

Tailings (Rückstände) aus der Aufbereitung von Erzen werden in vielen Bergbauländern mit verschiedenen Klimazonen in übertägigen Speicheranlagen, überwiegend in Tailings Ponds (Rückstandsteichen), abgelagert. Dies gilt insbesondere für Tailings aus Gold-, Kupfer-, Zink-, Blei- und Uranerzen (Bild 1). Die Tailings Ponds können erhebliche Abmessungen aufweisen.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat allerdings auch die untertägige Ablagerung der Aufbereitungsrückstände zugenommen. Die Aufbereitungsrückstände werden in der Regel als so genannte Paste Tailings (pumpfähig eingedickte Rückstände) in vorbereitete untertägige Hohlräume gepumpt. Dazu werden sie in der Regel entwässert und Bindemitteln zugegeben. Auch die Beifügung erprobter Immobilisierungsreagenzien bei der Herstellung der Paste Tailings ist gängige Praxis. Die gefüllten Ablagerungskammern werden mit Absperrbauwerken zuverlässig gegen die Umgebung gesichert. Erwähnenswert ist, dass bei der bergmännischen Gewinnung von Erzen nunmehr große Teile der Aufbereitung bereits unter Tage stattfinden und die Rückstände direkt dort verbleiben können.

In der DDR fielen in den Jahren von 1946 bis 1990 erhebliche Mengen von Tailings aus der Uranproduktion an. Aktuell wird in Deutschland beispielsweise im Jahr 2011 in der Lausitz bei Spremberg mit der Auffahrung einer Kupferlagerstätte und im Jahr 2015 mit dem Abbau begonnen

Sichere und langzeitstabile Verwahrung von Tailings Ponds, insbesondere aus der Uranerzaufbereitung

Dr.-Ing. Michael Lersow*, Obmann des Arbeitskreises 5.5 „Tailings“ der DGGT



werden. Bei der Aufbereitung der Kupfererze wird sich auch das Problem der Verbringung und Speicherung der anfallenden Rückstände stellen.

Die langzeitstabile Verwahrung von Tailings Ponds, insbesondere aus der Uranerzaufbereitung, ist eine große umweltgeotechnische Herausforderung.



Die sichere, langzeitstabile Verwahrung von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung ist eine große umweltgeotechnische Herausforderung. Bei der Auswahl der Verwahrungstechnologie ist entscheidend, dass das entstehende geotechnische Umweltbauwerk die Gefahren, die von den radioaktiven und toxischen Tailings für Mensch und Umwelt ausgehen, bleibend beseitigt und sich der Standortumgebung harmonisch anpasst. In Deutschland und anderen Ländern mit vergleichbaren klimatischen und Ablagerungsbedingungen für Uranerzaufbereitungsrückstände wird für deren sichere Verwahrung die „Trockene in situ Verwahrung mit teilweiser Entwässerung“ ausgeführt. Der Arbeitskreis 5.5 „Tailings“ der DGGT befasst sich mit der Planung, der Errichtung und der Verwahrung derartiger Tailings Ponds aus der Erzaufbereitung, insbesondere von Uranerzen, sowie den notwendigen Langzeitnachweisen und dem Langzeitmonitoring. Der Arbeitskreis hat mit der Erarbeitung von Empfehlungen begonnen. Diese sollen sich zunächst auf sehr eng begrenzte Aufgabenfelder aus der allgemeinen Aufgabenstellung beschränken. Die dramatischen Unfälle von Kolontar (Ungarn), Nachterstedt (Deutschland), Baia Mare (Rumänien), Los Frailes (Spanien) zeigen auf tragische Weise ein ungelöstes Problem,

nämlich das Fehlen einer auf einem standortspezifischen Langzeitmonitoring mit integriertem Frühwarnsystem basierenden, verlässlichen Prognose der Langzeitstandsicherheit (Langzeitstabilität) derartiger geotechnischer Umweltbauwerke, und damit auch die Bedeutung der Arbeiten des Arbeitskreises. In diesem Beitrag wird der Kenntnisstand über Tailings Ponds für Rückstände aus der Uranerzaufbereitung beschrieben, und offene Fragen und damit verbundener Forschungs- und Entwicklungsbedarf werden aufgezeigt. Der Beitrag beschreibt nach einer Einführung in das Thema zunächst den Uranerzbergbau in Deutschland. Er zeigt die Gefährdungspotenziale von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung und die relevanten gesetzlichen Vorschriften auf. Er beschreibt die Vorgehensweise bei der Planung der Verwahrung sowie für die Errichtung eines dazu erforderlichen geotechnischen Umweltbauwerks für die sichere Verwahrung von Tailings Ponds, erläutert die Ausführung solcher Bauwerke und gibt einige Ausführungsbeispiele dafür an. Die notwendigen Langzeitnachweise (Prognose) und das eng damit verzahnte Langzeitmonitoring (Kontrolle) werden behandelt und bewertet sowie ein Ausblick in die weitere Entwicklung gegeben.

Bild 1. Tailings Ponds aus der Golderzaufbereitung WA Goldfields/ Kalgoorly in heißer arider Klimazone, links trocken gefallen (verdunstetes Freiwasser), rechts mit Freiwasserlamelle (Fotos: LERSOW, 2005).

Bild 2. Tailings Ponds Culmitzsch A und B der SDAG Wismut (links) und Einspül-punkt der Tailings (rechts) (LERSOW/SCHMIDT, 2006).



Die geotechnische Umweltbauwerk muss die Gefahren, die von den radioaktiven und toxischen Aufbereitungsrückständen für Mensch und Umwelt ausgehen, bleibend beseitigen und sich der Standortumgebung harmonisch anpassen. Dabei haben standortspezifische Faktoren und Randbedingungen auf die Auswahl der Verwahrungstechnologie, auf das zu errichtende geotechnische Umweltbauwerk und damit auf die Erreichung des Sanierungsziels ausschlaggebenden Einfluss. Die in diesem Beitrag gewählte Beschreibung „geotechnisches Umweltbauwerk“ für die Ergebnisse der Verwahrung von Tailings Ponds soll die Komplexität der Aufgabenstellung verdeutlichen. Die Verwahrung erfolgt auf Grundlage eines Standortsanierungskonzepts (Conceptual Site Model (CSM)). Die zur Anwendung kommende Verwahrungstechnologie ist in der Regel ein Unikat. Die Langzeitstandsicherheitsuntersuchungen und -nachweise müssen einerseits standortspezifischen Zielsetzungen folgen, sich aber andererseits an generellen objektiven Kriterien orientieren.

Der Arbeitskreis 5.5 „Tailings“ der DGGT befasst sich mit der Planung, der Errichtung und der Verwahrung derartiger Tailings Ponds aus der Erzaufbereitung, insbesondere von Uranerzen, sowie den notwendigen Langzeitnachweisen und dem Langzeitmonitoring. Der Arbeitskreis hat mit der Erarbeitung von Empfehlungen begonnen. Diese sollen sich zunächst auf sehr eng

begrenzte Aufgabenfelder aus der allgemeinen Aufgabenstellung beschränken. In diesem Beitrag werden der Kenntnisstand über Tailings Ponds für Rückstände aus der Uranerzaufbereitung beschrieben und auch offene Fragen und damit verbundener Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt, indem:

- ◊ Zunächst kurz auf die Geschichte des Uranbergbaus in Deutschland eingegangen wird,
- ◊ Die Gefährdungspotenziale von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung und die relevanten gesetzlichen Vorschriften aufgezeigt werden,
- ◊ Die Vorgehensweise bei der Planung der Verwahrung von Tailings Ponds und der Errichtung dazu notwendiger geotechnischer Bauwerke erklärt wird,
- ◊ Die Ausführung erläutert wird und einige Ausführungsbeispiele beschrieben werden,
- ◊ Die notwendigen Langzeitnachweise (Prognose) und das eng damit verzahnte Langzeitmonitoring (Kontrolle) behandelt und bewertet werden.

Insbesondere zum Langzeitmonitoring gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf.

Bild 3. Aufbau und Hauptgefahrenpotenziale von Tailings Ponds der Uranerzaufbereitung (Quelle: LERSOW).



Uranerzbergbau in Deutschland

Nach dem Zweiten Weltkrieg begann im von der Sowjetunion dominierten Teil Deutschlands ein enormer Uranerzbergbau mit dazugehöriger Erzaufbereitung. Die bergbautreibende SDAG Wismut war größter Uranproduzent der Welt und die DDR insgesamt der drittgrößte uraniumproduzierende Staat. In den Jahren 1946 bis 1990 wurden ungefähr 230 000 t Uran mit 180 Mill. m³ Aufbereitungsrückständen produziert. Die Speicheranlagen der Uranerzaufbereitung umfassten eine Fläche von rund 600 ha. Die bedeutendsten Tailings Ponds sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Bild 2 zeigt exemplarisch die Tailings Ponds Culmitzsch A und B.

Bei der Aufbereitung von Erzen werden große Mengen zerkleinert, gemahlen und chemisch und/oder mechanisch getrennt. Im Allgemeinen erfolgt die Aufbereitung der gewonnenen Erze so, dass diese auf eine bestimmte Korngröße gebrochen oder gemahlen und dann in der Aufbereitungsanlage einem „Laugungsprozess“ unterworfen werden. Je

nach Erzart erfolgt die Laugung mit alkalischem oder saurem Lösungsmittel oder mikrobiologisch durch Bakterien, Pilze etc. Auch gravitative Trennungsmethoden werden angewendet. Tailings enthalten feste Bestandteile und Prozesswasser aus der Erzaufbereitung. Die festen Bestandteile sind feinkörnige Sedimente des gemahlten Erzes und Minerale, welche sich mit der Laugung der Erze bilden. Die typischen Kornfraktionen liegen im Ton- bis Mittelsandbereich (zwischen 0,001 und 0,6 mm). Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Tailings hängen von der Charakteristik der aufbereiteten Erze und des eingesetzten Lösungsmittels ab. Die Tailings werden in Tailings Ponds eingespült. Die Art der Absetzung der Tailings im Speicher hat Einfluss auf die sich dort herausbildenden Bereiche, die sich durch ihre Fraktion, Konsistenz und mineralische Zusammensetzung unterscheiden (Bild 3). Die Höhe der Ablagerung kann erhebliche Dimensionen annehmen (Tabelle 1).

Gefährdungspotenziale und gesetzliche Vorschriften bei der Verwahrung von Tailings Ponds der Uranerzaufbereitung

Hauptgefährdungspotenziale

Es ist von grundlegender Bedeutung die Hauptgefährdungspotenziale zu klassifizieren, die von den

Tabelle 1. Übersicht der bedeutendsten Tailings Ponds der SDAG Wismut (LERSOW, 2006).

Standort	Culmischsch A	Culmischsch B	Trünzig A	Trünzig B	Helmsdorf	Dänkriz I
Oberfläche [ha]	159	76	67	48	205	19
Volumen [Mill. m ³]	61	24	11	6	45	5
Masse Feststoff [Mill. t]	64	27	13	6	49	7
Maximale Ablagerungshöhe [m]	72	63	30	28	48	23
Unat im Feststoff [t]	4800	2200	1500	700	5000	1000
Ra-226 im Feststoff (1014 Bq)	7,9	2,4	1,3	0,5	5,5	0,4
Unat im Porenwasser [mg/l]	0,3 bis 3,9	1,0 bis 16,5	1 bis 19	1 bis 20	2 bis 30	10 bis 85
Ra-226 im Porenwasser [mBq/l]	bis 5 000	bis 2 300	bis 630	N.A.	500 bis 2 000	N.A.

Tailings Ponds der Uranerzaufbereitung ausgehen und die langfristig durch ein geotechnisches Umweltbauwerk beseitigt oder auf zulässige Werte begrenzt werden. Die Hauptgefährdungspotenziale sind:

- ⇨ Dammbrechungsgefahr (Verlust der mechanischen und der hydromechanischen Stabilität),
- ⇨ Austritt von Radioaktivität aus Gamma-Strahlung und Radonexhalation (Bild 3),
- ⇨ Kontamination des Grundwassers,
- ⇨ Staubentwicklung (Arsen, Radium).

Wirtschaftsgeographische Wandkarte

NEUERSCHEINUNG



Gasversorgungsnetze in Deutschland

Bearbeitet von Hubertus Schöneich,

Auflage 2010

Wandkarte 96 x 130 cm, vierfarbig, Maßstab 1: 750 000 Mill., Preis 149,- €, inkl. Aufhängeleiste.

Digitale Wandkarte (CD-ROM), Preis 230,- €.

Die Wandkarte zeigt das aktuelle Leitungsnetz der Bundesrepublik Deutschland mit seinen Anschlüssen an die Nachbarländer. Bei den Leitungsbetreibern wurden die Namen der neuen Netzgesellschaften berücksichtigt, deren Bildung durch das Energiewirtschaftsgesetz bedingt ist. An den Leitungen werden neben dem Betreiber auch der Nenndurchmesser (DN), der Nenndruck (PN) und die Übergabestationen in andere Netze dargestellt. Die namentlich aufgelisteten über 100 Erdgasfelder sowie die Erdölgasvorkommen zeigen die regionalen Schwerpunkte der deutschen Gasförderung. Berücksichtigt sind auch alle Untertage-Gasspeicher, Flüssiggasspeicher, Entschwefelungs- und Gaserzeugungsanlagen. Der topographische Hintergrund der Karte erleichtert die Orientierung.

Faxbestellung + 49 (0) 20 54 / 9 24-149 Telefon + 49 (0) 20 54 / 9 24-123 · E-Mail vertrieb@vge.de · Internet www.vge.de

Anzahl	Bestell-Nummer		Preis
	80 78 00	Gasversorgungsnetze in Deutschland · Wandkarte inkl. Aufhängeleiste	149,- €
	80 79 00	Gasversorgungsnetze in Deutschland · Digitale Version auf CD-ROM	230,- €

Umtausch/Rücksendegarantie: Bitte beachten Sie, dass nur originalverpackte und neuwertige Titel umgetauscht werden können. Wandkarten, CDs und DVDs sind vom Umtausch ausgeschlossen. Auslieferung über Firma Herold. Diese nimmt nur ausreichend frankierte Rücksendungen an.
Alle Preise inkl. MwSt, zuzügl. Versandkosten.

VGE
Verlag GmbH

Montebruchstraße 2 · 45219 Essen
Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24-123
Telefax +49 (0) 20 54 / 9 24-149
E-Mail vertrieb@vge.de
Internet www.vge.de

Relevante gesetzliche Vorschriften

Die Verwahrung bergbaulicher Tailings erfolgt immer auf der Grundlage des Bundesberggesetzes (BBergG) nach einem Abschlussbetriebsplan gemäß BBergG (§ 53). Dieser wird nach § 54 BBergG, unter Benennung der zu beteiligenden Behörden, zugelassen. Tailings Ponds sind keine Deponien im Sinne der Deponieverordnung und auch keine Endlager für künstliche radioaktive Stoffe mit geringer Wärmeentwicklung, obwohl sich die Inventare durchaus vergleichen lassen.

In Deutschland steht das folgende Gesetzestableau zur Verfügung:

- ◊ Bergrechtliche Verfahren:
- Betriebsplanverfahren nach BBergG,

- Bergrechtlicher Zulassungsantrag nach BBergG (§ 54),
- ◊ Strahlenschutzrechtliche Verfahren:
- Der Strahlenschutzrechtliche Genehmigungsantrag für Rückstände aus industriellen oder bergbaulichen Verfahren, die als Materialien in der Anlage XII Teil A der Strahlenschutzverordnung genannt sind, ist nach StrSchV (§97 bis § 102) zu stellen. Für Rückstände der SDAG Wismut ist der Strahlenschutzrechtliche Genehmigungsantrag nach VOAS (DDR-Verordnung über Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz vom 11. Oktober 1984 VOAS (GBI I S. 341) nebst Durchführungsbestimmung DB-VOAS vom 11. Oktober 1984 (GBI I S. 348, bereinigt GBI I 1987 S. 196) beziehungsweise HaldAO (DDR-Anordnung zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bei Halden und industriellen Absetzanlagen und bei der Verwendung darin abgelagerter Materialien vom 17. November 1980 (GBI I S. 347) – der so genannten Haldenanordnung, zu stellen.
- Direktive 96/29 EURATOM,
- ◊ Wasserrechtliche Verfahren:
- Wasserrechtlicher Erlaubnis- beziehungsweise Genehmigungsantrag nach WHG § 7 beziehungsweise § 31,
- beziehungsweise entsprechende Regelungen der Länder, so ThürWG (§ 56).

Tabelle 2. : Umweltforderungen und Strahlenschutzziele in Bezug auf die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK 92) für die Uranerzbergbaugebiete Sachsens und Thüringens.

Empfehlung der deutschen Strahlenschutzkommission: Grundsätze zur Bewertung der Strahlenexposition infolge von Radonemissionen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Uranerzbergbaugebieten Sachsens und Thüringens (SSK 92); Auszug (Abgeleitet vom Dosisrichtwert 1 mSv/a)								
<p>Bei uneingeschränkter Nutzung kontaminierter Bereiche, von Gebäuden und Bergbauhalden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 0,2 Bq/g bei Vorherrschen der U-238 Zerfallsreihe ▶ 300 nSv/h (0,3 µSv/h) Dosisrichtwert der Umgebung 	<p>Trinkwasser:</p> <p>0,5 mSv/a effektive Dosis über den Wasserpfad¹⁾ im allgemeinen Trinkwasser:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Unat: 0,3 mg/l (7 Bq/l total) ▶ ²²⁶Ra: 0,7 Bq/l; (²²⁸Ra 0,7 Bq/l) ▶ ²¹⁰Pb: 0,7 Bq/l; ²¹⁰Po: 0,7 Bq/l ▶ Bei Anwendung der Summenformel $\sum_i (R_i/C_i) \leq 1^2)$ 							
<p>Eingeschränkte Landnutzung (Forst, Grasland):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 0,2 bis 1 Bq/g bei Vorherrschen der U-238 ▶ Zerfallsreihe und Dosisrichtwert, siehe oben 	<p>¹⁾ siehe auch ICRP Publikation 82, § 38 Quellenbezogener Dosisrichtwert: „Bei der Nutzung mehrerer kontaminierter Flächen im Einzugsbereich eines Grundwasserhorizontes sollte durch eine langfristige Nutzung des Grundwassers im Abstrom als Trinkwasser eine Jahresdosis von 0,5 mSv/a nicht überschritten werden.“</p> <p>²⁾ Bei mehreren Radionukliden soll die Summe der Verhältniszahlen R_i/C_i aus freizugebender spezifischer Aktivität (C_i) und dem jeweiligen Freigabewert (R_i) der einzelnen Radionuklide den Wert 1 nicht überschreiten.</p>							
<p>Typische WISMUT-Dosen-Exposition durch lokale Verunreinigung: Wasserpfad (Vorfluter Lerchenbach“, lokal kontaminiert durch die Tailings ponds Trünzig A und B“)</p> <p>Nuklidvektor (Resultate von Messreihen, Konzentration in [Bq/l])</p>								
²³⁸ U	²³⁴ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³⁵ U	²³¹ Pa	²²⁷ Ac
5,2	6,1	0,17	0,02	0,025	0,024	0,24	0,015	0,015

Tabelle 3. Radioaktivität der Tailings Ponds im Sanierungsprojekt Wismut (Radioaktivität im Porenwasser ignoriert).

Standort	Cul-mitzsch A	Cul-mitzsch B	Trünzig A	Trünzig B	Helmsdorf	Dänkriz I
Ra-226 im FS [TBq]	790	240	130	50	550	40
Unat im FS [t]	4,800	2,200	1,500	700	5,000	1,000
U-234 [Bq/mg U _{nat}]	rund 12,35 (Halbwertszeit T _{1/2} = 2,455 · 10 ⁵ a; α-Strahler 100%; Zerfallsprodukt ²³⁰ Th)					
U-235 [Bq/mg U _{nat}]	rund 0,57 (Halbwertszeit T _{1/2} = 7,038 · 10 ⁸ a; α-Strahler 100%; Zerfallsprodukt ²³¹ Th)					
U-238 [Bq/mg U _{nat}]	rund 12,43 (Halbwertszeit T _{1/2} = 4,468 · 10 ⁹ a; α-Strahler 100%; Zerfallsprodukt ²³⁴ Th)					
Unat im FS [TBq]	122	56	38	18	127	25
Σ [TBq]	912	296	168	68	677	65

Weiterhin sind das Atomgesetz (AtG) unter anderem § 2, das Chemikaliengesetz unter anderem § 19 sowie das Bodenschutzgesetz zu beachten.

AtG § 2 enthält folgende Begriffsbestimmung: „Radioaktive Stoffe (Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe) im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe, die ein Radionuklid oder mehrere Radionuklide enthalten und deren Aktivität oder spezifische Aktivität im Zusammenhang mit der Kernenergie oder dem Strahlenschutz nach den Regelungen dieses Gesetzes oder einer auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnung nicht außer Acht gelassen werden kann“.

Vergleich mit Endlagern für radioaktive Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung

Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der Umweltforderungen und Strahlenschutzziele der deutschen Strahlenschutzkommission zur Bewertung der Strahlenexposition infolge von Radonemissionen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Uranerzbergbaugebieten Sachsens und Thüringens und typische in Wismut gemessene Strahlendosen. Tabelle 3 ergänzt die Angaben zum radioaktiven Inventar der Tailings Ponds der Wismut GmbH in Tabelle 1. In Tabelle 3 sind die Anteile des radioaktiven Isotops ²²⁶Ra und von Unat im Feststoff der Tailings aufgeführt. Unat setzt sich aus Isotopen des Urans wie folgt zusammen: ²³⁸U = 99,2836 %, ²³⁵U = 0,711 %, ²³⁴U = 0,0054 %. In der Gesamtaktivität des jeweiligen Tailings Ponds gemäß Tabelle 3 ist unter

anderem die Radioaktivität des Porenwassers nicht enthalten.

Zum Vergleich werden Daten aus dem Salzbergwerk Asse II in Niedersachsen herangezogen: Zum Stichtag 01.01.1980 betrug die Gesamtradioaktivität aus den rund 126 000 Fässern radioaktiver Abfälle (Low-Level Radioactive Waste, L-LRW), die in dem aufgelassenen Salzbergwerk Asse II in Kammern auf verschiedenen Sohlen abgelegt wurden, 0,211 MCi=7.807 TBq. Die Menge des radioaktiven Isotops ^{226}Ra wurde zum Stichtag 01.01.1980 mit 5,515 g (0,202806 TBq) angegeben. Zum Stichtag 01.01.2002 wurde die Gesamtaktivität mit 3.100 TBq und die Aktivität der Menge ^{226}Ra mit 0,200786 TBq ermittelt. Die Halbwertszeit von ^{226}Ra beträgt 1602 Jahre. In Tabelle 4 ist ein Auszug des Nuklidvektors des Inventars von ASSE II aufgeführt.

Darin liefert das radioaktive Isotop ^{241}Pu den Hauptanteil zur Radioaktivität des Inventars. Es hat allerdings nur eine Halbwertszeit von 14 Jahren. Aus den obenstehenden Daten kann für die Gesamtaktivität eine Halbwertszeit von 16,51 Jahren ermittelt werden. Damit wird deutlich, dass die langlebigen radioaktiven Nuklide des Inventars nur einen Anteil von $\ll 1000$ TBq der Gesamtaktivität halten (GERSTMANN, 2003).

Aus den Vergleichsdaten kann entnommen werden, dass sich Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung und Endlager für radioaktive Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung hinsichtlich des abgelagerten und späterhin langfristig sicher zu verwahrenden Inventars durchaus vergleichen lassen. Natürlich wird auch deutlich, dass die Nuklidvektoren des Inventars der Tailings Ponds und des Inventars der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die in dafür vorbereitete Endlager in tiefen geologischen Schichten abgelagert werden, unterschiedlich sind. Unterschiede gibt es auch in der Mobilität der Radionuklide. Die Mobilität der Radionuklide des Inventars der Tailings Ponds ist wesentlich höher als die in Endlagern für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. In Tabelle 5 sind die wesentlichen Teilaufgaben zur Endlagerung beziehungsweise Langzeitverwahrung gegenübergestellt, wobei der Transport sowohl der Gebinde als auch der Tailings darin nicht berücksichtigt wurde.

Planung der Verwahrung und Sanierung

Allgemeines

Allgemein kann festgehalten werden, dass die für die langzeitsichere Verwahrung von Tailings Ponds zu errichtenden Teile des geotechnischen Umweltbauwerks in ihrer Einzelfunktion und in der Gesamtfunktion jeweils Schutzfunktionen für den Boden-, den Wasser- und den Luftpfad (pathway of minerals, water path, air path) zu erfüllen haben. Dazu wird ein Mehrbarrierensystem errichtet,

das aus den drei Hauptbarrieren Dammbauwerk, Abdeckung und Basisabdichtung besteht.

In Deutschland gab es Anfang der 1990er-Jahre keine Erfahrungen zur Verwahrung von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung. Als im Jahr 1991 auf der Grundlage des Wismut-Gesetzes mit den Sanierungsarbeiten der enormen Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus in Sachsen und Thüringen begonnen wurde, konnten diese Arbeiten nur auf Grundlage zugelassener Abschlussbetriebspläne nach BbergG erfolgen. Dieses schreibt ein Planfeststellungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfungen für die Verwahrung der Tailings Ponds vor. Zur Gesetzeslage, nach der die Sanierung zu erfolgen hat, bestand ebenfalls erheblicher Klärungsbedarf. Sinnvoller Weise haben HaldAO und VOAS mit dem Einigungsvertrag ihre Gültigkeit behalten.

In Deutschland musste vorrangig auf internationale Erfahrungen zurückgegriffen werden. Ein Umstand kam hier allerdings erleichternd entgegen. In den USA wurden in den 1980er- und 1990er-Jahren wegen des rapiden Uranpreisverfalls auch eine große Anzahl von Urangewinnungs- und -aufbereitungsstandorte aufgegeben, die ebenfalls verwahrt werden mussten (LERSOW/MÄRTEN, 2008). Da mit der Aufgabe in vielen Fällen auch die bergbautreibenden Unternehmen verschwanden, sah sich die amerikanische Regierung gezwungen, für die sichere und langzeitstabile Verwahrung das UMTRA-Programm (US Uranium Mill Tailings Remediation Action Program) zu starten. Neben der Bereitstellung finanzieller Mittel wurden im UMTRA-Programm erhebliche, verallgemeinerbare Erkenntnisse zur sicheren, langzeitstabilen Verwahrung von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung gewonnen, die in das Sanierungs-

ASSE II Radioaktive Nuklide	Radioaktivität Stichtag 01.01.2002
Ra-226	0,200
Th-232	0,350
Σ (U-235, -236, -238)	1,365
Pu-239	19,000
*Pu-241	1 100,000
Σ (TBq)	1 120,915

Tabelle 4. Auszug aus dem Radionuklidvektor von ASSE II (GERSTMANN, 2003).

Tabelle 5. Gegenüberstellung der Aufgaben zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und zur Langzeitspeicherung von Tailings aus der Uranerzaufbereitung.

Teilaufgabe	Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	Speicherung von Tailings aus der Uranerzaufbereitung
1	Annahme der L-LRW-Einlagerung der Gebinde (Gebindeherstellung)	eventuell Vorbehandlung (paste) und Absetzen (discharge) der Tailings im Rückstandsspeicher
2	Verschließen des Endlagers mit Verschlussbauwerk (Langzeitstandsicherheit auf 1 Mill. Jahre prognostiziert)	Verwahrung, Sicherung und Abdeckung der Tailing Ponds (Langzeitstandsicherheit auf 1 000 Jahre prognostiziert)

konzept der Wismut GmbH einfließen (unter anderem WELS et al., 2000). In den bedeutenden bergbautreibenden Ländern existieren inzwischen Richtlinien und Vorschriften für den Entwurf, Bau, Betrieb, die Verwahrung, Nachsorge und das Langzeitmonitoring. Alle Phasen des Lebenszyklus übertägiger Speicheranlagen für Uranerzaufbereitungsrückstände werden so aufeinander abgestimmt. Die Verwahrungsplanung ist damit integraler Bestandteil der Planung von Tailings Ponds für Rückstände aus der Erzaufbereitung. Die weiteren Ausführungen des Beitrags konzentrieren sich auf geotechnische Sachverhalte.

Primäre und sekundäre Anforderungen an das geotechnische Umweltbauwerk

Es bestehen folgende primäre Anforderungen an das geotechnische Umweltbauwerk:

- ☐ Beseitigung der Gefährdungspotenziale:
 - radiologische Risiken (Luft, Wasser, Boden),
 - geotechnische/konventionelle Risiken,
 - Belastung des Grund- und Oberflächenwassers,
- ☐ Minimierung der mit den Tailings Ponds potenziell verbundenen stofflichen Risiken durch:
 - Verringerung der Freisetzungs- und Ausbreitungsraten (Abdeckung, Einkapselung),
 - Behandlung freigesetzter Schadstoffe (Wasserbehandlung).

Außerdem bestehen folgende sekundäre Anforderungen an das geotechnische Umweltbauwerk:

- ☐ Einpassung in die Umgebung,
- ☐ Ausreichende Verfügbarkeit anforderungsgerechter Materials zur Errichtung,
- ☐ Sozio-ökologische Akzeptanz.

Die Anforderungen sind standortunabhängig und weltweit gültig.

Standortspezifisches Sanierungskonzept und seine Ziele

Die standortspezifische Lösung muss allen genannten Anforderungen gerecht werden. Die Planungsergebnisse werden für den jeweiligen Tailings Pond in einem so genannten Standortsanierungskonzept (Abschlussbetriebsplan) zusammengefasst, das zugelassen werden muss. Das Standortsanierungskonzept enthält auch die Restriktionen, die bei einer möglichen Nachnutzung der sanierten Areale einzuhalten sind. Möglicherweise ist eine Nachnutzung zu untersagen. Erfolgskontrolle, Monitoring und Dokumentation (Abschlussdokumentation) sind Vorgaben, die die Zuverlässigkeit des Verwahrungsbauwerks und die Gewährleistung der Schutzfunktionen über dessen Standzeit garantieren sowie die möglicherweise notwendig werdenden Nachsorgeleistungen rechtzeitig anzeigen sollen. Die Ziele der standortspezifischen Lösung sind:

- ☐ Langzeitstabile Verwahrung radioaktiver und toxischer Rückstände:
 - geomechanisch/geohydraulisch langzeitstabil,
 - geochemisch langzeitstabil unter Beachtung der Wechselwirkungen geochemisch-geomechanisch etc.,
 - landschaftskompatibel,
- ☐ Reduzierung der:
 - ausgehenden radioaktiven Strahlung,
 - Radonexhalation,
 - Infiltrierung von Oberflächenwasser, Sicherung gegen Starkniederschläge (storm water),
- ☐ Vermeidung der:
 - Verbreitung von Radioaktivität über Staubbildung,
 - Sauerstoffdiffusion, um die Aciditätsbildung zu beschränken,
- ☐ Schutz des Grundwassers und der Vorfluter,
- ☐ Restriktionen für die Nachnutzung.

Zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzungen hat sich das Standortsanierungskonzept (CSM) an den standort-spezifischen Faktoren (Bedingungen) zu orientieren. Diese sind unter anderem:

- ☐ Klimatische Bedingungen am Standort,
- ☐ Geomechanische (geohydraulische)/geochemische Verhältnisse und Umweltrisiken am Ablagerungsstandort,
- ☐ Ausreichende Verfügbarkeit anforderungsgerechter Materials (sowohl gewachsenes wie auch geeignetes Bergematerial),
- ☐ Umsetzungsmöglichkeiten einer geeigneten Verwahrungsstrategie,
- ☐ Sozio-ökologische Akzeptanz,
- ☐ Kosten.

Die Hauptbestandteile des geotechnischen Umweltbauwerks sind:

- ☐ Dammbauwerk,

Tabelle 6. Arbeitsschritte zur Verwahrung von Tailings Ponds.

Arbeitsschritt	Arbeit
1	Abpumpen des Frei- und Porenwassers sowie Dekontamination in einer Aufbereitungsanlage, wodurch infolge der Entwässerung und Austrocknung die Scherfestigkeit im Bereich der Feinschlamm-tailings (fine grain tailings) ansteigt
2	Schaffung einer Arbeitsplattform bestehend aus verschiedenen Lagen Geokunststoffen, Einbringen von Vertikaldräns im vorgegebenen Raster zur weiteren Entwässerung der Tailings, lagenweiser Auftrag einer Zwischenabdeckung zur Verhinderung der Staubausbreitung und zur Konsolidierung der überdeckten Tailings, Konturierung und Profilierung des Dammbauwerks (Langzeitstandsicherheit), Stützanschüttung, Erstellung einer stabilen Oberflächenkontur zur Ableitung des Oberflächenwassers und Sicherung gegen Erosion, Auffangen des Oberflächenwassers, Endabdeckung
3	Konturierung und Profilierung des Dammbauwerks (Langzeitstandsicherheit), Stützanschüttung, Erstellung einer stabilen Oberflächenkontur zur Ableitung des Oberflächenwassers und Sicherung gegen Erosion, Auffangen des Oberflächenwassers, Endabdeckung
4	Konturierung, Profilierung einer stabilen Oberfläche, Vorsehen von Möglichkeiten des Fangens und der Ableitung von Oberflächenwasser
5	Abdeckung (Einkapselung) der Tailings, Endabdeckung, Verhinderung der Radonexhalation (Radondiffusion), der γ -Strahlung, der Infiltration (Sauerstoffdiffusion) und des Schadstoffaustrags aus dem Tailingkörper
6	Revegetation, Begrünung, Erstbepflanzung mit Verwendung regionaltypischer, umgebungskompatibler Pflanzen
7	Fassung der Oberflächen- und Sickerwässer, Aufbereitung, Abgabe an die Vorflut, Langzeitmonitoring, Monitoring über die Standzeit des geotechnischen Umweltbauwerks

- ⊞ Abdeckung (Einkapselung),
- ⊞ Wasserfassung und Wasseraufbereitung sowie Überleitung der gereinigten Wasser (innerhalb der Freigrenze) in die Vorflut,
- ⊞ Begrünung und Vegetation,
- ⊞ Monitoringssystem.

Das für die Verwertung von Tailings Ponds aus der Uranerzaufbereitung vorzulegende Standortsanierungskonzept (Abschlussbetriebsplan) ist kein statisches Konzept und sollte eine Anzahl von festgelegten Schnittstellen besitzen, an denen das Konzept am Sanierungsfortschritt nachjustiert werden kann.

Ausführung der Verwertung von Tailings Ponds

Ausführungsvarianten und Arbeitsschritte

Zur Ausführung der Verwertung von Tailings Ponds sind die in Tabelle 6 genannten Arbeitsschritte erforderlich.

Der zweite Arbeitsschritt zur Schaffung einer Arbeitsplattform wird im Bild 4 verdeutlicht. Nach Aufbringen verschiedener Lagen Geokunststoffe im Bereich der Feinschlamm-tailings können Vertikaldräns eingebracht werden. Deren Länge beträgt im Regelfall 5 m, bei Tiefendränage aber auch bis zu 20 m und mehr. Durch den Porenwasserdruckabbau wird den Tailings Porenwasser entzogen, und die Scherfestigkeit der Feinschlamm-tailings nimmt dadurch zu. Spektakuläre Porenwasserfontänen, wie bei der Sprengverdichtung, werden aber nicht beobachtet (Bild 5). Mit der Zwischenabdeckung und der damit verbundenen Auflast wird der Konsolidierungsprozess beschleunigt. Zur Konsolidierungsbeschleunigung kann bereits vor Entfernung des Freiwassers wie beim Sohlausbau eine Vorschüttung von einer Klappschute aus vorgenommen werden (subaquatische Auflast). Die Zwischenabdeckung kann mehrere Meter mächtig sein. Dabei übernimmt sie in einer multifunktionalen Abdeckung auch Strahlenschutz- und Emissionsschutzfunktion.

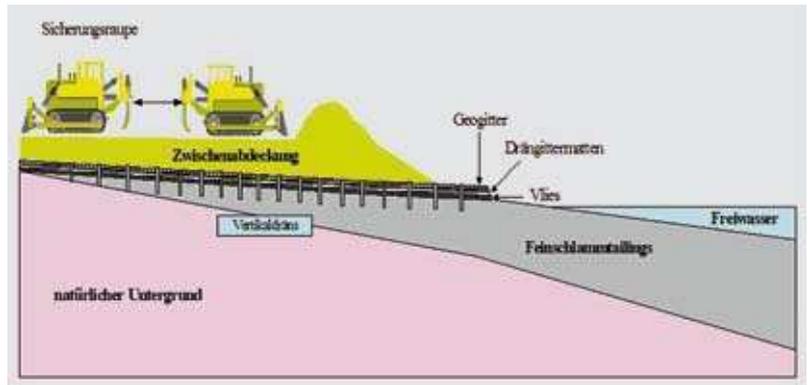


Bild 4. Schaffung einer Arbeitsplattform durch stabilisierende Konstruktion aus verschiedenen geosynthetischen Elementen, eine Zwischenabdeckung und Teilentwässerung der Tailings durch Vertikaldräns (LERSOW, 2006).



Bild 5. Porenwasserfontänen nach Entlastung, oben Sprengverdichtung Kippenareal in der Lausitz, unten links teilweise gefülltes Tagebaurestloch, unten rechts Vertikaldräns in Feinschlamm-tailings (Quelle: LERSOW).



Bild 6. Abdeckungen von Tailings Ponds aus dem Uranbergbau, links Tailings Ponds Trünzig der Wismut GmbH trockener in situ-Verwertung (Quelle: LERSOW, Wismut GmbH, 2007); rechts mit Klarwasserlamelle abgedeckte Tailings Ponds Rio Algom Quirke site Elliot Lake/OntarioCanada (BHP Billiton, 2004).

Zur Abdeckung der Tailings im Arbeitsschritt 4 werden zwei geeignete Methoden näher dargestellt (Bild 6):

- ◇ Abdeckung mit Klarwasserlamelle: Diese Methode hat sich als besonders geeignete Methode unter den klimatischen und geographischen, geomorphologischen Bedingungen Kanadas (continental climate zone) erwiesen. Sie stellt besondere Anforderungen an das Dammbauwerk.
- ◇ Trockene in situ-Verwahrung: Die vorrangig in Kanada und den USA in den 1990er-Jahren entwickelte trockene in situ-Verwahrung mit partieller Entwässerung hat sich besonders für zentraleuropäische Bedingungen als geeignet erwiesen und kommt bei der Verwahrung der Tailings Ponds der SDAG Wismut zur Anwendung. Hauptgründe für die Auswahl dieser Methode sind:
 - ▶ Standortspezifische, nachhaltige, langzeitstabile Verwahrungslösungen,
 - ▶ Unter den Bedingungen (Klima, Besiedelungsdichte etc.) Zentraleuropas am geeignetesten, wobei beispielsweise auch in großen Teilen der USA und Nordkanadas vergleichbare Bedingungen vorliegen,
 - ▶ Langzeitkosten und mit der Verwahrung verbundene Risiken im Vergleich zu anderen Technologien am geringsten eingeschätzt, wobei der Nachweis noch erbracht werden muss.

- Als Vorteile können herausgestellt werden:
- ◇ Geringe Umweltbelastungen (radioaktives und toxisches Material verbleibt am Ort),
 - ◇ Geringstes Restrisiko über die Standzeit des geotechnischen Umweltbauwerks.
- Das Dammbauwerk wird mit dem Bau des Rückstandsspeichers errichtet. Oftmals werden für die Ablagerung von Rückständen aus der Uranerzaufbereitung aufgelassene Tagebaurestlöcher mit einer natürlichen Tonbarriere (dient als Basisabdichtung) als Rückstandsspeicher ausgebaut. Mit der Verwahrung der Tailings Ponds wird das Dammbauwerk durch folgende Teilleistungen langzeitstandsicher saniert: Profilierung, Stabilisierung (Stützanschüttung), Errichtung von Wasserfanganlagen, Abdeckung, Begrünung und Bepflanzung. Da die trockene in situ-Verwahrung mit partieller Entwässerung der Tailings mehrere Funktionen zu erfüllen hat, werden multifunktionale Abdeckungen (multi-functional cover layer systems) für den jeweiligen Standort entworfen.

Ausführungsbeispiele für trockene in situ-Verwahrung

Beispiel 1 3-Barrierensystem der Wismut GmbH

Um die Stabilität und Funktionalität der Abdeckung einer trockenen in situ-Verwahrung der Tailings aus der Uranerzaufbereitung über die definierte Standzeit zu garantieren, ist beim Aufbau der multifunktionalen Abdeckung die Abstimmung der einzelnen Lagen der Abdeckung aufeinander entscheidend. Im UMTRA-Programm wurden mehrere Standardabdeckungen entwickelt, die letztendlich in jedem Einzelfall für jedes Standortmodell von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) unterstützt wurden.

Die von der Wismut GmbH zum Einsatz gebrachte multifunktionale Abdeckung ist ein 3-Barrierensystem aus einer Radonbarriere, einer Kapillarsperre (Suffusions- beziehungsweise Diffusionsbarriere) und einer Vegetationsschicht. Die Summe der Mächtigkeiten der Einzelschichten des Regelquerschnitts (Bild 7) ist deutlich höher als bei anderen vergleichbaren multifunktionalen Abdeckungen von Uranaufbereitungsrückständen. Die Barrierewirkung einer trockenen in situ-Verwahrung wird auch, allerdings nicht ausschließlich, durch die Summe der Mächtigkeiten der Einzelschichten bestimmt und Langzeitstabilität unterstellt. Eine Besonderheit bei dem von der Wismut GmbH zum Einsatz gebrachten Regelquerschnitt ist, dass hauptsächlich natürliches, mineralisches Material eingesetzt wird.

Einer Verallgemeinerung hält dieser Regelquerschnitt jedoch nicht stand. Diese Feststellung ist sowohl für die Arbeit des Arbeitskreises 5.5 „Tailings“ der DGGT als auch für einen möglichen Know-how-Transfer und dessen Einbindung in die Entwicklung standortspezifischer Lösungen von Bedeutung. Der gewählte Schichtenaufbau

Bild 7. Regelquerschnitt der multifunktionalen Abdeckung der Wismut GmbH, (Quelle: LERSOW).

Schichtdicke h_i in m	Material/Funktion	Permeabilität k_i in ms^{-1}
0,5	Rekultivierungs-/Speicherschicht	(10^{-9})
1,0	Speicherschicht	(10^{-9})
0,3	Suffusionsbarriere (Sand)	(10^{-5})
0,5	Drainageschicht (Kies)	(10^{-3})
0,5	Dichtungsschicht (Lehm/Ton)	$(10^{-9}-10^{-10})$
Mehrere Meter Zwischenabdeckung [Culmitzsch Becken B: 1,5 m mineralisch, subaquatische Auflast in Schichten von 15 cm, Auflastschüttungen) zuzüglich geosynthetische Konstruktion (Vlies, Drängittermatten, Geogrid, Vertikaldrains)], siehe Wismut 14.08.2006	Zwischenabdeckung (Stabilisierung/Auflast)	$(10^{-5}-10^{-6})$
Bis zu 72	Tailings	$(10^{-6}-10^{-9})$

in Verbindung mit den vorliegenden Schichtenmächtigkeiten lässt allerdings erwarten, dass die radiologischen und toxikologischen Risiken über die Standzeit der geotechnischen Umweltbauwerke mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aufgehoben sind. Die Barrieren gegen Infiltration, Diffusion, radioaktive Strahlung und Emission etc. sind sehr hoch angesetzt (KÜPPERS et al., 2007; BMU, 2004).

Beispiel 2 Multifunktionale Abdeckung nach den Anforderungen der Umweltschutzbehörde der USA

Die Umweltschutzbehörde der USA (US EPA-Environmental Protection Agency, 1991) hat für eine multifunktionale Abdeckung für Rückstände aus der Uranerzaufbereitung die folgenden allgemeinen Grundanforderungen formuliert (Bild 8):

- ⊞ Schicht niedriger hydraulischer Permeabilität: Tonbarriere mit Kunststoffdichtungsbahn (geomembrane liner) als Barrierschutz,
- ⊞ 60 cm dicke Schicht aus hochverdichtetem natürlichen schluffigen oder mit Betonit verbessertem Ton mit einer hydraulischen Permeabilität von $< 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$, die mit einer $\geq 0,5 \text{ mm}$ starken Kunststoffdichtungsbahn abgedeckt wird (siehe Beispiel 3). Die Kunststoffdichtungsbahn dient als Erosions-, Frost- und Infiltrationsschutz für die Tonbarriere (Geosynthetic barrier protection liner).
- ⊞ Dränageschicht: Lockergesteinsschicht $\geq 30 \text{ cm}$ mit einer hydraulischen Permeabilität von 10^{-4} ms^{-1} und einer geosynthetischen Trennschicht mit gleicher Charakteristik.
- ⊞ Revegetationsschicht: $\geq 60 \text{ cm}$ Oberbodenschicht (Oberboden, Speicherschicht), profiliert mit einer Neigung von 3 bis 5 %.

Diese Minimalforderungen sind integraler Bestandteil des Barrierekonzepts. Sie werden ergänzt durch optionale geosynthetische Schichten. Damit kann beispielsweise eine stabile Infiltrationsbarriere ausgebaut werden. Bei konkreten Verwah-

rungsprojekten, beispielsweise in den UMTRA-Programmen, obliegt es immer dem Auftraggeber (Bergwerkseigentümer) eine standortspezifische, multifunktionale Abdeckung in einem Standortsanierungskonzept zu entwerfen und den zuständigen Behörden zur Zulassung vorzulegen. Die allgemeinen Grundanforderungen können dabei immer nur Orientierung sein.

Beispiel 3 Monticelloprojekt in USA aus UMTRA-Programm

In Monticello/Utah/USA (südlich von Moab) wurden in den Jahren von 1942 bis 1960 etwa 1 Mill. t Uran- und Vanadiumerze gewonnen und aufbereitet. Etwa 150 000 m³ Aufbereitungsrückstände wurden in Rückstandsspeichern abgelegt, die eine Fläche von etwa 32 ha einnahmen. Der aufgegebene Standort wurde in das UMTRA-Programm aufgenommen und saniert. Die sanierte Fläche der Rückstandsspeicher dieses Projekts umfasst etwa 36 ha. Die Sanierung wurde im Juni 1999 abgeschlossen. Die Fläche ist langzeitstabil und mit einem installierten Langzeitmonitoringsystem übergeben worden. Die nunmehr permanente Erfolgskontrolle des Monticello-Projekts, insbesondere der Strahlenexposition, macht es durchaus zu einem Modell für andere Standorte (IAEA, 2004). Die Sanierung erfolgte mit der trockenen in situ-Verwahrung mit partieller Entwässerung. Es wurde die im Bild 9 dargestellte multifunktionale Abdeckung der Tailings gewählt und von den Aufsichtsbehörden zugelassen. Es handelt sich um ein System mit vier Barrieren, Radonbarriere, Kapillarbarriere, Biotic-Barriere und Vegetationsschicht. Die bisher vorliegenden Kontrollergebnisse liegen innerhalb der zugelassenen Grenzwerte. Die Unterschiede zur Regelabdeckung der Wismut GmbH sind evident. Die Anforderungen an die standortspezifische multifunktionale Abdeckung und das eingesetzte Material (natürliches und synthetisches Material) sind aber gleich, nämlich:

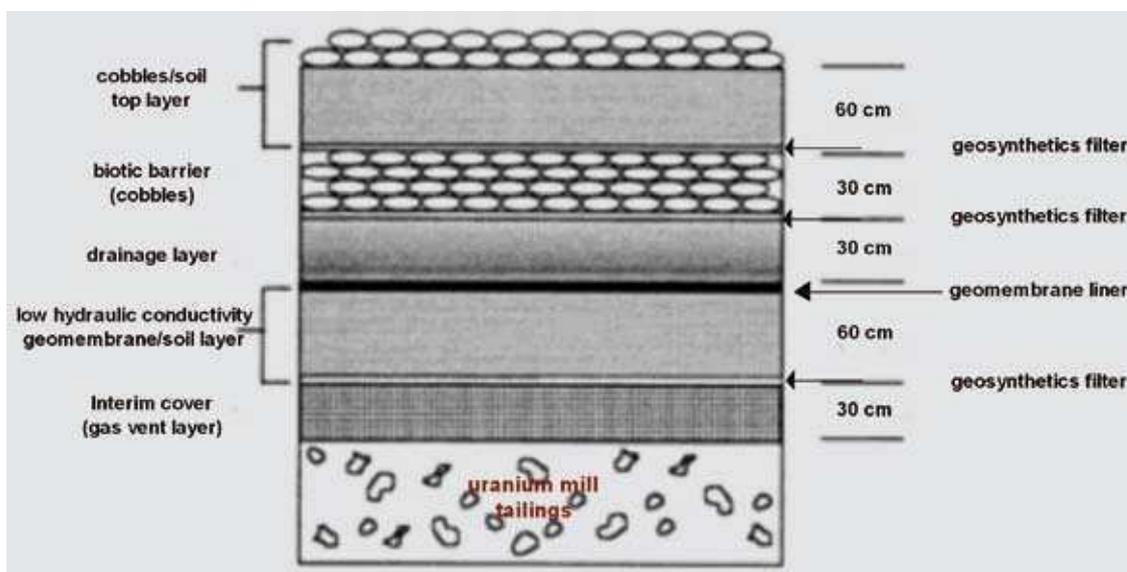


Bild 8. Allgemeine Grundanforderungen (US EPA) an eine multifunktionale Abdeckung mit optionalen Schichten (EPA recommended cover system with optional layers) (US EPA, 1991).

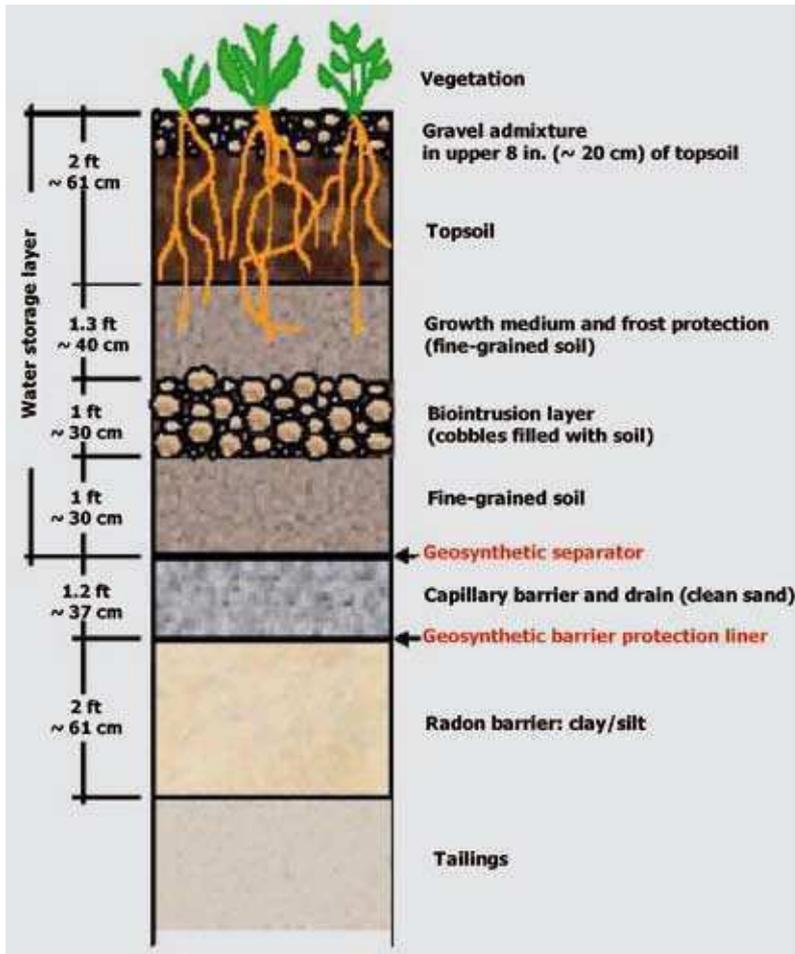


Bild 9. Multifunktionale Abdeckung im UMTRA-Projekt Monticello/Utah/USA (IAEA, 2004).

- ◊ Notwendige Begrenzung der Mobilität der acidischen, kontaminierten Wässer und der radioaktiven Nuklide und die Radonbarriere,
- ◊ Begrünung und Erstbepflanzung,
- ◊ Geomechanische/geochemische Stabilität,
- ◊ Weitestgehende Vermeidung von Nachsorgeleistungen am geotechnischen Umweltbauwerk, Gewährleistung der Stabilität und der Funktionalität über die Standzeit des geotechnischen Umweltbauwerks.

Der sechste Arbeitsschritt der Revegetation, Begrünung, Erstbepflanzung des geotechnischen Umweltbauwerks ist ein wesentlicher Bestandteil des Verwahrungskonzepts, insbesondere für die multifunktionale Abdeckung der Tailings und des Dammbauwerks. Die Vegetationsschicht (vegetation cover) verhindert die äußere Erosion, trägt zur Stabilität des Bauwerks bei, verhindert die Verbreitung von radioaktiven und toxischen Kontaminanten, insbesondere über die Staubentwicklung, reduziert die Infiltration von Oberflächenwässern, ist praktisch ein Frühwarnsystem für sich anzeigende Rutschungen und passt das geotechnische Umweltbauwerk in die Umgebung ein. Die Revegetation hat aber auch eine ästhetische Funktion (RITCEY, 1989). Von der Verwendung regionaler Pflanzen sollte nur im begründeten Ausnahmefall abgewichen werden. An mehreren Beispielen kann nachgewiesen werden, dass in Fällen, bei denen von diesem Prinzip abgewichen

wurde, der Erfolg der Revegetation und damit für das gesamte Verwahrungskonzept ausblieb. Dies kann dann nur über eine Aufarbeitung der Abdeckung und durch eine Neubepflanzung beseitigt werden. Die finanziellen Aufwendungen dafür sind erheblich (WAGGITT, 2008). Die Vegetationsschicht wird die Standsicherheit über die Standzeit des geotechnischen Umweltbauwerks wesentlich erhöhen. Die festigende Wirkung der Pflanzen liegt nach (TOBIAS, 2003) in der Erhöhung der Scherfestigkeit. Dabei spielt die Erhöhung der Saugspannung durch den Wasserentzug die wichtigste Rolle, wodurch in erster Linie die Häufigkeit der Wassersättigung des Bodens vermindert wird. In zweiter Linie erhöht die Vegetation die Scherfestigkeit des Bodens durch die armierende Wirkung der Wurzeln. Diese Wirkungsweise kommt erst bei gesättigtem Boden zum Tragen, also wenn aus bodenmechanischer Sicht der schlimmste Fall eingetreten ist. Die armierende Wirkung der Wurzeln verleiht dem Boden nach TOBIAS (1991) auch eine erheblich höhere Zugfestigkeit als die eines Bodens ohne Wurzeln. Diese Effekte der Revegetation lassen sich aber nur schwer quantifizieren und setzen große und langwierige Versuchsreihen (Probefelder) voraus. Bei der Auswahl der Pflanzen ist deren Wurzeltiefe im Verhältnis zur Dicke der aufgetragenen Vegetationsschicht zu beachten, damit die Bildung von Radonwegsamkeiten über die Durchwurzelung ausgeschlossen wird.

Beispiel 4 Shangrao-Projekt in Südchina

Mit dem Beispiel des Shangrao-Projekts in Südchina (Provinz Jiangxi) soll besonders auf die Möglichkeit der Einbeziehung der Vegetationsschicht in die Erfolgskontrolle der multifunktionalen Abdeckung hingewiesen werden. Aus der Fallstudie zur Verwahrung des Shangrao-Projekts/Südchina (IAEA, 2008) sind Hinweise auf die Wirksamkeit einer multifunktionalen Abdeckung und deren Barrierewirkung gegen die Ausbreitung von Radionukliden bekannt geworden. Beim Shangrao-Projekt wurde die im Bild 10 dargestellte multifunktionale Abdeckung eingesetzt. In einem Probefeld wurde ihre Barrierewirkung gegen die Ausbreitung von Radionukliden aus dem Inventar des Tailingskörpers in die Vegetationsschicht und in die Wurzeln und Blätter von Gräsern untersucht und der Nuklidvektor aufgezeichnet (Tabelle 7 und Bild 11). Für bergbaulich in Anspruch genommene Flächen, die nach der Sanierung uneingeschränkt genutzt werden können, schreibt die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) vor, dass die mittlere spezifische Aktivität eines Radionuklids in der Abdeckung den Wert von 0,2 Bq/g nicht überschreitet. Bei mehreren Radionukliden in der Abdeckung soll die Summe der Verhältniszahlen den Wert 1 nicht überschreiten: $\sum_i (R_i/C_i) \leq 1$. Für die Wismut GmbH sind aufgrund der Größe der Flächen standortspezifische Untersuchungen angeordnet.

Weitere Untersuchungen zu diesem Gegenstand liegen vor. So bestätigt DIEHL (2006), dass der Grenzwert der Radon-222-Emissionsrate der U.S. EPA von 20 picocuries per square meter per second ($20 \text{ pCi m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 0,74 \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) von den Abdeckungen der UMTRA-Programme garantiert wird (siehe auch ROBINSON, 2004). Für Flächen aus dem Uranerzbergbau hat die deutsche SSK empfohlen, durch Abdeckung eine Begrenzung der Ortsdosisleistung auf $\leq 0,3 \mu\text{S/h}$ zu erreichen, mit der Einschränkung, standortspezifische Untersuchungen vorzunehmen, wenn das deponierte Volumen beispielsweise 10^5 m^3 überschreitet. Die Wismut GmbH weist Flächen als unbedenklich aus, wenn die Ortsdosisleistung nachweislich dauerhaft kleiner als $0,15 \mu\text{S/h}$ ist.

Nachweise zur Langzeitsicherheit

Allgemeines

Eine allgemeine Vorschrift, wie die Nachweise zur Langzeitsicherheit für ein geotechnisches Bauwerk zur langzeitstabilen Verwahrung von Tailings Ponds zu erbringen sind, liegt derzeit nicht vor. Das hier beschriebene Vorgehen kann deshalb auch keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben. Dennoch kann es beanspruchen, auf der Analyse einer Reihe zugelassener und umgesetzter nationaler sowie internationaler Langzeitsicherheitsnachweise für derart komplexe geotechnische Umweltbauwerke zu beruhen. Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf zur Entwicklung eines Verfahrensschemas zur Erbringung der Nachweise. Die Versagensfälle, insbesondere in Kolontar und Nachterstedt in jüngster Zeit, haben dies auf tragische Weise belegt. Die Nachweise müssen umfassen:

- ⇨ Eine Prognose über das Langzeitverhalten des geotechnischen Umweltbauwerks und die dafür notwendigen Zustandsgrößen,
- ⇨ Ein begleitendes Langzeitmonitoring, das die Prognose über das Langzeitverhalten des geotechnischen Umweltbauwerks ständig verbessern und eine Einschätzung ermöglichen soll, wie das Langzeitmonitoring den Erfordernissen anzupassen ist und ob Nachsorgemaßnahmen notwendig sind.

Dazu sind folgende Punkte zu behandeln:

- ⇨ Auswahl der Berechnungsverfahren und der Verfahren zur Bestimmung der Zustandsgrößen,
- ⇨ Auswahl des Langzeitmonitoringverfahrens mit Auswertung und Datenmanagement,
- ⇨ Ermittlung der Zustandsgrößen (Widerstände) und Belastungen (Wirkungen) zum Zeitpunkt t_0 , die in die Standsicherheitsnachweise eingehen, eine Prognose über deren zeitliches

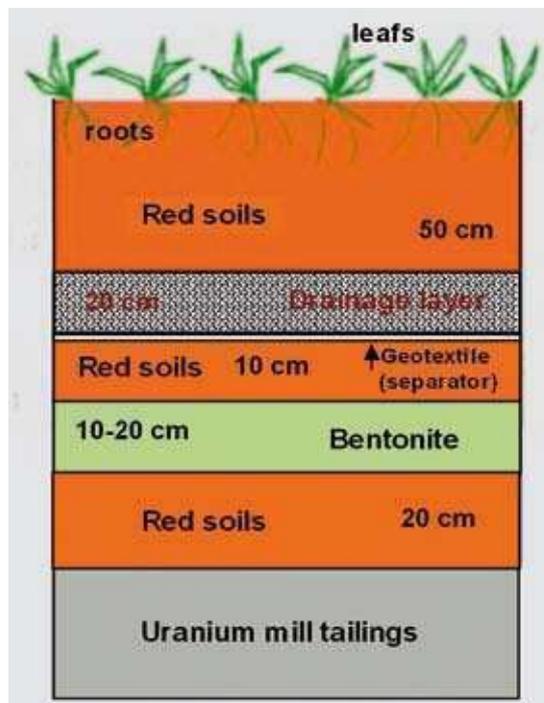


Bild 10. Multifunktionale Abdeckung des Shangrao-Projekts/Südchina (IAEA, 2004).

Körper	Radioaktive Nuklide/Körper [Bq/kg]			
	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K
Roter Boden (red soils)	35,62	46,47	34,0	716,0
Umgebung				
Blätter (leaves)	1,63	1,47	9,0	456,3
Wurzeln (roots)	n.a.	n.a.	22,0	n.a.
2 Monate später				
Blätter (leaves)	5,63	1,71	71,0	222,6
Wurzeln (roots)	20,93	7,70	70,0	248,6
4 Monate später				
Blätter (leaves)	10,65	3,75	85,0	115,0
Wurzeln (roots)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 7. Radionuklidgehalte im Oberboden und in Gräsern (Pflanzen und Wurzeln) an einem Probefeld mit multifunktionaler Abdeckung gemäß Bild 10 im Shangrao-Projekt/Südchina (IAEA, 2004).

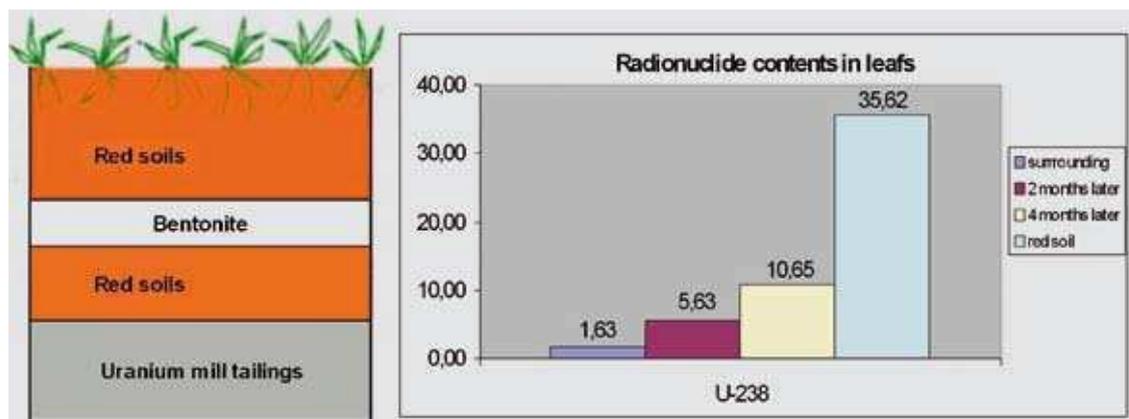


Bild 11. Radionuklidgehalte/Körper in Bq/kg für Boden und Gräser an einem Versuchsfeld im Shangrao-Projekt/Südchina (Auswahl aus Tabelle 7).

Verhalten und daraus Ermittlung der Langzeitstandsicherheit $S(t_0)$,

- ⇨ Verbesserte Prognose zum Langzeitverhalten zum Zeitpunkt t_1 mit $S(t_1)$ etc.

Für folgende Bereiche sind Nachweise zu führen:

- ⇨ Langzeitstandsicherheit des Dammbauwerks,
- ⇨ Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung,
- ⇨ Schutz des Grundwassers und der Vorfluter (run off protection), Stofftransportmodell.

Bevor auf ein mögliches Verfahrensschema zur Erbringung der Nachweise für die Langzeitstabilität des geotechnischen Umweltbauwerks zur sicheren, langzeitstabilen Verwahrung von übertägigen Speichereinrichtungen für Uranerzaufbereitungsrückstände eingegangen wird, soll der Vollständigkeit halber darauf verwiesen werden, dass die Stofftransportmodelle (Standortmodelle) zum geochemischen und hydrogeologischen Verhalten der Umgebung hier aus Platzgründen ausgeklammert werden. Ohne näher darauf einzugehen, werden diese ohnehin oftmals dem Langzeitmonitoring zugerechnet, weil ihre Aussagereichweite derzeit auf etwa 20 Jahre beschränkt ist. So wird ein permanentes Nachjustieren auf der Grundlage vorliegender Umweltdaten notwendig. Deswegen

kann es sinnvoll sein, diese Standortmodelle nach der Zertifizierung in die zentrale Umweltüberwachung des Standorts einzufügen.

Langzeitstandsicherheitsnachweise für das Dammbauwerk

Konzept der Wismut GmbH für $S(t_0)$

Das Konzept der Wismut GmbH sieht einen Langzeitstandsicherheitsnachweis aus folgenden Einzelnachweisen für die Dämme und ihre Teilböschungen gemäß DIN 19700 Teil 10 und 15, DIN 4084, ICOLD-Bulletins sowie den mitgeltenden Vorschriften (Strahlenschutz, VOAS, HaldAO) vor (Bild 3):

- ⇨ Statischer Langzeitstandsicherheitsnachweis (BISHOP, JANBU, Nachweis für 1000 a),
- ⇨ Dynamischer Langzeitstandsicherheitsnachweis bei Betriebserdbeben (OBE, Nachweis für 500 a),
- ⇨ Dynamischer Langzeitstandsicherheitsnachweis bei Sicherheitserdbeben (MCE, Nachweis für 10000 a, MCE-Maximum Credible Earthquake 10000 jährliches Ereignis (Wiederkehrperiode) nach ICOLD Bulletin 82, in neuer Fassung der DIN 19700 (neu) für Sicherheitserdbeben (Bemessungserdbeben) Wiederkehrzeitraum nun mit 2475 a festgeschrieben),

Lehrbuch der Bergbaukunde

12. Auflage

Von Ernst-Ulrich Reuther

12. Auflage · VGE Verlag · 2010

16,5 cm x 24 cm · 832 Seiten mit 552 Abbildungen

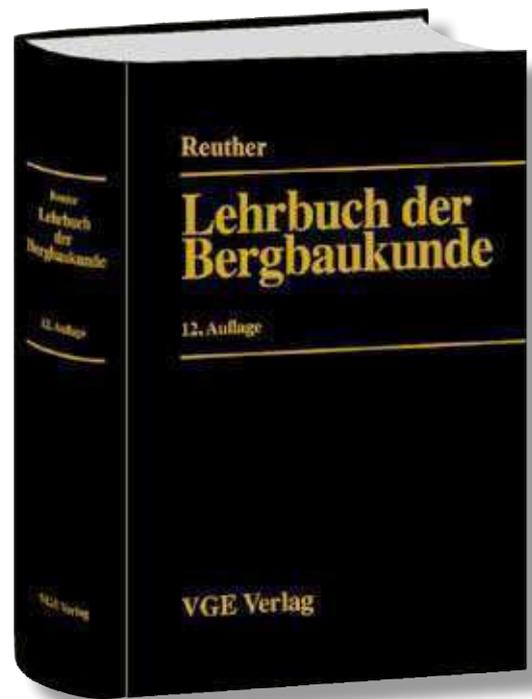
ISBN 978-3-86797-076-1

129 € zzgl. Versandkosten

für Studenten: 98 € zzgl. Versandkosten

Das Lehrbuch der Bergbaukunde hat sich seit über 100 Jahren an allen deutschen Bergbau-Hochschulen bewährt. Darüber hinaus gibt es auch den Ingenieuren in der Praxis, in den Bergwerksbetrieben und ihren Stäben, bei den Bergbehörden und in den Bergbauzulieferfirmen als Nachschlagewerk Einsicht in benachbarte, weniger vertraute Arbeitsgebiete und trägt zu deren besserem Verständnis bei.

Die kontinuierliche und zuletzt sogar wieder steigende Nachfrage nach diesem seit Jahren vergriffenen Standardwerk des Bergbaus hat den Verlag dazu veranlasst, die 11. Auflage nachzudrucken.



VGE
Verlag GmbH

VGE Verlag GmbH · Verlag Glückauf
Montebruchstraße 2 · 45219 Essen
Postfach 18 56 20 · 45206 Essen

Bestellung: Telefon + 49 (0) 20 54 / 9 24-123 · Fax + 49 (0) 20 54 / 9 24-149 · E-Mail vertrieb@vge.de

- ◇ Hydraulische Sicherheit:
- Hydraulischer Grundbruch,
- Sicherheit gegen innere Erosion (erosion channel),

◇ Langzeitsicherheit gegen äußere Erosion. Schwächezonen, die sich aufgrund innerer und/oder äußerer Erosionsvorgänge bilden, können die Dammsicherheit soweit reduzieren, dass mechanisches Versagen eintritt oder sehr wahrscheinlich wird. Erosionsvorgänge können aber auch Radonwegsamkeiten in der Abdeckung des Tailingskörpers verursachen, sodass die Sicherheiten gegen innere und äußere Erosion auch dem Erhalt der Strahlenschutzfunktion der Abdeckung dienen.

Das Konzept der Wismut GmbH muss unter anderem auf die multifunktionale Abdeckung erweitert werden, auch wenn vom Grundsatz her die gleichen Vorschriften gelten. Hier besteht erheblicher Handlungsbedarf für den AK 5.5 „Tailings“ der DGGT.

Grundsätze zur Ermittlung der Langzeitstandsicherheit

Allgemein wird die Standsicherheit im Rahmen der numerischen Analyse durch das Verhältnis der vorhandenen Wirkungen auf das System zum Systemwiderstand, bei dem rechnerisch der Bruch eintritt, definiert.

Gleichung [1] gibt das häufig angewendete Versagenskriterium von Mohr-Coulomb an, das die Berücksichtigung von dilatantem Verhalten zulässt:

$$S_t = \frac{\tan \varphi_k}{\tan \varphi_{ult}} = \frac{c_k}{c_{ult}} \dots \dots \dots [1]$$

Mit:
k charakteristischer Wert,
ult Wert, bei dem das System rechnerisch versagt (SCHANZ, 2006).

$$F(T_h) = \min \left\{ \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}; \sigma_{min} \right\} = 0 \dots \dots \dots [2]$$

Mit:
 $F(T_h) = 0 \wedge \min \{ \sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 \};$
 $\sigma_{max} = \max \{ \sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 \} \dots \dots \dots [2a]$

und
 $\sigma_{min} = \min \{ \sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 \} \dots \dots \dots [2b]$

Mit:
 φ Winkel der inneren Reibung,
 c Kohäsion,
 σ_i Hauptspannungen.
 Ein Ausschlusskriterium für Zugspannungen (tension-cut-off criterion) muss aber nicht zwingend eingefügt sein. Bei Zulassung von inelastischem

Materialverhalten müssen weitere Funktionen definiert werden, wie Fließfunktion, Kriechfunktion, Potenzialfunktion.

Materialparameter und Zustandsgrößen

Die Zustandsgrößen S_i , mit denen der bodenmechanische Zustand sowohl des Dammbauwerks als auch einer multifunktionale Abdeckung hinreichend genau beschrieben werden kann, lassen sich mit dem nachfolgend dargestellten funktionalen Zusammenhang nach (BACKHAUS, 1983) definieren:

$$S_i = S(x, y, z, t, \chi, \vartheta) \dots \dots \dots [3]$$

Mit:
 x, y, z Ortskoordinaten,
 t Zeit,
 χ Zustandsparameter,
 ϑ Korrelationsparameter.

Das Materialverhalten einer multifunktionalen Abdeckung unter verschiedenen Einwirkungen kann so nach BACKHAUS (1983) durch eine funktionale Verknüpfung der verschiedenen Messgrößen in folgender Form beschrieben werden:

$$F(\epsilon, \sigma, T, S) = 0 \dots \dots \dots [4]$$

Mit:
 $F(\dots)$ funktionale Beziehung zwischen den Messgrößen,
 ϵ Verformung,
 $\dot{\epsilon}$ Verformungsgeschwindigkeit,
 σ Spannung,
 T absolute Temperatur,
 S Zustandsparameter.

Für die am Ort x, y, z ermittelte Zustandsgröße S_i scheint es sinnvoll, die folgende Abhängigkeit vorzugeben:

$$S_i = f(w, e_0, \sigma'_1, t) \dots \dots \dots [5]$$

Mit:
 w Wassergehalt,
 e_0 Ausgangsporenzahl (spannungsfrei),
 σ'_1 wirksame größte Hauptspannung.

Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung

Die Aufgabe einer multifunktionalen Abdeckung besteht in der sicheren, langzeitstabilen Verwahrung des radioaktiven und toxischen Materials mit den folgenden Teilaspekten:

- ◇ Reduzierung von radioaktiver Strahlung und Radonexhalation in die Freigrenzen (ODL),
- ◇ Vermeidung der Infiltrierung von Oberflächenwasser und Sicherung gegen Starkniederschläge (storm water),
- ◇ Vermeidung von Sauerstoffdiffusion zur Beschränkung der Aciditätsbildung,
- ◇ Vermeidung des Austritts von kontaminierten Wässern,
- ◇ Möglichkeit der Wasserfassung und -abführung,

⇒ Renaturierung, Erstbepflanzung, Begrünung. Der Nachweis und die Erfolgskontrolle der Langzeitstabilität einer multifunktionalen Abdeckung sollten umfassen:

- ⇒ Innere und äußere Erosion (langzeitstabil: geomechanisch/geochemisch),
- ⇒ Alterung (Ausbildung von Wegsamkeiten, Rissbildung, Funktionsverlust),
- ⇒ Strahlen-, Emissionsschutzkontrolle (hydrologisch, Gas- und Mineraltransport),
- ⇒ Konsolidation und Setzungen (Ausbildung von Wegsamkeiten, Rissbildung, Funktionsverlust),
- ⇒ Bewuchs und Schadstoffaufnahme.

Auch zur Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung besteht erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere zum Einfluss der Alterung auf die Langzeitstabilität und welche Einflussgrößen die Alterung verschiedener Materialien einer Abdeckung (mineralische Stoffe, Geokunststoffe etc.) bestimmen beziehungsweise dominieren.

Strahlenschutzfunktion

Die Strahlenschutzziele in den USA (Emissionsrate) und in der Bundesrepublik Deutschland (Strahlenexposition) sind durch zwei unterschiedliche Größen definiert. Die Grenzwerte sind ähnlich stringent, beruhen aber auf den jeweils landesspezifischen Erfahrungen. Ohne Annahmen können diese nicht ineinander umgerechnet werden. Verliert die Abdeckung beispielsweise ihre Strahlenschutzfunktion (air path, water path, pathway of minerals), dann ist die Funktion des Bauwerks insgesamt gestört. Die Strahlenschutzfunktion kann über einzuhaltende Grenzwerte ausgewiesen werden. Während man in den USA (EPA), wie oben bereits aufgeführt, einen einzuhaltenden Grenzwert für die Emissionsrate $\leq 20 \text{ pCi m}^{-2}\text{s}^{-1} = 0,74 \text{ Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$ vorschreibt, hat sich bei der Wismut GmbH ein Grenzwert für die Strahlenexposition von $\leq 0,15 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ durchgesetzt (SSK). Ein Vorschlag, den Nachweis zur Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung für einen Zeitraum von 1 000 Jahren zu führen, stammt aus den UMTRA-Programmen. Er ist mit einer ausreichenden Anzahl von Untersuchungen gestützt. In den Vorschriften der US EPA (EPA: 40 CFR 192) und der US Nuclear Regulatory Commission (NRC: 10 CFR 40) ist dies verbindlich festgelegt, allerdings mit dem ausdrücklichen Hinweis, dass in begründeten Ausnahmefällen der Mindestzeitraum für den Langzeitstandortsicherheitsnachweis auf 200 Jahre reduziert werden kann. Der Nachweis für die multifunktionale Abdeckung der Tailings Ponds der Wismut GmbH ist für 1 000 Jahre geführt, behördlich zugelassen und von der IAEA gestützt. Die Begründung dafür liefern neben den langlebigen α -Strahlern auch jene radioaktiven Isotope im Inventar eines Tailings Ponds, die die Hauptlieferanten für Radon ^{222}Rn sind. Dies ist das Isotop ^{226}Ra (Tabelle 1),

während ^{232}Th hier vernachlässigt werden kann. Das ^{222}Rn ist ein Produkt der ^{238}U -Zerfallsreihe, mit einer Halbwertszeit von 3,8 d. ^{222}Rn ist ein Edelgas und α -Strahler. Einatmen des Radons in die Lunge kann erhebliche Schädigungen bewirken. Es zerfällt zunächst nacheinander in kurzlebige radioaktive Isotope von Polonium ^{218}Po , Blei ^{214}Pb , Wismut ^{214}Bi und Polonium ^{214}Po . Diese lagern sich als feste Bestandteile ab und können sowohl radioaktiv wie auch toxische Schädigungen hervorrufen. Die Exhalationsgrenzwerte sind deshalb sehr stringent. Für Tailings Pond Trünzig A ist der Anteil des Isotops ^{226}Ra mit $1,3 \cdot 10^{14} \text{ Bq} = 130 \text{ TBq}$ angegeben. Außerdem sind 630 mBq/l im Porenwasser ermittelt worden (Tabelle 1). Dies ist in der Angabe der Gesamtaktivität nicht berücksichtigt, auch weil unter anderem über Sickerwasser eine Menge ^{226}Ra aus dem Inventar ausgetragen wird. Die Sickerwässer werden aufgefangen und einer Wasserbehandlungsanlage zugeführt, dort gereinigt und in den Freigrenzen an die Vorflut abgegeben. Genau genommen kann so der Teil der ausgetragenen Aktivität bestimmt werden. Die Halbwertszeit des Isotops ^{226}Ra (Tabelle 3) beträgt 1 602 Jahre. Es kann gezeigt werden, dass sich nach 1 000 Jahren die Aktivität des Hauptradonbildners im Inventar auf weniger als 60 % reduziert hat (Zerfall, Drainage, Immobilisierung) und damit auch die Ursache der Radonexhalation. Durch die immobilisierende Wirkung einer Sekundärmineralisation der Tailings (mineral crustal formation), die über einen Zeitraum von 1 000 Jahren auch unter den Bedingungen einer Abdeckung nachweisbar ist, wird außerdem die Mobilität der Radionuklide erheblich gemindert (BGR, 2007).

Konsolidierung, Setzungsverhalten

Die Setzungen infolge Konsolidierung sind erheblich und müssen permanent verfolgt werden. Sie sind nach Aufbringen der multifunktionalen Abdeckung nicht abgeschlossen. Besonders beachtenswert ist dabei, dass sich entwickelnde Wegsamkeiten (zum Beispiel für Radon), die auch durch das unterschiedliche Setzungsverhalten der Schichten der Abdeckung hervorgerufen werden können, derzeit nicht exakt nachgewiesen werden können. Ihre Ausbildung kann lediglich, zum Beispiel aufgrund steigender Radonexhalationsraten (ODL), vermutet werden. Eine Nachsorge gestaltet sich deshalb schwierig. Hierzu besteht erheblicher Forschungsbedarf. Eine Lösung könnte darin bestehen, in die Abdeckung geeignete Sensoren einzubauen, um bessere Informationen über die Vorgänge zu erhalten. Die nachfolgende Zusammenstellung gibt dazu Hilfestellung. Bei der Modellierung boden- und felsmechanischer Aufgabenstellungen mithilfe der FEM sind grundsätzlich zwei Nichtlinearitäten zu beachten: die geometrische Nichtlinearität, die insbesondere mit der Untersuchung großer

Verformungen in Zusammenhang gebracht wird und die physikalische Nichtlinearität, die mit der Modellierung des Materialverhaltens zusammenhängt. Die vorliegenden Konzepte zur Langzeitstabilität multifunktionaler Abdeckungen gehen aber von kleinen Verformungen aus, also geometrischer Linearität. Damit gilt das Prinzip der linearen Superposition. Die einzeln ermittelten Setzungsanteile können so zusammengefasst werden:

$$s_g = s_e + s_l + s_{gw} \dots\dots\dots [6]$$

Mit:

- s_g Gesamtsetzung,
- s_e Eigensetzung des Tailingskörpers,
- s_l Lastsetzung des Tailingskörpers,
- s_{gw} Setzungsanteil aus der Entwässerung (des Wiederanstieg des Grundwassers) des Tailingskörpers.

Bei Zugrundelegung physikalischer Nichtlinearität in boden- und felsmechanischen Aufgabenstellungen ist es unerlässlich, auch Inhomogenität und Anisotropie hinsichtlich der Materialeigenschaften des Tailingskörpers zu bewerten. Dabei wird das statistische Verhalten der Zustandsgrößen mithilfe der ermittelten Korrelationskoeffizienten des beprobten Tailingskörpers dargestellt. Auftretende Anomalien können mit geophysikalischen Methoden detektiert werden. Tabelle 8 zeigt Ergebnisse von Regressionsanalysen von CPT-Ergebnissen eines Deponiestandorts. Die statistische Analyse der Feldversuche ist im Bild 12 zusammengefasst.

Obwohl die Zusammenstellung relevanter physikalischer Phänomene zunächst sehr übersichtlich erscheint und diese sicher auch als bekannt vorausgesetzt werden können, wird es aufgrund der komplexen physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie der Konsistenz der Tailings dennoch schwierig, diese in einem komplexen geotechnischen Modell adäquat abzubilden. Ein Monitoring über Zeiträume, mit denen Prognosen zum Langzeitverhalten der Tailingskörper hinreichend genau abgestützt werden können, ist bisher nicht bekannt geworden. So müssen die Ergebnisse aus eindimensionalen Konsolidationsmodellen

CPT-Nr.	a [MN/m ²]	b [MN/m ³]	Korrelationskoeffizient [-]
2-13	-1,01129	0,265345	0,955095
24	2,17634	0,161439	0,689819
24a	-7,87406	0,590386	0,849254
2-6	0,223683	0,244968	0,885242
2-9	3,43668	0,175812	0,949680
29a	-0,959411	0,213584	0,932856
31a	2,21298	0,122971	0,765281
35	-2,70202	0,230851	0,706560

Tabelle 8. Ergebnisse von Regressionsanalysen von CPT-Ergebnissen eines Deponiestandorts (LERSOW, 2003).

oder die mit FEM-Modellen ermittelten Verformungen sehr kritisch hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet werden, insbesondere wenn nicht alle relevanten Phänomene darin berücksichtigt sind. Die Notwendigkeit, das Setzungsverhalten einer multifunktionalen Abdeckung langfristig in situ zu überwachen, wird somit deutlich. Mit den sich daraus ergebenden umfänglichen Messreihen der ortsabhängigen Verformungen könnten wiederum die in der Setzungsprognose eingesetzten Modelle validiert werden.

Auf die Konsolidierung des Tailingskörpers und damit verbundene erhebliche Verformungen, die bei der Verwahrung durch unterschiedliche, bereits angesprochene Maßnahmen beschleunigt werden, soll hier nicht weiter eingegangen werden. Im folgenden Abschnitt wird aber kurz auf mögliche Auswirkungen der Verformungen auf die Abdeckung und damit auf das Langzeitverhalten des geotechnischen Umweltbauwerks eingegangen.

Monitoring

Umweltmonitoring

Aufgabe der Umgebungsüberwachung, des so genannten Umweltmonitorings, ist es, die Einwirkungen der einzelnen Objekte sowie der Sanierungsmaßnahmen selbst auf die Schutzgüter Boden, Luft und Wasser zu messen (Bild 13).

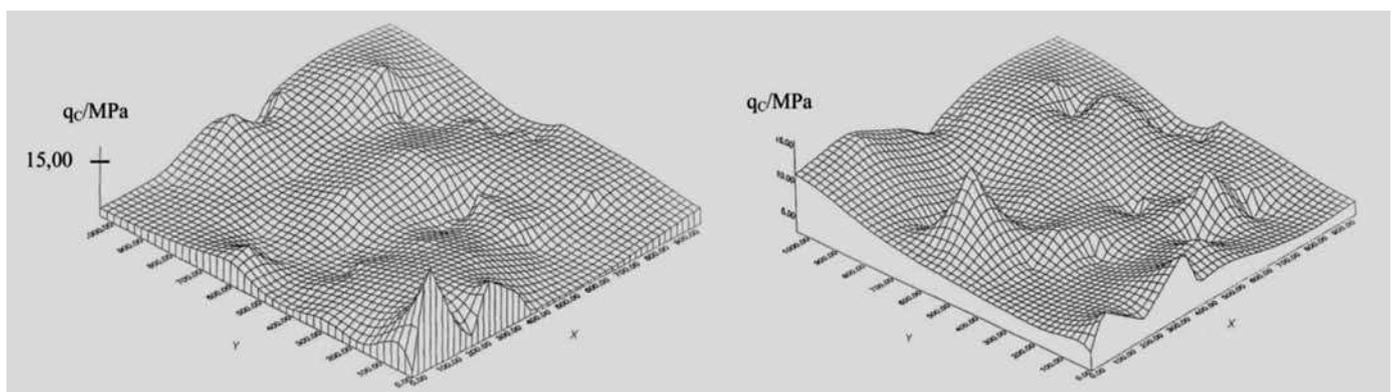


Bild 12. 3-D-Visualisierung des Spitzendrucks q_c aus Regressionsanalyse, links Tiefe 5 m (BGR, 2007), rechts Tiefe 30 m.

Das gilt für die Zeit vor, während und nach der Sanierung. Unterschieden wird zwischen Basis- und Sanierungsmonitoring. Im Basismonitoring werden die Überwachungsaufgaben zusammengefasst (Erfolgskontrolle), die unabhängig von der Sanierungstätigkeit regelmäßig an festen

Bild 13. Systematik des Umweltmonitoring.

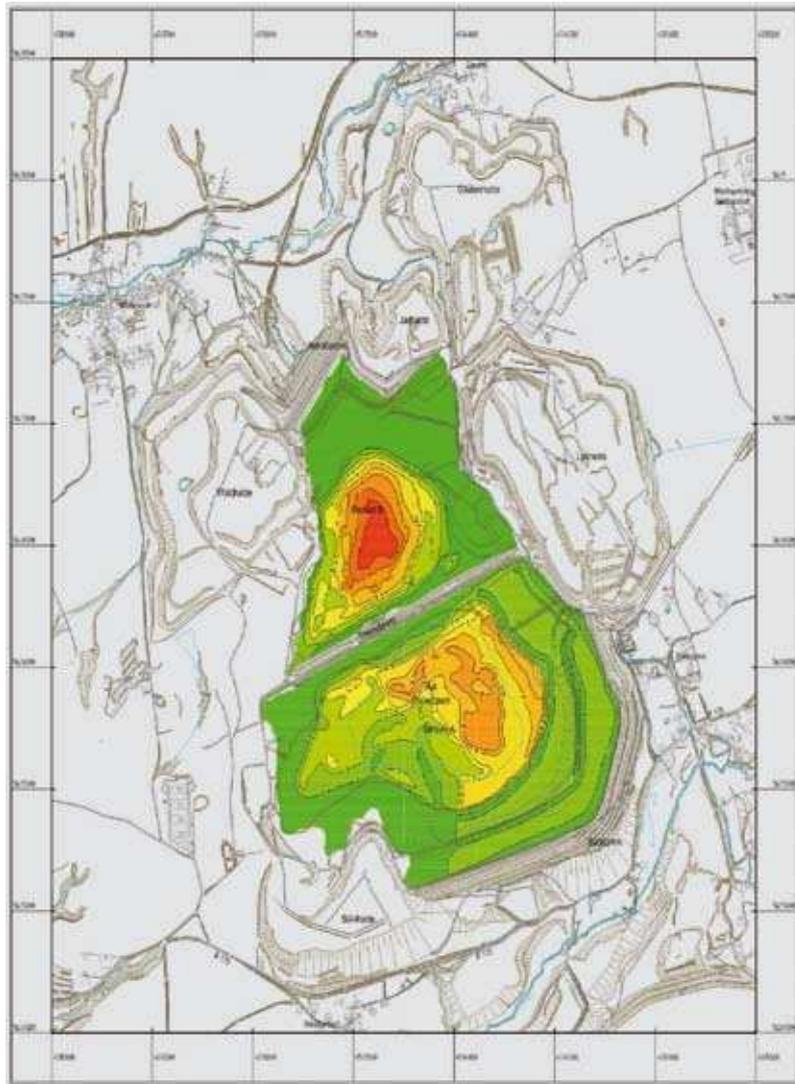
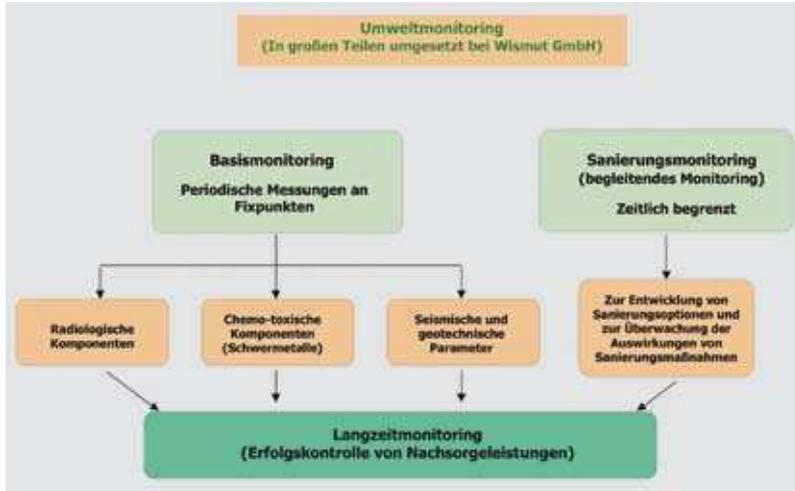


Bild 14. Exemplarische grafische Darstellung der Setzungen an einer Tailingsoberfläche bezogen auf die zum Zeitpunkt der Interpretation vorhandene Tailingsmächtigkeit (LERSOW, 2006).

Messpunkten und nach definierten Methoden durchgeführt werden. Des Weiteren werden die Auswürfe und Ableitungen von Einzelobjekten gemessen. Das Basismonitoring ist als Grundlage für die Langzeitüberwachung vorgesehen, mit seiner Hilfe wird also die Umgebungssituation nach Abschluss der Sanierung zur Beurteilung der Sanierungsergebnisse überwacht. Das Langzeitmonitoring baut also auf dem Basismonitoring auf. Aus den Ergebnissen des Basismonitorings wird in Verbindung mit den Entwicklungsprognosen das notwendige Netz an Messpunkten für das Langzeitmonitoring aufgebaut. Zu gegebener Zeit sollte das Messnetz aber einer Revision unterworfen und der Entwicklung angepasst werden. Das Sanierungsmonitoring (begleitendes Monitoring) begleitet die Durchführung der Sanierungsmaßnahmen als Ergänzung zum Basismonitoring. Charakteristisch für das Sanierungsmonitoring ist seine zeitliche Befristung. Das Sanierungsmonitoring schließt auch die radiologische Überwachung der Arbeitnehmer ein (§ 40 StrlSchV überwachungspflichtige Personen – beruflich strahlenexponierte Personen). Die Wismut GmbH hat seit dem Jahr 1991 die Ergebnisse der Umgebungsüberwachung in Form von Umweltberichten der Öffentlichkeit zur Kenntnis gegeben.

Langzeitmonitoring des geotechnischen Umweltbauwerks als Teil der Sicherheitsprognose

Das Langzeitmonitoring zu den Standsicherheitsnachweisen wird einerseits durch das im vorherigen Abschnitt beschriebene Raster der Einzelnachweise und andererseits durch die zu Grunde gelegten Zustandsstandsgrößen für das Dammbauwerk und die multifunktionale Abdeckung gemäß Gleichung [4] und [5] bestimmt. Es sind also einerseits die Zeitintervalle zu definieren, in denen Probenahme und Versuchsdurchführung zu erfolgen haben, andererseits die Versuche, mit denen deren Bestimmung vorgenommen wird. So werden üblicherweise die Scherfestigkeitsparameter aus direkten Scherversuchen (Rahmenscherversuche) und aus Triaxialversuchen (CU) gemäß DIN 18137 ermittelt. Aus Druck-Setzungs-Versuchen (Ödometer) nach DIN 18135 können, wie vorgeschlagen, die Verformungsparameter ermittelt werden. Die Durchführung der Versuche erfolgt unter Berücksichtigung der Entnahmetiefe der Probe beziehungsweise der in situ vorhandenen Überlagerungsspannung für die zu erwartenden Spannungsbereiche. Eine immer wiederkehrende Schwierigkeit besteht darin, die im Labor ermittelten Werte auf die Situation in situ zu übertragen. Der Tailingskörper konsolidiert mit Aufbringen der multifunktionalen Abdeckung weiter. Der Tailingskörper und die Abdeckung bilden dabei ein gekoppeltes System. Sind die Setzungsunterschiede zwischen benachbarten Teilen des Tailingskörpers und damit der Setzungsgradient

groß, wirkt sich das auf die Abdeckung aus. Die Schichten der multifunktionalen Abdeckung können gegeneinander versetzt, an den Schichtgrenzen eine Durchdringung verursacht und dadurch das Barriersystem verletzt werden. Infolgedessen können sich möglicherweise beispielsweise Radonwegsamkeiten entwickeln. Der Einbau geosynthetischer Trennschichten kann dagegen schützen (Bild 9), und bei geeigneter Produktauswahl auch die dynamische Stabilität der multifunktionalen Abdeckung wesentlich erhöhen. Über die gemessenen Radonexhalationsraten beziehungsweise über die Ortsdosisleistungen wird die Wirksamkeit und damit die Funktionalität der Radonbarriere der multifunktionalen Abdeckung belegt.

Die an der Oberfläche der Abdeckung gemessenen, ortsabhängigen Setzungen sind die Summe der Setzung des Tailingskörpers und der Abdeckung. Dem Boltzmann-Axiom der Gleichung [6] folgend ergibt sich:

$$s_g = s_{\text{tail}} + s_{\text{abd}} \dots \dots \dots [6a]$$

Mit:

s_g an Oberfläche gemessene Gesamtsetzung,

s_{tail} Setzung des Tailingskörpers,

s_{abd} Setzung des Abdeckkörpers.

Um die Auswirkungen der Konsolidierung auf die Abdeckung zu minimieren und Vorgaben für

die Dimensionierung der Abdeckung abzuleiten, sind umfangreiche Prognoseberechnungen und ein begleitendes Monitoring zur Validierung erforderlich (Bild 14). Auflastschüttungen und auch Teilbereiche der Zwischenabdeckung übernehmen dabei die Funktion von Probefeldern. Folgende Aufgaben dienen – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – dem Ziel, die Barrierewirkung der multifunktionalen Abdeckung für die festgelegte Standzeit des geotechnischen Umweltbauwerks zu garantieren und nachzuweisen:

- ⇨ Maßnahmen zur Vergleichmäßigung der Setzungen der Oberfläche des Tailingskörpers,
- ⇨ Ermittlung einer zuverlässigen Prognose für das Langzeitverhalten der Setzung des Tailingskörpers,
- ⇨ Installation eines Systems, mit dem die Setzungen der Abdeckung mit entsprechenden Auswertungsroutinen zuverlässig und über große Zeiträume ermittelt werden können,
- ⇨ Installation eines Netzes an radiologischen Messpunkten, beispielsweise zur Ermittlung der Radonexhalationsraten und Ortsdosisleistungen, mit entsprechenden Auswertungsroutinen und Korrelation zum Verformungsverhalten der Oberfläche der Abdeckung,
- ⇨ Detektierung möglicherweise auftretender Radonwegsamkeiten zum Beispiel durch

DIE BODENBEWEHRUNG VON NAUE

die **VIERDIMENSIONEN** von **Secugrid®**

Secugrid®

ist ein gelegtes Geogitter aus gereckten, monolithischen Flachstäben mit verschweißten Knoten für die Bodenbewehrung.

NAUE GmbH & Co. KG
 Gewerbestraße 2
 32339 Espelkamp-Fiestel

Telefon 05743 41-0
 Telefax 05743 41-240
 E-Mail info@naue.com
 Internet www.naue.com

www.secugrid.com

geeignete Tracerversuche in Korrelation mit radiologischen Messungen.
 Es scheint angeraten, in Bereichen erhöhter Versagenswahrscheinlichkeit, zum Beispiel am Dammbauwerk, ein Frühwarnsystem zu installieren, das mit Elementen der genannten Aufgaben gekoppelt werden könnte. Damit wird es möglich sein, Schwächezonen, Gleitflächen etc. zu identifizieren und Hinweise auf notwendige Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu bekommen beziehungsweise tiefer gehende Untersuchungen einzuleiten. Besonders schützenswert sind Bereiche in der Nähe von Wohngebieten sowie landwirtschaftlicher und tierischer Produktion,

Übergänge zu Vorflutern etc. Insbesondere in Zonen mit erhöhter seismischer Aktivität sowie erhöhter Anzahl und Dauer von Starkregenfällen wie auch zusitzender Wässer bei komplizierter geotechnischer Situation am Standort allgemein ist die Installation eines Frühwarnsystems angeraten (WAGGITT, 2008). Einige Anregungen existieren bereits, die zu einer Lösung beitragen können. Glötzl und Lersow sehen eine erste Möglichkeit darin, die in Matten integrierten Polymere Optical Fiber (POF), (GLÖTZL et al., 2009) und eine Spannungsmessstation (GLÖTZL/KRYWULT, 2002) in geeigneter Weise zu verbinden (Bild 15).



Bild 15. Prinzip einer Monitoringstation mit zentraler Datenerfassungs- und Auswertungseinheit (Umweltdatenbank) und Frühwarnsystem, zum Teil in Belchatov-lignite mine/Poland angewendet (GLÖTZL et al., 2009).

Schlussbemerkungen

Der Arbeitskreis 5.5 „Tailings“ der DGGT hat sich einer Aufgabe gewidmet, deren Bedeutung aufgrund tragischer Ereignisse wie Kolontar und Nachterstedt, in jüngster Zeit unbeabsichtigt in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt ist. Dass der Arbeitskreis dabei frühzeitig die allgemeine Aufgabenstellung auf die zentrale Problemstellung einer geeigneten, auf standort-spezifische Lösungen generell modifizierbaren, Langzeitstandsicherheit mit beigeschlossenem Langzeitmonitoring beschränkte, ist schon jetzt als wegweisend bestätigt. Grundlage wird der hier dargelegte internationale Erfahrungsstand sein. Diesen so zu verdichten und aufgabenspezifisch zu entwickeln, dass beispielsweise sowohl ein sich entwickelnder mechanischer Verlust der Stabilität, aber auch sich ausbildende Radonwegsamkeiten sicher frühzeitig erkannt werden, um Gefahrenabwehr beziehungsweise gezielte Nachsorge betreiben zu können, wird spannende Aufgabe sein, zumal Lösungen dafür noch gefunden werden müssen. Der internationalen Anbindung der DGGT wird die Arbeit des Arbeitskreises „Tailings“ in besonderer Weise gerecht, zumal die Ergebnisse auch auf andere Aufgabenfelder wie Böschungen und Dämme allgemein übertragen werden können.

Quellennachweis

BACKHAUS, G. (1983): *Deformationsgesetze*. Akademie-Verlag, Berlin.

BGR (2007): *Mineral crustal (cement layers) formation on mine and mill tailings dumps*. Final Report, Federal Institute of Geosciences and Natural Resources (BGR), 30.12.2007.

BHP BILLITON (2004): *Health, Safety, Environment and Community, Closure Standard*. July 2004, Melbourne.

BMU (2004): *Untersuchung des Einflusses der Bio-turbation von Abdeckung und kontaminierten Materialien auf Radondämmwirkung mittels Bleispurmethode*. Abschlussbericht des IAF Radioökologie GmbH im Auftrage des BfS, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, rs_643.

DIEHL, P. (2006): *Gesundheitliche Folgen des Uran-bergbaus*. Bonn.

GERSTMANN, U.; MEYER, H.; THOLEN, M. (2002): *Bestimmung des nuklid-spezifischen Aktivitätsinventars der Schachanlage Asse*. Abschlussbericht, August 2002, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/GSF_Bericht_nuklidspezifisches_Akti-vitaetsinventar.pdf.

GLÖTZL, R., KRYWULT, J. (2002): *Erfahrungen und neue Erkenntnisse zum Spannungsverhalten einer Braunkohleschürfe*. Bericht XXVI, Glötzl GmbH.

GLÖTZL, R.; SCHNEIDER-GLÖTZL, J.; LIEHR, S.; LENKE, P.; WENDT, M.; KREBBER, K.; GABINO, L.; KRYWULT, J. (2009): *First Results of a Field Test in*

Belchatow Brown Coal Mine to investigate Creeping Slopes. 2009, VIth International Brown Coal Mining Congress in Belchatow.

IAEA (2004): *The long term stabilization of uranium mill tailings*. Final report of a coordinated research project 2000–2004; IAEA-TECDOC-1403, August 2004.

KÜPPERS, C.; HEINRICH, E.; SCHMIDT, G. (2007): *Bewertung der Strahlenexposition in der sogenannten BUGA'07-Kernzone „Neue Landschaft Ronneburg“*. Öko-institut Darmstadt im Auftrage der Wismut GmbH.

LERSOW, M. (2003): *Exhaustive proof of the soil mechanical behaviour of loose rocks in stabilized extensive mining sites*. XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, August 2003, Prague, CZ Republic.

LERSOW, M. (2006): *Verwahrung von Wismut Tailings Ponds und Dekontamination der Frei-, Poren- und Sickerwässer*. 57. BHT, TU Bergakademie Freiberg, Deutsch-Polnisches Bergbauforum, Juni 2006.

LERSOW, M.; MÄRTEN, H. (2008): *Energiequelle Uran-Ressourcen, Gewinnung und Reichweiten im Blickwinkel der technologischen Entwicklung*. Glückauf 144 (2008)3, S. 116-122, Essen.

LERSOW, M.; SCHMIDT, P. (2006): *The Wismut Remediation Project*. Proceedings of First International Seminar on Mine Closure, Sept. 2006, Perth, Australia, pp. 181-190.

RITCEY, G.M. (1989): *Tailings management: Problems and solutions in the mining industry*. Elsevier, New York.

ROBINSON, P. (2004): *Uranium Mill Tailings Remediation Performed by the US DOE: An Overview*. Southwest Research and Information Center, Albuquerque, USA.

SCHANZ, T. (2006): *Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik*. geotechnik 29 (2006), Nr. 1, S. 13-27.

TOBIAS, S. (1991): *Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

TOBIAS, S. (2003): *Einführung in die Ingenieurbiologie*. Skriptum, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.

WAGGITT, P.; LEERSOW, M.; MÄRTEN, H. (2008): *Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus und deren Sanierung – Ein Überblick über Afrika, Asien und Australien*. Glückauf 144 (2008)3, S.108-115.

WELS, C.; ROBERTSON, A.; MAC, G.; JAKUBICK, A. T. (2000): *A Review of Dry Cover Placement on Extremely Weak, Compressible Tailings*. Paper published in CIM Bulletin, Vol. 93, No. 1043, pp. 111-118, September 2000.

*Bundesamt für Strahlenschutz

Sichere und langzeitstabile Verwahrung von Tailings Ponds, insbesondere aus der Uranerzaufbereitung

Dr.-Ing. Michael Lersow*, Obmann des Arbeitskreises 5.5 „Tailings“ der DGGT

Hinweise/Einfügungen

In der Ausgabe 4/10 der GEOTECHNIK hat sich auf der Seite 355 dieses Beitrages ein Übertragungsfehler eingeschlichen, der in diesem Abdruck beseitigt ist. Ein Chance zur Beseitigung in der Ausgabe 4/10 der GEOTECHNIK bestand für den Autor nicht mehr. Die Umrechnung lautet natürlich $0,211 \text{ MCi} = 7.807 \text{ TBq}$.

In diesem Beitrag fand nur frei zugängliches Datenmaterial Verwendung. In der Zeit der Drucklegung ist auf http://www.endlager-asse.de/DE/2_was_ist/A_In6Schritten/_node.html zur Gesamtaktivität der Asse II der Radionuklidvektor so präzisiert dargestellt, dass man damit die Aussage, dass die langlebigen radioaktiven Nuklide an der Gesamtaktivität einen Anteil $A < 1.000 \text{ TBq}$ halten, weiter präzisieren werden kann.

1980; GA = 7.806.025 GBq = 7.806,025 TBq				2003; GA = 2.700.000 GBq = 2.700,000 TBq			
Isotop	Halbwertszeit $T_{1/2}$ in a	Anteil an der GA in %	Anteil an der GA in TBq	Isotop	Halbwertszeit $T_{1/2}$ in a	Anteil an der GA in %	Anteil an der GA in TBq
Co-60	5,26	30,94	2.415,18410	Co-60	5,26	4,20	113,40
Ni-63	100,00	10,27	801,67876	Ni-63	100,00	24,53	662,31
Sr-90	28,78	6,60	515,19765	Sr-90	28,78	10,60	286,20
Cs-137	30,17	11,01	859,44335	Cs-137	30,17	18,17	490,59
Pu-241	14,35	38,73	3.023,27340	Pu-241	14,35	35,68	963,36
Sonstige	???	2,45	191,24761	Sonstige	???	6,82	184,14
Σ	22,12 (ohne sonstige)	100,00	7.806,02487	Σ	35,78 (ohne sonstige)	100,00	2.700,000

Anmerkung zur obigen Tabelle: Per definitionem handelt es sich beim Inventar der Asse II im Wesentlichen um kurzlebige ($T_{1/2} \leq 30 \text{ a}$) oder etwas länger lebige radioaktive Isotope. Die in der obigen Tabelle dargestellte gewichtete, mittlere Halbwertszeit des radioaktiven Inventars der Asse II (ohne Sonstige) zum jeweiligen cut off date (ohne Bemühung des Zerfallsgesetzes, durch Wichtung nach Anteil der Nuklide am Inventar zum Zeitpunkt t) wird sich also im Laufe der Zeit in Richtung 100a entwickeln. Legt man das Zerfallsgesetz zu Grunde, beträgt die fiktive Halbwertszeit des Gesamtinventars zum Stichtag 01.01.2003 $T_{1/2} = 15,02 \text{ a}$. Bei Sonstige handelt es sich im Wesentlichen um langlebige radioaktive Isotope (Th-232, Σ (U-235, -236, -238), Pu-239, Ra-226 etc.). Legt man als Stichtag den 01.01.1980 zugrunde, entspricht in der obigen Tabelle der Radionuklidvektor von 1980 dem Startvektor. Der Anteil der langlebigen radioaktiven Isotope an der Gesamtaktivität war zum 01.01.1980 damit $A_{\text{ges}} < 191,24761 \text{ TBq} < 1.000 \text{ TBq}$. Dieser ist langfristig sicher zu verwahren (**This radioactivity has to be stored safely for a long time with very small long-term failure likelihood of the repository and its surrounding barriers.**). Der Fakt der eingeschränkten Mobilität der radioaktiven Isotope und das Potential der Radonemission des Inventars der Asse II werden hier nicht diskutiert.

Weiter siehe Beitrag M. Lersow in Geotechnik 4/2010

Tabelle unter Verwendung der Quelle: http://www.endlager-asse.de/DE/2_WasIst/A_In6Schritten/_node.html

Der Beitrag in der Geotechnik 4/2010 basiert auf der keynote lecture, die der Autor auf der 6th International Conference on Environmental Geotechnics im November 2010 in New Dehli gehalten hat. Es ist sicher für den Leser interessant, beide Beiträge gelesen zu haben. Die gedruckte Version für die proceedings der 6th ICEG ist unter [2] als download hier zur Verfügung gestellt.

Der Autor wünscht den Lesern der GEOTECHNIK, insbesondere denen, die sich dem hier zur Verfügung gestellten Beitrag widmen, viele Anregungen, Freude auf der Entdeckungstour und natürlich kritische Resonanz als Nachweis, dass der Beitrag die gewünschte Wirkung erzeugt hat.