

Texte in [eckigen Klammern] wurden von der Kommission zunächst zurückgestellt.

5.4 Optionen zur weiteren Beobachtung und ggf. Erforschung

In der gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Debatte werden die Pfade der tiefen Bohrlochlagerung, der Transmutation oder einer Langzeitzwischenlagerung als mögliche Alternativen zur Endlagerung in einem Bergwerk genannt. Die Kommission hat diese drei Pfade daher aufgegriffen, sich jeweils über den aktuellen Sachstand informiert, und ist im Ergebnis der Diskussion zu einer differenzierten Einschätzung der Pfade gekommen.

Zunächst ist festzustellen, dass tiefe Bohrlöcher, Transmutation und Langzeitzwischenlagerung im Vergleich untereinander keine gleichwertigen Pfade für die Lösung der Endlagerproblematik sind:

- Die Einbringung hoch radioaktiver Abfälle in tiefe Bohrlöcher stellt, im Falle ihrer technischen Realisierbarkeit, de facto eine Endlagerung und damit eine Alternative zur Endlagerung in einem Bergwerk dar.
- Hingegen benötigen Transmutation und Langzeitzwischenlagerung im Falle einer Verfolgung dieser Optionen auch weiterhin eine nachgeschaltete Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle, gleich in welcher Form. Diese Optionen können die Endlagerung also zeitlich hinauszögern und ggf. ihre Randbedingungen ändern, sie aber letztlich nicht ersetzen.

Die Kommission ist auch zu der Auffassung gelangt, dass aus heutiger Sicht keine der drei Pfade zu einer früheren Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle führen würde als der von der Kommission bevorzugte Pfad der Endlagerung in einem Endlagerbergwerk mit Reversibilität / Rückholbarkeit / Bergbarkeit.

Eine weitere Verfolgung und regelmäßige Beobachtung der zukünftigen Entwicklung auf dem Gebiet der tiefen Bohrlochtechnik hält die Kommission grundsätzlich für sinnvoll.

Von einer Entwicklung der Transmutationstechnologie erwartet die Kommission unter den in Deutschland herrschenden Randbedingungen keinen maßgeblichen Beitrag zur Lösung der Endlagerproblematik.

Eine geplante Langzeitzwischenlagerung mit dem Ziel, die Entsorgungsfrage in einer unbestimmten Zukunft mit unbestimmten Methoden zu lösen, sollte ebenfalls keine aktiv zu verfolgende Strategie sein. Die mit der heute absehbaren Zwischenlagerung auf längere Sicht ohnehin verbundenen technischen und regulatorischen Fragestellungen sieht die Kommission im Themenfeld der notwendigen Zwischenlagerung¹ verortet, so dass von Überlegungen zur Langzeitzwischenlagerung hier kein zusätzlicher Entwicklungsbeitrag zu erwarten ist.

Die spezifischen Schlussfolgerungen der Kommission zu den drei Pfaden sind in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben.

¹ Siehe Kapitel 5.7

5.4.1 Langzeitzwischenlagerung

Unter dem Begriff der Langzeitzwischenlagerung versteht die Kommission die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren, unter einem zeitlich nicht festgelegten Verzicht auf die Entwicklung einer endgültigen Entsorgungslösung. Sie grenzt sich insofern durch die zeitliche Dimension ab von der notwendigen Zwischenlagerung bis zur Einlagerung in ein betriebsbereites Endlager. Die Langzeitzwischenlagerung ist de facto keine wirkliche Entsorgungsoption. Dennoch könnte sie, über die wahrscheinlich notwendigen Zeiträume von einigen Jahrzehnten hinaus, unter bestimmten Umständen eine von der Gesellschaft zu verfolgende Strategie darstellen.

Die Kommission ist daher der Auffassung, dass das Thema Langzeitzwischenlagerung hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren Beobachtung bedarf, und hat zu den hiermit verbundenen Fragestellungen ein Gutachten eingeholt².

Eine mehr oder weniger zufällige, sich wiederholende Verlängerung des Betriebs von Zwischenlagern ist keine akzeptable Option für den Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen. Um daher überhaupt als denkbare Strategie in Betracht zu kommen, bedarf eine Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre einer bewussten Entscheidung und einer dezidierten Begründung. Sie verschiebt die Frage der Endlagerung in eine sehr weit entfernte Zukunft, in der von der dann lebenden Generation nichts desto trotz eine Entscheidung über die tatsächliche Entsorgung der hoch radioaktiven Abfällen erwartet wird.

5.4.1.1 Technische Einflussgrößen

Als geplanter Zustand wäre das Gesamtsystem eines Langzeitzwischenlagers auf wahrscheinliche Entwicklungen während einiger hundert Jahre auszulegen. Die Schutzziele wären dabei mit den heutigen identisch: der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe, die Abfuhr der Zerfallswärme und die Einhaltung der Unterkritikalität sowie die Vermeidung unnötiger und die Begrenzung und die Kontrolle unvermeidbarer Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung sind ohne Abstrich auch in Zukunft von einer Langzeitzwischenlagerung zu gewährleisten. Rein technisch erscheint eine Langzeitzwischenlagerung grundsätzlich realisierbar.

Die baulichen Anlagen wären hinsichtlich ihrer Robustheit so auszulegen, dass auch bei einem zeitweisen Ausfall von sicherungs- bzw. sicherheitstechnischen Maßnahmen ihre sicherheitsgerichteten Funktionen bestehen bleiben. Ein wirksames, auf die lange Nutzungsdauer abgestimmtes Alterungsmanagement für die Bauwerke müsste dafür sorgen, dass Bauwerksschäden festgestellt, dokumentiert und verfolgt werden. Darauf aufbauend wären Instandsetzungsmaßnahmen zu planen und durchzuführen. Grundsätzlich könnte auch ein, ggf. mehrfacher, Neubau der Gebäude und Anlagen erforderlich werden.

Hinsichtlich der Auslegung eines Langzeitzwischenlagers gegen Einwirkungen von außen müssten regulatorische Grundlagen geschaffen werden, in denen trotz langfristig zunehmender Unsicherheiten handhabbare Festlegungen zu Art, Höhe und Eintrittshäufigkeit der für die Auslegung zugrunde zu legenden Einwirkungen getroffen werden. Da diesbezügliche Prognosen nicht abdeckend für einige hundert Jahre erfolgen können, müssen die regulatorischen Rahmenbedingungen so beschaffen sein, dass während der Betriebszeit des

² vgl. TÜV Nord et. al. (2015), Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung

Langzeitzwischenlagern die zu unterstellenden Einwirkungen und ihre möglichen Auswirkungen regelmäßig überprüft und ggf. Nachrüstmaßnahmen realisiert werden.

Alle realistisch denkbaren Ausführungsoptionen zur Langzeitzwischenlagerung weisen Vor- und Nachteile auf. Eine zunächst nahe liegende Weiternutzung der bestehenden Zwischenlager hätte den grundsätzlichen Nachteil, dass diese nicht im Hinblick auf Betriebszeiten von einigen hundert Jahren ausgelegt wurden. Sie weisen daher einen Mangel an Flexibilität gegenüber Lastannahmen auf, die aufgrund der langen Lagerzeit deutlich über die heutigen Annahmen hinausgehen, oder die auf zusätzlich zu berücksichtigenden Einwirkungen beruhen. Bei Neubauten könnten dem gegenüber die für erforderlich gehaltenen Anforderungen, einschließlich Reserven, von vorneherein eingeplant werden. Das dazu notwendige technische Regelwerk und der regulatorische Rahmen wären aber noch zu entwickeln.

Übertägige Langzeitzwischenlager böten gegenüber flach untertägigen, also noch oberflächennahen, Bauwerken Vorteile hinsichtlich des Schutzes gegen Überflutungen, sowie hinsichtlich der einfacheren Zuwegung und Instandhaltung. Untertägige Lagereinrichtungen und Tunnellösungen böten gegenüber übertägigen Lagern hingegen Vorteile hinsichtlich der Anlagensicherung und gegen zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von außen. Mögliche Aufpralllasten können durch Erdüberdeckungen bzw. Anschüttungen gedämpft werden. Tunnellösungen könnten die Überflutungsproblematik vermeiden.

Stahlbetonstrukturen gelten bereits heute als vergleichsweise langlebig. Es liegen aber keine Erfahrungen über das Alterungsverhalten von Stahlbeton über Zeiträume von mehreren hundert Jahren vor. Im Laufe der Nutzungsdauer würden daher Sanierungen der Betonstrukturen höchstwahrscheinlich notwendig werden.

Die Dichtheit der Lagerbehälter müsste mit Hilfe eines Behälterüberwachungssystems dauerhaft überwacht werden. Handhabungseinrichtungen wie Krananlagen, Flurförderfahrzeuge o. ä. müssten für die Ein- und Auslagerung der Lagerbehälter vorhanden sein und im Hinblick auf ggf. erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an den Lagerbehältern während des gesamten Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung betriebsbereit zur Verfügung stehen. Für Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen an den Lagerbehältern, insbesondere am Dichtungssystem, wäre eine Behälterwartungsstation vorzuhalten. Auch eine sog. "heiße Zelle" inkl. Handhabungsequipment für Instandsetzungsmaßnahmen am Primärdeckeldichtungssystem und für ein ggf. erforderliches Umladen des Inventars in einen zweiten Lagerbehälter müsste vorhanden sein. Die Verfügbarkeit der verwendeten Komponenten des Dichtungssystems wäre ebenso dauerhaft sicherzustellen wie die erforderliche Energieversorgung.

Für den Erhalt der Betriebsbereitschaft der technischen Einrichtungen über lange Zeiträume hinweg wäre ein Wartungs- und Instandhaltungskonzept zu entwickeln, das auch den Ersatz nicht mehr verwendbarer Komponenten vorsieht. Da eine Ersatzteilbevorratung für die gesamte Dauer der Langzeitzwischenlagerung nicht realisierbar ist, muss die Fähigkeit erhalten bleiben, diejenigen Bauteile und Baugruppen, die einer Alterung unterliegen, über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung bei Bedarf nachfertigen zu können. Auch die Möglichkeit eines kompletten Austauschs der technischen Einrichtungen wäre mit zu berücksichtigen, zumal ein sich weiter entwickelnder Stand der Technik zu Nachrüstungsbedarf führen wird.

Die Aufrechterhaltung von Integrität und Handhabbarkeit der Inventare ist eine wichtige Voraussetzung. In der heutigen Nachweisführung zur Sicherstellung der Integrität des Inventars werden einige Aspekte, z. B. chemische Interaktionen, Versprödungsverhalten der Inventare oder Hydrid-Reorientierung, aufgrund des kürzeren Beurteilungszeitraums aus der Betrachtung

ausgeklammert, die für lange Lagerzeiträume neu zu analysieren und in der Folgezeit wiederkehrend zu bewerten wären. Die heute verwendeten Analysemethoden zur Sicherstellung der Inventarintegrität müssten auf ihre Eignung für Langzeitaussagen hin überprüft und ggf. durch neue Bewertungsmethoden ersetzt werden, die ihrerseits erst noch zu entwickeln wären. Die Dokumentation der Inventare und der Behälter müssten so umfassend sein, dass auch nach längerer Zeit eine grundlegende Bewertung mit Basisdaten möglich wäre. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist die generationenübergreifende Speicherung und Auffindbarkeit der Daten sowie der Erhalt ihrer Lesbarkeit.

Aus heutiger Sicht wäre bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung zu unterstellen, dass die Anforderungen an die Integrität und Handhabbarkeit abgebrannter Brennelemente nicht über den gesamten geplanten Lagerzeitraum aufrechterhalten werden können. Es wären daher Konzepte zu entwickeln, die bei Hinweisen auf unerwünschte Schädigungen angewandt werden könnten (z.B. die Brennelemente neu zu verpacken).

Die Sicherung eines Langzeitzwischenlagers gegenüber Dritten erfordert neben baulichen und technischen Sicherungseinrichtungen auch Sicherungspersonal oder staatliche Einsatzkräfte. Dabei wären mindestens die gleichen technischen Einrichtungen und Systeme erforderlich, die zur Sicherung der derzeitigen Zwischenlagerung eingesetzt werden. Hierzu gehören passive Einrichtungen (z. B. verstärkte Wände) und aktive Systeme (z. B. elektronische Überwachungseinrichtungen).

Über einige hundert Jahre hinweg gewinnt außerdem die Auslegung der Anlagen gegenüber Einwirkungen bei kriegerischen Auseinandersetzungen an Bedeutung. Unabhängige Medienversorgung, befristeter personalloser Betrieb, regelmäßiges Update der Maßnahmen gegen Beschuss/Flugkörperabsturz und eine Bevorzugung untertägiger Lagerformen wären die Konsequenzen.

Es wären also bereits in der Planung spezifische, von heutigen Annahmen ggf. abweichende Lastannahmen (inkl. zu unterstellenden Tatmustern, Auslegungstätern, Hilfsmitteln und Tätervorgehen) als Auslegungsgrundlage neu festzulegen, aufgrund des langen Betrachtungszeitraum verbunden mit der Verpflichtung, diese in regelmäßigen Abständen und bei erkanntem Bedarf durch die zuständigen Behörden zu evaluieren. Ob langfristig eine hieraus folgende regelmäßige Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen technisch möglich ist, so dass auch Angriffe mit verbesserten oder neuartigen Tat- und Hilfsmitteln beherrscht werden können, kann aus heutiger Sicht nicht prognostiziert werden.

5.4.1.2 Nichttechnische Einflussgrößen

Bei einer über mehrere Jahrhunderte dauernden Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind nicht nur Fragen der technischen Machbarkeit und Sicherheit in den Blick zu nehmen. Es sind vielmehr auch die Randbedingungen und deren mögliche Änderung zu berücksichtigen, die die Fähigkeit einer Gesellschaft beeinflussen, die mit der Zwischenlagerung verbundenen Aufgaben dauerhaft verantwortungsvoll zu erfüllen.

Der hohe Spezialisierungsgrad der Behältertechnologie, die Wartungsarmut der Behälter selbst und die nach Beendigung der Kernenergienutzung fehlende Inlandsnachfrage können dazu führen, dass bereits in wenigen Jahrzehnten ein Erhalt der erforderlichen Kompetenzen in Deutschland nicht mehr ohne weiteres vorausgesetzt werden kann. Ähnliches gilt für die Fähigkeit zum Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen, sei es im Rahmen von Behälterreparaturen, Umverpackung oder in Zusammenhang mit den auf eine

Langzeitzwischenlagerung folgenden Entsorgungsschritten bis hin zur Realisierung der Endlagerung. Die Verfügbarkeit qualifizierten technischen, wissenschaftlichen und administrativen Personals für eine zukünftige Nischen-Technologie der Langzeitzwischenlagerung kann nicht als sicher gelten. Mit dem Verlust von Know-how können aber Einbußen an der Qualität im Umgang mit den Abfällen einhergehen. Es wäre also eine Herausforderung, die benötigten Kompetenzen in der erforderlichen Qualität über einige hundert Jahre aufrecht zu erhalten.

Demografische Effekte wie Bevölkerungsrückgang und -konzentration in urbanen Räumen können auf lange Sicht auch Fragen der Standortauswahl und der Auslegung von Langzeitzwischenlagern beeinflussen. Je nach Standort wäre beispielsweise der Aufwand für den Erhalt der erforderlichen externen Infrastruktur (Zufahrten, Medienversorgung) auf lange Sicht zunehmend dem Lager selbst zuzurechnen, das ggf. der alleinige Nutzer der Infrastruktur wäre.

Unter regulatorischen Gesichtspunkten wäre eine Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über einige hundert Jahre, unter Verzicht auf ein aktives Verfahren mit dem Ziel der Endlagerung, mit dem heutigen nationalen und europäischen Rechtsrahmen nicht kompatibel. Eine potenzielle Entscheidung in diese Richtung müsste also eine weitgehende Überarbeitung der atomgesetzlich geregelten Verfahrens- und Verwaltungsgrundlagen inklusive des untergesetzlichen Regelwerkes nach sich ziehen, verbunden mit einer grundsätzlichen Neuorientierung der Sicherheitsphilosophie im Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen. Für die Genehmigung und deren Aufrechterhaltung wird es neuer Konzepte bedürfen, die geeignet sind, mit Genehmigungsvorbehalten umzugehen, die sich aus den langfristig nicht prognostizierbaren Einflüssen auf das Sicherheits- und Sicherungskonzept ergeben.

Sinnvoller Weise müsste eine Langzeitzwischenlagerung in staatlicher Zuständigkeit erfolgen, um die erforderliche Kontinuität zu ermöglichen. Hinsichtlich der mit der Genehmigung und Aufsicht verbundenen Aufgaben läge es aus heutiger Sicht nahe, diese bei einer Behörde auf Bundesebene zu konzentrieren, um Kompetenzen zu bündeln, Schnittstellen zu optimieren und Kosten zu begrenzen. Insofern wären verschiedene Änderungen der heutigen Zuständigkeitsverteilung bei der Zwischenlagerung erforderlich. Die Akteurs- und Meinungsvielfalt im Zusammenhang mit der Langzeitzwischenlagerung wird während eines langfristigen Betriebs sehr wahrscheinlich erheblich schwinden, so dass Prozesse demokratischer Entscheidungsfindung unter Beteiligung von Öffentlichkeit und Stakeholdern kaum möglich sein werden.

Die Finanzierung einer Langzeitzwischenlagerung wirft gegenüber der heutigen Praxis eine Reihe offener Fragen auf, z. B. zum Begriff der Sicherstellung (§ 9a AtG), zur Aufrechterhaltung des Verursacherprinzips, zur rückwirkenden Geltendmachung von Mehrkosten oder zur Umwidmung von Rücklagen, die für die Endlagerung gebildet wurden. Die Kosten für Errichtung, Betrieb und Überwachung der Zwischenlager wären zusätzlich zur Endlagervorsorge aufzubringen. Der derzeit vorhandene Rechtsrahmen des Atomgesetzes bzw. der Endlagervorausleistungsverordnung bedürfte einer entsprechenden Weiterentwicklung.

Unabhängig von der gewählten Ausführungsoption des Langzeitzwischenlagers dürfte der erforderliche Zeitbedarf bis zu seiner Inbetriebnahme mehrere Jahrzehnte umfassen. Gar nicht quantifizierbar ist dabei der vorlaufende Prozess des gesellschaftlichen und politischen Diskurses, der zunächst zu einem Konsens für die Langzeitzwischenlagerung als Paradigmenwechsel gegenüber der heutigen Sichtweise führen müsste. Unter den derzeit gültigen genehmigungsrechtlichen Randbedingungen ist jedenfalls davon auszugehen, dass die

Inbetriebnahme eines geplanten Langzeitzwischenlagers nicht mehr während der derzeitigen Laufzeit der bestehenden Zwischenlager möglich wäre.

5.4.2.3 Fazit

Eine heute zu treffende Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung über einige Jahrhunderte wäre mit dem Eingeständnis verbunden, dass unter den heutigen Sicherheitsanforderungen, der heutigen Risikowahrnehmung und den heutigen gesellschaftlichen Randbedingungen keine Lösung für den dauerhaften Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen gefunden wurde, und dass die hiermit verbundenen Entscheidungen deshalb von zukünftigen Generationen getroffen werden müssten.

Die Kommission lehnt deshalb eine Langzeitzwischenlagerung (mit einer Endlagerung in einigen hundert Jahre) ab.

Die technischen Randbedingungen einer Langzeitzwischenlagerung sind aus heutiger Sicht zwar vollständig beschreibbar, ihre langfristige Entwicklung über Zeiträume von einigen Jahrhunderten ist aber nur eingeschränkt prognostizierbar. Außerdem werden einige Aspekte gesellschaftlichen Wandels (z. B. Atomausstieg und Demografie) Herausforderungen für den Erhalt eines Langzeitzwischenlagers bilden. Schließlich kann die gesellschaftliche Stabilität, wie aus der Geschichte zu lernen ist, über so lange Zeiträume nicht vorausgesetzt werden. Instabilitäten wie z.B. kriegerische Auseinandersetzungen und Einwirkungen Dritter müssten in der Auslegung eines Langzeitzwischenlagers berücksichtigt werden. Freilich erscheint es schwer vorstellbar, den sicheren Betrieb eines Langzeitzwischenlagers in Phasen schwerer gesellschaftlicher Verwerfungen - wie z. B. einem Zusammenbruch der gesellschaftlichen Ordnung - zu gewährleisten.

Die Planung einer Langzeitzwischenlagerung und die Aufrechterhaltung der Fähigkeit hierzu über Jahrhunderte hinweg wirft eine ganze Reihe von Fragen auf und beinhaltet Unsicherheiten und damit Risiken, die aus heutiger Sicht gegen eine aktive Verfolgung einer solchen Strategie sprechen. Nichts desto trotz mag der Gesellschaft eine Langzeitzwischenlagerung aufgenötigt werden, wenn es nicht gelingt die angestrebte Endlagerung zu realisieren. Die Kommission betrachtet es daher als sinnvoll und notwendig, insbesondere die mit der Alterung von Behältern und Inventaren verbundenen Effekte im Blick zu behalten und hier auch in Zukunft Anstrengungen für weitere Erkenntnisgewinne zu unternehmen.³

5.4.2 Transmutation

Die Kommission hat das Verfahren der Transmutation als ein Thema identifiziert, das hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren Beobachtung bedarf, und hat zu den mit der Transmutation verbundenen Fragestellungen zwei Gutachten eingeholt⁴.

Transmutation zielt darauf ab, die beim Betrieb von Kernreaktoren entstehenden langlebigen⁵ Nuklide der Elemente Plutonium, Neptunium, Americium und Curium (sogenannte

³ Für den Abschnitt erwendete Literatur: TÜV Nord ENSYS, Öko-Institut e.V. (2015). Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle. K-MAT 44

⁴ vgl. Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ und Öko-Institut et.al. (2015) Gutachten "Transmutation"

⁵ unter langlebigen Radionukliden werden in dem hier diskutierten Zusammenhang Nuklide mit Halbwertszeiten von mehr als ca. 10.000 Jahren verstanden, kurzlebige Nuklide haben dementsprechend deutlich kürzere Halbwertszeiten

Transurane) nach vorheriger Abtrennung (Partitionierung) in stabile oder kurzlebige Nuklide umzuwandeln. Die Transmutation der im abgebrannten Brennstoff ebenfalls vorhandenen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte wird in der Forschung hingegen praktisch nicht verfolgt. In diesem Zusammenhang ist Transmutation auch für eine weitere Behandlung der bereits verglasten hoch radioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nicht geeignet. Für Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren sind die heute diskutierten Verfahren ebenfalls nicht anwendbar, so dass sich die Anwendung des Verfahrens nur auf die Brennelemente aus Leistungsreaktoren bezieht.

Transmutation kann zu einer Verringerung, im besten Fall zu einer Eliminierung des Anteils langlebiger Transurane am endzulagernden Radionuklidinventar führen. Sie ist aber keine Entsorgungsoption zum langfristigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, da auch bei optimistischen Annahmen hoch radioaktive bzw. langlebige Abfälle verbleiben, die einer Endlagerung, bedürfen.

5.4.2.1 Technologisches Gesamtsystem und technischer Entwicklungsstand

Die Umsetzung von "Partitionierung und Transmutation" (oder kurz "P&T") beinhaltet im Wesentlichen drei Schritte: Abtrennung (Partitionierung), Brennstofffertigung und Umwandlung (Transmutation).

Bei der Partitionierung (P) werden die abgebrannten Brennelemente in einer Wiederaufarbeitungsanlage chemisch aufgelöst und die enthaltenen radioaktiven Stoffe in verschiedenen Prozessschritten in mehrere Produktströme separiert. Dabei sind für die Abtrennung der Transurane zwei Verfahren zu unterscheiden. Aus der Wiederaufarbeitung stammt das für die Abtrennung von Uran und Plutonium aus abgebrannten Uranoxid-Brennelementen entwickelte hydrometallurgische PUREX-Verfahren. Um zukünftig auch die sog. Minoren Aktiniden (Neptunium, Americium, Curium) abtrennen zu können, ist eine erhebliche technische Weiterentwicklung erforderlich. Die Machbarkeit einer Abtrennung konnte gezeigt werden. Bisherige Versuche befinden sich aber noch im Labormaßstab. Ob eine großtechnische Umsetzung mit den erforderlichen Wiedergewinnungsfaktoren im Bereich von 99,9% gelingt, ist aus heutiger Sicht offen. In einem noch früheren Entwicklungsstadium befindet sich das Konzept der sog. pyrometallurgischen Verfahren, basierend auf elektrochemischen Methoden bei hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff.

Aus den separierten Transuranen werden im nächsten Schritt frische Brennelemente gefertigt. Auch die Entwicklung von Brennstoffen, die neben Plutonium die Minoren Aktinide enthalten, befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium – insbesondere für die uranfreien Brennstoffe zum Einsatz in beschleunigergetriebenen Reaktoren (s.u.). Eine Problematik bei Brennelementfertigung, -transport und -handhabung der Transmutations-Brennelemente stellen die hohe Gammastrahlung und die, insbesondere von Curium ausgehende, Neutronenstrahlung dar. Sie erfordern massive Abschirmungen und fernbediente Hantierung und führten bereits zu Überlegungen, auf Abtrennung und Transmutation der Curiumisotope zu verzichten. Für die uranfreien Brennstoffe existieren außerdem noch keine Verfahren zur Abtrennung der Spaltprodukte von der Matrix, so dass über die resultierenden Abfallprodukte hinsichtlich Volumen und Eigenschaften derzeit keine Aussagen möglich sind.

Die frischen Brennelemente werden letztlich in geeigneten Transmutationsreaktoren eingesetzt und dort bestrahlt, um die Transurane zu spalten. Für die Transmutationsreaktoren und deren Brennstoff werden international zwei Konzepte diskutiert. Zum einen sind dies "Schnelle Reaktoren" mit Mischoxid-Brennstoffen, die eine Weiterentwicklung der Schnellen Brüter

darstellen. In Frankreich existiert derzeit ein Konzept für einen Prototypreaktor (sog. ASTRID-Reaktor) als Schneller Brüter mit Optimierung für die Transmutation. Zum anderen werden beschleunigergetriebene Reaktoren mit uranfreien Brennstoffen diskutiert, die durch eine externe Neutronenquelle angefahren und gesteuert werden. Solche Anlagen existieren bisher nur als Konzeptstudien. Ein erster beschleunigergetriebener Versuchsreaktor (MYRRHA) soll mit wesentlicher Förderung durch die Europäische Union in Belgien errichtet werden. Daneben besteht ein Konzept für einen europäischen Prototypen (sog. EFIT-Reaktor).

Die Transmutations-Brennelemente müssten nach erfolgter Transmutation erneut wiederaufgearbeitet werden, um danach den Zyklus erneut zu durchlaufen. Da in jedem Durchlauf nur ein Teil der Transurane umgewandelt werden kann, ergibt sich daraus eine Vielzahl von erforderlichen Umläufen. Zwischen den verschiedenen Schritten sind zudem Zwischenlager und Transporte verschiedener radioaktiver Stoffe erforderlich. Da der Prozess nicht zu einer vollständigen Transmutation der langlebigen Minoren Aktiniden führt, sind im Ergebnis nach wie vor hoch radioaktive sowie erhebliche Mengen schwach- und mittelradioaktive (Sekundär-)Abfälle zu entsorgen.

5.4.2.2 Zeitrahmen und Kosten

Aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungsstadiums erscheinen für die Entwicklung aller notwendigen P&T-Technologien bis zur industriellen Reife aus heutiger Sicht zunächst mindestens vier bis fünf Jahrzehnte erforderlich, ggf. auch deutlich mehr.

Bezogen auf das in Deutschland nach Beendigung der Kernenergienutzung vorhandene Inventar abgebrannter Brennelemente und bei einer angestrebten Reduzierung der darin enthaltenen 140 t Transurane auf 10 % des Ausgangswerts müssten anschließend durchschnittlich zwischen fünf und sieben Transmutations-Reaktoren sowie die erforderliche Infrastruktur zur Wiederaufarbeitung (Partitionierung) kontinuierlich über 150 Jahre in Betrieb sein. Anfänglich könnten aufgrund der großen Menge an Transuranen auch 16 Reaktoren erforderlich werden, nach 100 Jahren noch etwa 3 bis 4 Reaktoren. Gesamt-Betriebszeiten unter 100 Jahren lassen sich theoretisch nur mit deutlich mehr Reaktoren bzw. höheren Reaktorleistungen oder unter der optimistischen Annahme eines höheren Transmutationsanteils pro Zyklus erreichen. Unterstellt man geringere Reaktorleistungen können sich auch Betriebszeiten von 200 bis 300 Jahren ergeben.

Über die Kosten eines P&T-Systems sind derzeit nur sehr grobe Abschätzungen mit großen Bandbreiten möglich. Je nach Konzept wären für Forschung und Entwicklung 25 bis 60 Milliarden Euro zu veranschlagen, für die Bereitstellung der erforderlichen Anlagen weitere 40 bis 350 Milliarden Euro. Die mit Transmutationsanlagen erzeugbare elektrische Energie kann hierzu lediglich einen Deckungsbeitrag liefern.

5.4.2.3 Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

Die Einflüsse einer umfassenden P&T-Strategie auf die Endlagerung können derzeit höchstens qualitativ benannt werden. So könnten das Volumen, das Radionuklidinventar und die Radiotoxizität der hoch radioaktiven Abfälle reduziert werden. Der Flächenbedarf für ein entsprechendes Endlager könnte sich ebenfalls reduzieren, wobei aber das Endlagerkonzept und die Wärmeleistung der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung einen größeren Einfluss auf den Flächenbedarf ausüben als der Anteil der transmutierbaren Radionuklide. Um eine nennenswerte Reduzierung der Wärmeleistung zu erreichen, müssten die durch P&T

entstehenden Spaltprodukte nach der Transmutation noch etwa 300 Jahre in einem obertägigen Zwischenlager abklingen.

Der erforderliche Isolationszeitraum für die Endlagerung wird sich nicht verringern, da die potenzielle Dosis, die langfristig aus der Endlagerung resultiert, nicht durch die Transurane sondern durch die für P&T nicht zugänglichen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte bestimmt wird. Die Transurane gelten unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil. Die insgesamt vorhandene Spaltproduktmasse würde sich hingegen erhöhen, je nach Transmutationskonzept sogar in etwa verdoppeln. Daneben ist wesentlich, dass die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Form verglaster Abfallprodukte das langlebige Aktivitätsinventar des Endlagers bestimmen und einer Transmutation aus heutiger Sicht nicht zugänglich sind.

Für bestimmte Szenarien des menschlichen Eindringens oder schneller Freisetzungen nach unwahrscheinlichen Entwicklungen kann die durch P&T verringerte Aktivität des endgelagerten Inventars zur Verringerung potentieller Dosisleistungen führen.

Die Menge der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle vergrößert sich durch die bei P&T anfallenden Sekundärabfälle (z.B. Betriebs- und Rückbauabfälle) erheblich um schätzungsweise 150.000 – 170.000 m³. Diese Abfälle besitzen jedoch vergleichsweise geringe Halbwertszeiten. Im aktuellen Nationalen Entsorgungsprogramm Deutschlands gibt es hierfür keinen Endlagerpfad.

Der Zeitpunkt für den Verschluss eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle würde sich deutlich in die Zukunft verschieben, sei es durch eine spätere Inbetriebnahme oder eine längere Offenhaltung. Verbunden wäre dies mit sicherheitstechnischen Konsequenzen und Auswirkungen für die Sicherung.

5.4.2.4 Sicherheit und Proliferationsrisiken

Die Entwicklung von Transmutationsreaktoren mit gegenüber heutigen Leistungsreaktoren erhöhter Sicherheit stellt eines der Kernziele der aktuellen internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet dar. Allerdings weisen Transmutationsreaktoren spezifische Störfallrisiken auf, die aus dem speziellen radioaktiven Inventar in den Anlagen, den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Transmutationsbrennstoffe sowie den Eigenschaften der zur Kühlung vorgesehenen Flüssigmetalle resultieren. Ob eine erhöhte Sicherheit der Transmutationsreaktoren gegenüber heutigen Kernkraftwerken daher tatsächlich erreicht werden kann ist aus heutiger Sicht offen.

Aufgrund der höheren Wärmeentwicklung, der hohen Dosisleistung und der Kritikalitätssicherheit ergeben sich bei P&T teils deutlich höhere Anforderungen an den Transport und die Zwischenlagerung der radioaktiven Materialien. Im Verhältnis zur eingesetzten Tonne Schwermetall wäre im Vergleich zur heutigen Praxis mit einem Vielfachen an Brennelement-Transporten und Handhabungsschritten zu rechnen, verbunden mit erheblichen Anforderungen an den Strahlenschutz insbesondere des Personals.

Im Falle der großtechnischen Umsetzung einer P&T-Strategie in Deutschland würde während der Betriebszeit mit einigen Tonnen abgetrennter Transurane jährlich umgegangen werden, von denen insbesondere Plutonium, aber in geringerem Maße auch Neptunium und Americium zum Bau von Kernwaffen missbräuchlich verwendet werden könnten. Bei den Anlagen zur Wiederaufarbeitung und Brennstoffherstellung, bei denen diese Stoffe separiert gehandhabt werden, bestünden über mehrere hundert Jahre (s.o.) kontinuierlich hohe Anforderungen an die Spaltmaterialkontrollen, aber auch an die Anlagensicherung. Aus diesem Grunde geht die

Entwicklung in Richtung einer gemeinsamen Abtrennung der Minoren Aktiniden. Nach erfolgter Transmutation wäre das Risiko einer Proliferation entsprechend reduziert bzw. ausgeschlossen.

Dem gegenüber steht das Szenario einer Wiedergewinnung kernwaffenfähiger Stoffe aus einem Endlager. Dies erfordert die Rückholung oder Bergung der Abfälle und die daran anschließende Abtrennung der gewünschten Spaltstoffe. Diese Maßnahmen sind mit erheblichem Aufwand verbunden, dürften für subnationale Akteure undurchführbar sein und würden durch Maßnahmen der Spaltmaterialüberwachung detektiert werden.

Die Risiken aus der Umsetzung einer P&T-Strategie in einem Zeitraum von ca. 150 – 300 Jahren sind gegenüber einer möglichen Reduzierung potenzieller Risiken in der Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers abzuwägen.

5.4.2.5 Gesellschaftliche und soziale Randbedingungen für die praktische Umsetzung

Die Nutzung einer P&T Strategie erfordert für die kommenden Jahrhunderte stabile staatliche Verhältnisse inklusive einer entsprechenden Infrastruktur für Wissenserhalt, Ausbildung, Betrieb, Forschung und Entwicklung. Damit würde eine P&T-Strategie die Verantwortung für Behandlung und Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle weitgehend auf die zukünftigen Generationen verlagern.

Eine Entscheidung für die Umsetzung von P&T würde eine entsprechende Akzeptanz der Bevölkerung voraussetzen, die aufgrund der erforderlichen Zeitdauern für die technische Verwirklichung auch von zukünftigen Generationen getragen werden müsste. Der heutige gesellschaftliche Konsens zum Verzicht auf die Kernenergienutzung in Deutschland müsste aufgehoben werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen im Atomgesetz müssten angepasst und untergeordnete Regelwerke geschaffen werden, um die mit einer P&T-Strategie verbundene großtechnische Plutoniumnutzung in dem oben beschriebenen technologischen Ausmaß zu ermöglichen. Des Weiteren wäre eine Verständigung bezüglich der Finanzierung erforderlich, sowohl im Hinblick auf eine zügige Entwicklung als auch auf eine spätere Umsetzung der Technologien. Selbst eine wie auch immer geartete Beteiligung europäischer Partnerländer wäre mit erheblichen politischen, gesellschaftlichen und regulatorischen Anpassungen verbunden. Im europäischen Raum werden bisher nur in Frankreich und durch die EURATOM konkrete Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verfolgt.

5.4.2.6 Fazit

Die Kommission ist unter Würdigung der oben beschriebenen Aspekte der Auffassung, dass sich aus der von der Kommission bearbeiteten Endlagerthematik keine Argumente für eine Entwicklung einer Transmutationstechnologie ableiten lassen. Die Kommission sieht in dieser Technologie unter den in Deutschland geltenden Randbedingungen keine Vorteile für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Daher wird aus heutiger Sicht eine aktive Verfolgung einer P&T-Strategie nicht empfohlen.⁶

⁶ Verwendete Literatur: Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45. Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48

5.4.3 Endlagerung in tiefen Bohrlöchern

Die Kommission hat die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als mögliche Alternative zur Endlagerung in einem Bergwerk identifiziert, die einer näheren Befassung bedarf, und hat sich anhand eines Gutachtens über den derzeitigen Sachstand informiert⁷.

Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in bis zu 5.000 m tiefen Bohrlöchern ist eine Form der geologischen Tiefenlagerung, die aufgrund der Tiefe und der überlagernden Gesteinsschichten als sicherer Einschluss hoch radioaktiver Abfälle prinzipiell vorstellbar ist.

In Deutschland wurde sie bisher nicht näher als Entsorgungsalternative betrachtet. International stellen beispielsweise die USA und Schweden Überlegungen zu derartigen Konzepten an. Vertiefte Untersuchungen oder Demonstrationsvorhaben erfolgten bisher nicht.

5.4.3.1 Technisches und sicherheitliches Konzept

Die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern soll eine weiträumige Isolation der Abfälle von der Biosphäre ermöglichen, sowie die Möglichkeit bieten, mehrere (redundante) unterschiedliche (diversitäre) geologische Barrieren für die Sicherheit des Endlagers nutzen zu können. Die Schädigung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist bei Bohrungen grundsätzlich geringer als bei Bergwerken, außerdem können die langen Verschlussstrecken der Bohrungen mit ebenfalls redundanten und diversitären Versiegelungen ausgestattet werden. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen⁸.

Der Anspruch an die tiefe Bohrlochlagerung als Form der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle muss nach heutigem Maßstab sinngemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010⁹ entsprechen, d.h. sie muss dauerhaft und langfristig nachsorgefrei einen sicheren Einschluss für eine Million Jahre, i. W. durch die geologischen Barrieren, gewährleisten. Dabei sollen Rückholung während des Betriebs und Bergung in einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss möglich sein. Hinsichtlich dieser Anforderungen wurde in dem beauftragten Gutachten ein Grundkonzept für tiefe Bohrlöcher entwickelt, anhand dessen der Stand der Technik und die mit dem Konzept verbundenen Sicherheitsaspekte diskutiert wurden.

Das Konzept sieht einen Einlagerungsbereich in 3.000 m bis 5.000 m Tiefe in vertikalen Bohrungen im kristallinen Grundgebirge vor. Andere geeignete Wirtsgesteinstypen sind in dieser Tiefenlage in Deutschland nicht zu erwarten. Der Einlagerungsort soll von mindestens zwei unabhängig wirkenden geologischen Barrieren (Salz / Ton) überlagert werden. Zwischen Einlagerungstiefe und den Salz- und Tonbarrieren soll eine Auffang- bzw. Fallenstruktur zur Speicherung der als Korrosionsprodukte zu erwartenden Gase vorliegen.

Der Mindestdurchmesser der Bohrungen orientiert sich am Durchmesser der Einlagerungskokillen (konzeptioneller Durchmesser 430 mm), die zusätzlich einen stabilisierenden Einlagerungsbehälter benötigen. Je tiefer die Bohrung desto mehr Behälter kann sie aufnehmen, umso stabiler müssen aber auch die Behälter aufgrund von Auflast und Druckbeaufschlagung im verschlossenen Bohrloch sein. Die erforderliche Stabilität des

⁷ Bracke, Guido, et al., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-MAT 52

⁸ vgl. K-MAT 52, S. 16

⁹ Vgl. BMU, Sicherheitsanforderungen, 2010

Behälters wird durch die Wandstärke erreicht, die wiederum den Durchmesser der Bohrung beeinflusst. Das von der Kommission in Auftrag gegebene Gutachten betrachtet dazu verschiedene Varianten mit dem Ergebnis, das für eine Einlagerungstiefe von 5.000 m aufgrund der Behälterdimensionierung ein Bohrlochdurchmesser von 900 mm für erforderlich gehalten¹⁰ wird. Für weniger tiefe Bohrungen sind geringere Durchmesser ausreichend.

Die Bohrung bedarf einer vollständigen Verrohrung. Im Einlagerungsbereich wird das Bohrloch mit Verrohrung und zusätzlicher Zementierung des Ringraums ausgebaut. Im Bereich der Barrieren aus Salzgestein und Tonschichten müsste die Verrohrung beim Verschluss des Bohrlochs rückgebaut werden, um Konvergenz und Selbstheilung der geologischen Barrieren nicht zu beeinträchtigen. Das Bohrloch wird für die Einlagerung mit einem Bohrlochbetriebsfluid gefüllt, das der Bohrlochstabilität dient und die Rückholbarkeit gewährleistet. Abdichtende Funktion beim Bohrlochverschluss haben Verfüllungen aus Salzgrus, Bentonit und Asphalt/Bitumenschichten oberhalb der eingelagerten Abfälle.

5.4.3.2 Stand der Technik und Entwicklungsbedarf

Untersuchungen zu tiefen Bohrlöchern als Entsorgungsoption werden derzeit hauptsächlich in den USA vorangetrieben. So plant das Department of Energy (DOE) neben geowissenschaftlicher Forschung einen Pilotversuch, indem inaktive Behälter mit einem Durchmesser von 115 mm in das kristalline Grundgebirge eingebracht und rückgeholt werden sollen. Der Pilotversuch soll der Demonstration einer Entsorgungsmöglichkeit von Strontium-Kapseln aus der Forschung dienen, weshalb hier auch ein deutlich geringerer Behälter- bzw. Bohrlochdurchmesser benötigt wird. Die Sicherheitsanalysen für Transport, Konstruktion, Operation, Verschluss und Langzeitsicherheit werden derzeit erarbeitet. Diskutiert werden auch verschiedene Verfüllmaterialien für das Bohrloch in- Flüssigkeits- oder Feststoffform.

Eine mögliche Bergung ist in keinem der bekannten internationalen Vorhaben zur tiefen Bohrlochlagerung vorgesehen.

Tiefe Bohrungen werden vor allem in der Erdöl- und der Erdgasindustrie eingesetzt. Die hierbei entwickelten Technologien und Verfahren können auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angewendet werden. Dafür sind allerdings Anpassungen und Weiterentwicklungen erforderlich.

Stand der Technik für Bohrungen in großer Tiefe sind Spülbohrverfahren. Ein trockener Ausbau tiefer Bohrlöcher kann für die erforderlichen Tiefen nicht vorausgesetzt werden. Tiefe und Durchmesser sind dabei entscheidende, miteinander in Beziehung stehende Größen. Im Normalfall wird eine Bohrung mit einem größeren Durchmesser begonnen, der mit steigender Tiefe schrittweise verringert wird. Bei typischen Tiefbohrungen der Erdöl- / Erdgasindustrie werden heute in aller Regel Bohrungen im End-Durchmesser von 311,1 mm (12 ¼ ") niedergebracht. Als heute mit Standardbohrverfahren bis in 5.000 m Tiefe maximal realisierbar gilt ein nutzbarer End-Durchmesser von 450 mm. Bei einer Tiefe von 2.000 m ist ein Durchmesser von 650 mm technisch erreichbar. Größere Durchmesser wurden in der Vergangenheit nur in wissenschaftlichen und militärischen Bohrvorhaben realisiert.

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in mehrere tausend Meter tiefe Bohrlöcher werden größere End-Durchmesser (bis 900 mm, s.o.) benötigt, so dass hier eine erhebliche

¹⁰ Vgl. K-MAT 52, S. 158

Weiterentwicklung der Geräte- und Bohrtechnik erforderlich ist. Zudem ist für die Einlagerung ein höherer Anspruch an die vertikale Ausrichtung der Bohrung zu stellen, als bei herkömmlichen industriellen Bohrungen.

Die Bohrlochverfüllung mittels Fluid ist neben dem Spülbohrverfahren selbst auch für die Offenhaltung und Stabilisierung des stehenden Bohrlochs erforderlich. Die Eigenschaften des Fluids sind dabei auf das Umgebungsgestein abzustimmen (Lösungsverhalten, hohe Dichte). Es ist eine ganze Reihe an erprobten Bohrfluiden verfügbar, es muss aber jeweils eine standortspezifische Fluidzusammensetzung entwickelt werden. Da die Stabilisierungsaufgabe auch während und nach der Einlagerung der Abfallgebinde besteht, würde das eingesetzte Fluid im Bohrloch verbleiben, so dass die Abfallbehälter in das Fluid abgesenkt werden und in der Einlagerungstiefe von Fluid umgeben ist. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Wechselwirkungen zwischen Fluid, Verrohrung und Abfallgebinde und die hieran geknüpften zentralen Fragen der Endlagersicherheit, beispielsweise im Hinblick auf Korrosion und Gasbildung.

Die Verrohrung stabilisiert das Bohrloch und kann im Hinblick auf die Einlagerungstiefe den Gebirgsdruck mit aufnehmen. Im Hinblick auf die Rückholbarkeit ist eine langfristig drucksichere Verrohrung unabdingbar, die zudem unter Einlagerungsbedingungen korrosionsfest sein muss. Erfahrungen zur Langzeitbeständigkeit von Verrohrungsmaterialien liegen nicht vor. Auch hier besteht entsprechender Entwicklungsbedarf.

Abfallbehälter für die tiefe Bohrlochlagerung wären ebenfalls noch zu entwickeln. Maßgebliche Randbedingungen für die Behältergröße sind dabei einerseits die Bohrlochgeometrie und andererseits die Größe des einzulagernden Abfalls. Für die Auswahl des Behältermaterials sind Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch sowie die chemischen Eigenschaften des Fluids maßgeblich. Austenitische Stähle werden als prinzipiell geeignet eingestuft. Die erforderliche Behälterstabilität und damit seine Wandstärke wird auch durch die Auflast der übereinander gestapelten Behälter bestimmt.

Die Abfallbehälter können aufgrund der begrenzten Wanddicken nicht selbstabschirmend sein. Entsprechend muss die Einlagerung unter Strahlenschutzbedingungen erfolgen. Kalte Realversuche zur Einlagerung in ein Bohrloch mittels Transferbehälter wurden bereits erfolgreich durchgeführt. Verschiedene Verfahren zum automatisierten Einlagerungsbetrieb sind zudem Stand der Technik. Ein weiterer spezifischer Entwicklungsbedarf wird hier nicht gesehen. Voraussetzung ist aber ein vertikaler Bohrlochverlauf mit möglichst geringen Abweichungen der Ausrichtung.

Als Materialien für Bohrlochverschlüsse haben sich Salz, Ton und Bitumen/Asphalt als langzeitstabil z.B. bei Erdgas/Erdöllagerstätten erwiesen. Der redundante und diversitäre Einsatz derartiger Materialien über eine Bohrlochverschlussstrecke von über 1000 m wird als technisch machbar eingestuft.

5.4.3.3 Betriebs- und Langzeitsicherheit

Mit dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich die Betriebs- und Langzeitsicherheit einer tiefen Bohrlochlagerung noch nicht bewerten. Es lässt sich auch nicht einschätzen, ob eine derartige Lagerung langzeitsicher prinzipiell überhaupt realisiert werden kann. Einige sicherheitsrelevante Themen lassen sich aber identifizieren.

Aufgrund der großen Tiefe der Bohrungen ist es dabei grundsätzlich eine Herausforderung, einen Sicherheitsnachweis zu erbringen, der nicht nur für die Betriebsphase und das Nahfeld

der Bohrung, sondern auch für ein größeres Raumvolumen im Sinne eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei einer Langzeitsicherheitsbetrachtung gilt. Durch die Kombination von kristallinem Grundgebirge in großer Tiefe, überlagernden geologischen Barrieren und den erforderlichen Gasfallen ergäbe sich hier jedenfalls eine sehr komplexe Konfiguration.

Neu zu entwickeln ist auch das Spektrum einzubeziehender Störfälle während der Betriebsphase. Die frühzeitige Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfallinventar in den ersten 100 Jahren ist als relevantes Risiko zu bewerten. Eine Freisetzung kann erfolgen aufgrund einer Behälterbeschädigung bei der Einlagerung, durch Korrosionsvorgänge im Zusammenhang mit dem Bohrlochbetriebsfluid oder aufgrund geologischer Vorgänge, die die Bohrloch- und die Behälterstabilität beeinträchtigen. In der Folge ist mit einer erheblichen Freisetzung von Radionukliden in das Bohrlochfluid zu rechnen, was insbesondere Konsequenzen für die Rückholbarkeit hat. Für das offene Bohrloch wäre zudem zu bewerten, ob die Gasbildung aus Korrosion im Bohrlochfluid frühzeitig zu einer aufwärts gerichteten Fluidbewegung und damit zur Ausbreitung von Radionukliden führen könnte.

Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines verschlossenen Einlagerungsbohrlochs wären die zugrunde zu legenden wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, bzw. die hierbei für die Bohrlochlagerung spezifischen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse¹¹ ebenfalls neu zu entwickeln. Dabei wird es als wahrscheinlich angesehen¹², dass in Folge des Kontakts von Behältermaterial und Fluid eine relevante Korrosion bereits nach wenigen Jahrzehnten einsetzt. Im verschlossenen Bohrloch ist als Konsequenz die Bildung erheblicher Wasserstoffgasmengen zu erwarten. Die Auswirkungen der Gasmigration und des resultierenden Gasdrucks auf das Verschlussystem sind für tiefe Bohrlöcher nicht untersucht. Für die Sicherheitsanalyse müssten Wissenslücken zum geochemischen Milieu im tiefen Bohrloch, beeinflusst durch Behälter- und Verrohrungsmaterialien, Bohrlochfluid, Gestein und ggf. Abfallinventar geschlossen werden. Auch die langfristige Einhaltung der Unterkritikalität in einem tiefen Bohrloch mit zahlreichen, vertikal übereinander eingebrachten Behältern mit abgebranntem Kernbrennstoff kann aufgrund dieser Wissenslücken derzeit nicht bewertet werden¹³.

5.4.3.4 Rückholung und Bergung

Die Anforderungen an Rückholung und Bergung müssten zunächst für die tiefe Bohrlochlagerung spezifiziert werden. Nach sinngemäßer Übertragung der BMU Sicherheitsanforderungen von 2010 wird die Rückholung im Sinne der Umkehrbarkeit der Einlagerung eines Abfallbehälters bis zum Zeitpunkt des Verschlusses eines Bohrlochs, unter Einsatz vorhandener Verfahren, als machbar eingestuft. Der Einlagerungszeitraum in ein Bohrloch, und damit die mehr oder weniger unmittelbare Zugänglichkeit der Abfallgebinde, umfasst allerdings nur etwa 3 bis 5 Jahre und ist damit nicht vergleichbar zum Rückholungszeitraum aus einem Endlagerbergwerk. In K-Mat 52¹⁴ wird hierzu dargestellt, dass aufgrund von Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik der Betrieb von Bohrlöchern über 100 Jahre grundsätzlich möglich ist. Über diesen Zeitraum könnte demnach auch eine Rückholung aus einem offen gehaltenen Bohrloch erfolgen.

¹¹ engl.: FEP: Features, Events, Processes

¹² Vgl. K-Mat 52, Kapitel 10.2

¹³ Vgl. K-Mat 52, Kapitel 10.3

¹⁴ Vgl. K-Mat 52, Kapitel 9

Die gemäß BMU Sicherheitsanforderung von 2010 über 500 Jahre erforderliche Bergbarkeit von Behältern wird in K-Mat 52 mit heutigen Kenntnissen als nicht machbar eingestuft. Nach Verschluss des Bohrlochs könnte der eingelagerte Abfall zwar prinzipiell durch Überbohren wieder erreicht und ggf. auch geborgen werden. Letztlich ist aber keine Aussage darüber möglich, ob Behälter und Bohrlochausbau in der Einlagerungstiefe über den geforderten Zeitraum von 500 Jahren ausreichend intakt und lokalisierbar bleiben¹⁵.

5.4.3.5 Fazit

Eine Endlagerung in tiefen Bohrlöchern könnte prinzipiell eine weiträumige Isolation der Abfälle von der Biosphäre unter Nutzung redundanter und diversitärer geologischer Barrieren und langer technischer Verschlussstrecken ermöglichen. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen.

Die Kommission sieht die Technologie einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern allerdings als derzeit nicht so ausgereift an wie die Endlagerung in einem Bergwerk. Generell weist die Technik einige von der Kommission als relevant eingestufte Probleme auf, die intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern, und für die die Aussichten auf Machbarkeit unklar sind. Zu nennen ist hier vor allem die Einlagerung der Abfallbehälter in ein Bohrlochbetriebsfluid mit den Konsequenzen der Behälter- und Verrohrungskorrosion und einer relevanten Gasbildung. Zudem besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Bohrtechnologie für die in der Einlagerungstiefe erforderlichen, derzeit nicht verfügbaren Bohrdurchmesser (bisher nur 430 mm) und ein erheblicher Entwicklungsbedarf für die für diese Form der Endlagerung erforderlichen Abfallbehälter. Ein denkbarer Bohrdurchmesser von 900 mm würde immer noch nur Behälter erlauben, die vergleichsweise sehr wenig radioaktives Material aufnehmen würden; damit würde eine sehr hohe Zahl von Behältern erforderlich.

Außerdem müsste auf das Konzept der Bergbarkeit verzichtet werden, da sie nach derzeitigem Wissenstand als nicht machbar eingestuft wird.

Die Kommission geht davon aus, dass eine Fortentwicklung der Technologie möglich ist, die dann zu einer anderen Bewertung tiefer Bohrlöcher führen könnte. Tiefe Bohrlöcher können aber erst dann als Entsorgungsalternative in Betracht gezogen werden, wenn die Technik ausgereift und mindestens ebenso erfolgversprechend ist wie die Endlagerung in einem Bergwerk. Die Kommission sieht bei der Endlagerung in tiefen Bohrlöchern insbesondere keinen zeitlichen Vorteil gegenüber der bevorzugten Bergwerkslösung.

Die Kommission empfiehlt, die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik, die derzeit vor allen Dingen in den USA erfolgt, weiter zu beobachten und den erreichten Stand regelmäßig festzustellen, z.B. im Rahmen einer Berichterstattung durch den Vorhabenträger an die Regulierungsbehörde und den deutschen Bundestag. Außerdem erachtet es die Kommission als sinnvoll, auch auf deutscher Seite Forschungsvorhaben zu offenen Fragen wie der spezifischen Behältertechnologie und der an die Bohrlochlagerung zu stellenden Sicherheitsanforderungen angemessen zu fördern. Aufgrund der grundsätzlichen Unsicherheit, ob durch intensive Forschung und Entwicklung der Pfad der tiefen Bohrlöcher überhaupt als eine Option für die sichere Endlagerung erwiesen werden kann, darf die Standortsuche für ein Endlager in einem Bergwerk hierdurch aber nicht eingeschränkt werden.

¹⁵ Vgl. K-Mat 52, S. 217

Verwendete Literatur

Bracke, Guido, et al., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010