



**Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 60**

DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission

Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuholenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	2
2	Beratungshergang	3
3	Sicherheitsanforderungen und Sicherheitskonzept	3
4	Aktuelles Aufkommen an endzulagernden radioaktiven Abfällen in Deutschland	4
5	Spezifika unterschiedlicher Wirtsgesteine	6
6	Analyse von Einflussparametern und möglichen Wechselwirkungen	8
7	Potenzielle Maßnahmen	12
8	Einflüsse auf den Endlagerbetrieb	13
9	Bewertung und Schlussfolgerungen	14
10	Literatur	17

1 Einleitung

Entsprechend dem im Standortauswahlgesetz (StandAG) vom 23.07.2013 [1] vorgezeichneten Verfahren soll bis 2031 ein Standort in Deutschland für ein Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle gefunden werden. Für einen großen Anteil der in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (303.000 m³) wird laut Planfeststellungsbeschluss nach Fertigstellung das Endlager Konrad zur Verfügung stehen. Die darüberhinausgehenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung:

- Urantails aus der Urananreicherung,
- rückzuholende Abfälle aus der Schachanlage Asse II,
- sonstige Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können¹,

sollen gemäß dem „Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle“ (Nationales Entsorgungsprogramm, NaPro [2]) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) bei der Standortsuche für das Endlager nach StandAG berücksichtigt werden.

Je nach den Bedingungen am Standort und abhängig vom Endlagerkonzept (insbesondere der Anordnung der jeweiligen Einlagerungsbereiche) sind bei einer Einlagerung am selben Standort mögliche Wechselwirkungen zwischen den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und den radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu beachten. Grundsätzlich sind Quereinflüsse der Abfallarten durch physikalische und chemische Wechselwirkungen (z. B. Wärmeeintrag, Gasbildung, Ausbildung chemischer Gradienten) unterschiedlicher Abfallkomponenten denkbar. Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle sind durch ein großes Radionuklidinventar gekennzeichnet (Gesamtaktivität ca. 10²⁰ Bq [3]) und bestehen im Wesentlichen aus Uranoxid bzw. Borosilikatglas. Die zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung besitzen ein deutlich geringeres Radioaktivitätsinventar (siehe Tabelle 1). Sie liegen teilweise in einer Zementmatrix konditioniert vor, weisen ein sehr viel größeres Volumen auf und enthalten eine von Abfallstrom zu Abfallstrom variierende, zum Teil komplexe Mischung unterschiedlicher Stoffe (Salze, organische Materialien, Dekontaminationsmittel etc.). Dies gilt insbesondere für die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt werden sollen und für die die Art der Konditionierung noch unbekannt ist. Von besonderer Relevanz für Sicherheitsbetrachtungen sind solche Wechselwirkungsprozesse, die möglicherweise zu einer erhöhten Radionuklidfreisetzung aus den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen führen können.

Bereits im Abschlussbericht des ehemaligen Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) [4] wird darauf hingewiesen, dass „ein Endlager alle aus verschiedenen Abfallarten resultierenden Anforderungen zugleich“ erfüllen muss. Dies setzt voraus, dass für ein erfolgreiches Standortauswahlverfahren Abfallarten und -mengen bekannt sein müssen. Darüber hinaus betont der AkEnd: „Von daher ist zu erwarten, dass die Anzahl potenziell geeigneter Standorte für alle Abfälle kleiner ist als die

¹ Dies sind laut [2] radioaktive Abfälle, die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkts ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind.

Anzahl potenziell geeigneter Standorte für Teile der Abfälle“. Weiterhin fordert der AkEnd die räumliche Trennung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung von den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen als unerlässlich aus Langzeitsicherheits- und Nachweisaspekten.

Bei der Konzeption eines Endlagers nach StandAG sind Maßnahmen zu ergreifen, um sicherheits- oder nachweisrelevante Wechselwirkungen zwischen den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und den radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung auszuschließen oder zu minimieren, die aus der Lagerung an einem Standort resultieren. Dies gilt insbesondere für Wechselwirkungen, die zu einer möglicherweise erhöhten Radionuklidfreisetzung führen könnten. Im vorliegenden Diskussionspapier werden potenzielle Wechselwirkungen aufgeführt und ihre Relevanz für Endlagerstandorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen skizziert.

2 Beratungshergang

Die ESK hat in ihrer 49. Sitzung am 03.09.2015 die Diskussion über die verschiedenen Gesichtspunkte, die bei der Endlagerung der oben genannten Abfälle an einem Endlagerstandort zu betrachten sind, aufgenommen. Bereits in dieser Sitzung hat die ESK ihre Ansicht zum Ausdruck gebracht, dass das einzulagernde Abfallspektrum und das Einlagerungskonzept (gemeinsame oder getrennte Lagerung) Auswirkungen auf das Standortauswahlverfahren haben werden. Die ESK führte ihre Beratungen in der 50. ESK-Sitzung am 29.10.2015 fort und bat eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe des ESK-Ausschusses ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE, die sich bereits mit einer Zusammenstellung der Eigenschaften verschiedener Abfallströme, der zu erwartenden Mengen sowie der hieraus abzuleitenden jeweiligen Anforderungen an ein Endlager befasst hatte, ihre Beratungsergebnisse im Sinne der ESK-Diskussion weiterzuentwickeln. Diese Ad-hoc-Arbeitsgruppe SONSTIGE ABFÄLLE legte die entsprechend fortgeschriebene Unterlage der ESK in ihrer 51. Sitzung am 10.12.2015 als Entwurf eines Diskussionspapiers vor. In ihrer 52. Sitzung am 11.02.2016 setzte die ESK ihre Beratungen fort. Anschließend überarbeitete eine erweiterte Ad-hoc-Arbeitsgruppe SONSTIGE ABFÄLLE den Textentwurf nochmals und stimmte ihn in ihrer Sitzung am 05.04.2016 sowie im weiteren Umlaufverfahren ab. In ihrer 54. Sitzung am 12.05.2016 verabschiedete die ESK das vorliegende Diskussionspapier.

3 Sicherheitsanforderungen und Sicherheitskonzept

Für das nach StandAG zu errichtende Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle gelten die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ [5]. Danach ist der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt insbesondere unter Beachtung folgender Sicherheitsprinzipien zu erreichen:

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.
- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.

Die Sicherheitsanforderungen [5] gelten explizit nur für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Im Hinblick auf eine gemeinsame Endlagerung mit vernachlässigbar Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen legen sie fest: „Soweit aus anderweitigen Erwägungen auch vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in dieses Endlager eingelagert werden sollen, sind diese Sicherheitsanforderungen unter Einbeziehung dieser Abfälle mit Ausnahme der gemäß Abschnitt 8.6 für Abfallbehälter geltenden Anforderungen einzuhalten“, (Abschnitt 8.6 enthält Anforderungen zur Rückholbarkeit und zur Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung.). Mit Ausnahme dieser generischen Aussage erfolgen keine weiteren Präzisierungen bzgl. der Einlagerung vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle. Nach Ansicht der ESK sind entsprechende Sicherheitsanforderungen ggf. neu zu entwickeln.

Die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle soll nach [5] in tiefen geologischen Schichten mit hohem Einschlussvermögen erfolgen. „Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten“. Zur Umsetzung dieser Sicherheitsanforderung werden Sicherheitskonzepte entwickelt, die den Standortgegebenheiten, insbesondere den Wirtsgesteinseigenschaften, sowie den Eigenschaften der endzulagernden radioaktiven Abfälle Rechnung tragen (Kapitel 4).

4 Aktuelles Aufkommen an endzulagernden radioaktiven Abfällen in Deutschland

Die heutige Situation hat sich gegenüber den Randbedingungen, unter denen der Abschlussbericht des AkEnd [4] verfasst wurde, geändert. Für ca. 303.000 m³ der in Deutschland nach Abschalten und Rückbau der Kernkraftwerke sowie aus der Forschung und anderen Quellen entstandenen und entstehenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird nach Beschluss der Bundesregierung das Endlager Konrad zur Verfügung stehen [2]. Im Endlager nach StandAG sollen ca. 10.500 t SM bestrahlte Brennelemente und 7.979 Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung gelagert werden [2]. Hinzu kommen laut NaPro [2] nach derzeitiger Schätzung möglicherweise ca. 100.000 m³ Urantails aus der Urananreicherung; diese Menge entspricht etwa 30 Betriebsjahren der Urenco-Anlage, sie kann sich bei längerem Betrieb unter Umständen erhöhen. Außerdem kommt eine Menge von möglicherweise 175.000 bis 220.000 m³ hinzu, die aus der Schachanlage Asse II stammt (radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sowie kontaminierte Materialien). Darüber hinaus gibt es Abfälle, die aus heutiger Sicht nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können. Ihre Menge ist schwer quantifizierbar und es gibt derzeit nur Schätzungen für Obergrenzen [6] (Tabelle 1).

Die Zusammensetzung der einzelnen Abfallarten, die laut NaPro [2] für das Endlager nach StandAG berücksichtigt werden sollen, variiert sehr stark (Tabelle 1). Auch der Kenntnisgrad bezogen auf die Charakterisierung der drei Abfallströme ist sehr unterschiedlich. Während die Zusammensetzung der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und der Urantails aus der Urananreicherung sehr genau bekannt ist, wird die physikalisch-chemische Charakterisierung der aus der Schachanlage Asse II zurückzuholenden Abfälle erst im Rahmen der Rückholung erfolgen können und sich auch aus den noch festzulegenden Konditionierungskonzepten ergeben; die bisherigen Kenntnisse zur Zusammensetzung stammen aus der

Einlagerungsdokumentation. Die hier weiterhin zu betrachtenden sonstigen Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, stammen aus verschiedenen Quellen und sind im Hinblick auf ihre chemische Zusammensetzung sehr unterschiedlich und noch nicht näher charakterisiert.

Tabelle 1: Mengen, Bestandteile und Eigenschaften unterschiedlicher radioaktiver Abfälle, die für die Einlagerung am Standort des Endlagers nach StandAG vorgesehen sind [2,6, 7-10].

	Abfallart	Zusammensetzung (Hauptkomponenten)	zu betrachtende mögliche Auswirkungen auf die Umgebung des Einlagerungsbereichs
Wärme entwickelnd (>99% des Radionuklidgesamtinventars, ca. 10^{20} Bq [12])	Bestrahlte Brennelemente [2] (Stoffzusammensetzung: überwiegend UO ₂ , MOX Material, Eisenbehälter)	<ul style="list-style-type: none"> - 10.500 t SM aus Leistungsreaktoren; keramisches UO₂/MOX Material - 10-12 t SM aus Forschungsreaktoren; Graphitkugeln, USi, Al ... - Stahl/Gusseisenbehälter ggf. auch Behälter aus anderen Metallen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeeintrag - Wasserstoffeintrag (aus Behälterkorrosion)
	Abfälle aus der Wiederaufarbeitung [2] (Stoffzusammensetzung: Borosilikatglas, Zircaloyhülsen, andere Metalle, Eisenbehälter)	<ul style="list-style-type: none"> - Borosilikatglas (3.875 Kokillen) - Kompaktierte metallhaltige, technologische Abfälle (4.104 Kokillen) - Stahl/Gusseisenbehälter ggf. auch Behälter aus anderen Metallen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeeintrag - Wasserstoffeintrag aus Behälterkorrosion
Vernachlässigbar Wärme entwickelnd (< 1% des Radionuklidgesamtinventars)	Abfälle aus der Schachanlage Asse II [7-10] (komplexe Stoffzusammensetzung)	<p>Insgesamt ca. 175.000 bis 220.000 m³, darunter:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ca. 12.000 t Zementstein und 45.000 t Beton - ca. 19.000 t Eisen/Stahl - ca. 9.500 t organische Verbindungen [10] (davon 40 t Komplexbildner EDTA, Citrat, Oxalat, ...) - ca. 900 t Nitrat - ca. 50.000 m³ kontaminiertes Salz [10] - 102 t U, 87 t Th, 28,9 kg Pu [10]; 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂-Eintrag (aus mikrobiologischer Zersetzung organischer Komponenten) - Hoch-pH-Fahne aus Zementkorrosion - Eintrag löslicher Komplexbildner - Eintrag löslicher Salze - Wasserstoffeintrag aus der Metallkorrosion
	Abfälle aus Urananreicherung (Stoffzusammensetzung: hauptsächlich U ₃ O ₈)	<ul style="list-style-type: none"> - ca. 100.000 m³ Uran (als U₃O₈) [2] - ca. 2.240 t UO₂F₂ [11, 12] - unbekannte Menge an Flusssäure (HF) [11, 12] 	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Fluoriden und Flusssäure - Wasserstoffeintrag aus der Behälterkorrosion
	darüber hinausgehende Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können [6, 11, 12] (komplexe Stoffzusammensetzung)	<ul style="list-style-type: none"> - Graphithaltige Abfälle netto max. 500 m³ [6]: (H-3, C-14 ...); ca. 1.540 t Kohlestein; ca. 660 t Graphit [11, 12] - weitere „gemischte“ Abfälle: Nettoabfallvolumen max. 5000 m³ [6] <ul style="list-style-type: none"> - C-14 haltige radioaktive Abfälle, - H-3 haltige Abfälle, - H-3 in berylliumhaltigen Materialien, - Thorium und paraffinhaltige Abfälle 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoch-pH-Fahne aus Zementkorrosion - ggf. bisher nicht bekannte weitere Stoffeinträge - Wasserstoffeintrag aus der Behälterkorrosion

5 Spezifika unterschiedlicher Wirtsgesteine

Nachfolgend werden zentrale Sicherheitsfunktionen typischer Tiefenlagerkonzepte für hoch radioaktive (Wärme entwickelnde) Abfälle im Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein, deren Wirksamkeit und Robustheit bei einer gemeinsamen Einlagerung mit weiteren Abfällen überprüft werden müssten, dargestellt.

Eine Einlagerung im *Steinsalz* [13] setzt vorrangig darauf, den Zutritt von Lösungen, also potenzieller Transportmedien für radio- und chemotoxische Stoffe, zu den eingelagerten Abfällen zu verhindern. Dies soll durch niedrig permeable Barrieren erreicht werden: Eine Auffahrung der Einlagerungshohlräume soll in ungestörten, vernachlässigbar permeablen Steinsalzpartien erfolgen. Potenzielle Wegsamkeiten über die aufgefahrenen Zugangsstrecken und -schächte sind durch geotechnische Barrieren zu verschließen. Dies sind in der ersten Phase nach Einlagerung (Jahrzehnte bis wenige Jahrhunderte) die Strecken- und Schachtverschlüsse. Es ist sicherzustellen, dass deren Permeabilität (einschließlich Kontakt- und Auflockerungszone) hinreichend niedrig bleibt, so dass Lösungszuflüsse verhindert werden. Die Funktion der Verhinderung von Lösungszutritten wird von dem in den Hohlräumen eingebrachten Salzgrusversatz übernommen, sobald dieser aufgrund der aus dem Gebirgsdruck resultierenden Konvergenz hinreichend niedrige Permeabilitäten aufweist.

Sollte es zu einer Freisetzung von Schadstoffen aus den Abfallbinden und anschließender Migration kommen – mögliche Trägermedien wären trotz der oben genannten Maßnahmen zugetretene Lösungen, mit den Abfällen eingebrachte Flüssigkeiten oder entstehende Gase – so ist anzustreben, dass möglichst wenige Schadstoffe gelöst werden und deren Migration chemisch retardiert wird, so dass eine Migration in Schächten und Zugangsstrecken nur in vernachlässigbarem Maße erfolgt.

Angesichts dessen ist zu überprüfen, ob ein Druckaufbau durch die von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zusätzlich gebildeten Gase die Barrierenintegrität (also die Gewährleistung niedriger Permeabilitäten) gefährden kann oder die Fluidbewegung beeinflusst oder ob diese Gase als Trägermedium für Schadstoffe infrage kommen. Weiterhin ist zu prüfen, ob negative, die Löslichkeit erhöhende bzw. Komplexbildung begünstigende und damit die Freisetzung aus den Binden fördernde chemische Verhältnisse eintreten können und ob es negative Auswirkungen hinsichtlich der Haltbarkeitsdauer der Behältermaterialien und geotechnischen Barrieren oder hinsichtlich von Rückhaltemechanismen geben kann. Hohe Salzanteile, wie sie in den rückzuholenden Abfällen aus der Schachanlage Asse zu erwarten sind, werden bei einer Einlagerung in einem Endlager im Steinsalz mit dem Wirtsgestein kompatibel sein. Negative Einflüsse auf geotechnische oder geologische Barrieren sind hier nicht zu erwarten, während dies für andere Wirtsgesteine nicht auszuschließen und daher zu überprüfen ist.

Bei einer Einlagerung im *Tonstein* wird von einem Einschluss der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle in den Behältern für einige tausend Jahre ausgegangen. Diese Anforderung ist daher auslegungsführend für die Behälter. Später, wenn von einem Einschluss durch die Behälter kein Kredit mehr genommen werden kann, kommen Flüssigkeiten und Gase als Trägermedien für freigesetzte Schadstoffe infrage. Die Bewegung von Flüssigkeiten sollte insoweit behindert werden, dass der Transport durch Advektion im Vergleich zum diffusiven Transport vernachlässigbar ist. Dies soll durch die niedrige Permeabilität des Wirtsgesteins und der geotechnischen Barrieren (Verschlussbauwerke, quellender Bentonitversatz – unter Berücksichtigung von Kontakt- und Auflockerungszonen) erreicht werden. Auch

hier ist anzustreben, dass möglichst wenige Schadstoffe gelöst werden. Chemische Rückhaltemechanismen im Wirtsgestein und den geotechnischen Barrieren sollen die Migration durch Diffusion verzögern. Geringe Porengrößen sollen zum Ausfiltern etwaiger schadstofftragender Kolloide beitragen.

Damit ergibt sich, dass auch bei einer Einlagerung im Tonstein zu prüfen ist, ob die von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zusätzlich gebildeten Gase zu einem Druckaufbau und damit einer mechanischen Barrierschädigung beitragen können oder ob sie als Treiber für Fluidbewegungen oder Trägermedium für eine Schadstoffmigration wirken können. Auch die Auswirkungen von Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Lösungen auf die in den geotechnischen Barrieren verwendeten Materialien sowie auf das Löslichkeits-, Komplexbildungs- und das Sorptionsverhalten sind zu überprüfen.

Bei einer Einlagerung im in der Regel klüftigen *Kristallingestein* wird zum Beispiel im schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept von einem Einschluss der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle in kupferummantelten Behältern über mehrere 100.000 Jahre ausgegangen. Die Behälter werden von Puffern aus quellendem Bentonit umgeben, die die mechanische Stabilität gewährleisten und den Angriff durch korrosive Grundwasserinhaltsstoffe verhindern sollen. Eine günstige Wahl des Wirtsgesteins und eine entsprechende Auslegung des geotechnischen Verschlusssystems sollen hydraulisch und hydrogeochemisch bewirkte Schädigungen des Puffers (Bentoniterosion) und den Transport von korrosiven Stoffen (z. B. Sulfiden) zum Puffer-Behälter-System ver- bzw. behindern. Im Falle einer Behälterschädigung ist ebenso wie in den oben genannten Konzepten anzustreben, dass möglichst wenige Schadstoffe gelöst werden. Die Puffer sollen in diesem Fall einen advektiven Schadstofftransport weitgehend verhindern und durch chemische Retardation dem diffusiven Transport entgegenwirken sowie Kolloide ausfiltern. Eine weitere Retardation kann im Wirtsgestein durch Sorption in den Klüftfüllungen sowie durch Matrixdiffusion erfolgen.

Für eine Einlagerung im Kristallingestein sind insbesondere die Auswirkungen von Gasen, die von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gebildet werden, auf das Strömungsfeld zu prüfen. Korrosion der für das KBS-3-Konzept vorgesehenen kupferummantelten Behälter und eine damit verbundene großvolumige Wasserstoffentwicklung kann zumindest für die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems als vernachlässigbar angesehen werden. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach den Auswirkungen von ggf. geänderten hydrogeochemischen Verhältnissen auf Erosion und Quellverhalten von Bentonit, auf die Kupferkorrosion, auf Radionuklidmobilisierung und die Rückhalteeigenschaften von Bentonit und Wirtsgestein.

Auch ist die Einbringung unterschiedlicher Abfallströme in verschiedenen z. B. übereinander liegenden Wirtsgesteinsformationen am selben Standort denkbar. Solche Konzepte könnten ggf. zur Anwendung kommen, wenn das für den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfall geeignete Wirtsgestein in seiner Ausdehnung begrenzt ist. Auch eine Ausnutzung unterschiedlicher Wirtsgesteinseigenschaften für verschiedene Abfallströme ist denkbar. So könnten etwa Porenvolumina zur Aufnahme entstehender Gase bei stärker Gas entwickelnden Abfällen genutzt werden, weniger stark Gas entwickelnde Abfälle aber in dichtere Wirtsgesteinsformationen eingelagert werden.

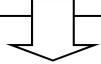
Wegen ihres begrenzten Radionuklidinventars kommen für die Einlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ggf. auch andere Wirtsgesteinsformationen als für die Lagerung Wärme entwickelnder Abfälle infrage. Unter Umständen lässt sich auf diese Weise eine bessere Trennung der Abfallarten voneinander erzielen. Beispielsweise wurde im Schweizer Sachplanverfahren geologische Tiefenlagerung für die Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (HAA) nur der Opalinuston in mehreren möglichen Standortregionen vorgeschlagen, während für die schwach und mittel radioaktiven Abfälle (SMA) teilweise in den gleichen Standortregionen neben dem Opalinuston auch andere Wirtsgesteinsformationen empfohlen wurden [14].

6 Analyse von Einflussparametern und möglichen Wechselwirkungen

Sicherheitsbetrachtungen für ein Endlagerkonzept, das sowohl die Einlagerung von Wärme entwickelnden als auch von vernachlässigbar Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen vorsieht, erfordern zunächst die Analyse von Einflussparametern und Prozessen, die zu einer möglichen wechselseitigen Beeinflussung unterschiedlicher Abfallbestandteile und insbesondere zu einer möglichen zusätzlichen Radionuklidfreisetzung führen können und somit die Langzeitsicherheit beeinträchtigen können. Des Weiteren sind Einflüsse auf die Komplexität des Gesamtsystems zu berücksichtigen, die die Qualität von Sicherheitsanalysen tangieren können. Die Sicherheitsbetrachtung für ein solches Endlagerkonzept muss insbesondere die Einflüsse der vernachlässigbar Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle auf die Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle berücksichtigen. Des Weiteren beeinflusst die Art der Konditionierung von Abfällen deren chemische Reaktivität. Tabelle 2 soll verdeutlichen, dass mögliche gegenseitige Einflüsse einzelner Abfallarten aufeinander sehr unterschiedlich sein können. Sie zeigt auch, dass mögliche Wechselwirkungen vor allem zwischen den Wärme entwickelnden Abfällen und Abfallkomponenten aus den „sonstigen vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen“ (vgl. Fußnote in Tabelle 2) zu erwarten sind. Insbesondere solche Prozesse gilt es zu quantifizieren bzw. auszuschließen.

Einige der zu analysierenden Einflussparameter und Wechselwirkungen werden im Folgenden skizziert. Generell ist die existierende Datenlage zu vielen beschriebenen Prozessen begrenzt und muss zu einem erheblichen Anteil neu entwickelt werden.

Tabelle 2: Zu untersuchende mögliche Einflüsse bei der Einlagerung von Abfallarten auf andere eingelagerte Abfallströme.

Zu überprüfende mögliche Auswirkungen auf bei der Einlagerung von	Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle	Urantails	sonstige vernachlässigbar Wärme entwickelnde Abfälle*
 <p>Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle</p>		<ul style="list-style-type: none"> - physikalisch/chemische Effekte erhöhter Temperaturen - Durch H₂-Gasentwicklung (Behälterkorrosion) verursachter 2-Phasenfluss und möglicher beschleunigter Schadstofftransport 	<p>physikalisch/chemische Effekte erhöhter Temperaturen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mikrobiellen Abbau organischer Abfallbestandteile (Bildung von Komplexbildnern, CO₂, CH₄) und dadurch erhöhte Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Metallkorrosion (H₂-Bildung) - durch H₂-Gasentwicklung (Behälterkorrosion) verursachter 2-Phasenfluss und möglicher beschleunigter Schadstofftransport
<p>Urantails</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Fluoriden und Flusssäure und dadurch bedingter Einfluss auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten - Rückhaltung von Radionukliden an Urantails [15] 		<ul style="list-style-type: none"> - Rückhaltung von Radionukliden an Urantails [15]
<p>sonstigen vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen*</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Salzlösungen: Einfluss auf Bentonitbarrieren in einem Endlager im Tonstein oder Kristallin - Eintrag von organischen Komplexbildnern, CO₂: Einfluss auf Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Hoch-pH-Fahne: Einfluss auf geologische/ geotechnische Barrieren und auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten 	<ul style="list-style-type: none"> - Eintrag von Salzlösungen: Einfluss auf Bentonitbarrieren in einem Endlager im Tonstein oder Kristallin - Eintrag von organischen Komplexbildnern, CO₂: Einfluss auf Radionuklidlöslichkeit/-mobilität - Hoch-pH-Fahne: Einfluss auf geologische/geotechnische Barrieren und auf Radionuklidlöslichkeiten/-mobilitäten 	

* Unter „Sonstige vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen“ sind die in der Tabelle 1 beschriebenen Abfälle aus der Schachanlage Asse II sowie andere Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, zu verstehen.

Temperatur

Der Wärmeeintrag in die Umgebung eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle wird dazu führen, dass es zu einem Temperaturanstieg in benachbarten Einlagerungsbereichen für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung kommt. Das Ausmaß der Temperaturerhöhung hängt vom Wirtsgestein, vom Einlagerungskonzept und von der Planung bzgl. der Abstände der Einlagerungsbereiche voneinander ab. Bisherige Sicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gehen nicht von Temperaturen wesentlich über der Gebirgstemperatur aus. Reaktionen wie z. B. Zersetzung organischer Inhaltstoffe unter möglicherweise mikrobiellem Einfluss und in Anwesenheit von Oxidationsmitteln (Nitrat), Korrosion von Abfallmatrizes und damit Freisetzung von Radionukliden können bei erhöhten Temperaturen erheblich beschleunigt werden. Die Datenlage, die eine belastbare Aussage zu Auswirkungen höherer Temperaturen auf die in einem Endlager mit heterogener Abfallzusammensetzung ablaufenden Prozesse ermöglicht, ist begrenzt.

Gasentwicklung

Im Hinblick auf die Gasentwicklung sind die drei folgenden Faktoren zu betrachten, die jeweils von unterschiedlicher Relevanz für die Betriebs- und die Nachverschlussphase sein können:

Als wesentliche Quelle für das Entstehen von Wasserstoff gilt bei der Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle die Metallkorrosion im Falle eines Lösungszutritts zum Endlagernahfeld in der Nachverschlussphase. Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung können Korrosionsprozesse aufgrund eines Restwassergehalts in den Abfällen auch ohne externen Lösungszutritt stattfinden. Erhöhte Wasserstoffpartialdrucke führen zu reduzierenden Bedingungen und können eine deutliche Verringerung der Brennstoffkorrosion bewirken [16]. Der erhöhte Gasdruck kann sich auch auf die Funktionalität geotechnischer Barrieren auswirken.

Bei einem großen Inventar an organischem Material in einem Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (z. B. Harze, Öl, Folien) sind Szenarien zu analysieren, die mit einer erheblichen Gasentwicklung in Form von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Wasserstoff (H₂) einhergehen. Auch für diese Fälle sind die Auswirkungen auf die Funktion geotechnischer Barrieren zu überprüfen. Zudem kann der Eintrag von CO₂ in ein Endlager mit hohem Radionuklidinventar zu einem erheblichen Anstieg der Löslichkeit und damit der Mobilisierung von Actiniden durch Karbonatkomplexierung führen [17]. Die Relevanz solcher Szenarien ist zu überprüfen.

In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Abfälle können diese relevante Anteile an radioaktiven, flüchtigen oder gasgebundenen Radionukliden Tritium (H-3), Kohlenstoff (C-14), Iod (I-129) und Radon enthalten. Diese sind für die Betriebsphase zu betrachten und führen ggf. zu speziellen Anforderungen an den Bau, die Bewetterung und die Abluftführung sowie an die Gestaltung der betrieblichen Abläufe, um die Betriebssicherheit und den Strahlenschutz zu gewährleisten.

Organische Bestandteile

Abfälle in der Schachanlage Asse II enthalten relevante Anteile an organischem Material, welches z. T. aus Komplexbildnern (EDTA, Citrat, Oxalat) besteht, bzw. Bestandteile wie z. B. Cellulose enthält, die zu Komplexbildnern wie Isosaccharinsäure (ISA) abgebaut werden können. Weiterhin ist erhebliche CO₂-Entwicklung (s. oben) und damit verbunden ein Anstieg der Konzentrationen an komplexbildendem Karbonat in Lösungen durch mikrobielle Degradation von Organika zu erwarten. Es ist zu prüfen, inwiefern durch Komplexbildung mit einem unter Umständen erheblichen Anstieg der Löslichkeit relevanter radiotoxischer Abfallbestandteile zu rechnen ist, wenn solche Komplexbildner durch beispielsweise diffusiven Transport in Einlagerungsbereiche für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle gelangen. Während der Einfluss von Komplexbildnern auf die Radionuklidmobilität in einem Endlager mit zementierten radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wegen Rückhaltung an Zementphasen und den daraus entstehenden Korrosionsprodukten/Sekundärphasen begrenzt wird, ist dies in einem Endlager für bestrahlten Brennstoff und verglaste hoch radioaktive Abfälle nicht notwendigerweise der Fall.

Salz-/Säureeinfluss

Leicht lösliche Salze z. B. in Abfällen aus der Schachanlage Asse II können sich durch Diffusion oder advektiven Transport ausbreiten. Die Quellfähigkeit von Bentoniten, wie sie in einem Endlager im Kristallingestein und im Tonstein als geotechnische Barrieren eingesetzt werden, nimmt mit steigender Ionenstärke ab. Ebenso ist der Einfluss von salzhaltigen Lösungen auf die potenziell ausgewählten Wirtsgesteine Kristallin und Tonstein zu überprüfen. Hier existieren bislang nur wenige Daten, um Auswirkungen auf Langzeitstabilität und Radionuklidrückhaltung unter solchen Bedingungen abschätzen zu können.

Ähnliches gilt für verbleibende Flusssäure und Fluoridmengen, die nach Konditionierung in den Urantails aus der Urananreicherung verbleiben. Ihr Transport, ihre geochemischen Reaktionen und ihr möglicher Einfluss auf die Korrosion von Brennstoff und hoch radioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung sowie auf Radionuklidlöslichkeiten durch Komplexbildung [18] sind zu quantifizieren.

Hoch-pH-Fahnen

Durch Korrosion der beträchtlichen Zement-/Betonanteile in Abfällen aus der Schachanlage Asse II und anderen radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, kann sich in der Umgebung der Einlagerungsbereiche eine Hoch-pH-Fahne ausbilden, die unter Umständen Auswirkungen auf Barrierenkorrosion und Radionuklidlöslichkeiten im Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle hat. Hohe pH-Werte in Kombination mit hohen Kalziumkonzentration führen unter Umständen zu einer deutlichen Erhöhung der Löslichkeit von insbesondere den ansonsten als immobil geltenden tetravalenten Actiniden wie z. B. Plutonium [19]. Die räumliche Ausbreitung von pH-Gradienten wird in einem Endlager im Tonstein wegen äußerst langsamer

diffusiver Transportprozesse begrenzt sein (Größenordnung Meter oder darunter), jedoch in geklüftetem Gestein mit advektivem Stofftransport deutlich weiter reichen. Weitere Auswirkungen betreffen Sekundärphasenbildung und dadurch bedingt Porositätsänderungen in geotechnischen und geologischen Barrieren.

7 Potenzielle Maßnahmen

Im Folgenden werden mögliche technische Maßnahmen diskutiert, die dazu beitragen können, die oben aufgeführten Wechselwirkungen zu minimieren oder gar zu vermeiden.

Konditionierung der Abfälle

Durch die Konditionierung (Behandlung) der Abfälle können die Gasbildung und die Freisetzung von Radionukliden wesentlich beeinflusst werden. Relevante Parameter sind insbesondere die Beständigkeit und Korrosionsresistenz der Abfallbehälter, die Fixierung der Radionuklide in der Abfallmatrix sowie der Wassergehalt und der Gehalt an Organika in den Abfällen. Aus den Anforderungen an die Konditionierung ergeben sich auch das spezifische Volumen eines Abfallstroms, der Aufwand und die Kosten. Ein detailliertes Konzept für die Konditionierung der Abfälle kann insofern nur im Kontext eines Endlagerkonzepts definiert werden.

Die Verpackung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, die derzeit z. B. mit Stahlbehältern vorgesehen ist, wird eine langfristige Freisetzung von Abfallbestandteilen und deren mögliche Wechselwirkung mit wärmeentwickelnden Abfällen nicht verhindern können. Bei Wasserzutritt zum Einlagerungsbereich ist die Barrierefunktion z. B. dünnwandiger Stahlbehälter über längere Zeiträume nur von begrenzter Dauer, so dass von ihr kein Kredit für die Langzeitsicherheit genommen wird. Insbesondere bei Kontakt mit Salzlösungen kann von einer nahezu vollständigen Korrosion innerhalb weniger Jahrzehnte und der Freisetzung von Abfallbestandteilen ausgegangen werden.

Durch Abtrennung bestimmter Abfallbestandteile im Rahmen der Konditionierung lassen sich dagegen bestimmte Wechselwirkungsprozesse ggf. ausschließen. So wäre die Abtrennung der Salzanteile aufgrund ihrer guten Wasserlöslichkeit aus rückgeholten Abfällen aus der Schachanlage Asse II grundsätzlich denkbar. Anschließend müsste sich ein weiterer Behandlungsschritt, um ebenso leicht lösliche Radionuklide aus den salzhaltigen Lösungen selektiv abzutrennen. Für derartige Radionuklide wie z. B. Cs-137, Sr-90, I-129 sind in der Literatur selektive Ionenaustausch- und Solventextraktionsverfahren beschrieben, deren Anwendbarkeit auf Lösungen mit hohen Salzkonzentrationen jedoch zu überprüfen ist. Wesentlich aufwändiger würde sich die selektive Abtrennung von Radionukliden wie H-3 oder C-14 gestalten. Angesichts der Zusammensetzung der zum großen Teil zementierten Asse-Abfälle müssten entsprechende Einflüsse durch Zementbestandteile sowie durch weitere Abfallbestandteile auf die jeweiligen Trennschritte untersucht werden. Etablierte Verfahren für diese spezielle Fragestellung sind derzeit nicht verfügbar und müssten erst entwickelt werden. Im Hinblick auf die geschätzten Volumina von 175.000 bis 220.000 m³ an konditionierten Abfällen mit ca. 50.000 m³ kontaminiertem Salz [20], die aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt werden sollen, wird man darüber hinaus von entsprechend dimensionierten

Konditionierungsanlagen ausgehen müssen, die die Behandlung dieser Abfallmengen und einiger 100.000 m³ Salzlaugen ermöglichen. Die erforderlichen Anlagen würden die Kapazitäten heute üblicher Konditionierungseinrichtungen bei weitem übertreffen.

Organische Bestandteile lassen sich grundsätzlich durch eine thermische Behandlung der Abfälle eliminieren. Möglicherweise geeignete Verfahren bestehen z. B. in Calcinierung, der Pyrolyse oder der Anwendung von Plasmaverfahren für brennbare, bituminierte und auch zementierte Abfälle [21]. Teilweise erfolgt im Zusammenhang mit der thermischen Behandlung die Einbindung in endlagerfähige Matrices wie z. B. Keramiken oder Borosilikatglas. Ob und welche Verfahren sich für die Behandlung von Abfällen aus der Schachanlage Asse II sowie von sonstigen Abfällen eignen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, müsste jedoch zunächst untersucht werden.

Trennung von Einlagerungsbereichen (Einflüsse aus anderem Grubengebäude)

Der Begriff der Lagerung „an einem Endlagerstandort“ ist unbestimmt. Grundsätzlich sind dabei alle Varianten denkbar von der Nutzung gemeinsamer Einlagerungsbereiche für verschiedene Abfallarten bis zur Festlegung eines großräumigen obertägigen Standortareals, von dem aus zwei vollständig voneinander getrennte untertägige Bergwerke aufgefahren werden. Wenn eine gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Abfallströme vollständig ausgeschlossen werden soll, wäre für jeden der oben beschriebenen (und ggf. für weitere) sicherheitsrelevanten Parameter die maximale Reichweite zu bestimmen, aus der sich dann der erforderliche Abstand der Einlagerungsbereiche ergibt. Wenn, in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Analysen von Wechselwirkungen, ein Konzept verfolgt wird, das für unterschiedliche Abfallströme nur ein Endlagerbergwerk vorsieht, können verschiedene Einlagerungsbereiche beispielsweise durch Barrieren und angepasste Auslegung der Wetterführung voneinander getrennt werden, so dass die wechselseitige Beeinflussung minimiert oder gar ausgeschlossen werden kann. Eine konsequente Trennung der Abfallarten bestünde in der Einrichtung zweier benachbarter, aber vollständig getrennter Lager mit getrennten Zugangsschächten an einem Standort. Je nach Variante der Trennung ergäben sich unterschiedliche Anforderungen an den Endlagerstandort und entsprechende Konsequenzen für das Standortauswahlverfahren.

8 Einflüsse auf den Endlagerbetrieb

Beim Betrieb eines Endlagers können im Wesentlichen die drei folgenden Schritte unterschieden werden: (1) Handhabung der Abfallgebände übertage zur Vorbereitung der Einlagerung, (2) Beförderung der Abfallgebände nach untertage (z. B. über einen Schacht) und (3) Handhabung der Abfallgebände untertage zum Zwecke der Einlagerung im vorgesehenen Endlagerbereich. Somit sind grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten der Abfallführung beim Betrieb eines Endlagers für verschiedene Abfallströme an einem Standort vorstellbar:

- 1 Trennung der Abfallführung nur in der übertägigen Anlage,
- 2 Trennung der Abfallführung über Tage und bei der Schachtförderung,
- 3 Vollständige Trennung der Abfallführung.

Bei den Optionen 1 und 2 stehen für die übertägige Handhabung der Wärme entwickelnden und der vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfälle jeweils getrennte Handhabungseinrichtungen zur Verfügung. Während bei Option 1 dann für die Verbringung nach Untertage für alle Abfallströme die gleiche Schachtförderanlage vorgesehen ist, sieht Option 2 zwei getrennte Schächte vor.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und Dimensionen der Gebinde erhöht sich die Komplexität des Einlagerungsbetriebs bei der gemeinsamen Nutzung von Handhabungseinrichtungen. Dies gilt bei Option 1 für die Schachtförderanlage, wo ein häufiger Wechsel der Anschlags- und Feststellvorrichtungen für die verschiedenen Abfallarten erforderlich wäre. Diese Umrüstmaßnahmen sind zeitintensiv, müssen qualitätsgesichert erfolgen und stellen dadurch erhöhte Anforderungen an die Fachkunde des Betriebspersonals. Die erforderliche Einlagerungstechnik (Transportfahrzeuge, Einlagerungsvorrichtungen etc.) wird bei den Optionen 1 und 2 aufgrund der Vielzahl von Behältertypen deutlich komplexer.

Bei vollständiger Trennung der Abfallführung durch Bau zweier Bergwerke mit eigenen übertägigen Anlagen (an einem Standort), getrennten Schachtförderanlagen und separaten Einlagerungsbereichen, die ggf. durch eine ausreichende Feste von Wirtsgestein voneinander getrennt sind (Option 3), lassen sich sowohl die technischen Einrichtungen als auch die Arbeitsabläufe gezielt auf die jeweiligen Abfallströme anpassen und optimieren. Häufige Umrüstungen bei den Handhabungsvorgängen zur Abfalleinlagerung würden dabei nicht erforderlich. Die vollständige Trennung erlaubt des Weiteren die unabhängige Planung und Durchführung von Stilllegung und Verschluss der Endlager für unterschiedliche Abfälle zu ggf. unterschiedlichen Zeitpunkten. Gleiches gilt für möglicherweise erforderliche Rückholmaßnahmen, da hier keinerlei sicherheitstechnische Beeinträchtigungen des jeweils nicht betroffenen Bergwerks entstünden.

9 Bewertung und Schlussfolgerungen

Eine quantitative Bewertung potenzieller Wechselwirkungen und Effekte auf die Betriebs- und Langzeitsicherheit eines Endlagers ist nur im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für einen konkreten Standort mit entsprechendem Wirtsgestein und Endlagerkonzept möglich und daher derzeit nur mit Einschränkungen durchführbar. Diese Einschränkungen sind verursacht durch einen gegenwärtig noch unvollständigen Satz von erforderlichen Daten sowie fehlende konzeptionelle Festlegungen. Im Folgenden wird daher der Versuch einer qualitativen Bewertung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Effekte, Einflussgrößen und Maßnahmen unternommen.

Die gemeinsame Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuholenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, in einem Endlager führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der Komplexität des Endlagersystems. Dies hat Auswirkungen auf die zu erstellende Sicherheitsanalyse. Insbesondere wird damit eine Erhöhung der Unsicherheiten in den Aussagen einhergehen. Dies führt letztlich zu einer Verringerung der Robustheit der Nachweisführung. Grundsätzlich ist damit die gemeinsame Endlagerung der verschiedenen Abfälle in einem Endlager sicherheitstechnisch und nachweistechisch nicht vorteilhaft. Diese Defizite können nur ausgeschlossen bzw. vollständig umgangen werden durch eine komplette Isolierung der verschiedenen Abfallarten in getrennten Einlagerungsbereichen voneinander. Unter Isolierung wird hierbei in erster Linie der Ausschluss von

chemischen und fluiddynamischen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten verstanden. Sicherheitserhöhende Synergien durch die gemeinsame Endlagerung der verschiedenen Abfallarten sind nicht oder nur in Ausnahmefällen zu erwarten.

Potenzielle chemische Wechselwirkungen, die zu einer Erhöhung der Mobilität von Radionukliden insbesondere von langlebigen α -Strahlern führen, sind von hoher Relevanz für die Langzeitsicherheit und sollten durch technische Maßnahmen (Konditionierung, zusätzliche Barrieren) ausgeschlossen oder zumindest weitestgehend verhindert werden. Dies betrifft (organische) Komplexbildner, Karbonatbildung durch Degradation organischer Materialien und mit Einschränkungen hohe pH-Werte und gilt bei Betrachtung von Szenarien mit Flüssigkeitszutritt für alle drei Wirtsgesteine Kristallin, Tonstein und Salz. Hohe pH-Werte führen nur bei besonderen Bedingungen zu einer Mobilitätserhöhung und sind im Allgemeinen mobilitätsverringend, können aber die Eigenschaften der geologischen und geotechnischen Barrieren verändern. Untersuchungen zu den Auswirkungen von Hoch-pH-Fahnen in Endlagersystemen im Tongestein zeigen allerdings eine vergleichsweise geringe räumliche Ausbreitung. Sicherheitstechnische Relevanz haben auch potenziell hohe Salzkonzentrationen in Fluiden bei der Endlagerung in den Wirtsgesteinen Kristallin und Tongestein. Hier ist insbesondere die negative Beeinflussung der Wirksamkeit des Barrierensystems von Bedeutung (eine direkte chemische Beeinflussung der Mobilität der Radionuklide ist von untergeordneter Bedeutung). Auch diese potenziellen Wechselwirkungen müssen durch technische Maßnahmen vermieden bzw. ausgeschlossen werden.

Eher geringere sicherheitstechnische Auswirkungen sind durch Temperaturerhöhung und Gasbildung zu erwarten, die zusätzlich durch die gemeinsame Endlagerung von Wärme entwickelnden und vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen verursacht werden.

Hinsichtlich der verschiedenen Abfallarten sind relevante Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit in erster Linie zu erwarten durch die Lagerung aus der Schachanlage Asse II rückzuziehender Abfälle und sonstiger Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, gemeinsam mit Wärme entwickelnden Abfällen in einem Endlager. Hierbei sind sicherheitsrelevante Effekte und Wechselwirkungen zu betrachten, zu quantifizieren und zu bewerten. Weitaus weniger problematisch erscheint die gemeinsame Lagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle mit abgereichertem Uran aus der Urananreicherung. Hierbei wäre lediglich zu bewerten, inwieweit die Fluorid- und Flusssäuregehalte im abgereicherten Uran die Stabilität der bestrahlten Brennstäbe bzw. verglasten Abfälle und die Mobilität der Radionuklide beeinflussen. Gravierende Effekte sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand dabei nicht zu erwarten.

Auch was die Betriebsführung eines Endlagers für die gemeinsame Einlagerung von vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen und Wärme entwickelnden Abfällen betrifft, ist von einer Erhöhung der Komplexität auszugehen. Die damit möglicherweise verbundene erhöhte Gefahr von Betriebsstörungen, Störfällen und Unfällen, die zu Unterbrechungen des Einlagerungsbetriebs führen können, könnte durch vollständige Trennung der Abfallführung durch Bau zweier Bergwerke mit eigenen übertägigen Anlagen (an einem Standort), getrennten Schachtförderanlagen und separaten Einlagerungsbereichen minimiert werden. Die Möglichkeit der unabhängigen Planung und Durchführung von Verschluss-, Stilllegungs- und ggf. Rückholbetrieb stellen weitere Vorteile getrennter Endlager für Wärme entwickelnde und vernachlässigbar

Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle dar. Insgesamt böte diese Variante also deutlich mehr Flexibilität und sicherheitstechnische Robustheit der Betriebsführung.

Zur Vermeidung der oben genannten negativen Auswirkungen von Bestandteilen vernachlässigbar Wärme entwickelnder Abfälle auf Wärme entwickelnde Abfälle durch gezielte Konditionierung, könnten die Abtrennung von leicht löslichen Salzen sowie die thermische Behandlung zum Abbau organischer Abfallbestandteile in Betracht gezogen werden. Beide Arten der Konditionierung sind grundsätzlich technisch möglich. Allerdings müssten existierende Verfahren auf ihre Anwendbarkeit auf die komplexe stoffliche Zusammensetzung der aus der Asse rückzuholenden Abfälle und der sonstigen Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, überprüft werden. Ggf. sind Anpassungen, Optimierungen und Neuentwicklungen erforderlich. Insbesondere für die eventuelle Abtrennung von Salz aus Abfallströmen mit anschließender Konditionierung der Salzlösungen werden Neukonzeption und Neubau entsprechender Anlagen erforderlich werden.

Aus den oben diskutierten Überlegungen heraus, die sowohl Aspekte der Langzeitsicherheit als auch der Betriebssicherheit für ein Endlager für vernachlässigbar Wärme entwickelnde und Wärme entwickelnde Abfälle betrachten, erscheint ein Konzept, das fluiddynamisch entkoppelte und separierte Einlagerungsbereiche vorsieht, als am vorteilhaftesten. Dies läuft auf die Planung zweier Lagerbereiche an einem Standort hinaus, die sich auch in zwei unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen befinden können. Die Möglichkeit, vollständig separierte Endlager an einem Standort zu errichten, wird auch vom AkEnd und in der Schweiz als sogenanntes Kombilager diskutiert. Art und Ausmaß der Entkopplung können sich je nach Endlagerkonzept, Wirtsgestein und technischer Realisierung unterschiedlich gestalten. Gegebenenfalls wird man neue optimierte Versatz- und Verschlusskonzepte erarbeiten müssen. Im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens sind entsprechende Vorstellungen für die infrage kommenden Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte zu entwickeln und die Effektivität der Entkopplung im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse nachzuweisen. Dazu ist u. a. abzuschätzen, inwiefern sich das Ausmaß der Ausbreitung von Wärme und Gasen sowie von chemischen Gradienten im Umfeld eines Endlagers gestaltet und auswirkt. Danach wird sich das Design eines optimierten Endlagerkonzepts richten. Es ist evident, dass solche Überlegungen bereits in einem frühen Zeitpunkt einer Standortauswahl erforderlich werden. Die Optionen für einen Standort zur Endlagerung der Wärme entwickelnden Abfälle werden bei Festlegung auf gemeinsame Lagerung voraussichtlich zusätzlich eingeschränkt werden.

10 Literatur

- [1] Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz; StandAG), Ausfertigungsdatum: 23.07.2013

- [2] Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), August 2015

- [3] Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle; Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die fünfte Überprüfungskonferenz im Mai 2015; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Referat Öffentlichkeitsarbeit; August 2014

- [4] Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, 2002, W & S Druck GmbH, Köln.

- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010

- [6] BMUB, Daten aus Bundestagsdrucksachen 17/3627 zu Frage 17 und 17/6817 zu Frage 20

- [7] Meyer, H. Das Radionuklidinventar in der Schachtanlage Asse, Informationsveranstaltung des GSF-FB Asse, Remlingen

- [8] Helmholtz Zentrum München, PG Jülich, AG Asse Inventar – Abschlussbericht, Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt Projektgruppe Jülich, 31.08.2010

- [9] Buchheim, B., Meyer, H., Tholen, M., Bestimmung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten radioaktiven Abfällen der Schachtanlage Asse, Abschlussbericht, März 2004, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Forschungsbergwerk Asse

- [10] Schachtanlage Asse II; Kenntnis über die eingelagerten Abfälle, Erlass vom 10.09.2015 (RSIII5-14841-1/24, Brief des Bundesamt für Strahlenschutz an BMUB RS III. 11.09.2015
- [11] Pfeiffer, F., McStoker, B., et al., (2011), Abfallspezifikation und Mengengerüst – Bericht für Arbeitspaket 3, Stand: Juli 2011, in Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS, ISTec, nse
- [12] Kienzler B., Altmaier M., Bube C., Metz V., (2013), Radionuclide Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, research and education reactors, for Waste forms with negligible Heat Generation and for Uranium Tails, KIT Scientific Reports 7635, KIT Scientific Publishing.
- [13] Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J., Synthesebericht für die VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben), Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS – 290, März 2013
- [14] Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete; Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 14-01, Dezember 2014
- [15] Forsberg, C.W., Dole, L.R., Depleted uranium dioxide waste package for spent nuclear fuel, 2002 Materials Research Society Symposium – Proceedings, 713, pp. 143-150
- [16] Carbol, P., Cobos Sabate, J., Glatz, J.P., Grambow, B., Kienzler, B., Loida, A., Martinez Esparza, V.A., Metz, V., Quiñones, J., Ronchi, C., Rondinella, V., Spahiu, K., Wegen, D., Wiss, T., 2005. The effect of dissolved hydrogen on the dissolution of ²³³U doped UO₂(s), high burn-up spent fuel and MOX fuel. SKB Technical Report, TR-05-09, Stockholm, Sweden, 139p.
- [17] Altmaier, M., Gaona, X., Fanghänel, T. (2013), Recent Advances in Aqueous Actinide Chemistry and Thermodynamics, Chemical Reviews 113 (2), pp. 901-943
- [18] Aas, W., Steinle, E., Fanghänel, Th., Kim, J.I., Thermodynamics of Cm(III) in concentrated electrolyte solutions. Fluoride complexation in 0-5 m NaCl at 25°C (1999), Radiochim. Acta, 84, 85-88

- [19] Fellhauer, D., Neck, V., Altmaier, M., Lützenkirchen, J., Fanghänel, Th. (2010), Solubility of tetravalent actinides in alkaline CaCl_2 solutions and formation of $\text{Ca}_4[\text{An}(\text{OH})_8]^{4+}$ complexes: A study of Np(IV) and Pu(IV) under reducing conditions and the systematic trend in the An(IV) series, *Radiochim. Acta*, 98, 541-548
- [20] BfS, Schreiben vom 11.09.2015, Schachtanlage Asse II, Kenntnis über die eingelagerten Abfälle, Erlass vom 10.09.2015
- [21] Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, December, 2006