

---

Michael Lersow

# Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen

Langzeitstabile, langzeitsichere  
Verwahrung in Geotechnischen  
Umweltbauwerken – Sachstand,  
Diskussion und Ausblick

 Springer Spektrum

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	1
	Literatur . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Radioaktivität in Abfällen und Rückständen</b> . . . . .	11
2.1	Klassifizierung der Rückstände und radioaktiven Abfälle . . . . .	11
2.2	Beschreibung der Rückstände und radioaktiven Abfallarten . . . . .	17
2.3	Zeitliche Veränderung der Radioaktivität in Abfällen und Rückständen . . . . .	20
2.4	Entstehung von radioaktiven Abfällen und Rückständen . . . . .	25
2.4.1	Entstehung bei der Gewinnung von Energie aus Kernbrennstoffen . . . . .	25
2.4.2	Entstehung durch Isotopenproduktion und Anwendung der Produkte . . . . .	28
2.4.3	Bergbauliche oder industrielle Prozesse, die zu Rückständen mit natürlich vorkommenden Radionukliden („NORM“) führen . . . . .	29
2.4.4	Radioaktive Abfälle und Rückstände aus der Entwicklung, Herstellung und Aussonderung von Kernwaffen und radioaktiver Munition . . . . .	31
	Literatur . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Endlagerung radioaktiver Abfälle und Rückstände</b> . . . . .	35
3.1	Aufgabe . . . . .	35
3.2	Anforderungen . . . . .	37
3.3	Voraussetzungen für den Endlagerstandort . . . . .	38
3.3.1	Ortung des Standortes . . . . .	38
3.3.2	Standortsuche . . . . .	39
3.4	Multibarrierenkonzept . . . . .	42
3.4.1	Multibarrierenkonzept zur langzeitsicheren, langzeitstabilen Verwahrung von Abfällen mit sehr geringer Radioaktivität und für nicht überwachungsbedürftige Abfälle . . . . .	42

3.4.2	Multibarrierenkonzept für Geotechnische Umweltbauwerke zur langzeitsicheren, langzeitstabilen Verwahrung von Uran-Aufbereitungsrückständen . . . . .	44
3.4.3	Multibarrierenkonzept für Geotechnische Umweltbauwerke zur langzeitsicheren, langzeitstabilen Verwahrung von radioaktiven Abfällen . . . . .	45
3.5	Grundbegriffe der Langzeitsicherheit . . . . .	46
3.6	Krisenmanagement/Notfallplan . . . . .	53
3.7	Vorhandene Gefahrenquellen und präventive, optimierte Sicherheitsvorkehrungen . . . . .	56
3.7.1	Uran-Rückstandsspeicher (Tailings ponds) . . . . .	56
3.7.2	Schäden von Einzelpersonen bei direktem Kontakt und Strahleneinwirkung – Strahlenschutz . . . . .	57
3.7.3	Endlagerung radioaktiver Abfälle . . . . .	62
3.8	Ausbreitungsmöglichkeiten von Radionukliden aus Geotechnischen Umweltbauwerken (Endlagerbauwerken) . . . . .	67
3.8.1	Radionuklidausbreitung auf Deponien gemäß KrWG und DepV . . . . .	69
3.8.2	Radionuklidausbreitung bei Uran-Tailings ponds . . . . .	69
3.8.3	Radionuklidausbreitung beim Ablegen von wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen . . . . .	70
3.9	Monitoring – Nachweise der Funktion und Wirksamkeit der Geotechnischen Umweltbauwerke zur dauerhaften Isolation radioaktiver Abfälle und Rückstände . . . . .	73
	Literatur . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Entsorgung von Abfällen mit sehr geringer Radioaktivität (VLLW) . . . . .</b>	<b>81</b>
4.1	Freigegebene Reststoffe, entlassene und nicht überwachungsbedürftige Rückstände . . . . .	81
4.1.1	Herkunft . . . . .	81
4.1.2	Gesetzliche Grundlagen . . . . .	83
4.1.3	Radiologische Grundlagen . . . . .	83
4.2	Zweckgerichtete Freigabe von radioaktiven Abfällen und Entlassung von Rückständen . . . . .	84
4.2.1	Beispiele von nicht überwachungsbedürftigen Rückständen zur Deponierung gemäß DepV und AVV . . . . .	86
4.3	Deponierung von Abfällen mit sehr geringer Radioaktivität . . . . .	87
4.3.1	Multibarrierenkonzept . . . . .	88
4.4	Ausblick . . . . .	94
	Literatur . . . . .	96

<b>5</b>	<b>Überwachungsbedürftige radioaktive Rückstände des Uranerzbergbaus</b>	<b>97</b>
5.1	Herkunft der radioaktiven Rückstände und Rückstandsspeicher, grundsätzliche Anforderungen an deren Stilllegung	97
5.2	Stilllegung/Langzeitsichere Verwahrung von radioaktiven Rückständen des Uranerzbergbaus in Deutschland	105
5.3	Eigenschaften und Radiotoxizität der Uran-Tailings, insbesondere der SDAG Wismut	109
5.4	Standortsanierungskonzept – Conceptual Site Model (CSM)	111
5.4.1	Grundsätze der Verwahrungsplanung	111
5.4.2	Langzeitsichere und langzeitstabile Verwahrung von Tailings ponds aus der Erzaufbereitung	116
5.4.3	Multibarrierenkonzept	119
5.5	Definition von Langzeitsicherheit und Langzeitstabilität	146
5.5.1	Mechanische Materialparameter, Zustandsgrößen	148
5.5.2	Langzeitsicherheit und Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung	149
5.5.3	Langzeitsicherheit und Langzeitstabilität der Basisabdichtung	155
5.5.4	Monitoring	158
5.6	Betrachtung außergewöhnlicher Ereignisse – Worst Cases	163
	Literatur	164
<b>6</b>	<b>Entsorgung von radioaktiven Abfällen geringer und mittlerer Radioaktivität</b>	<b>169</b>
6.1	Internationale Entwicklung	169
6.2	Beschreibung der derzeitigen Situation bei der langzeitsicheren Verwahrung von LAW, MAW in Deutschland	176
6.3	Anforderungen und Umsetzung einer langzeitsicheren Verwahrung	179
6.4	Standortbeschreibungen/Einlagerungsbedingungen/Langzeitsicherheit	180
6.4.1	Schachtanlage Konrad/Endlager Konrad	180
6.4.2	Endlager für Radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)	185
6.4.3	Schachtanlage Asse II	201
6.5	Vergleichende Betrachtungen zum Radionuklidinventar der Schachtanlage Asse II und des ERAM mit den Tailings ponds der Wismut GmbH	225
6.5.1	Vergleich der Aktivitätsinventare	225
6.5.2	Vergleich der Langzeitsicherheitskonzepte des ERA Morsleben mit Rückstandsspeichern aus der Uranerzaufbereitung	229
6.6	Zusammenfassung des Konzepts einer langzeitsicheren Verwahrung von LAW und MAW	232
	Literatur	235

<b>7</b>	<b>Entsorgung von radioaktiven Abfällen mit hoher Radioaktivität</b>	239
7.1	In Deutschland zu entsorgende hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle	239
7.2	Vergleichende Betrachtungen zu abgelegten Radionuklidinventaren in Endlagerbauwerken in Deutschland	245
7.3	Stand der langzeitsicheren und langzeitstabilen Entsorgung von HAW in Deutschland	251
7.4	Internationale Projekte (Lösungen) zur langzeitsicheren Entsorgung von HAW (Auswahl)	257
7.4.1	Endlagerprojekte in den USA	257
7.4.2	Ausgewählte Endlagerprojekte in Europa	263
7.5	Zeitliche Veränderung der Radioaktivität in Abfällen	284
7.5.1	Grundlagen	284
7.5.2	Gezielte Veränderung der Radioaktivität durch Transmutation	287
7.6	Schlussfolgerungen	289
7.7	Verantwortung und Kosten	302
	Literatur	305
<b>8</b>	<b>Langzeitsicherheit Geotechnischer Umweltbauwerke</b>	309
8.1	Aufgabe und Ziel	309
8.2	Langzeitsichere und langzeitstabile Verwahrung der Uran-Tailings ponds	311
8.3	Langzeitsichere und langzeitstabile Verwahrung radioaktiver Abfälle in Deutschland	315
8.3.1	Derzeit gültige Anforderungen an die Endlagerung	315
8.3.2	Zentrale Sicherheitsanforderungen an ein zu entwickelndes Endlagersystem in Deutschland	316
8.4	Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland	317
8.4.1	Endlagerung radioaktiver Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung	317
8.4.2	Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	319
8.4.3	Anforderungen an die langzeitsichere und langzeitstabile Verwahrung und mögliche Suchgebiete für Endlagerstandorte für HAW in Deutschland	320
8.5	Elemente eines Langzeitsicherheitsnachweises	345
8.5.1	Analyse des Endlagersystems (Systemanalyse)	345
8.5.2	Szenarienentwicklung – Szenarienanalyse	352
8.5.3	Szenarien der Endlagerentwicklung in der Nachverschlussphase	359

---

8.6	Langzeitsicherheitsnachweis . . . . .	363
8.6.1	Modellgebiet A gemäß Abb. 8.14 – Versagen (Teilversagen) des Verschlusssystems . . . . .	365
8.6.2	Modellgebiet B gemäß Abb. 8.14 – Herausbildung eines Radionuklid-Quellterms im ewG . . . . .	366
8.6.3	Modellgebiet C gemäß Abb. 8.14 – Stofftransportmodellierung für den Fernbereich . . . . .	377
8.6.4	Modellgebiet D gemäß Abb. 8.14 – Ermittlung möglicher Strahlenexpositionen aufgrund des Eintretens von A, radiologische Auswirkungen in der Biosphäre, anerkannte Expositionsmodelle . . . . .	379
8.7	Umweltüberwachung und Beweissicherung . . . . .	382
8.8	Safety Case . . . . .	383
8.9	Ausblick . . . . .	384
	Literatur . . . . .	387
<b>9</b>	<b>Umwelt-Monitoring</b> . . . . .	<b>393</b>
9.1	Endlagerprogramm und Monitoring . . . . .	393
9.2	Monitoring in verschiedenen Phasen der Endlagerung . . . . .	400
9.2.1	Monitoring des unverschlossenen Endlagers . . . . .	400
9.2.2	Monitoring des verschlossenen Endlagers . . . . .	407
9.2.3	Monitoring bei oberflächennaher Endlagerung . . . . .	413
9.2.4	Zentrale Datenbank . . . . .	414
9.3	Langzeit-Monitoring von Uran-Tailings ponds und im Deponiebau . . . . .	415
	Literatur . . . . .	417
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>419</b>
	Literatur . . . . .	427
	<b>Glossar</b> . . . . .	<b>429</b>
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>443</b>