

# Langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung von Rückständen und radioaktiven Abfällen – Beitrag zur Diskussion um Lagerung (Endlagerung)

Im Beitrag wird dargestellt, wo radioaktive Abfälle und Rückstände anfallen, wie diese klassifiziert werden, welche Vorschriften und Regeln bei der Entsorgung einzuhalten sind und welche geotechnischen Umweltbauwerke (Endlager) sich eignen, diese Materialien langzeitsicher zu verwahren. Primäres Schutzziel der Endlagerung ist, „dass Übertritte von toxischen, radioaktiven Kontaminanten auf dem Luft-, Wasser- und Gebirgs- (Boden-) pfad in die Biosphäre dauerhaft vermieden bzw. in den Freigrenzen der gesellschaftlich akzeptierten Kontaminationen gehalten werden.“

Die in den beschriebenen Anlagen abgelegten Radionuklidinventare und die Betrachtungszeiträume zur Langzeitsicherheit werden verglichen und gezeigt, dass sich diese standortspezifischen Entsorgungslösungen nicht mit den dort abgelagerten radioaktiven Inventaren begründen lassen. Der Betrachtungszeitraum von  $10^6$  Jahren wird einer kritischen Wertung unterzogen und vorgeschlagen, diesen in zwei Zeitabschnitte (mit unterschiedlichen Voraussagesicherheiten) zu unterteilen. Die Ergebnisse eines speziell ausgelegten Langzeitmonitorings als Bestandteil standortspezifischer Entsorgungslösungen sollen in den Langzeitsicherheitsnachweis einbezogen werden. Ein Modulares Konzept zur Endlagerung von HAW wurde aus der kritischen Wertung zur Langzeitsicherheit abgeleitet, das auch die Module Transmutation, Übergangslagerung und Monitoringsystem enthält. Ein Stiftungsmodell soll die notwendigen Rückstellungen zur Entsorgung der HAW sichern.

**Long-term stable, long-term safe storage of residues and radioactive waste – contribution to discussion to the storage (final storage).** *In this paper it is presented, where radioactive waste and residues occur, how these materials can be classified, which rules and regulations have to be complied with regarding the disposal and which geotechnical environmental constructions (final repositories) are suitable to guarantee a safe long-term disposal of these materials. Primary protection objective is "to permanently prevent the transfer of toxic, radioactive contaminations into the biosphere by air, water or rock path or to keep the amount of contamination within a commonly accepted range".*

*Radionuclide inventories and the given time period considered for long-term safety are compared with. It is shown, that the site-specific disposal solutions cannot be justified by the radioactive inventory deposited there. The given period of  $10^6$  years is critically evaluated. Based on this it is suggested to subdivide this period into two time periods with different prognosis reliabilities. Results of a specially designed long-term monitoring as part of the site-specific waste disposal solution should be considered for the long-term safety proof. A modular concept for the final stor-*

*age of High Active Waste (HAW) is derived based on the critical evaluation of the long-term safety, including transmutation, provisional storage and monitoring module. A foundation model is proposed to guarantee the financial resources required for the disposal of HAW.*

## 1 Einführung

Der vorliegende Beitrag verfolgt das Ziel, die Diskussion um die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle (engl.: High Active Waste – HAW) vor dem Hintergrund des Ausstiegs Deutschlands aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie zur Energiegewinnung zu unterstützen. Die sehr kontrovers geführte Diskussion über die Endlagersuche auf der politischen Ebene bewegt sich in einem verkrusteten Diskussionsraster und blendet fachliche Rahmenbedingungen weitgehend aus. Damit wird der deutschen Gesellschaft nicht annähernd genügend genau beschrieben, worum es in der heftig geführten Diskussion überhaupt geht, welche Ziele erreicht werden sollen, in welchen Grenzen (Zielgebiet) die Suche stattfinden soll, und wer die Kosten bisher dafür getragen hat, und wer sie zukünftig tragen wird.

Die vom Bundestag gemäß Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) eingesetzte „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ wird u. a. zu prüfen haben, ob anstelle einer unverzüglichen Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen andere Möglichkeiten für eine geordnete Entsorgung dieser Abfälle wissenschaftlich untersucht und bis zum Abschluss der Untersuchungen die Abfälle in oberirdischen Zwischenlagern aufbewahrt werden sollen.

In Deutschland ist es bisher nicht gelungen, die gesetzlichen Anforderungen, unter gesetzlichen Vorschriften und technischen Standards für die Errichtung von Anlagen zur langzeitsicheren Verwahrung von radioaktiven Abfällen und Rückständen in einem Regelwerk zusammenzufassen, das für diese Aufgaben dringend erforderlich ist.

Ein Regelwerk sollte auf Kriterien beruhen, die sich aus der langzeitsicheren Verwahrung der verschiedenen Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen aus gesicherten Untersuchungen ableiten lassen und die dann dem Stand von Wissenschaft und Technik nachgeführt

werden. Das Regelwerk sollte weitestgehende Objektivität besitzen. Die Ausführungen hier wollen dazu einen Beitrag leisten.

Den Autoren ist durchaus bewusst, dass ein Regelwerk allerdings auch den jeweiligen gesellschaftlichen Bedingungen unterliegt, in die dessen Ausarbeitung fällt. Damit sind mehr oder weniger große Abweichungen vom Ideal zu erwarten, woraus sich die Notwendigkeit ableitet, dass das Regelwerk von Zeit zu Zeit fortgeschrieben werden sollte. Den nachfolgenden Generationen wird so ein Einfluss auf den Umgang mit den radioaktiven Hinterlassenschaften ihrer Vorfahren gesichert.

Für eine Bewertungsbasis ist es notwendig zu beschreiben, welche radioaktiven Stoffe als Rückstände oder radioaktive Abfälle entsorgt werden müssen, wo diese anfallen und auf welcher gesetzlichen Grundlage die langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung – Lagerung (Endlagerung) – dieser im Sinne der neuen europäischen Richtlinie 2013/59/Euratom radioaktiven Materialien derzeit stattfindet. Dabei sind zwei Kategorien von Stoffen zu unterscheiden (s. Bild 1):

- Radioaktive Abfälle sind radioaktive Stoffe im Sinne von § 2 Abs. 1 Atomgesetz (AtG), die nach § 9a AtG geordnet beseitigt werden müssen. Sie stammen (in der Regel) aus einem strahlenschutzrechtlich oder atomrechtlich genehmigten Umgang, bei dem die Radioaktivität bzw. die davon ausgehende Strahlung zielgerichtet genutzt wurden und die im Teil 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) geregelt sind.
- Rückstände sind Materialien, die in den in Anlage XII Teil A StrlSchV genannten industriellen und bergbaulichen Prozessen anfallen und deren Verwertung oder Beseitigung im Teil 3 StrlSchV geregelt wird. Diese Materialien sind dabei Stoffe, die natürlich vorkommende

Radionuklide enthalten oder mit solchen Stoffen kontaminiert sind.

Beide Kategorien enthalten letztlich radioaktive Stoffe, die nach derzeitigem Stand der Technik nicht mehr genutzt werden können oder wegen politischer Vorgaben nicht mehr genutzt werden dürfen.

Sie stammen aus vier Herkunftsbereichen:

- Bergbau zur Uran-/Thoriumgewinnung als besonderer Teil der Kernenergienutzung,
- Reststoffe aus der technischen Anwendung von radioaktiven Stoffen in Medizin, Industrie und Forschung,
- Reststoffe aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie (im Ausland auch aus der Entwicklung und Herstellung von Kernwaffen), die in Zukunft vor allem als Abfälle aus dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen anfallen werden,
- Rückstände aus bergbaulichen oder industriellen Prozessen mit natürlich vorkommenden Radionukliden (NORM).

Diese vier Bereiche zeichnen sich durch (sehr) unterschiedliche gesetzliche Grundlagen aus, und der momentane Stand der verschiedenen langzeitsicheren Verwahrungsmethoden (Endlagerungen) ist deshalb in hohem Maße verschieden.

In allen vier der vorgenannten Bereiche gibt es Teilmengen, die aufgrund des geringen radioaktiven Gefährdungspotenzials eine strahlenschutzrechtliche Überwachung nicht erfordern und solche, die besondere Anforderungen an die Entsorgung stellen. Die derzeitigen Möglichkeiten zur Entsorgung dieser beiden Kategorien von Abfällen sollen im Folgenden dargestellt und diskutiert werden. Dabei wird insbesondere auf die nötige Langzeit-

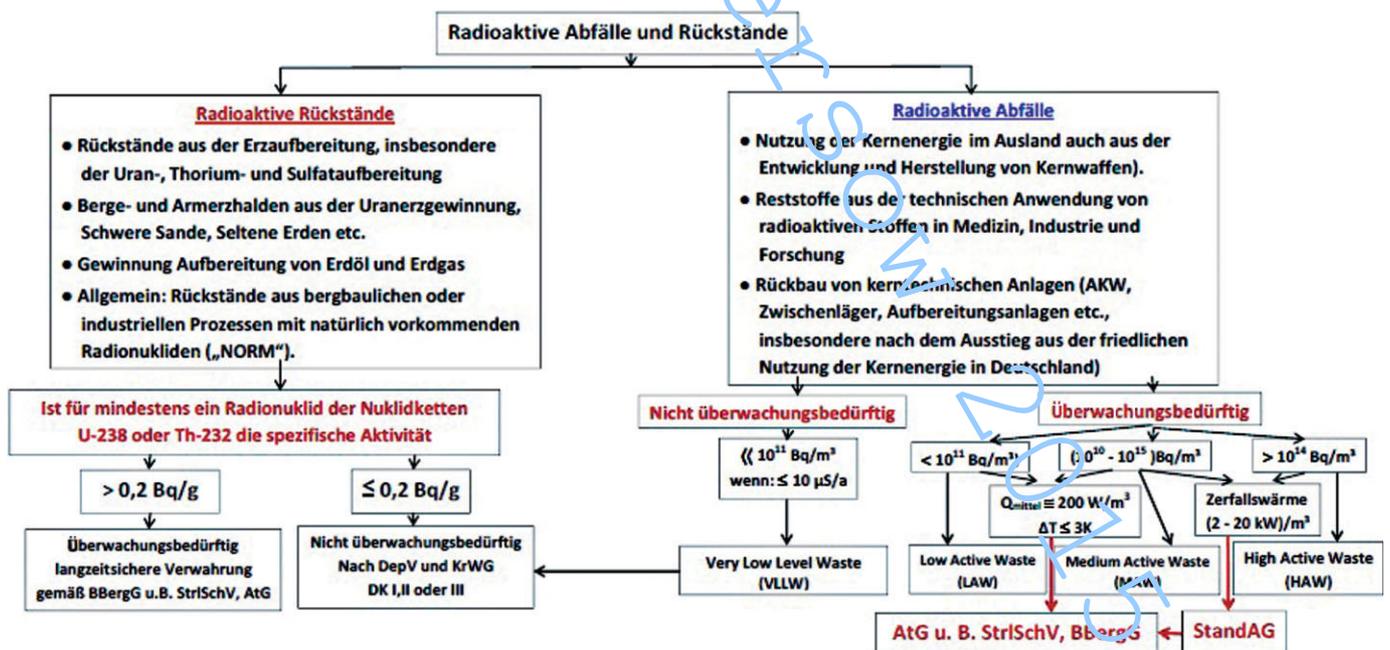


Bild 1. Klassifizierung radioaktiver Abfälle und Rückstände nach spezifischer Aktivität und spezifischer Wärmeleistung (Zum Vergleich: Der Kubikmeter Einheitsboden mit einer Einheitsdichte von 1,6 t/m<sup>3</sup> mit den Radionukliden U-238, spezifische Aktivität 0,04 Bq/g und Th-232, spezifische Aktivität 0,04 Bq/g, enthält ca. 1,6E+6 Bq) [1]

Fig. 1. Classification of radioactive waste and residual materials by specific activity and heat capacity [1]

Stabilität und -sicherheit der Verwahrung und die daraus resultierenden Anforderungen an die geotechnischen Bauwerke eingegangen.

Für die Geotechnik ist es wichtig darzustellen, nach welchem geotechnischen Anforderungsraaster die notwendigen geotechnischen Umweltbauwerke errichtet werden sollen, was der derzeitige Stand der Technik ist, welche Lösungsmöglichkeiten zu erwarten sind bzw. wo sich Wissenslücken auf tun, die noch geschlossen werden müssen. Weiterführende Darlegungen zum Thema sind in [2] zusammengefasst.

Ein zu errichtendes geotechnisches Umweltbauwerk (Endlager) für die langzeitsichere Verwahrung von Rückständen oder radioaktiven Abfällen hat unabhängig von der Art der abzulagernden radioaktiven Stoffe als primäres Schutzziel: „*dass Übertritte von toxischen, radioaktiven Kontaminanten auf dem Luft-, Wasser- und Gebirgs-(Boden-)pfad in die Biosphäre dauerhaft vermieden bzw. in den Freigrenzen der gesellschaftlich akzeptierten Kontaminationen gehalten werden.*“ [3]. Um dieses Schutzziel zu erreichen, sind Bauwerke erforderlich, die aus verschiedenen Barriersystemen bestehen. Als langzeitsicher im engeren Sinne gilt die geologische Tiefenlagerung. Das in Deutschland entwickelte Sicherheitskonzept sieht einen sicheren Einschluss in einem Endlagerbergwerk vor, das mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und den umgebenden sowie überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche die Sicherheit herstellt [4]. Ergänzende Einzelmaßnahmen, wie z. B. die Konzeption der Behälter bei Einlagerung in kristalline Gesteine (Granit) oder die Immobilisierung der einzulagernden radioaktiven Abfälle, z. B. durch Verglasung, können die Sicherheit weiter erhöhen. Die Wirkungskdauer dieser Einzelmaßnahmen in einem langen Betrachtungszeitraum ist derzeit allerdings nicht belegt.

Die primären Anforderungen an ein geotechnisches Umweltbauwerk zur Erreichung der Schutzziele einer langzeitsicheren Verwahrung von Rückständen oder radioaktiven Abfällen betreffen damit folgende Aspekte:

- die Begrenzung der geotechnischen Risiken,
- die Begrenzung der radiologischen und chemisch-toxischen Risiken, insbesondere der Risiken in Hinblick auf eine Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser,
- die Begrenzung der Risiken aus einem ungewollten menschlichen Eindringen in das Endlager.

## 2 Entsorgung als Abfälle nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz

### 2.1 Freigegebene Reststoffe aus genehmigten Tätigkeiten

Radioaktive Reststoffe aus Kernenergie, Medizin, Forschung oder Industrie werden in der Regel zunächst daraufhin überprüft, ob sie als radioaktive Stoffe weiterhin überwacht werden müssen, oder ob sie nur sehr gering radioaktiv sind und daher aus dieser Überwachung freigegeben werden können. Solche freigegebenen Reststoffe sind im Sinne des Atomrechts nicht mehr radioaktiv (obwohl sie eine durchaus messbare physikalische Radioaktivität aufweisen können). Zumeist handelt es sich bei den freigegebenen Stoffen um Bauschutt, Metallschrott und sonstige feste und flüssige Stoffe aus dem Rückbau von Kern-

kraftwerken und Forschungsreinrichtungen, aus Industrieanlagen oder der Medizin.

Die Freigabe radioaktiver Stoffe (§ 29 StrlSchV) kann in Deutschland uneingeschränkt oder zweckgerichtet für einen bestimmten Entsorgungsweg erfolgen (z. B. die Wiederverwertung von Gebäuden oder die Beseitigung auf Abfalldeponien). Nach der Freigabe unterliegen die freigegebenen Materialien keiner weiteren Strahlenschutzüberwachung mehr und sind (soweit sie entsorgt werden müssen) Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG). Die Bedingungen für die Freigabe basieren auf Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Behörde (IAEA) bzw. EU-Richtlinien und sind national in AtG und StrlSchV festgelegt. Radiologisch muss gewährleistet sein, dass die Dosis von Einzelpersonen der Bevölkerung (unter Einschluss der Beschäftigten auf der Deponie bzw. Entsorgungsanlage) unter  $10 \mu\text{Sv}$  ( $0,01 \text{ mSv}$ ) im Kalenderjahr liegt.

Durch den Ausstieg Deutschlands aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie zur Energiegewinnung hat diese Regelung für den Rückbau stillgelegter Atomkraftwerke eine erhebliche Bedeutung. Es werden jährlich immense Mengen nicht überwachungsbedürftiger Abfälle anfallen, die auf überträgigen Deponien beseitigt werden können. Schon jetzt ist absehbar, dass dafür nicht genügend Deponieraum zur Verfügung steht.

### 2.2 Nicht überwachungsbedürftige und entlassene Rückstände

Materialien mit natürlich vorkommenden Radionukliden unterliegen als Rückstände einer strahlenschutzrechtlichen Überwachung, wenn ihre spezifische Aktivität die in Anlage XII Teil B StrlSchV genannten Überwachungsgrenzen übersteigt. Ein Großteil der in Deutschland anfallenden Rückstände hat allerdings so geringe spezifische Aktivitäten, dass er nicht überwacht werden muss und unter Beachtung der Anforderungen des KrWG entsorgt werden kann.

Auch die Materialien, die als überwachungsbedürftige Rückstände einer strahlenschutzrechtlichen Kontrolle unterliegen, können bei Einhaltung eines Dosiswerts von  $1 \text{ mSv}$  im Kalenderjahr nach § 98 StrlSchV aus der Überwachung entlassen und als Abfälle verwertet oder auf Deponien beseitigt werden. Auf dieser Grundlage konnten bisher fast alle überwachungsbedürftigen Rückstände in Deutschland als Abfälle nach KrWG entsorgt werden.

Die Anforderungen an die Langzeitsicherheit der Verwahrung richten sich in diesen Fällen ausschließlich nach abfallrechtlichen Gesichtspunkten und werden vor allem durch die toxischen Eigenschaften der Materialien bestimmt.

## 3 Entsorgung radioaktiver Stoffe unter Atom- bzw. Strahlenschutzrecht

### 3.1 Überwachungsbedürftige Rückstände

Die Hinterlassenschaften des Uranbergbaus in Sachsen und Thüringen enthalten große Mengen an radioaktiv belasteten Materialien. Die langzeitstabile Verwahrung dieser Hinterlassenschaften erfolgt nach geotechnischen Anforderungen, daneben aber auch nach Kriterien des Strah-

**Tabelle 1. Leitnuklide des Radionuklidvektors der größten Wismut Tailings Ponds (das Inventar des Porenwassers ist hier vernachlässigt) [5]**

**Table 1. Reference nuclides of radionuclide vector from largest Wismut Tailings Ponds (the inventory of the pore water is neglected here) [5]**

Tailing Pond	Culmitzsch A	Culmitzsch B	Trünzig A	Trünzig B	Helmsdorf	Dänkriz I
$U_{\text{nat}}$ (TBq)	122	56	38	18	127	25
Ra-226 (TBq)	790	240	130	50	550	40
Gesamtaktivität (TBq)	8.388	2.624	1.452	572	6.008	500
V (Mio. m <sup>3</sup> )	6,10E+01	2,40E+01	1,30E+01	6,00E+00	4,50E+01	5,00E+00

lenschutzes (StrlSchV, HaldAO, VOAS). Das bedeutet, dass Ablagerungen geschaffen werden, die, sofern sie aktuell anfallen würden, als überwachungsbedürftige Rückstände einzustufen wären. Die radiologisch bedeutendsten dieser Ablagerungen sind die Tailings Ponds, die die Rückstände der aufbereiteten Uranerze enthalten. Die wichtigsten langlebigen Radionuklide dieser Tailings Ponds sind die natürlich vorkommenden Radionuklide U-238, U-234, Th-230, Ra-226. Ihre spezifische Aktivität im Tailings-Schlamm kann mit etwa 1 bis 2 Bq/g für die Anfangsglieder der U-238-Zerfallsreihe (bis zum U-234) und mit 6 bis 10 Bq/g für die weiteren Radionuklide der U-238-Reihe angegeben werden. Rechnet man die Tochternuklide dieser Radionuklide mit ein (U-238 bis U-234 = 4 Radionuklide; Th-230 bis Po-210 = 10 Radionuklide und berücksichtigt außerdem noch die U-235-Reihe mit einem Aktivitätsanteil von ca. 4 % bezogen auf die U-238-Reihe, so beträgt die gesamte spezifische Aktivität dieser Rückstände bei einer Trockendichte von 2 t/m<sup>3</sup> ca. 1 bis 2E+08 Bq/m<sup>3</sup>.

Angaben zu den Mengen an Tailings-Material in den durch die Wismut GmbH verwahrten Tailings Ponds der Uranerzverarbeitung sind in Tabelle 1 aufgeführt. In allen diesen Anlagen spielt die Th-232-Reihe in Hinblick auf die radioaktiven Inventare keine Rolle.

### 3.2 Radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Die radioaktiven Abfälle können nach der spezifischen Aktivität klassifiziert werden [6], [7] (s. a. Bild 1 in Abschnitt 1):

- Radioaktive Abfälle mit mittlerer Aktivität (MAW). Als Aktivitätsbereich ist hier von der IAEA  $10^{10}$  bis  $10^{15}$  Bq/m<sup>3</sup> vorgegeben.

- Radioaktive Abfälle mit hoher Aktivität (HAW). Als Aktivitätsbegrenzung ist hier von der IAEA  $> 10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup> vorgegeben.

Die Klassifizierung erfolgt in den einzelnen nationalen Systemen unterschiedlich. Für Endlager wird dies in den Annahmebedingungen geregelt. Im Endlager Schacht Konrad sind die Obergrenzen  $1,5 \cdot 10^{17}$  Bq für  $\alpha$ - und  $5,0 \cdot 10^{18}$  Bq für  $\beta/\gamma$ -Strahler.

Die LAW und MAW stammen, außer aus kerntechnischen Anlagen, auch aus Forschungseinrichtungen und industriellen oder medizinischen Anwendungen radioaktiver Stoffe. Typische Radionuklide in den Inventaren sind H-3, C-14, Co-60, Ni-63, Sr-90, Cs-137, Ra-226, aber auch Aktinide (Uran, Plutonium, Americium).

Auf der Grundlage dieser Klassifikation wurde die Planung für das Endlager Schacht Konrad bearbeitet. Im Laufe des Genehmigungsverfahrens für die Schachanlage Konrad zum Endlager für LAW und MAW war ausschlaggebend, dass man die Zerfallswärme der abzulagernden radioaktiven Materialien und deren Einwirkung auf das Wirtsgestein in den Ablagerungsbereichen mit in die Betrachtung einbezog. Genehmigt wurde die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle mit dem Kriterium, dass die durch die Zerfallswärme verursachte Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins im Mittel  $\Delta T \leq 3$  K nicht überschritten werden darf.

In der allgemeinen Diskussion und in den Genehmigungsverfahren für Endlager zur langzeitsicheren Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird derzeit in Deutschland die Lagerung in tiefen geologischen Schichten, unabhängig von deren Radioaktivität, präferiert. Allerdings ist diese Lösung als Generallösung durchaus umstritten und keineswegs politisch gesichert. Alternative Lösungen sind nach Inkrafttreten des StandAG in Diskussion und wer-

**Tabelle 2. Charakteristische Daten der für die Kritikalitätsrechnungen verwendeten Nuklidinventare [7]**

**Table 2. Characteristic data of the inventory of radionuclides used for calculation of criticality [7]**

Brennelement	Anreicherung % U-235 bzw. % Pu <sub>fiss</sub>	Abbrand GWd/t SM	Abklingzeit/Jahre	U-235 Gew.-%	Pu <sub>fiss</sub> Gew.-%	Pu <sub>total</sub> Gew.-%	U-238 Gew.-%	Sonstige Gew.-%
du40a1e2	3,6 % U-235	40	100	0,78	0,58	0,95	97,53	0,74
du55a1e2	4,4 % U-235	55	100	0,67	0,65	1,14	97,19	1,0

Abbrand: In Gigawatt-Tagen pro Tonne Schwermetall (GWd/t SM); Pu<sub>fiss</sub> (Pu-239 + Pu-241); Pu<sub>total</sub> (Pu-238 + Pu-239 + Pu-240 + Pu-241 + Pu-242 + Am-241)

den einer umfassenden Bewertung unterzogen, ohne dass erkennbar ist, welche Lösung(en) zur langzeitsicheren Entsorgung letztendlich favorisiert wird (werden). Trotz Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie in Deutschland hat diese Diskussion zunächst keine Auswirkungen auf die Endlagerung von LAW und MAW, da Schacht Konrad in der Umrüstungsphase ist. Langfristig können sich aber neue Herausforderungen ergeben, da die prognostizierten Mengen radioaktiver Abfälle derzeit stark in Diskussion stehen.

### 3.3 Hoch radioaktiv wärmeentwickelnde Abfälle (HAW)

Zu den hoch radioaktiven Abfällen zählen Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken, und verglaste Abfälle der Wiederaufarbeitung (der Anteil verglaster Abfälle aus der WAA ist nicht zu vernachlässigen, s. a. Abschnitt 7.1.2). Prognosen über das zu erwartende Abfallaufkommen gingen 2011 noch von einem kumulierten Volumen bis 2040 von ca. 29.030 m<sup>3</sup> aus (Prognose BfS, Stand 23.9.2011). Dem wurde eine Gesamtaktivität von ca.  $6,2 \cdot 10^{19}$  Bq zum Bezugszeitraum 2075 zugeordnet. Eine aktuelle Schätzung [8] zum Stichtag 31.12.2013 gab die vorliegende Menge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen (HAW) mit ca.  $3E+20$  Bq an und prognostizierte bis 2025 eine Verdoppelung der Menge. Diese Abweichung von der bisherigen Bilanzierung hat keine Auswirkungen auf die Aussagen zur Endlagerauslegung, da diese sich an allgemeiner und objektiven Kriterien orientieren. Es ist davon auszugehen, dass die Bilanzierung bis zur Auslegung eines Endlagers für HAW permanent fortgeschrieben wird. Die vorläufige Sicherheitsanalyse von Gorleben [9] [10] hat ein Abfallvolumen unter Annahme einer Entsorgung in Behältern, die für Salzgestein entwickelt wurden, mit 27.000 m<sup>3</sup> zugrunde gelegt.

Das Nuklidinventar abgebrannter Brennstäbe (s. Tabelle 6 in Abschnitt 5.4) hängt ab:

- vom Reaktortyp,
- von der Ausgangsanreicherung von U-235 bzw.  $Pu_{\text{fiss}}$  und
- dem Abbrand.

Derzeit werden Brennelemente mit über 4 % U-235 (Anreicherung) verbrannt. Diese gelten erst mit weniger als 0,5 % U-235 als abgebrannt.

Die abgebrannten Brennelemente werden nach derzeitiger Technologie in Castorbehältern in ein Zwischenlager verbracht. Dies kann aber erst dann geschehen, wenn die abgebrannten Brennelemente auf eine Temperatur abgekühlt sind, die einen Transport in Castorbehältern möglich macht.

Im Radionuklidvektor abgebrannter Brennstäbe existieren Radionuklide mit z. T. sehr langen Halbwertszeiten. Alphastrahler, wie Np-237, Pu-239, Pu-240, Cm-245, Cm-246 und Cm-248, sind in Tabelle 2, Abschnitt 3.2 unter Sonstige erfasst. Daneben gibt es aber auch langlebige Betastrahler (s. Tabelle 3b). Bei der direkten Endlagerung wird daher ein Sicherheitsnachweis der Lagerung über sehr lange Zeiträume, gesetzlich verankert über eine Milliarde Jahre, verlangt.

Der Anteil der Spaltprodukte im Inventar ist in den Tabellen 3a und 3b zusammengefasst. Die ebenfalls ange-

Tabelle 3a. Spaltprodukte von Brennelementen [11]; 4 % U-235-Anreicherung bei Beladung, Abbrand 45 GWd/t SM

Table 3a. Fission products of fuel elements, [11], 4% U-235 enrichment at the time of the loading, burn-up 45 GWd/t SM

#### Spaltprodukte mittlerer Lebensdauer

Spaltprodukt	T <sub>1/2</sub> in a	Q in keV	Zerfall durch
Eu-155	4,76	252	βγ
Kr-85	10,76	687	βγ
Cd-113m	14,10	316	β
Sr-90	28,90	2.826	β
Cs-137	30,23	1.176	βγ
Sn-121m	43,90	390	βγ
Sm-151	90,00	77	β

Q freigesetzte Energie (1 keV =  $1,6 \cdot 10^{-16}$  J)

Tabelle 3b. Spaltprodukte von Brennelementen [11]; 4 % U-235-Anreicherung bei Beladung, Abbrand 45 GWd/t SM

Table 3b. Fission products of fuel elements, [11], 4 % U-235 enrichment at the time of the loading, burn-up 45 GWd/t SM

#### Spaltprodukte langer Lebensdauer

Spaltprodukt	T <sub>1/2</sub> in 10 <sup>6</sup> a	Q in keV	Zerfall durch
Tc-99	0,211	294	β
Sn-126	0,230	4.050	βγ
Se-79	0,327	151	β
Zr-93	1,53	91	βγ
Cs-135	2,3	269	β
Pd-107	6,5	33	β
I-129	15,7	194	βγ

Q freigesetzte Energie (1 keV =  $1,6 \cdot 10^{-16}$  J)

gebene Zerfallsenergie gibt einen Hinweis auf die Wärme-freisetzung.

Bei der langzeitsicheren Entsorgung der HAW ist wesentlich, dass diese wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind. Das Spektrum der Zerfallswärme wird in [1] mit 2 bis 20 kW/m<sup>3</sup> beschrieben. Die Einwirkungen auf das Wirtsgestein sind erheblich und bestimmendes Kriterium für die Standortwahl. Allerdings besteht auch die Möglichkeit der Behandlung der HAW mit dem Ergebnis, dass sowohl die Aktivität als auch die Zerfallswärme wesentlich abgesenkt werden können (s. a. Abschnitt 7.2). Dies könnte der Diskussion zur Findung des bestmöglichen Entsorgungskonzepts für die HAW eine ganz andere, gesellschaftlich akzeptable Richtung geben.

### 3.4 Allgemeine Anforderung an die Entsorgung radioaktiver Abfälle und Rückstände

Die Festlegung eines Standorts, an dem ein geotechnisches Bauwerk zur abschließenden Entsorgung radioakti-

ver Abfälle oder nicht aus der Strahlenschutzüberwachung entlassener Rückstände errichtet werden soll, muss nach objektiven, transparenten Kriterien erfolgen. Nach der Standortgenehmigung wird dort ein geotechnisches Umweltbauwerk errichtet, mit dem eine sichere, langzeitstabile Verwahrung der radioaktiven Rückstände und Abfälle erreicht und langfristig garantiert wird.

Für die verschiedenen Klassen radioaktiven Abfalls und für Rückstände wird der Zeitraum, innerhalb dessen die Funktionalität des geotechnischen Umweltbauwerks mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit garantiert werden muss, sehr unterschiedlich vorgeschrieben. Während für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (auch der mit niedriger oder mittlerer Aktivität) ein Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren festgeschrieben ist, sind die Nachweise für Dämme und ihre Teilböschungen bei Tailings Ponds gemäß DIN 19700-1 und -15, DIN 4084 sowie ICOLD-Bulletins und mitgeltende Vorschriften (Strahlenschutz, VOAS, HaldAO) zu führen. Für die folgenden Einzelnachweise eines Langzeitsicherheitsnachweises sind Zeiträume definiert:

- Langzeitstandsicherheitsnachweis für Dämme (BI-SHOP, JANBU) mit Nachweis zur Langzeitstabilität der multifunktionalen Abdeckung für 1.000 Jahre,
- dynamischer Langzeitstandsicherheitsnachweis bei Betriebserdbeben (OBE), Nachweis für BtE 500 Jahre,
- dynamischer Langzeitstandsicherheitsnachweis bei Sicherheitserdbeben (MCE), Nachweis für 2.500 Jahre,
- hydraulische Sicherheit/hydraulischer Grundbruch, 1.000 Jahre.

Nach DIN 19700-10 beträgt für Betriebserdbeben (BtE)/Operating Basis Earthquakes (OBE) die Wiederkehrperiode 500 Jahre; für Bemessungserdbeben (BmE)/Maximum Considered Earthquakes (MCE) und die Erdbebenwirkung am jeweiligen Standort beträgt die Wiederkehrperiode rechnerisch 2.475 Jahre.

#### 4 Gesetzlicher Rahmen für die langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung – Lagerung (Endlagerung) von Rückständen und radioaktiven Abfällen in Deutschland

##### 4.1 Verwahrung von Rückstandsspeichern aus der Uranerzaufbereitung

Trotz fehlender Lösungen in Hinblick auf eine geregelte Entsorgung radioaktiver Stoffe im Sinne des AtG gibt es in Deutschland große Ablagerungen, die nach Kriterien der StrlSchV als radioaktive Stoffe zu charakterisieren sind. Es handelt sich hierbei um die immensen Rückstände des Uranbergbaus vor allem in Sachsen und in Thüringen, insbesondere die sogenannten industriellen Absetzanlagen der SDAG Wismut (Tailings Ponds) aus der Uranerzaufbereitung (Bild 2).

Die Ablagerungsstandorte für Rückstände aus der Uranerzaufbereitung der SDAG Wismut wurden nach Gesichtspunkten ausgewählt und errichtet, die nicht dem (aktuellen) Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Diese Tailings Ponds werden derzeit auf der Grundlage zugelassener Abschlussbetriebspläne nach Bundesberggesetz (BBergG) mit erheblichem Aufwand langzeitsicher verwahrt. Die dadurch entstehenden geotechnischen



Bild 2. Tailings Ponds der SDAG Wismut 1992, Culmützsch A und B [5]

Fig. 2. Tailings Ponds of SDAG Wismut in 1992, Culmützsch A and B [5]

Umweltbauwerke können als Bezug genutzt werden, an denen moderne Anforderungen an eine langzeitsichere Verwahrung radioaktiver Stoffe gespiegelt und bewertet werden können [3]. Dies trifft auch auf das installierte Monitoringsystem, eingeschlossen das Langzeitmonitoring und die Umgebungsüberwachung, zu, welches bei der Endlagerplanung bisher völlig ausgeblendet wurde.

Das BBergG schreibt ein Planfeststellungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfungen für die Verwahrung der Tailings Ponds vor. Damit war gesichert, dass für die langzeitsichere Verwahrung dieser Rückstandsspeicher jeweils ein standortgerechtes VerwahrungsmodeLL entwickelt und zugelassen werden würde. Die strahlenschutzrechtlichen Zulassungskriterien hatten sich an den internationalen Erfahrungen, an den Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Behörde (IAEA) bzw. EU-Richtlinien zu orientieren und diese in nationales Recht zu implementieren. Bei der Sanierung gab es neben den fehlenden Erfahrungen bei der langzeitsicheren Verwahrung dieser gewaltigen Rückstände auch zur Gesetzeslage erheblichen Klärungsbedarf, der bis heute nicht vollständig gedeckt ist. Den Prozess kann man mit Learning by Doing bezeichnen.

##### 4.2 Verwahrung von radioaktiven Abfällen in Endlagern

###### 4.2.1 Niedrig bis mittel radioaktive Abfälle

Für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (LAW, MAW) gelten erheblich abweichende gesetzliche Vorschriften gegenüber der langzeitstabilen, langzeitsicheren Verwahrung von Rückstandsspeichern aus der Uranerzaufbereitung. In Deutschland ist durch § 9a Abs. 1 AtG vorgeschrieben, dass Reststoffe aus kerntechnischen Anlagen, die nicht schadlos verwertet werden können, als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden (direkte Endlagerung). Für die Endlagerung errichtet der Bund die notwendigen Anlagen (Endlager). Die Umweltauswirkungen der Endlagerung wurden bei den beiden in einem Genehmigungsverfahren nach AtG beantragten Endlagern ERAM (Antrag auf Still-

legung) und Schacht Konrad (Antrag auf Zulassung zur Endlagerung) umfassend geprüft. Insbesondere hinsichtlich der Sicherheitskriterien und der Öffentlichkeitsbeteiligung im Planfeststellungsverfahren sind die Unterschiede gegenüber der Verwahrung von Rückstandsspeichern aus der Uranerzaufbereitung gravierend.

Im Unterschied zur Errichtung von Anlagen zur Erzeugung oder zur Spaltung von Kernbrennstoffen oder zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe, bei denen die zu prüfenden Inhalte eines Genehmigungsverfahrens in der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung (AtVfV) [12] detaillierter festgelegt sind, sind für die Endlagerung die inhaltlichen Anforderungen an ein Verfahren nicht gesetzlich geregelt, sondern sind im Einzelfall festzulegen. Kein Teil des Planfeststellungsverfahrens beinhaltet die Prüfung auf die Zulässigkeit des Vorhabens nach den Vorschriften des Berg- und Tiefspeicherrechts. Hierüber entscheidet die dafür sonst zuständige Behörde (§ 9b (5) Nr. 3 AtG).

Detailliertere Anforderungen an die radiologische Langzeitsicherheit eines Endlagers sind nur im untergesetzlichen Regelwerk festgelegt. Die Anforderungen in diesem Regelwerk wurden seit den 1980er-Jahren immer wieder erhöht. So legte das Bundesministerium des Inneren (BMI) 1983 einen Planungsrichtwert von 0,3 mSv jährliche Strahlenexposition für die langfristige Sicherheit eines Endlagers zugrunde [13], der sich an den geltenden Dosiswerten zum Schutz der allgemeinen Bevölkerung orientierte. Die Reaktorsicherheits- (RSK) und die Strahlenschutzkommission (SSK) waren 1988 in ihrer gemeinsamen Stellungnahme [14] der Ansicht, dass der zu fordernde Nachweis der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle durch eine Sicherheitsanalyse für den Zeitraum von etwa 10.000 Jahren zu führen ist. Für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle wurden die Festlegungen des BMI aus 1983 [13] mit den Sicherheitskriterien des BMU [4] aufgehoben und weitergeführt.

Durch das im Jahr 2013 verabschiedete Standortauswahlgesetz (StandAG) wird für die Entsorgung radioaktiver Abfälle eine Abkehr von der Fokussierung auf ein Endlager in tiefen geologischen Horizonten vorgenommen. Für die Langzeitsicherheit schreibt dieses Gesetz den Betrachtungszeitraum mit 1 Mio. Jahren erstmals verbindlich fest. Allerdings sind die nachzuweisenden strahlenschutzfachlichen Anforderungen für den Nachweiszeitraum auf der Ebene gesetzlicher Regelungen noch nicht spezifiziert.

Für niedrig bis mittel radioaktive Abfälle entfaltet dieses Gesetz zunächst keine Wirkung, da das Endlager Schacht Konrad für diese Abfälle gemäß vorliegendem Planfeststellungsbeschluss in der Errichtungsphase ist (s. a. Abschnitt 5.3). Inwieweit sich aus den Mengenmehrungen der zu entsorgenden LAW und MAW (s. Abschnitt 5) ein Bedarf an einem weiteren Endlager ergibt, ist derzeit nicht absehbar.

#### 4.2.2 Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen

Zunächst gelten für die hoch radioaktiven Abfälle (HAW) die gleichen gesetzlichen Grundlagen wie für die niedrig bis mittel radioaktiven Abfälle (LAW, MAW). Die Anforderungen an die Langzeitsicherheit bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle wurden bisher vor allem im untergesetzlichen Regelwerk beschrieben. In

einer Veröffentlichung des BMU [4] wird gefordert: „Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann. Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist ... eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen.“

Diese letztlich sehr hohen Anforderungen beeinflussen den Prozess der Suche und Auswahl eines Standorts für ein Lager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, wie sie vom StandAG umrissen worden ist, in erheblichem Maße. Um den Prozess der Standortsuche zu strukturieren und die Auswahlkriterien und Mindestanforderungen für die Errichtung eines Endlagers wissenschaftlich und transparent zu begründen, wurde im StandAG die Bildung einer Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe verankert, die entsprechend dem StandAG bis spätestens Mitte 2016 einen Bericht vorlegen wird, in dem die für das Standortauswahlverfahren relevanten Grundsatzfragen bearbeitet wurden. Dazu gehören insbesondere die Entwicklung von Auswahlkriterien und Mindestanforderungen für das eigentliche Auswahlverfahren, das nach Abschluss der Kommissionsarbeit beginnen soll.

## 5 Endlager für radioaktive Abfälle

### 5.1 Schachanlage Asse II

In dem ehemaligen Salzbergwerk Asse II wurde in den 1960er-Jahren die Einlagerung von niedrig bis mittel aktiven Abfällen behördlich genehmigt. Die Einlagerung endete bereits 1978. 125.787 Fässer mit schwach und mittel radioaktivem Abfall lagern auf verschiedenen Sohlen in Kammern. Die Schachanlage Asse (s. Bild 3), ist zwar inzwischen als Anlage nach § 9a AtG eingestuft, sie ist aber kein Endlager.

Für die endgültige Verwahrung der radioaktiven Abfälle wurde drei Optionen ausgearbeitet und geprüft:

- die Verwahrung der radioaktiven Abfälle vor Ort (Option Vollerfüllung),
- die Rückholung der Abfälle und spätere Verbringung in ein Endlager (Option Rückholung) und
- die Verbringung der Abfälle auf tiefere, neu aufzufahrende Sohlen (Option Umlagerung).

Durch das BfS wurde die Option, Rückholung der Abfälle, als einzige Option, mit der die Langzeitsicherheit nach derzeitiger Kenntnis gewährleistet werden kann, favorisiert. Durch den Bundestag wurde daraufhin die Umsetzung dieser Option durch eine Änderung des AtG gesetzlich festgeschrieben, wobei ein Abweichen von dieser Vorgabe nur dann möglich ist, wenn es aus Gründen der Bergsicherheit oder des Strahlenschutzes nicht vertretbar ist, die gesetzliche Anforderungen umzusetzen.

Die Kosten für den Gesamtprozess trägt der Bund. Diese können sich nach seriösen Schätzungen je nach Option auf bis zu 6 Mrd. Euro summieren, wobei völlig unklar ist, welche Kosten mit einer späteren Endlagerung verbunden werden, da trotz der vorläufigen Benennung von Schacht Konrad als eine Option im Entwurf des Na-



Bild 3: Schachtanlage Asse II; Maschinenhaus (links); Faktenerhebung, Bohransatzpunkt mit Preventer (rechts); Fotos: M. Lersow

Fig. 3. Shaft plant Asse II, left: power house; right: fact finding, drilling starting point with preventer; photos: M. Lersow

tionalen Entsorgungsprogramms [15] keine konkreten Bedingungen der Endlagerung absehbar sind.

## 5.2 ERA Morsleben

Beim ERA Morsleben (ERAM) handelt es sich um ein ehemaliges Kali- und Steinsalzbergwerk, das in der ehemaligen DDR als Endlager genehmigt worden war.

Im ERA Morsleben wurden zwischen 1974 und 1998 insgesamt 36.754 m<sup>3</sup> radioaktive Abfälle und 6.621 umschlossene Strahlenquellen auf verschiedenen Sohlen und in verschiedenen Grubenfeldern abgelegt [16] (s. Bild 4).

Die Abfälle stammen zu einem Teil aus der ehemaligen DDR (ca. 14.500 m<sup>3</sup>, eingelagert bis 1991) und aus der Bundesrepublik Deutschland (ca. 22.300 m<sup>3</sup>, eingelagert von 1994 bis 1998). Die Kosten für den Stilllegungsprozess (ca. 3 Mrd. Euro) trägt der Bund. Die Einnahmen für Einlagerungen nach der Wiedervereinigung bis 1998 können gegengerechnet werden. Eine Umlage der Kosten, wie teilweise auch über Einwendungen im Planfeststellungsverfahren gefordert wird, wird sich aus zwei Sachverhalten rechtlich nicht durchsetzen lassen. Zum einen lag eine Dauergenehmigung für die Einlagerung im ERAM vor, die 2001 unwiderruflich vom Bund zurückgenommen wurde, zum anderen wurden auf der Grundlage dieser Dauergenehmigung Einlagerungsgebühren generiert, die erstens hätten so kalkuliert werden müssen, dass sie kostendeckend sind, und zweitens sind die eingenommenen Gebühren für Einlagerungen bis zur Deutschen Einheit gemäß Einigungsvertrag für den Bund verloren gegangen und dürfen nicht umgelegt werden. Für den Prozess der Deutschen Einheit hat der Bund außerdem einen Solidaritätszuschlag erhoben, der auch für solche Aufgaben Verwendung finden sollte.

## 5.3 Schachtanlage Konrad/Endlager Konrad

Der Schacht Konrad ist ein stillgelegtes Eisenerz-Bergwerk in Salzgitter/Bleckenstedt. Es wurde als geeigneter Standort für die langzeitsichere Verwahrung von nicht wärmeentwickelnden (die durch die Zerfallswärme verursachte Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins darf im Mittel  $\Delta T \leq 3$  K nicht überschreiten) radioaktiven Abfällen

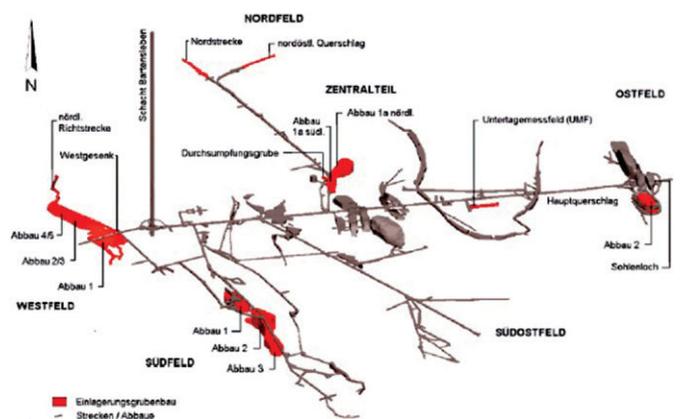


Bild 4. Übersicht Einlagerungsbereiche im ERAM, Quelle BfS

Fig. 4. Overview storage areas in the ERAM, source: Federal Office for Radiation Protection (BfS)

ausgewählt. Mit Planfeststellungsbeschluss vom 22. Mai 2002 wurde die Einlagerung von maximal 303.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung genehmigt. Mit Urteil vom 26. März 2007 wurde diese Entscheidung (Planfeststellungsbescheid) für Schacht Konrad letztinstanzlich bestätigt. Die konditionierten Gebinde sollen in Einlagerungskammern geordnet abgelegt werden, dabei bilden mehrere Einlagerungskammern ein Einlagerungsfeld. Für das Auffahren von Einlagerungsfeldern (theoretisch bis neun Stück) stehen sechs Hauptsohlen in 800, 850, 1.000, 1.100, 1.200 und 1.300 m zur Verfügung. Die atomrechtliche Anlage Schacht Konrad wird voraussichtlich 2022 (sehr unsicher) annahmefähig sein (nach Angabe des Bundesamtes für Strahlenschutz) [17].

Die Einlagerungsfelder liegen im Bereich der Eisenerz-Lagerstätte. Die Grube ist außergewöhnlich trocken. Die über den Einlagerungsfeldern liegenden Deckschichten aus Tonsteinen bilden effektive natürliche Barrieren gegen Übertritte von Radioaktivität in die Biosphäre. Das BfS beschreibt in [17] die Standortsituation wie folgt: „Das Eisenerzvorkommen tritt nirgends bis an die Erdoberfläche und wird großflächig von einer bis zu 400 Meter dicken Schicht aus tonigen Gesteinen der Unterkreide überdeckt. Darüber liegen mehrere hundert

Meter mächtige Kalksteine der Oberkreide. Die Tonsteine bilden eine wirksame natürliche (geologische) Barriere zum Grundwasser und damit zur Biosphäre.“

Schacht Konrad ist eine Anlage des Bundes. Die Eigentümerfunktion ist auf das BfS übertragen worden. Die Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE) hat vom BfS den Auftrag erhalten, Schacht Konrad gemäß Planfeststellungsbeschluss umzurüsten. Die Arbeiten sind im Gange. Nach seriösen Schätzungen werden sich die Kosten, einschließlich Offenhaltungsbetrieb, auf ca. 4 Mrd. Euro summieren. Das BfS oder das von ihm beauftragte Unternehmen wird die radioaktiven Abfälle gegen Gebühr annehmen. Bei entsprechender Kostenkalkulation könnte das Endlager Schacht Konrad kostendeckend arbeiten.

Da das Endlager Schacht Konrad aber bisher nicht fertiggestellt ist und damit auch keine radioaktiven Abfälle dort lagern, werden sich die weiteren Ausführungen hier auf das ERA Morsleben und die Schichtanlage Asse II beziehen. Aus Sicht der Autoren ist es angeraten, das Endlager Schacht Konrad mit einem hier beschriebenen Monitoringsystem (Langzeitmonitoring und Umweltüberwachung) auszustatten [2].

#### 5.4 Vergleichende Betrachtungen zu Radionuklidinventaren

Wie zuvor beschrieben, gibt es in Deutschland derzeit zwei Standorte (Asse, ERAM), in denen niedrig und mittel aktive (LAW und MAW) Abfälle in geologisch tiefen Schichten abgelegt sind. Daneben existieren große Anlagen mit Rückständen der ehemaligen Uranerzaufbereitung, in denen ebenfalls Materialien nach Strahlenschutz Gesichtspunkten verwahrt werden. Für die Zukunft besteht die Aufgabe, auch für die in Landessammelstellen verwahrten LAW und MAW sowie für die HAW aus der Kernkraftnutzung, langzeitsichere Verwahrungsmöglichkeiten zu finden.

Obwohl die rechtlichen Rahmenbedingungen für diese Fälle sehr unterschiedlich sind, ist es zur Veranschaulichung der Problemstellungen durchaus nützlich, diese mit den vorgenannten Abfallkategorien in vorhandenen radioaktiven Inventaren zu vergleichen. Ein solcher

Vergleich stößt allerdings auf Schwierigkeiten, da in den Abfallkategorien sehr unterschiedliche Radionuklide dominieren. Da die physikalische Größe Aktivität zwar gut messbar ist, aber wenig aussagekräftig in Hinblick auf die potenziell damit verbundenen Gefährdungen, werden zum Vergleich von Inventaren unterschiedliche Kenngrößen konstruiert. So können z. B. die rechnerischen Dosen ermittelt werden, die bei einem vollständigen Verzehr der Abfälle (Ingestion) resultieren. Die so erhaltenen Dosen sind völlig fiktiv und können durch Umrechnung auf Krebstote manipulativ missbraucht werden. Daher wird hier ein anderer Indikator benutzt. Indem die Aktivitätsinventare  $A_i$  für jedes Radionuklid  $i$  auf die Freigrenze der Gesamtaktivität ( $FG_i$ ) des jeweiligen Radionuklids lt. StrlSchV (Anlage III Tabelle 1 Spalte 2) bezogen werden, ergibt sich eine dimensionslose Verhältniszahl. Die Summe dieser Verhältniszahlen über alle Radionuklide ergibt einen dimensionslosen Aktivitätsindex, der geeignet ist, das Gesamtinventar von Aktivitätsinventaren mit unterschiedlicher Zusammensetzung zu charakterisieren. Die radiologische Gefährlichkeit von Einzelnucliden ist dabei über die jeweilige Freigrenze der Einzelnuclide orientierend berücksichtigt.

Für die Beurteilung der Radioaktivität in Hinblick auf die Langzeitsicherheit bei der Endlagerung wäre darüber hinaus eine Wichtung nach hydrochemischer Mobilität sinnvoll. Da es für eine solche Wichtung aber keine verbindlichen Datensätze gibt, sind Indikatoren, die hydrochemische Effekte berücksichtigen, derzeit subjektiv beeinflusst und daher für generelle Vergleiche wenig geeignet.

Eine Berechnung von Aktivitätsindikatoren mit dem o. g. Ansatz für die Inventare der Wismut Tailings Ponds (s. Tabelle 1 in Abschnitt 1) enthält Tabelle 4. Um aus den Daten der Tabelle 1 in Abschnitt 1 einen normierten Aktivitätsindex abzuleiten, wurde berücksichtigt, dass sich  $U_{nat}$  hinsichtlich der Aktivitäten wie folgt zusammensetzt:  $^{238}U/^{234}U = 1,0$ ,  $^{235}U/^{238}U = 0,046$ . Außerdem gilt für die Tochternuclide des Urans, dass  $^{230}Th/^{226}Ra$  ca. 1 ist und  $^{231}Pa$  und  $^{227}Ac$  ca. 0,046 der  $^{230}Th$ -Aktivität besitzen. Mit diesen Angaben ergeben sich die normierten Radionuklidinventare in Tabelle 4.

Tabelle 4. Radionuklidinventare von Wismut Tailings Ponds normiert auf die Freigrenzen (FGi) [3]

Table 4. Inventories of radionuclides of Wismut Tailings Ponds normalized to the exemption limits (FGi), [3]

Tailings Pond	Culmitzsch A	Culmitzsch B	Trünzig A	Trünzig B	Helmsdorf	Dänkriz I
	Ai/FGi	Ai/FGi	Ai/FGi	Ai/FGi	Ai/FGi	Ai/FGi
U-238+	1,22E+10	5,60E+09	3,80E+09	1,80E+09	1,27E+10	2,50E+09
U-234	1,22E+10	5,60E+09	3,80E+09	1,80E+09	1,27E+10	2,50E+09
Th-230	7,90E+10	2,40E+10	1,30E+10	5,00E+09	5,50E+10	4,00E+09
Ra-226++	7,90E+10	2,40E+10	1,30E+10	5,00E+09	5,50E+10	4,00E+09
U-235+	5,56E+08	2,55E+08	1,73E+08	8,21E+07	5,79E+08	1,14E+08
Pa-231	3,60E+10	1,09E+10	5,93E+09	2,28E+09	2,51E+10	1,82E+09
Ac-227+	3,60E+10	1,09E+10	5,93E+09	2,28E+09	2,51E+10	1,82E+09
Ra-223+	3,60E+08	1,09E+08	5,93E+07	2,28E+07	2,51E+08	1,82E+07
Summe	2,55E+11	8,15E+10	4,57E+10	1,83E+10	1,86E+11	1,68E+10

**Tabelle 5. Zusammenstellung der Gesamtaktivität  $A_i$  und der Werte des Aktivitätsindikators  $A_i/FG_i$  (FG – Freigrenze nach Anlage III Tabelle 1 Sp. 2 StrlSchV) für die radiologisch wichtigsten Radionuklide im Inventar der Schachanlage Asse II und im Endlager Morsleben [18] [19]**

**Table 5. Survey of the total activity  $A_i$  and of the values of the indicator of activity  $A_i/FG_i$  (FG – exemption limit in Appendix III Table 1 column 2 StrlSchV.) for the radiologically most important radionuclides in the inventory of the Asse II mine and the Morsleben repository [18], [19]**

			Asse II (01.01.2003)		ERAM (30.06.2005)	
	HWZ	FGi	Ai	Ai/FGi	Ai	Ai/FGi
	[a]	[Bq]	[Bq]		[Bq]	
Cs-137	30,1	1,00E+04	5,56E+14	5,56E+10	1,40E+14	1,40E+10
Sr-90	28,5	1,00E+04	3,25E+14	3,25E+10	5,90E+12	5,90E+08
Pu-240	6.600	1,00E+03	2,22E+13	2,22E+10	6,60E+10	6,60E+07
Pu-241	14,4	1,00E+05	1,05E+15	1,05E+10	k.A.	
Am-241	432,6	1,00E+04	9,58E+13	9,58E+09	2,20E+11	2,20E+07
Pu-238	87,7	1,00E+04	3,65E+13	3,65E+09	k.A.	
Pu-239	24.000	1,00E+04	1,92E+13	1,92E+09	6,80E+10	6,80E+06
Co-60	5,3	1,00E+05	1,29E+14	1,29E+09	2,50E+14	2,50E+09
Cm-244	18,1	1,00E+04	1,89E+12	1,89E+08	6,60E+09	6,60E+05
U-234	250.000	1,00E+04	1,33E+12	1,33E+08	1,10E+09	1,10E+05
U-238	4,40E+09	1,00E+04	1,26E+12	1,26E+08	4,30E+08	4,30E+04
Ra-226	1.600	1,00E+04	2,00E+11	2,00E+07	3,90E+11	3,90E+07
Ni-63	100	1,00E+08	7,52E+14	7,52E+06	1,80E+13	1,80E+05
C-14	5.700	1,00E+07	3,85E+12	3,85E+05	3,40E+12	3,40E+05
Summe			3,00E+15	1,38E+11	4,21E+14	1,72E+10

In Tabelle 5 sind Aktivitätsindikatoren für die Asse und das ERAM auf der Basis der veröffentlichten Angaben zu den Radionuklidinventaren der Asse [18] und ERAM [16] dargestellt. Die Daten zeigen, dass in der Schachanlage Asse ein insgesamt höheres Radionuklidinventar eingelagert wurde, als im genehmigten Endlager Morsleben. Bezogen auf den hier errechneten Aktivitätsindex ist das Inventar der Asse mit  $1,38E+11$  um fast das Zehnfache größer als das des ERAM ( $1,72E+10$ ). Dieser Unterschied hat sich bereits zum Stichtag 31.12.2013 auf das 25Fache vergrößert [8]. Streicht man die Radionuklide aus den Bilanzen heraus, die weniger als 100 Jahre Halbwertszeit haben (s. Spalte HWZ ( $T_{1/2}$ ) in Tabelle 5) und die daher nach 1.000 Jahren schon zerfallen sind, dann reduziert sich der für Langzeitbetrachtungen relevante Aktivitätsindex des Inventars in der Asse auf  $3,4E+10$  (ca. 25 % des Werts lt. Tabelle 1 in Abschnitt 1) und der für das ERAM auf  $1,3E+08$  (ca. 0,8 % des Werts lt. Tabelle 5).

Die Tabelle 5 macht deutlich, dass die nach diesem einfachen radiologischen Indikator bewerteten Inventare der Wismut Tailings Ponds und die der Asse vergleichbar sind. Unterschiede gibt es aber 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. Für Langzeitaussagen ist außerdem wichtig, dass die Aktivität von Tailings in einem Zeitraum von 1.000 Jahren sich kaum verändert (das Radionuklid Th-230 hat eine Halbwertszeit von 80.000 Jahren).

Analog zu Tabelle 5 sind in Tabelle 6 Daten von abgebrannten Brennelementen von Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR, SWR) und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V und CSD-C) zum Ende der Betriebsphase des Endlagers (hier unterstellt 2075) nach [20] ausgewertet.

Der Zeitpunkt 2075 stellt bei einer angenommenen Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2035 und einer Betriebszeit von 40 Jahren den frühestmöglichen Zeitpunkt für den Abschluss der Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in einem Endlager in Deutschland dar. Die in [20] aufgeführten Angaben zu den Inventaren der abgebrannten DWR- und SWR-Brennelemente basieren auf Abbränden von 55 bzw. 50 GWd/tSM (Gigawatttage pro Tonne Schwermetall). Die Angaben zu den Inventaren der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung basieren auf Abbrand- und Aktivierungsrechnungen für einen Abbrand von 33 GWd/tSM (Uranoxid-Brennstoff mit einer Anreicherung von 3,5 % im Uran-235) sowie unterstellten Abtrennfaktoren für Uran von 0,998 und für Plutonium von 0,994 innerhalb des Wiederaufarbeitungsprozesses. Neuere Untersuchungen zu gemessenen Inventaren an verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitungsanlage (WAA) in La Hague [20] zeigen, dass die realen mit den berechneten Inventaren nicht immer übereinstimmen. Insbesondere für die leicht flüchtigen Elemente, wie Jod und Chlor, liegen die realen Werte erheblich niedriger.

In Tabelle 6 aufgeführt sind die Daten von den 20 Radionukliden mit den höchsten Werten des Aktivi-

Tabelle 6. Halbwertszeiten, Freigrenzen (FGi), Aktivitätsinventare Ai [Bq] und Indikatoren Ai/FGi [-] von abgebrannten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung zum Ende der Betriebsphase des Endlagers (hier unterstellt 2075) [20]  
 Table 6. Half-life period, exemption limits (FGi), activity inventories Ai [Bq] and indicators Ai / FGi [-] of spent fuel elements and waste from reprocessing at the end of the operational phase of the repository (here all in 2075) according to [20]

ISOTOP	T <sub>1/2</sub> [a]	DWR+SWR [Bq]	CSD-V/C [Bq]	SUMME [Bq]	Freigrenze FGi [Bq]	DWR+SWR Ai/FGi	CSD-V Ai/FGi	Summe Ai/FGi
C-14	5,73E+03	3,15E+14	1,22E+14	4,38E+14	1,00E+07	3,15E+07	1,22E+07	4,37E+07
Cl-36	3,00E+05	9,07E+12	3,92E+12	1,30E+13	1,00E+06	9,07E+06	3,92E+06	1,30E+07
Se-79	6,50E+04	2,53E+13	8,53E+12	3,38E+13	1,00E+07	2,53E+06	8,53E+05	3,38E+06
Sr-90	2,91E+01	8,47E+18	1,87E+18	1,03E+19	1,00E+04	8,47E+14	1,87E+14	1,03E+15
Tc-99	2,13E+05	7,74E+15	2,64E+15	1,04E+16	1,00E+07	7,74E+08	2,64E+08	1,04E+09
I-129	1,57E+07	1,65E+13	4,97E+12	2,14E+13	1,00E+05	1,65E+08	4,97E+07	2,15E+08
Cs-135	2,30E+06	2,66E+14	8,21E+13	3,48E+14	1,00E+07	2,66E+07	8,21E+06	3,48E+07
Cs-137	3,00E+01	1,44E+19	2,89E+18	1,73E+19	1,00E+04	1,44E+15	2,89E+14	1,73E+15
U-232	7,20E+01	1,82E+15	7,96E+09	1,82E+15	1,00E+03	1,82E+10	7,96E+06	1,82E+10
U-234	2,45E+05	8,04E+14	9,30E+11	8,05E+14	1,00E+04	8,04E+10	9,30E+07	8,05E+10
U-238	4,47E+09	1,12E+14	9,11E+10	1,12E+14	1,00E+04	1,12E+10	9,11E+06	1,12E+10
Np-237	2,14E+06	2,39E+14	6,30E+13	3,02E+14	1,00E+03	2,39E+11	6,30E+10	3,02E+11
Pu-238	8,78E+01	2,12E+18	1,97E+15	2,12E+18	1,00E+04	2,12E+14	1,97E+11	2,12E+14
Pu-239	2,41E+04	1,65E+17	4,10E+14	1,66E+17	1,00E+04	1,65E+13	4,10E+10	1,65E+13
Pu-240	6,54E+03	3,72E+17	1,21E+15	3,73E+17	1,00E+03	3,72E+14	1,21E+12	3,73E+14
Pu-241	1,44E+01	4,70E+18	2,84E+15	4,70E+18	1,00E+05	4,70E+13	2,84E+10	4,70E+13
Pu-242	3,87E+05	2,32E+15	2,14E+12	2,32E+15	1,00E+04	2,32E+11	2,14E+08	2,32E+11
Am-241	4,33E+02	3,05E+18	1,54E+17	3,20E+18	1,00E+04	3,05E+14	1,54E+13	3,20E+14
Am-242m	1,52E+02	9,80E+15	8,31E+14	1,06E+16	1,00E+04	9,80E+11	8,31E+10	1,06E+12
Am-243	7,39E+03	2,96E+16	2,76E+15	3,24E+16	1,00E+03	2,96E+13	2,76E+12	3,24E+13
Cm-244	1,81E+01	5,63E+17	1,16E+16	5,74E+17	1,00E+04	5,63E+13	1,16E+12	5,75E+13
Cm-245	8,51E+03	1,18E+15	2,41E+13	1,20E+15	1,00E+04	1,18E+11	2,41E+09	1,20E+11
Cm-246	4,73E+03	2,11E+14	3,41E+12	2,14E+14	1,00E+03	2,11E+11	3,41E+09	2,14E+11
Summe		3,39E+19	4,94E+18	3,88E+19		3,33E+15	4,97E+14	3,82E+15

tätsindikatoren. Ein Vergleich von Tabelle 6 mit den Daten der Tabelle 5 zeigt, dass die höchsten Werte des Aktivitätsindikatoren in allen hier betrachteten Aktivitätsinventaren vom Cs-137 und Sr-90 stammen. Beide Radionuklide zerfallen aber aufgrund ihrer Halbwertszeit von ca. 30 Jahren relativ schnell und sind für Langzeitbetrachtungen weniger wichtig. Von den langlebigen Radionukliden finden sich Pu-239, Pu-240 und Am-241 unter den wichtigsten zehn Radionukliden der LAW, MAW und HAW.

Streicht man auch bei den HAW die Radionuklide, die weniger als 100 Jahre Halbwertszeit besitzen, aus der Betrachtung heraus, dann verbleiben noch 11 % des Aktivitätsinventars der Brennelemente und 3 % des Aktivitätsinventars der Wiederausarbeitungsrückstände, die aber 22 % des Aktivitätsindikatoren bei den Brennstäben und 4 % des Aktivitätsindikatoren bei den Wiederausarbeitungsrückständen besitzen.

Eine Zusammenstellung der Aktivitätsinventare aller hier betrachteter Abfälle bzw. Rückstände enthält Tabelle 7, in der zusätzlich noch der Aktivitätsindikator je

1 Mio. Bq (MBq) des jeweiligen Radionuklidgemischs angegeben wurde. Die letzte Spalte von Tabelle 7 zeigt, dass die Radiotoxizität je physikalischer Aktivität in den betrachteten Radionuklidgemischen bei den HAW um den Faktor 2 höher ist als bei den LAW und MAW. Blendet man wieder die Radionuklide mit Halbwertszeiten unter 100 Jahren aus, so steigt der auf die Aktivität bezogene Aktivitätsindikator auf 120 bis 200 je MBq an, da die verbleibenden langlebigen Radionuklide geringere Freigrenzen (eine höhere Radiotoxizität) aufweisen, als die derzeit noch dominanten Radionuklide Cs-137, Sr-90.

Aus Tabelle 7 geht aber vor allem hervor, dass die HAW um den Faktor 10.000 größere Inventare besitzen als die Inventare von Asse und ERAM.

Entscheidender Unterschied zwischen den Inventaren von LAW, MAW und HAW ist allerdings die Radioaktivität und Radiotoxizität je Volumeneinheit (s. Tabelle 8). Nur bei hoher Konzentration der Aktivität in einem kleinen Volumen führt die Strahlungsenergie der radioaktiven Zerfälle bei den HAW zu einer signifikanten Temperatur-

**Tabelle 7. Langzeitsicher zu verwahrende Aktivitätsinventare und zugehörige Radiotoxizität, gemessen als Aktivitätsindikator für verschiedene Inventare von radioaktiven Abfällen bzw. Rückständen**

**Table 7. Long-term safe deposition of the activity inventories and associated radiotoxicity measured as activity indicator for different inventories of radioactive wastes and residues**

Anlage	Stichtag	Aktivität [Bq]	Aktivitätsindikator (Radiotoxizität)	Aktivitätsindikator je MBq
HAW (Tab. 6)	2075	3,88E+19	3,82E+15	98
Asse II (Tab. 5)	01.01.2003	3,00E+15	1,38E+11	46
ERAM (Tab. 5)	30.06.2005	4,21E+14	1,72E+10	41
Culmitzsch A (Tab. 4)	(ca. 2000)	8,39E+15	2,55E+11	30

**Tabelle 8. Vergleich von volumenbezogenen Aktivitäten und Aktivitätsindikatoren für verschiedene Inventare von radioaktiven Abfällen bzw. Rückständen**

**Table 8. Comparison of volume-related activities and activity indicators for different inventories of radioactive wastes or residues**

	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Aktivität pro Volumen [Bq/m <sup>3</sup> ]	Aktivitätsindikator pro m <sup>3</sup>	Bemerkungen
HAW (2075)	27.000	1,44E+15	1,42E+11	Volumen nach [10]
Asse (2013)	47.000	6,38E+10	2,94E+06	Volumenangabe = Gebindebruttovolumen
ERAM (2013)	ca. 40.000	1,05E+10	4,30E+05	36.753 m <sup>3</sup> feste und verfestigte Abfälle sowie 6.621 umschlossene Strahlenquellen
IAA Culmitzsch A	6,1E+07	1,38E+08	4,18E+03	Volumen nach [5]
Boden/Erdruste		1,57E+06	134	Annahme: U-238sec = Th-232 = 40 Bq/kg; Dichte 1,6 t/m <sup>3</sup>

erhöhung. So entsteht ein Gefährdungspotenzial, wie man im Vergleich zur natürlichen Radioaktivität eines Bodens erkennt (s. a. Abschnitt 7.1.3).

## 6 Errichtung eines Endlagers für hoch radioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle

Lange Zeit galt in Deutschland als vorherrschende Meinung hinsichtlich der Standortsuche für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle, dass diese in tiefen geologischen Schichten verwahrt werden sollten, und sich als Wirtsgestein besonders gut Salzstöcke eignen würden (nicht unberücksichtigt dürfen die hohe Wasserlöslichkeit und das geringe Sorptionsvermögen von Salzstöcken bleiben). Diese hätten drei hervorstechende Eigenschaften:

- Salzstöcke können einen sehr homogenen Aufbau aufweisen, besitzen eine äußerst geringe Porosität und entfalten dadurch eine sehr gute Barrierewirkung,
- Salzstöcke besitzen eine hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit,
- durch die Konvergenz aufgefahrener Einlagerungsbereiche werden die eingelagerten Gebinde im Laufe der Zeit vollständig im Salzstock eingeschlossen, was als zusätzliches Sicherungselement bewertet wurde.

Als Erkundungsstandort wurde von der Niedersächsische Landesregierung am 22. Februar 1977 entschieden, den

Salzstock Gorleben als vorläufigen Standort für eine mögliche Anlage zur Entsorgung der bundesdeutschen Kernkraftwerke zu wählen. Dass dafür nicht nur fachliche Gründe ausschlaggebend waren, ist heute bekannt. Für die in Gang gesetzte Standorteignungsprüfung war es wenig hilfreich.

Das Erkundungsbergwerk Gorleben ist heute über zwei Schächte erschlossen. Diese sind im Zentrum des rund 14 km langen und 4 km breiten Salzstocks Gorleben mit einer Tiefe von 933 bzw. 840 m geteuft. Vorhabensträgerin ist das Bundesamt für Strahlenschutz. Das Erkundungsbergwerk wird von der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) betrieben, siehe [17].

Das Bergwerk Gorleben diente der Erkundung des Salzstocks auf seine Eignung als mögliches Endlager für hoch radioaktive Abfälle. Bis heute wurde nur ein kleiner Teil des Salzstocks untersucht. Neben dem historisch-politischen Makel aus der Standortauswahl, kann auch die geringe Erkundungstiefe eine abschließende Standortauswahl derzeit nicht begründen, allerdings auch nicht ablehnen.

Das Erkundungsbergwerk Gorleben wird derzeit in den Offenhaltungsbetrieb überführt. Es ist so lange offen zu halten, bis der Standort Gorleben nicht im Standortauswahlverfahren ausgeschlossen wird.

Die bisher für das Erkundungsbergwerk Gorleben angefallenen Kosten von ca. 1,6 Mrd. Euro wurden komplett von den Energieversorgungsunternehmen getragen, bei denen hoch radioaktive Abfälle angefallen sind. Geregelt ist dies eindeutig im AtG in Verbindung mit der Endlagervorausleistungsverordnung (EndlagerVIV). Die Kostenfrage bei der Entsorgung ist so geklärt, dass entsprechend dem Verursacherprinzip, die Abfallerzeuger die Kosten tragen. Die Verantwortung, Endlager nach Stand von Wissenschaft und Technik zu bauen, liegt beim Bund.

## 7 Modulares Endlagerkonzept für hoch radioaktive Abfälle und Kriterien zur langzeitsicheren, langzeitstabilen Verwahrung dieser Abfälle

### 7.1 Rahmenbedingungen

#### 7.1.1 Standortauswahlgesetz

Das im Juli 2013 verabschiedete Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standorts für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) enthält wesentliche Weichenstellungen für die Endlagersuche in Deutschland. In Kenntnis des Gesetzes können daraus die folgenden, für diesen Beitrag relevanten Feststellungen getroffen werden:

*Feststellung 1:* Die Umschreibung in „tiefen geologischen Schichten“ ist in die Zielstellung des StandAG nicht eingeflossen.

*Feststellung 2:* Die Begriffsbestimmungen im StandAG und alle weiteren einschlägigen Gesetze dazu, haben es offen gelassen, ob eine Endlagerung von HAW unmittelbar nach der Entlassung aus dem Zwischenlager erfolgen muss oder ob es nicht der Aufgabenstellung eher gerecht wird, erst nach mehreren Zwischenschritten die Endlagerung, dann langzeitsicher und ohne Absicht der Rückholung vorzunehmen.

*Feststellung 3:* Durch die Prozesse, die das StandAG ausgelöst hat, verschiebt sich die Entlassung von HAW aus den Zwischenlagern auf nach 2050. Es ist jetzt schon absehbar, dass es Verlängerungen der Genehmigungen für die Zwischenlager an der KKW-Standorten (einbezogen die Zwischenlager Gorleben und Lubmin) geben muss. Sinnvoll scheint es, zu überlegen, den Prozess bis zur Endlagerung generell länger zu gestalten und diese Planungen in ein Endlagerkonzept einzubeziehen. So wird die Einbeziehung von Partitionierung und Transmutation (P & T) in ein Endlagerkonzept nach derzeitigem Forschungsstand einen Zeitraum von ca. 150 Jahren verlangen (s. a. Abschnitt 7.2).

Die Abfälle mit dem höchsten Gefahrenpotenzial, bestrahlte Brennelemente und hoch aktive Abfälle müssen unabhängig vom Endlagerkonzept über längere Zeiträume übertägig zwischengelagert werden (derzeit mindestens bis 2050). Das Argument der Risikominimierung

durch umgehende Endlagerung ist also nur sehr eingeschränkt zutreffend. Es stehen diesem Argument gewichtige andere Argumente entgegen. Das Prinzip „Augen zu und durch!“ trägt auch die Botschaft, die wollen die radioaktiven Abfälle so schnell wie möglich loswerden und Unsicherheiten der Endlagerung auf die nachfolgenden Generationen verlagern. Dem muss mit einem geeigneten, gesellschaftlich akzeptierten Endlagerkonzept entgegengetreten werden. Die Notwendigkeit der langfristigen Entwicklung eines gesellschaftlich akzeptierten Endlagerkonzepts und des sorgfältigen, verantwortungsbewussten Eignungsnachweises muss dagegen abgewogen werden.

### 7.1.2 Aktivitätsinventare

Wenn die bis 2040 anfallenden hoch radioaktiven Abfälle in einem Endlager in tiefen geologischen Schichten langzeitsicher verwahrt werden sollten, dann wäre der Langzeitsicherheitsnachweis ähnlich zu gestalten, wie bei radioaktiven Abfällen mit geringer Wärmeentwicklung. Die in der vorläufigen Sicherheitsanalyse von Gorleben [9], [10], [21] ausgewiesenen radioaktiven Abfälle von ca. 29.030 m<sup>3</sup> verteilen sich im Jahr 2075 danach wie folgt:

- Gesamtaktivität von ca.  $6,2 \cdot 10^{19}$  Bq:
  - ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren (ca.  $5,3 \cdot 10^{19}$  Bq),
  - verglaste hoch radioaktive Spaltprodukte und Feedklärschlämme (verglaste Abfälle (CSD-V)) aus der Wiederaufarbeitung (ca.  $9,0 \cdot 10^{18}$  Bq).
- Die Gesamtaktivität an  $\alpha$ -Strahlern im Jahre 2075 beträgt ca.  $6,4 \cdot 10^{18}$  Bq:
  - davon ausgediente Brennelemente aus Leistungsreaktoren (ca.  $6,2 \cdot 10^{18}$  Bq),
  - davon HAW-Kokillen (CSD-V) (ca.  $2,0 \cdot 10^{17}$  Bq).

Dieses Aktivitätsinventar unterscheidet sich von dem der zuvor beschriebenen Inventare der Asse und des ERAM nicht nur durch die wesentlich höhere Aktivität in der Größenordnung von  $10^{19}$  Bq = 10 EBq, sondern auch in der völlig anderen Zusammensetzung und der Wärmeentwicklung, die sich aus dem Zerfallsprozess ergibt. So ist z. B. ein Nachweis der Unterkritikalität erforderlich, mit dem zu zeigen ist, dass „sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.“ [22].

### 7.1.3 Wärmeentwicklung

Durch die Wärmeentwicklung endgelagerter Abfälle darf das Isolationsvermögen der geologischen Barrieren eines Endlagersystems etwa durch thermisch induzierte Spannungen oder andere Veränderungen der Barriereigenschaften (z. B. die mechanischen Eigenschaften) nicht beeinträchtigt werden. Das Spektrum der Zerfallswärme wird in [1] mit 2 bis 20 kW/m<sup>3</sup> angegeben. Mit der Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen werden also umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung der radioaktiven Abfälle und umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung der wärmeinduzierten Belastung des Gebirges erforderlich. Weiterhin müssen mögliche indirekte Folgen der Wärmeentwicklung, insbesondere durch den

Wärmeeintrag gesteigerte Gasentwicklung anderer Abfälle, untersucht werden. Die nachteiligen wärmeinduzierten Auswirkungen auf die nicht wärmeproduzierenden Abfälle sind derzeit ebenfalls nicht ausreichend untersucht. In der Sicherheitsanalyse Gorleben [10], Seite 25, wird dazu ausgeführt: „M15: Die Temperaturen im Hauptsalz z2HS, in dem die wärmeentwickelnden hoch radioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Die Festlegung dieser Temperaturgrenze dient allein der Auslegung des Endlagers.“ (s. a. Abschnitt 5.4. und [23]).

Durch die möglichen Auswirkungen der Wärmeentwicklung auf das Isolationsvermögen der geologischen Barrieren, die erheblich größeren Schutzmaßnahmen zur Reduzierung der wärmeinduzierten Belastung des Gebirges und die mögliche Beeinträchtigung der Barrierefunktion gering durchlässiger Wirtsgesteinskörper durch Gasdruckaufbau ergeben sich verschiedene Vorteile des Mehr-Endlager-Konzepts gegenüber dem Ein-Endlager-Konzept.

## 7.2 Nukleare Transmutation

Zwischenzeitlich vorliegende Forschungsergebnisse und Umsetzungen müssen ernstgenommen und in ein Endlagerkonzept einfließen, dazu gehört auch die kerntechnische Behandlung radioaktiven Abfalls (Nukleare Transmutation bestehend aus Partitionierung und Transmutation (P & T). Hier einige wenige Anmerkungen dazu. P & T bezeichnen technische Verfahren zur Behandlung abgebrannter Brennelemente aus Kernkraftwerken, die auf die Abtrennung von Stoffgruppen zielen (Partitionierung) und auf die anschließende Umwandlung der Aktinidenelemente Plutonium (Pu), Neptunium (Np), Americium (Am) und Curium (Cm) durch Bestrahlung (Transmutation). Radioaktive Isotope mit hoher Halbwertszeit (langer Lebensdauer) werden durch die Bestrahlung mit Neutronen in Radionuklide umgewandelt, die entweder stabil sind oder aber wesentlich kürzere Halbwertszeiten aufweisen. In Bild 5 ist die zeitliche Entwicklung eines Radiotoxizitätsindikators (gemessen in der Dosiseneinheit Sievert – Sv) dargestellt. Durch P & T kann die Abnahme der Radiotoxizität von Aktiniden (hier: Plutonium, Uran, blaue Kurve in Bild 5) deutlich schneller ablaufen (gelbe Kurve in Bild 5).

Damit verkürzt sich die Zeit, in der die Radiotoxizität von HAW auf ein Niveau abfällt, das dem von natürlichem Uran(erd) entspricht, von ca. 16.000 Jahre auf nur noch 330 Jahre. Die Wärmefreisetzung des HAW wird deutlich schneller auf ein Niveau reduziert, mit dem die Wärmefreisetzung durch Zerfallswärme im Endlager weitgehend vermieden werden kann. So können umfangreiche Maßnahmen zur Reduzierung der wärmeinduzierten Belastung des Gebirges entfallen, ohne dass dadurch der Sicherheitsstandard abgesenkt wird. Die benötigte Infrastruktur für P & T umfasst die Partitionierungsanlagen (Anlagen für die Herstellung der Transmutationsbrennstoffe), Transmutationsanlagen und Zwischenlager.

Es ist auch nachgewiesen, dass der Einsatz von P & T zu einer Änderung der einzulagernden Mengen und Zusammensetzungen radioaktiver Stoffe und deren Wärme-

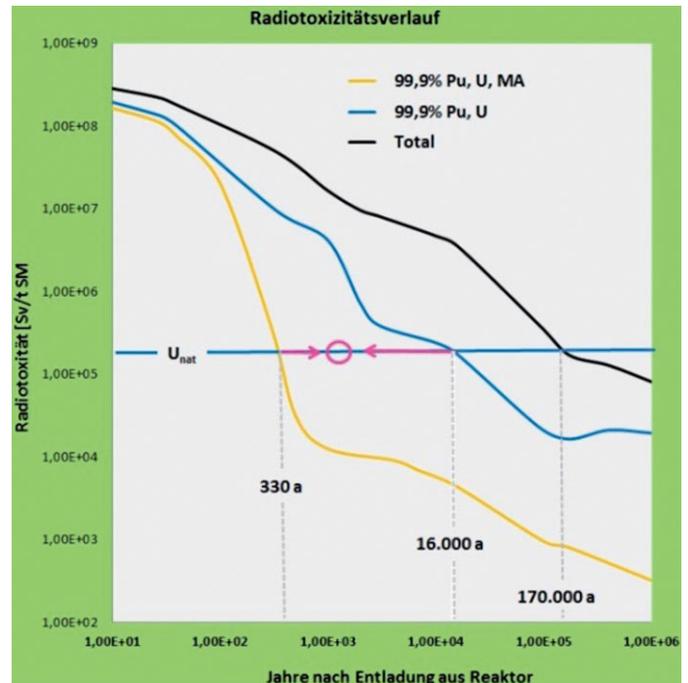


Bild 5. Transmutation, Verlauf der Radiotoxizität; nach Angaben des KIT und [20]

Fig. 5. Transmutation, progression of the radiotoxicity; according to the KIT and [20]

produktion führt, wodurch das Endlagerkonzept anzupassen ist und der Langzeitsicherheitsnachweis beeinflusst werden kann. Aus diesseitiger Sicht könnte damit auf einen Langzeitsicherheitsnachweis zurückgegriffen werden, wie er für radioaktive Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung zum Ansatz gebracht und genehmigt wurde.

In das im Folgenden vorgestellte modulare Endlagerkonzept haben diese Überlegungen Eingang gefunden. Die im modularen Endlagerkonzept ausgewiesenen Übergangslager (s. Bild 7 in Abschnitt 7.3) ersetzen die Zwischenlager der oben aufgeführten Infrastruktur von P & T. Auch zeigen technische Analysen, dass die Verringerung des Aufkommens wärmeentwickelnder Abfälle, die Reduktion der thermischen Leistung und der Gesamtaktivität infolge einer nachfolgenden Durchführung von P & T für ein deutsches Endlagerszenario signifikant sein kann. Dabei bewegt sich deren Reduktion im Minimum um zwischen ein und zwei Größenordnungen bei der Radiotoxizität noch signifikanter, siehe auch [20].

Natürlich werden mit der Transmutation die radioaktiven Abfälle nicht beseitigt und müssen ebenfalls einer Endlagerung, allerdings mit einem erheblich veränderten Radionuklidvektor und reduzierter Radiotoxizität der HAW, zugeführt werden. So verbleiben als mobile und langlebige Radionuklide u. a. C-14, Cl-36, Cs-135 und I-129, für die ein Langzeitsicherheitsnachweis zu führen ist. Der Sicherheitsgewinn durch den schnelleren Abbau von radiotoxikologisch besonders relevanten Radionukliden der Aktiniden ist aber ein insgesamt wichtiger Aspekt in Hinblick auf die Langzeitsicherheit. Es laufen dazu derzeit Forschungsprogramme im großen Umfang und mit erheblicher Beteiligung von Deutschland, die eine Anwendung der Transmutation in einem Endlagerkonzept erwar-

ten lassen. Erste Einschätzungen der Vor- und Nachteile von P & T bei verschiedenen Reaktorkonfigurationen in Abhängigkeit von den vorgegebenen spezifischen Zielen sind in [20] zusammengestellt. „Um die verschiedenen Handlungsoptionen für die Bundesregierung in der Frage des künftigen Umgangs mit P & T abzuschätzen und zu bewerten, wurden insgesamt vier technische Szenarien entwickelt. Diese Szenarien wurden auf der Grundlage eines breiten Methodenmixes auf ihre sozialen, ökologischen, rechtlichen und ökonomischen Implikationen hin untersucht.“ [20].

Obwohl die Studie in [20] zahlreiche noch zu lösende Fragen thematisiert, kann vor dem Hintergrund der notwendigen Zeit bis zu einer endgültigen Entscheidungsfindung zur finalen Entsorgung von HAW (s. Abschnitt 7.1.1) und der zu erwartenden Weiterentwicklung der Technologie, die P & T-Technik in ein modulares Konzept der Endlagerung einbezogen werden.

### 7.3 Modulares Endlagerkonzept für noch radioaktive Abfälle

Angesichts der Tatsache, dass Gebinde in oberflächennahen Zwischenlagern von Kernkraftwerken, z. B. Brunsbüttel, erheblich korrodiert aufgefunden wurden, ist ein Nachweis dafür, dass diese nicht kurzfristig in ein Endlager verbracht werden sollten. Dies dient geradezu als Beleg dafür, dass eine Zwischenlagerung (Übergangslagerung), bezogen auf das abgelagerte Inventar, verlängert werden sollte. Von dieser Erfahrung ausgehend, wird nachfolgend eine Endlagerkonzeption vorgestellt, die sich an den folgenden Kategorien orientiert:

- längere Lagerung der HAW in den Zwischenlagern (1),
- nukleare Transmutation (2),
- Übergangslagerung (3),
- mit zunächst freiem Zugang zu den zu verwahrenden HAW über einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren (die 500 Jahre Übergangslagerung erhalten nach Bild 4 eine wissenschaftliche Begründung) (4), schrittweise Überführung in eine den Endlagerbedingungen entsprechende Verwahrung,
- Ein- oder Mehr-Endlager-Konzept (5),
- gesellschaftliche Akzeptanz und Berücksichtigung der Interessen nachfolgender Generationen (6),
- Finanzierung über eine Stiftung (7).

Die längere Lagerung der HAW in den vorhandenen Zwischenlagern (1) sollte dazu genutzt werden, die nukleare Transmutation (2) vorzubereiten und anzuwenden. Die so aufgearbeiteten HAW (bei bereits verglasten Abfällen aus WAA ist P & T wenig sinnvoll) sollten dann konditioniert (Verpackung/Gebinde) und für die Einlagerung in ein Übergangslager (3) vorbereitet werden. Es zeigt sich gegenwärtig ganz deutlich, dass die Phase der Zwischenlagerung und der hier nachfolgenden Übergangslagerung einer kontinuierlichen und abgestuften Kontrolle unterliegen müssen, wozu ggf. auch die Nachbesserung und möglicherweise neue Verpackung der Gebinde gehören.

Es fehlen gegenwärtig ganz offensichtlich notwendige Informationen über die langfristige Haltbarkeit von Gebinden, Abschirmverlusten, Mobilität und Radionuklid-ausbreitung, insbesondere unter Realbedingungen der

Endlagerung im Wirtsgestein. Da die Schnelligkeit des Fortschreitens von Korrosion an Gebinden in Zwischenlagern selbst den Genehmigungsbehörden scheinbar unbekannt gewesen war (s. Fall Brunsbüttel, Pressemeldung vom 19.02.2014, Kaverneninspektion: Vattenfall GmbH, Media Relations Germany), zeigt sich hier dringender Nachbesserungsbedarf.

Eine geeignete Vorgehensweise für standortbezogene Langzeitsicherheitsnachweise, mit der zuverlässig eine Versagenswahrscheinlichkeit ausgewiesen werden kann, liegt bisher nicht vor. Es wäre daher aus Sicht der Autoren eine Nachweisführung sinnvoll, die Langzeitsicherheit in zwei aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten (mit unterschiedlichen Gefahrenpotenzialen) zu betrachten:

- der Nachweis bis in den Zeitraum von einigen 10.000 Jahren, bei dem die Versagenswahrscheinlichkeit mit hoher Zuverlässigkeit ermittelt werden kann,
- der Nachweis bis in den Zeitraum von 1 Mio. Jahren, bei dem die Versagenswahrscheinlichkeit nur mit geringer Zuverlässigkeit ermittelt werden kann, weil diese auf die Betrachtung von Entwicklungen der Umweltbedingungen und extremen Einwirkungsszenarien aufbauen muss, die weitgehend spekulativ sind.

Da durch die Transmutation die Radiotoxizität wesentlich schneller verringert wird, als bei einem naturgegebenen Zerfall der Radionuklide, ist das radioaktive Gefahrenpotenzial für den Zeitraum ab 100.000 Jahren schon so weit reduziert, dass diese gestuften Betrachtungen ausreichend sein sollten.

Es ist aber zwingend notwendig, für die Zwischenlagerung und die Übergangslagerung bis zur Endlagerung ein Monitoringsystem einzurichten, das sowohl zur Umgebungsüberwachung dient als auch die Informationsbeschaffung über das Verhalten der Abfallbehälter zu Radioaktivitätsaustritten und Radionuklidenausbreitung etc. über längere Zeiträume sicherstellt. Anleitung für die Einrichtung eines geeigneten Monitoringsystems könnte man von der Überwachung der langzeitsicher verwahrten Tailings Ponds der Wismut GmbH beziehen [2], [3] (s. a. Bild 6).

Wesentlich erscheint aus Sicht der Autoren, dass damit der Nachteil der schnellen Lagerung in tiefen geologischen Schichten eindeutig aufgezeigt ist.

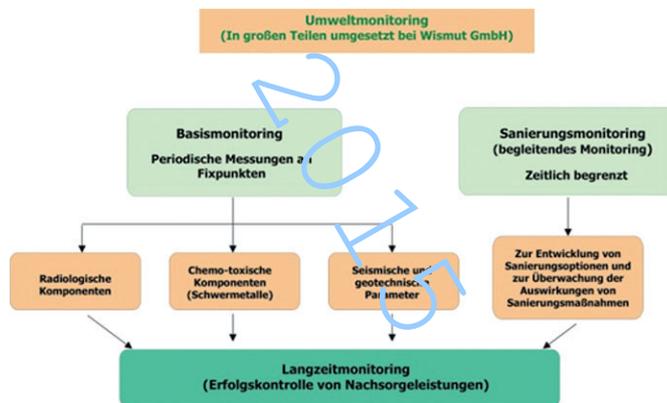


Bild 6. Umweltmonitoring [5]  
Fig. 6. Environmental monitoring [5]

## Fazit

Um den Nachweis einer Langzeitisolation der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten gegenüber der Biosphäre verantwortungsvoll und zuverlässig führen zu können, fehlen nach diesseitigem naturwissenschaftlich-mathematischem Verständnis fundamentale Voraussetzungen. Ein Langzeitmonitoring, umfangreiche Daten- und Zeitreihen sind dafür grundlegende Voraussetzung. Es wird zudem grundlegend bezweifelt, dass diese für einen Nachweis über 1 Mio. Jahre nur aus der Beobachtung von technischen Lagerbedingungen beigebracht werden können. Um Prognosen über Zustände des Versagens – (Verlust der Gebrauchstauglichkeit von Gebinden, geotechnischen Elementen des Umweltbauwerks oder auch geologischen Strukturen) mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit treffen zu können, bedarf es einer Informationsgewinnung unter Realbedingungen. Zur Langzeitsicherheitskonzeption sind Übertritte von toxischen, radioaktiven Kontaminanten auf dem Luft-, Wasser- und Bodenpfad in die Biosphäre zu vermeiden bzw. in den Freigrenzen der gesellschaftlich akzeptierten Kontaminationen zu halten s. [24].

Es liegt im gesellschaftlichen Interesse, die Nachweiszeiten in solcher Größenordnung zu definieren, dass sie mit menschlichen Zeitmaßstäben noch erfasst und damit dennoch eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen mit an Wahrscheinlichkeit grenzender Sicherheit vorausgesagt wird. Ein Nachweiszeitraum in geologischer Größenordnung ist zudem wenig vertrauenserweckend und schürt eher Ängste.

Um die höchst mögliche Sicherheit zu gewährleisten und um möglichen Fehleinschätzungen, die gravierende Auswirkungen für zukünftige Generationen haben werden, bestmöglich entgegen zu wirken und um diese gezielt, nachhaltig korrigieren zu können sowie um eine genügend große Zahl gesicherter, verlässlicher Daten über einen hinreichend großen Zeitraum über das Wechselspiel zwischengelagerter hoch radioaktive Abfälle und die Anlage zur Endlagerung nach § 9a Abs. 3 Satz 1 AtG gewinnen zu können, sollte der Zugang zu den abgelegten hoch radioaktiven Abfällen jederzeit über einen zu definierenden Zeitraum, mindestens jedoch 500 Jahre (ausgenommen für verglaste Abfälle aus der WAA) möglich sein. Dies gilt insbesondere für eine oberflächennahe Übergangslagerung. Bei einer Tiefenlagerung ist der ungehinderte Zugang eingeschränkt, daraus können sich insbesondere Gefahrenquellen für das Personal ergeben. Dazu gehört auch eine mögliche, notwendige geordnete Rückholung. Zwischen- bzw. Übergangslagerung und Monitoringsystem bilden eine Einheit.

Ein abschließender Langzeitsicherheitsnachweis kann erst erbracht werden, wenn hinreichend qualifizierte Daten über das Verhalten der eingelagerten Abfälle gewonnen worden sind. Das gelingt nur, wenn die Abfälle in der für eine Langzeitverwahrung geeigneten Form abgelegt sind, die geohydraulischen und die geotechnischen Verhältnisse dem Zustand der Dauerverwahrung entsprechen und mittels geeigneter Indikationen im Deckgebirge (z. B. die Heliumfreisetzung aus dem Endlager) die Annahmen der Planungen bestätigen. Eine endgültige Stilllegung darf erst dann erfolgen, wenn der abschließende Langzeitsicherheitsnachweis vorliegt.

Das modulare Konzept zur Endlagerung von hoch radioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen (HAW) soll den folgenden Aufbau haben (s. Bild 7).

- Errichtung der P & T-Facility an den ausgewählten Standorten, Absenkung der Aktivität und Wärmeentwicklung der HAW.
- Errichtung von Konditionierungsanlagen an den ausgewählten Standorten.
- Errichtung von anspruchsgerechten Übergangslagern in der Nähe der vorgesehenen Transmutations- und Konditionierungsanlagen. Übergangslager sind oberflächennahe, zugängliche Kavernen und Bunker, in die die transmutierten, konditionierten HAW in Gebinden für einen Übergangszeitraum (gemäß Endlagerkonzept) sicher gelagert werden können. Von dort werden die Gebinde in das/die bereit stehende(n) langzeitsichere(n) Endlager verbracht.
- Errichtung eines konzeptionspezifischen Langzeitmonitorings unter Realbedingungen zur Datengewinnung für die Langzeitsicherheit und zur Sicherheitsüberwachung vor und nach der Stilllegung mit Umgebungsüberwachung.
- Beobachtung, Überwachung (Langzeitmonitoring; Aufnahme einer genügend großen Zahl gesicherter, verlässlicher Daten über einen hinreichend großen Zeitraum – Zeitreihen), möglicherweise Rückwirkung auf die Lagerung des transmutierten HAW in der Kaverne (Bunker).
- Lagerungszeit abhängig von der Abklingkurve des transmutierten HAW; Konditionierung und Gebindefreigabe gemäß gesetzlicher Vorgaben, schrittweise Überführung in eine Endlagerbedingung entsprechende Verwahrung (Ausnutzung der Erfahrungen und des Know-hows bei der Planung, der Errichtung und möglicherweise des Betriebs von Schacht Konrad. Obwohl Gorleben politisch verbrannt scheint, sollte es eben auch unter diesen neuen Aspekten nicht aus dem Pool genommen werden. Die Prüfung auf Verwendung dieses Standorts für niedrig und mittel aktive Abfälle wäre ein denkbare weitere Option.).
- Offenhaltung der eingeschlossenen möglichen, notwendigen geordneten Rückholung und Langzeitmonitoring vor und nach der Stilllegung, Aufnahme einer genügend großen Zahl gesicherter, verlässlicher Daten über einen hinreichend großen Zeitraum – Zeitreihen unter Realbedingungen, Sicherheitsüberwachung nach der Stilllegung.
- Nachführung (Ausweisung) der Langzeitsicherheit des Endlagers mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit gegen Versagen.
- Langzeitsicherer Verschluss der Anlage nach 500 Jahren, gerechnet ab Zwischenlagerung. Die Forderung von mindestens 500 Jahren ist übernommen vom ESK-Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle vom 05.09.2014. Aus Sicht der Autoren entscheidet über den Zeitraum einer Übergangslagerung und schrittweisen Überführung der zu verwahrenden HAW in ein Endlager, die Überwachung des Prozesses mit einem Langzeitmonitoring unter Realbedingungen.
- Bei einem modularen Endlagerkonzept mit integrierter Transmutation ist der Nachweis der Unterkritikalität per se gegeben (ausgenommen für verglaste Abfälle aus der WAA). Dies wird sich positiv auf die bereitzustellenden Behälter auswirken.

**Modulares Konzept zur Endlagerung von hoch radioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen (HAW – High active waste) (nicht direkte Endlagerung) ©**

Modulares Endlagerkonzept für HAW, gekennzeichnet durch: Längere Lagerung der HAW in Zwischenlagern, nukleare Transmutation, oberflächennahe Übergangslager (Kavernen oder Bunker), freien Zugang und Überwachung der isolierten HAW über einen Zeitraum von min. 500 Jahren, Langzeitmonitoring (zur Datengewinnung für die Langzeitsicherheit und zur Sicherheitsüberwachung vor und nach der Stilllegung), Ein- oder Mehr-Endlager-Konzept, gesellschaftliche Akzeptanz und Berücksichtigung der Interessen nachfolgender Generationen. Die Lagerung in tiefen geologischen Schichten wird nicht ausgeschlossen, aber nicht präjudiziert.

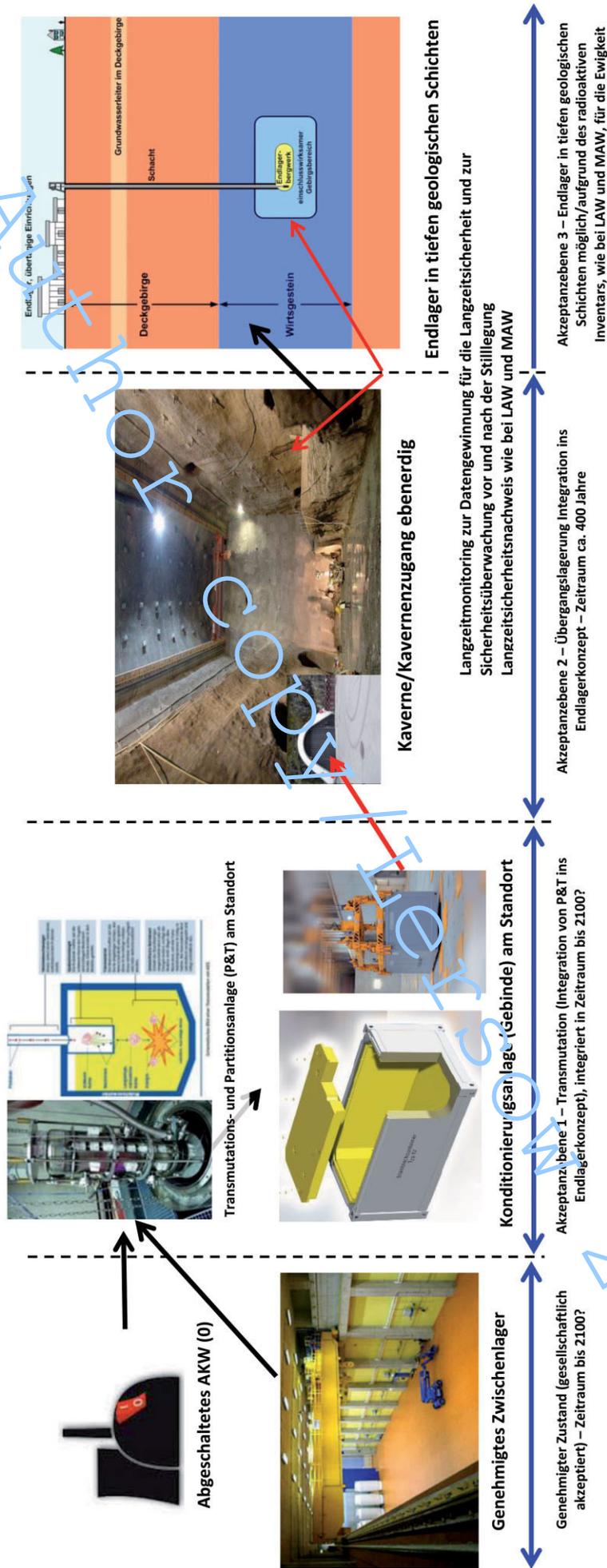


Bild 7. Modulares Konzept zur Endlagerung von hoch radioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen (HAW)  
Fig. 7. Modular concept for final disposal of highly radioactive, heat generating waste (HAW – High Active Waste)

Die Kosten für eine Endlagerkonzeption für HAW sind derzeit nicht zuverlässig darstellbar. Angaben darüber hier wären rein spekulativ.

*Anmerkung 1 zum modularen Endlagerkonzept (s. Bild 7):* Durch Transmutation und Partitionierung und 500 Jahre Übergangslagerung hat sich das radioaktive Gesamtinventar der langzeitsicher zu verwahrenden HAW von  $6,2 \cdot 10^{19}$  Bq (ca.  $30.000 \text{ m}^3$ ) auf  $10^{14}$  bis  $10^{15}$  Bq verringert (s. a. Bild 5). Das radioaktive Gesamtinventar wird dann nicht größer sein als das der Wismut-Tailings Ponds. Es muss die Frage beantwortet werden, ob die in den Kavernen lagernden radioaktiven Abfälle dort langzeitsicher verwahrt werden, also dort langzeitsicher gegenüber der Biosphäre eingekapselt werden können. Das Gefahrenpotenzial ist, wie gezeigt, beherrschbar und jederzeit überwachbar!

*Anmerkung 2 zum modularen Endlagerkonzept (s. Bild 7):* Die Kosten werden über einen großen Zeitraum gestreckt. Wegen des großen Zeitraums, könnte die Finanzierung über eine Stiftung (7) geregelt werden. Die HAW liefern den Unternehmen speisen die Stiftung. Das langzeitsichere Verwahrungskonzept verbleibt beim Bund.

## 8 Zusammenfassung

In Deutschland ist es bisher nicht gelungen, die Vorgaben, Vorschriften und Standards für die Errichtung von Anlagen zur langzeitsicheren Verwahrung von radioaktiven Abfällen und Rückständen in einem Regelwerk zusammenzufassen, das für Aufgaben mit einem solch hohem und langfristen Gefährdungspotenzial für die Biosphäre dringend erforderlich ist.

Ein Regelwerk sollte auf allgemeinen Kriterien beruhen, die sich aus der langzeitsicheren Verwahrung der verschiedenen Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen ableiten lassen und die dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden müssen. Das Regelwerk sollte weitestgehende Objektivität besitzen. Die Ausführungen hier wollen dazu einen Beitrag leisten. Für die Bewertungsbasis der unterschiedlichen geotechnischen Bauwerke war es zunächst notwendig zu beschreiben, welche radioaktiven Stoffe als Rückstände und radioaktive Abfälle entsorgt werden müssen, wo diese anfallen und auf welcher gesetzlichen Grundlage die langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung – Lagerung (Endlagerung) dieser im Sinne der neuen europäischen Richtlinien zum Strahlenschutz radioaktiven Materialien, derzeit stattfindet.

Als ein Ergebnis kann gezeigt werden, dass sich die vorliegenden standortspezifischen Entsorgungslösungen nicht mit dem jeweils dort abgelagerten radioaktiven Inventar begründen lassen. Insbesondere der Vergleich zwischen den Inventaren der Wismut-Tailings Ponds und dem Endlager für niedrig und mittel aktive Abfälle ERA Morsleben sowie der Schachanlage Asse II zeigt, dass die radioaktiven Inventare der Wismut-Tailings Ponds von ähnlicher radiologischer Größe, aber langlebiger und mobiler sind, die Sicherheitsvorkehrungen am Beispiel ERA Morsleben dagegen aber wesentlich umfassender gewählt wurden, als bei den Wismut-Tailings Ponds, ohne dass da-

durch ein langzeitsicheres geotechnisches Umweltbauwerk entsteht.

Es kann gezeigt werden oder zumindest zum Nachdenken angeregt werden, dass eine oberflächennahe Endlagerung im Vergleich zur Endlagerung in tiefen geologischen Schichten durchaus Sicherheitsvorteile bietet. Um Akzeptanz müsste im gleichen Maße geworben werden, wie bei einer Tiefenlagerung. Nachfolgenden Generationen ist es hier leichter möglich, Nachbesserungen am geotechnischen Umweltbauwerk und an der Verpackung des radioaktiven Materials vorzunehmen. Die Sicherheit für das Personal der kerntechnischen Anlage ist hier ebenfalls höher, als bei einer Tiefenlagerung. Sowohl die Möglichkeit, Nachbesserungen am geotechnischen Umweltbauwerk als auch an der Verpackung des radioaktiven Materials vornehmen zu können, in Verbindung mit der Einrichtung eines geeigneten Monitoringsystems, mit Umweltüberwachung und Langzeitmonitoring, führt zu einer beachtlichen Erhöhung des Sicherheitsniveaus (der Einsatz mannloser Technologien und starke Abschirmung sowie externe Steuerung können größtmögliche Sicherheit geben).

Die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle leiten sich aus dem Ziel einer wartungsfreien und zeitlich unbefristeten Beseitigung dieser Abfälle ab. Am Beispiel des ERA Morsleben ist die Stilllegung so konzipiert, dass nach Beendigung aller Stilllegungsmaßnahmen kein Kontroll- und Überwachungsprogramm erforderlich ist. Das heißt, es werden auch keine verlässlichen Daten aus dem stillgelegten Endlager übermittelt und nutzbar gemacht. Unabhängig von den derzeit geltenden Vorschriften dazu, scheint dies dringend überdenkenswert. Es wird empfohlen, die Langzeitüberwachung der langzeitsicher verwahrten Tailings Ponds der Wismut GmbH als Anregung in die Weiterentwicklung der Standortüberwachung von Endlagerstandorten, wie dem ERA M, einzubeziehen.

Es wird weiterhin empfohlen, an Endlagerstandorten, analog dem Modularen Endlagerkonzept, ein Langzeitmonitoring zur Datengewinnung für die Langzeitsicherheit und zur Sicherheitsüberwachung vor und nach der Stilllegung zu installieren. Zur Datengewinnung für die Langzeitsicherheit sollten im notwendigen Maße Datenreihen aus Versuchen gewonnen werden, die unter Realbedingungen durchgeführt werden.

Eine schnelle Stilllegung der Endlager impliziert die Botschaft, dass die Absicht besteht, die radioaktiven Abfälle so schnell wie möglich loszuwerden. Der Betrachtungszeitraum für den Langzeitsicherheitsnachweis in Deutschland ist derzeit mit  $10^6$  Jahren vorgeschrieben. Dieser geologische Betrachtungszeitraum macht ein Endlager nicht sicherer.

Da die Risikoeinschätzung mit Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Betrachtungszeitraum von  $10^6$  Jahren nicht quantifizierbar ist, ist die auf dieser Basis ausgewiesene Langzeitsicherheit mit einer großen Unsicherheit behaftet. Es wird zumindest angeregt, von einer kleineren Betrachtungszeit von z. B. 10.000 Jahren auszugehen, für den man Eintrittswahrscheinlichkeiten von Prozessen und Ereignissen quantifizieren kann. Von der so ermittelten Langzeitsicherheit ist es möglich, dann eine Extrapolation auf längere Betrachtungszeiträume vorzunehmen.

Den so ermittelten Langzeitsicherheiten werden dann Unsicherheiten zugeordnet, die gleichbedeutend damit sind, mit welcher Zuverlässigkeit der Langzeitsicherheitsnachweis erfolgte.

Aus Sicht der Autoren wäre eine Nachweisführung sinnvoll, die Langzeitsicherheit in zwei aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten (mit unterschiedlichen Gefahrenpotenzialen) zu betrachten (s. Abschnitt 7.3).

Mit dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Lager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG) vom Juli 2013 ist auch der Auftrag an die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe ausgereicht worden, Auswahlkriterien und Mindestanforderungen für das eigentliche Auswahlverfahren zu entwickeln. Darin enthalten sind Fragestellungen, wie oberflächennahe Lagerung oder in tiefen geologischen Schichten, ein oder mehrere Endlagerstandorte, Verbringung der HAW direkt aus dem Zwischenlager in das vorbereitete Endlager oder Übergangslagerung mit garantierter Zugänglichkeit von mindestens 500 Jahren, schadlose Behandlung der HAW als Teil der langzeitsicheren Verwahrung bis hin zum vorgeschriebenen Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren für die auszulegende Langzeitsicherheit.

Die wärmeinduzierte Einwirkung, die sich aus der Zerfallswärme der HAW ergibt, ist neben dem langzeit-sicheren Verschluss des radioaktiven Inventars gegenüber der Biosphäre, der gravierendste Unterschied zur Verbringung von radioaktiven Abfällen mit geringer Wärmeentwicklung in tiefe geologische Schichten, siehe [23]. Die Anforderungen an das Multi-Barrierensystem sind um ein Vielfaches höher, die Festlegung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) kann dabei hilfreich sein, schärft sie doch den Fokus auf die damit im Zusammenhang stehenden Fragestellungen.

Zwischenzeitlich vorliegende Forschungsergebnisse und Umsetzungen müssen ernstgenommen und in ein Endlagerkonzept einfließen, dazu gehört auch die Behandlung radioaktiven Abfalls mittels Nuklearer Transmutation, bestehend aus Partitionierung und Transmutation (P & T). Radionuklide mit hoher Halbwertszeit (langer Lebensdauer) werden durch die Bestrahlung mit Neutronen in Isotope umgewandelt, die entweder stabil sind oder aber wesentlich kürzere Halbwertszeiten aufweisen. Die Reduktion der thermischen Leistung und der Gesamtaktivität infolge einer nachfolgenden Durchführung von P & T kann für ein deutsches Endlagerszenario signifikant sein, siehe [20]. Es erfolgt eine Reduktion der Abklingzeit der radiologischen Toxizität unter das Level von Natururan ( $U_{\text{nat}}$ ), siehe Bild 5 in Abschnitt 7.2. Natürlich werden mit der Transmutation die radioaktiven Abfälle nicht beseitigt und müssen ebenfalls einer Endlagerung, allerdings mit einem erheblich veränderten Radionuklidvektor und reduzierter Radiotoxizität der Abfälle, zugeführt werden.

Im Prozess der Suche und der Auswahl eines Standorts für ein Lager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle wird in diesem Beitrag ein modulares Endlagerkonzept für hoch radioaktive Abfälle vorgestellt. Bei diesem modularen Endlagerkonzept kann eine Wärmefreisetzung (Zerfallswärme) im Endlager weitgehend vermieden und damit auch auf Maßnahmen zur Reduzierung der wär-

meinduzierten Belastung des Gebirges verzichtet werden. Es könnte damit auf einen Langzeitsicherheitsnachweis zurückgegriffen werden, wie er für radioaktive Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung zum Ansatz gebracht und genehmigt wurde.

Die vorgestellte modulare Endlagerkonzeption (s. Bild 7) ist gekennzeichnet durch längere Lagerung der HAW in Zwischenlagern, Nukleare Transmutation, Übergangslager (Kavernen oder Bunker) mit zunächst freiem Zugang zu den verwahrenden HAW, der über einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren schrittweise in eine Endlagerbedingung entsprechende Verwahrung überführt wird, Ein- oder Mehr-Endlager-Konzept, gesellschaftliche Akzeptanz und Berücksichtigung der Interessen nachfolgender Generationen und Finanzierung über eine Stiftung.

## Danksagung

Die ganze Komplexität des Themas lässt sich in einem nur wenige Seiten umfassenden Beitrag nicht darstellen. Die Autoren sind deshalb dem Verlag Ernst & Sohn in Berlin, Herrn Dr.-Ing. *Helmut Richter* (Managing Editor) und insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Christos Vrettos* (DGGT e. V.; Head of Editorial Board der *geotechnik*) sehr dankbar, dass sie ermuntert wurden, sich diesem Thema zu stellen und dass geplant ist, die Langfassung dieses Beitrags vorzustellen.

## Literatur

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA): Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide. Safety Series No. 111-G-1.1. Wien, 1994. Aktuelle Fassung: IAEA Safety Standard Series No. GSG 1, IAEA Wien, November 2009.
- [2] *Lersow, M., Gellermann, R.*: Langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung von Rückständen und radioaktiven Abfällen – Sachstand und Beitrag zur Diskussion um Lagerung (Endlagerung); Langfassung zum vorliegenden Beitrag, geplant als E-Book im Verlag Ernst & Sohn, vorauss. 2016.
- [3] *Lersow, M.; Gellermann, R.*: Sichere Verwahrung von Rückständen aus der Erzaufbereitung, insbesondere aus der Uranerzaufbereitung – ein Überblick. Vortrag auf der 13. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik (FS-KGEC 2013).
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. September 2010.
- [5] *Lersow, M., Schmidt, P.*: The Wismut Remediation Project, Proceedings of First International Seminar on Mine Closure (2006) pp. 181–190.
- [6] International Atomic Energy Agency: Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide. Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Wien 1994. Aktuelle Fassung: IAEA Safety Standard Series No. GSG 1, IAEA Wien, November 2009.
- [7] *Gmal, B., Hesse, U., Hummelsheim, K., Kilger, R., Krykacz-Hausmann, B., Moser, E. F.*: Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit eines Endlagers für aufgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) im Vorhaben 1005/8488-2, GRS-A-3240. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, 2004.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Gemeinsames Übereinkommen über

- die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungs-konferenz. August 2014.
- [9] Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, 2011.
- [10] Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG), Arbeitspaket 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, GRS-277. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, 2012.
- [11] Freiersleben, H.: Endlagerung von radioaktivem Abfall in Deutschland. TU Dresden, Dezember 2011.
- [12] Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach § 7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung – AtVfV) vom 18. Februar 1977, Neufassung vom 3. Februar 1995 (BGBl. I 1995, Nr. 8, S. 180), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I 2006, Nr. 58, S. 2819).
- [13] Bundesministerium des Inneren (BMI): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. GMBI. 1983, S. 220.
- [14] Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission: Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. 1988.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Entwurf vom 06. Januar 2015.
- [16] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Radionuklidvektor der relevanten Radionuklide, Stichtag 30.06.2005, ERAM. 2009
- [17] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlager Konrad/Eignung. www.bfs.de.
- [18] Gerstmann, U., Meyer, H., Tholen, M.: Abschlussbericht: Bestimmung des nuklid-spezifischen Aktivitätsinventars der Schachanlage Asse. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. August 2002.
- [19] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Stilllegung ERA Morsleben, Plan zur Stilllegung des Endlagers für Radioaktive Abfälle Morsleben. Salzgitter, 2009.
- [20] Renn, O. (Hrsg.): Partitionierung und Transmutation. aca-tech Studie, Forschung – Entwicklung – Gesellschaftliche Implikationen. Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart, 2014.
- [21] Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG), Arbeitspaket 6: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, GRS-281. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- [22] Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K.: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben – Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, GRS-277. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.
- [23] TIMODAZ – Thermal Impact on the Damaged Zone Around a Radioactive Waste Disposal in Clay Host Rocks (Contract Number: FI6W-CT-2006-036449).
- [24] OECD/NEA: Radioactive Waste Management. Post Closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose. OECD 2004. The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Radioactive Waste Management NEA/RWM/R(2013)1, March 2013 (www.oecd-nea.org).

#### Autoren

Dr.-Ing. Michael Lersow  
Obmann des Ak 5.5 Tailings der DGGT e. V.  
Am Kammerstein 16  
08359 Breitenbrunn/Erzgeb.  
m.lersow@ecm-ing.com

Dr. Rainer Gellermann  
Nuclear Control & Consulting GmbH  
Hinter dem Turme 24  
38114 Braunschweig  
rainer.gellermann@nuclear-cc.de

Eingereicht zur Begutachtung: 14. Januar 2015

Überarbeitet: 26. März 2015

Angenommen zur Publikation: 15. April 2015