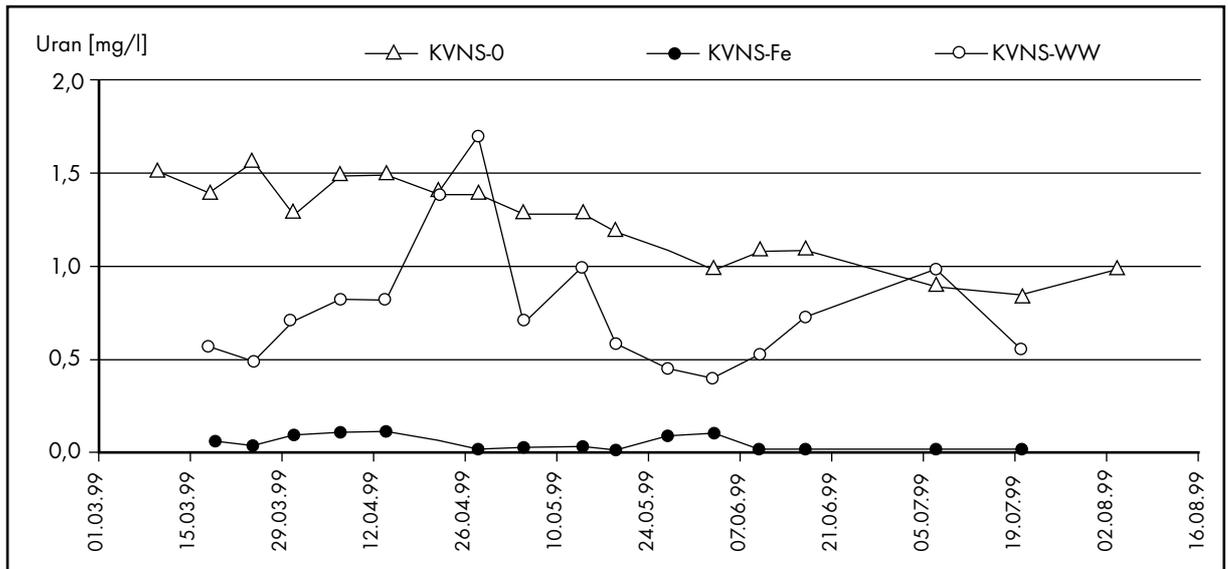


Abb.2: Ganglinien der Wasserschadstoffe Uran, Arsen und Ra-226 in Niederschlag

LITERATUR

- BAES, C. F.: The Reduction of Uranium(VI) by Ferrous Iron in Phosphate Acid Solution. Oak Ridge National Laboratory, Publ.-No. ORNL-1581, Oak Ridge (Tennessee), 1953
- CALMANO, W.; ZOOMIS, T.: Development of geochemical barriers for a natural demobilization of heavy metals from mine waters. in: Proc. Internat. Mine Water Assoc. Symposium: "Mine Water and the Environment", Vol. 2, Johannesburg (South Africa), 1998, S. 286-288
- DAHMKKE, A.: Reaktive Wände - pH-Redox-reaktive Wände. Technischer Bericht Nr. 95/21 (HG 223), Lehrstuhl für Hydraulik und Grundwasser der Universität Stuttgart im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1995 (Aktualisierung 1997)
- DAHMKKE, A. et al.: Perspektiven der Nutzung geochemischer Barrieren. Geowissenschaften 14 (1996), 186-195
- EBERT, M.; MÖLLER, W.; WEGNER, M.: F + E-Vorhaben Reaktive Wand in Rheine - aktuelle Ergebnisse. Altlasten Spektrum II (1999), 109-112
- FARRELL, J. et al.: Uranium Removal from Ground Water Using Zero Valent Iron Media. Ground Water 37 (1999), 618-624
- FIEDOR, J. N. et al.: Understanding the Mechanism of Uranium Removal from Groundwater by Zero-Valent Iron Using X-ray Photoelectron Spectroscopy. Environ. Sci. Technol. 32 (1998), 1466-1473
- GU, B. et al.: Reductive Precipitation of Uranium(VI) by Zero-Valent Iron. Environ. Sci. Technol. 32 (1998), 3366-3373
- LANGMUIR, D.: Uranium Solution-Mineral Equilibria at Low Temperatures with Applications to Sedimentary Ore Deposites. Geochim. Cosmochim. Acta 42 (1978), 547-569
- LOYAUX-LAWNICZAK, S. et al.: Trapping of Cr by Formation of Ferrihydrite during Reduction of Chromate Ions by Fe(II)-Fe(III) Hydroxysalt Green Rusts. Environ. Sci. Technol. 34 (2000), 4384-43
- MCMURTHY, D. C., ELTON, R. O.: New Approach to In-Situ Treatment of Contaminated Groundwaters. Environ. Progress 4 (1985), 168-170
- MORRISON, S. J.; SPANGLER, R. R.: Extraction of Uranium and Molybdenum from Aqueous Solutions: A Survey of Industrial Materials for Use in Chemical Barriers for Uranium Mill Tailings Remediation. Environ. Sci. Technol. 26 (1992), 1922-1931
- PFEIFFER, S. et al.: Altlasten und Grundwasser - Geowissenschaftliche Ansätze zum Schutz des Grundwassers vor Stoffeinträgen aus Altablagerungen und Altlastenstandorten. Vom Wasser 91 (1998), 351-354
- SCHNEIDER, P.; NEITZEL, P. L.; MERKEL, B.: Alternative Methoden zur Behandlung von Flutungswässern. 1.-3. Zwischenbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben an das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, AZ 13.8802.3528/44, Chemnitz-Freiberg, 1998/99
- STARR, R. C.; CHERRY, J. A.: In-Situ Remediation of Contaminated Ground Water: The Funnel-and-Gate-System. Ground Water 32 (1994) 465-476

- TEUTSCH G.: Dimensionierung von Funnel-and-Gate-Systemen. in: Proc. Workshop „Passive Systeme zur in-situ Sanierung von Boden und Grundwasser“, Dresden, 1996
- TEUTSCH, G. et al.: In-situ-Reaktionswände - ein neuer Ansatz zur passiven Sanierung von Boden- und Grundwasserverunreinigungen. Grundwasser 1 (1996), 12-20
- TEUTSCH, G.: Internationale Erfahrungen bei der Anwendung durchströmter Reinigungswände. in: Umweltbundesamt (Hrsg.): Sanierung von Altlasten mittels durchströmter Reinigungswände. Proc. der Vorträge und Diskussionsbeiträge des Fachgesprächs vom 27.10.1997 im Umweltbundesamt, Berlin, 1997, S. 22-32
- VENKATARAMANI, B. et al.: Sorption Properties of Oxides(III). J. Colloid Interf. Sci. 67 (1978), 187-194
- WEGGERLE, R.; PEIFFER, S.: Reduktion von Nitrat und Nitrit mit Fe(0). in: Poster-Proc. Jahrestagung der Wasserchem. Ges. der GDCh(P-31), Regensburg, 1999, S. 281-282
- WEISSMAHR, K. W.: Laboratory and Field Scale Evaluation of Geochemical Controls on Subsurface Transport of Nitroaromatic Ammunition Residues. in: Proc. Jahrestagung der Wasserchem. Ges. der GDCh (V-25), Regensburg, 1999, S. 130-133, ISBN-Nr. 3-924763-75-5
- WEISS, H.; TEUTSCH, G.; DAUS, B.: Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) - Bericht zur Machbarkeitsstudie für den Modellstandort Bitterfeld. Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (Hrsg.): UFZ-Bericht Nr. 27 (1997), ISSN-Nr. 0948-9452
- ZOUMIS, T. et al.: Naturnahe Demobilisierung von Schwermetallen aus Grubenwässern. in: Proc. Jahrestagung der Wasserchem. Ges. der GDCh (V 27), Regensburg, 1999, S. 138-142

Anschriften der Autoren

Dr. Peter L. Neitzel und Dipl.-Geol. Petra Schneider
Hydroisotop-Piewak GmbH 09117-Chemnitz, Oberfrohnauer Straße 84
Hydroisotop-Piewak@t-online.de

Dipl.-Geol. Stephanie Hurst
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 01109 Dresden, Zur Wetterwarte 11
stephanie.hurst@lfugdd.smu.sachsen.de