

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

Beratungsunterlage zu TOP 3 der 14. Sitzung am 24. November 2015

Vorträge zu Behältertechnologien für den Zweck der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle

Stellungnahme zur Rückholung und Bergung von Behältern

Verfasser: Dr.-Ing. Holger Völzke, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-47</p>

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz
Arbeitsgruppe 3 Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen
14. Sitzung am 24.11.2015

Beitrag zu den Anforderungen an die Beschaffenheit von Endlagerbehältern hinsichtlich ihrer Rückholbarkeit und Bergbarkeit

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Fachbereich 3.4 Sicherheit von Lagerbehältern
Dr.-Ing. Holger Völzke, Dr.rer.nat. Dietmar Wolff, Dr.-Ing. Eva-Maria Kasperek

1 Veranlassung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurde von der AG 3 der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gebeten, Anforderungen an Behälter für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe im Hinblick auf ihre Rückholbarkeit während des Endlagerbetriebes und ihre Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers über einen Zeitraum von 500 (bis 1.000 ?) Jahren darzustellen. Die BAM kommt diesem Wunsch auf der Grundlage ihrer langjährigen Erfahrungen und Fachkenntnisse auf den Gebieten der Bauartprüfung und der sicherheitstechnischen Begutachtung von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe nach.

2 Grundsätzliche Überlegungen

Den sicherheitstechnischen Betrachtungen, insbesondere auch zur Langzeitbeständigkeit von Behältern für hoch radioaktive Stoffe, liegt bislang der in Deutschland genehmigte Zwischenlagerzeitraum von maximal 40 Jahren unter den Randbedingungen der trockenen Zwischenlagerung zugrunde. Ausgehend von den diesbezüglichen Erkenntnissen und Erfahrungen sowie unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen auf dem Gebiet der Endlagerforschung, werden nachfolgend Anforderungen und Kriterien, die sich für Endlagerbehälter aus einer späteren Rückholung oder Bergung ergeben, hergeleitet und ihre Konsequenzen für die verschiedenen denkbaren Behälterkonzepte diskutiert.

Hierbei sind die möglichen Auswirkungen der vom Endlagersystem abhängigen Beanspruchungsbedingungen auf den Zustand von Behältern, Komponenten, Werkstoffen und Inventaren während ihrer gesamten Einsatzzeit zu berücksichtigen. Angesichts der gegenwärtigen Ausgangslage mit unbekanntem Wirtsgestein, unbekannter Endlagerformation und unbekanntem davon abhängigen Behälterdesign, erfolgt wegen der Vielzahl der potenziell zu berücksichtigenden Beanspruchungs- und Materialparameter eine Fokussierung auf wesentliche Zusammenhänge und Einflussparameter.

Entsprechend dem gegenwärtigen deutschen Entsorgungskonzept für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, werden diese zunächst in dickwandigen Transport- und Lagerbehältern unter weitgehend inerten Bedingungen trocken zwischengelagert. Die erforderlichen Aufbewahrungszeiten bis zu einer Endlagerung der Inventare dürften nach derzeitiger Lage um einige weitere Jahrzehnte über die bisher genehmigten maximal 40 Jahre hinaus zu verlängern sein. Im Zuge der Bereitstellung eines Endlagers muss schließlich entschieden werden, ob die

bisherigen Zwischenlagerbehälter auch für die Endlagerung ertüchtigt werden können oder eine Umladung bzw. Umkonditionierung der Inventare in spezielle Endlagerbehälter vorgesehen wird.

Ergänzend zu den sicherheitstechnischen Anforderungen an die Behälter im Zuge ihrer Verbringung in das Endlager werden zunächst mögliche Auswirkungen durch die Forderung nach einer Rückholbarkeit noch während der Betriebsphase des Endlagers angestellt. Weitergehend werden Auswirkungen aus der zusätzlichen Forderung nach ihrer Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers für weitere 500 bis 1.000 Jahre diskutiert.

Die nachfolgenden Überlegungen konzentrieren sich auf technische Aspekte entsprechend dem heutigen Wissensstand unter Einbeziehung ausgewählter Erfahrungen internationaler Endlagerprojekte und berücksichtigen diejenigen Aspekte, die eine sichere Rückholung bzw. Bergung bis zur Verbringung der Behälter über Tage ermöglichen. Nachfolgende Schritte werden nicht betrachtet.

3 Behälterspezifische Sicherheitsanforderungen im Einlagerungsbetrieb und Überlegungen zur Rückholoption

Grundlegend müssen Verpackungen für Transport oder Lagerung radioaktiver Stoffe folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe,
- Sichere Einhaltung der Unterkritikalität,
- Sichere Abfuhr der Zerfallswärme,
- Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung.

Bei Aufbewahrung und der damit verbundenen Handhabung in einer kerntechnischen Einrichtung wie z. B. einem Endlager, folgen unter Berücksichtigung der betrieblichen Randbedingungen zusätzlich hieraus abgeleitete behälterspezifische Anforderungen:

- Ausreichende Abschirmung der ionisierenden Strahlung durch die Behälter und sonstige über- und untertägige technische Einrichtungen,
- Betriebs- und instandhaltungsgerechte Auslegung der Behälter,
- Sichere Handhabung und Transporte der Abfallgebände,
- Auslegung gegen Betriebsstörungen und Störfälle.

Zur Ermittlung der auslegungsrelevanten Beanspruchungsgrößen sind neben den normalen Betriebsbedingungen auch die in der Sicherheitsanalyse der Anlage ermittelten auslegungsrelevanten Störfallszenarien (z.B. Brand, Kollision, Behälterabsturz) zu berücksichtigen. Für die erforderliche konservative Nachweisführung sind die ungünstigsten Behältereigenschaften in Verbindung mit den höchsten bzw. ungünstigsten Beanspruchungsbedingungen zu Grunde zu legen, die im Laufe der gesamten Betriebsphase auftreten können. Hierbei sind auch langfristige Schädigungs- und Alterungsmechanismen zu berücksichtigen. Sofern eventuelle Schäden an den Behältern nicht durch festgelegte Inspektionen identifiziert und ggf. durch Reparaturmaßnahmen beseitigt werden, ist für die sicherheitstechnische Nachweisführung der ungünstigste Behälterzustand zu betrachten, der sich am Ende der zu bewertenden Zeitspanne eingestellt haben kann.

Diese Prinzipien aus der bisherigen Praxis der Behälterauslegung und -begutachtung sind zu spiegeln an den im Jahr 2010 durch das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (heute BMUB) definierten Anforderungen, mit denen das erforderliche Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen durch ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen erreicht wird [1].

Hieraus ergibt sich, dass während des Einlagerungsbetriebes alle Behälter die o.g. Sicherheitsanforderungen unter den normalen betrieblichen Beanspruchungen und bei auslegungsrelevanten Störfallszenarien erfüllen müssen. Die technische Ausgestaltung hängt unmittelbar vom Endlagerstandort mit seinem Wirtsgestein und den daraus resultierenden Beanspruchungsbedingungen unter Berücksichtigung des festgelegten Betriebsregimes ab. In der Nachweisführung sind alle einzulagernden Behälter unter Berücksichtigung ihres zu erwartenden Zustands zum Zeitpunkt der Anlieferung für die Verbringung nach untertage zu betrachten und ihre Eignung nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik nachzuweisen.

Sofern eine Rückholbarkeit der Behälter während des Betriebszeitraums des Endlagers gefordert ist, müssen alle Behälter ihre Funktionen als technische Barriere zur Einhaltung der o.g. Sicherheitsanforderungen nicht nur bis zum Abschluss der Einlagerung über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum bis zum Verschluss des Einlagerungsbereiches oder Bohrlochs, sondern bis zum endgültigen Verschluss des Endlagerbergwerks erfüllen. Hierbei handelt es sich um Zeiträume von voraussichtlich bis zu etwa 100 Jahren, in denen die Behälter größtenteils nicht mehr frei zugänglich sind.

Nach [1] wird die Rückholbarkeit wie folgt dargestellt: „Als Rückholbarkeit wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet. ... In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.“ Betroffen ist formal der Zeitraum ab der Einlagerung des Behälters bis zum Ende der Stilllegungsarbeiten, wobei für Nachweise über die Zuverlässigkeit und Robustheit von Sicherheitsfunktionen in diesem Zeitraum das „kerntechnische Regelwerk für vergleichbare Funktionen in anderen kerntechnischen Anlagen“ [1] heranzuziehen ist.

Sofern der Endlagerbetrieb also die Rückholoption einschließen soll, muss die Rückholung der Behälter im Rahmen eines erweiterten Betriebsregimes technisch und organisatorisch in den Sicherheitsnachweis des Endlagerbergwerks eingeschlossen und zu Einlagerungsbeginn geregelt sein. Dazu gehören insbesondere auch der Zugriff auf und die Handhabung von bereits in verschlossenen Bereichen des Endlagers gelagerten Behältern und deren Verbringung nach übertage. Da es sich um eine betriebliche Maßnahme handelt, sind die Anforderungen an das Nachweisniveau gegenüber dem Einlagerungsbetrieb unverändert. Dies schließt verlässliche Prognosen über den Zustand des potenziell „ältesten“ Behälters mit ein, dessen Eigenschaften weiterhin eine planbare Handhabung zur Verbringung nach übertage erlauben müssen.

Im Zuge der Rückholung sind dabei auch Konzepte denkbar, bei denen einzelne Sicherheitsfunktionen nicht ausschließlich durch den Behälter sondern ggf. ergänzend durch zusätzliche Komponenten, z.B. Overpacks, übernommen werden. In diesem Sinne müssen auch die Behälterkonfigurationen in den unterschiedlichen Betriebsabläufen Einlagerung und Rückholung nicht identisch sein. So

kommt ggf. in einem salinaren Wirtgestein wegen des raschen Zuwachsens der Endlagerbereiche nach dem Verschluss durch das Fließen des Salzes, auch ein zylindrisches Herausschneiden der die Behälter umgebenden Salzbereiche in Frage. Entsprechende Konzepte müssen wiederum sowohl normale Betriebsabläufe als auch mögliche Störfälle berücksichtigen.

Insgesamt folgen für die Endlagerbehälter aus einer zusätzlichen Betriebsphase der Rückholung erweiterte Anforderungen in erster Linie hinsichtlich ihrer Langzeitbeständigkeit unter den Bedingungen des verschlossenen Einlagerungsbereiches. Der zu betrachtende Zeitraum beginnt mit dem erstmaligen Verschluss eines Einlagerungsbereiches und endet unmittelbar vor dem endgültigen Verschluss des gesamten Endlagers zzgl. des notwendigen Zeitraumes bis zur Rückholung des letzten Behälters. Hierfür sind in Abhängigkeit vom Behälterkonzept und vom Wirtsgestein belastbare Sicherheitsnachweise unter Berücksichtigung möglicher Schäden am Behälter und seiner Anschlagmittel einschließlich geeigneter Reparaturkonzepte bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich. Da [1] impliziert, dass die Rückholung dem Normalbetrieb zuzuordnen ist, sind sowohl für die Behälter als auch für die relevanten Randbedingungen des Endlagersystems die ungünstigsten Entwicklungen zu Grunde zu legen. Sofern zusätzliche Rückholungstechniken vorgesehen werden, gilt ein entsprechendes Anforderungsniveau auch diesbezüglich, d. h. für ggf. erforderliche Overpacks oder Bergungsbehälter, wobei deren Eignung und Realisierbarkeit während des Einlagerungsbetriebes regelmäßig zu überprüfen ist und bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen sind.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Frage nach den Kriterien für die Einleitung einer Rückholung. Hierzu müsste unterstellt werden, dass gegenüber der ursprünglichen Sicherheitsanalyse, auf deren Grundlage die Genehmigung erteilt worden ist, im Verlauf des über mehrere Jahrzehnte laufenden Einlagerungsbetriebes neue Erkenntnisse vorliegen, die berechtigte Zweifel an der Sicherheit des Endlagers begründen und damit eine Rückholung der Behälter zwingend notwendig wäre. Hierzu können neben der allgemeinen Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik auch Erkenntnisse aus dem Endlagerbetrieb beitragen.

In diesem Zusammenhang stellt sich im Hinblick auf die sehr lange Betriebsphase eines Endlagers (üblicherweise wird von bis zu 100 Jahren ausgegangen) auch die Frage nach der Notwendigkeit und dem Umfang eines Monitorings im Hinblick auf die Einhaltung von Sicherheitsfunktionen durch die Endlagerbehälter in bereits verschlossenen Einlagerungsbereichen. Dieser Gesichtspunkt unterscheidet sich deutlich von dem im Kap. 7.4 in [1] adressierten Messprogramm primär zur Beweissicherung und Kontrolle der thermomechanischen Reaktionen des Gebirges. Hierbei ist zu beachten, dass ein Monitoring selbst keine Sicherheitsfunktionen beinhaltet, sondern diese von den Endlagerbehältern nach Möglichkeiten inhärent und passiv gewährleistet werden müssen. Ein Monitoring eröffnet lediglich die Möglichkeit eventuelle unerwartete Eigenschaftsverschlechterungen an den Endlagerbehältern, die ggf. sicherheitsrelevant sein können, frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass durch ein Monitoring und die damit verbundenen technischen Maßnahmen, wie zusätzlich installierte Sensoren, keine Beeinträchtigung vorhandener Sicherheitsfunktionen verbunden sein darf. So wäre eine zusätzliche Anbringung von Messwertaufnehmern bzw. Sensoren an den Endlagerbehältern (z.B. zur Überwachung der Dichtheit) von vornherein bereits bei der Behälterauslegung zu berücksichtigen. Weitere Fragestellungen betreffen die langfristige Zuverlässigkeit installierter Sensoren einschließlich der Datenübertragung und Da-

tenerfassung vor dem Hintergrund sehr langer Betriebszeiträume unter komplexen Beanspruchungsbedingungen und fehlender Zugänglichkeit nach Verschluss des Einlagerungsbereiches. Nach unserer Auffassung ist auf diesem Gebiet noch mit erheblichem Entwicklungs- und Erprobungsbedarf bis zur Verfügbarkeit geeigneter technischer Messsysteme zu rechnen. Schließlich wäre auch zu klären, welche Aussagegenauigkeit und Schlussfolgerungen die während des Monitorings generierten Messdaten ermöglichen.

4 Überlegungen zu behälterspezifischen Anforderungen bzgl. Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers

Sofern nach Verschluss des Endlagers eine Bergung von Behältern planbar ermöglicht werden soll, müssten die Behälter in einem „bergbaren Zustand“ erhalten bleiben. Hierbei würden wir unter bergbarem Zustand verstehen, dass die wesentlichen Sicherheitsfunktionen der Behälter unter Berücksichtigung des jeweiligen Endlagers mit seinen spezifischen Beanspruchungsbedingungen nachweislich für den zu betrachtenden Zeitraum von insgesamt 500 (oder ggf. auch bis 1.000) Jahren auf Grundlage der heutigen Wissensbasis beibehalten werden. In die Betrachtungen sind dabei auch Verhalten und Eigenschaften der Behälterinventare insbesondere hinsichtlich ihrer Freisetzungspotenziale und der Kritikalitätssicherheit einzubeziehen. Unter Kap. 8.6 in [1] ist ausgeführt: „Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.“

Die für ihre Bergbarkeit wesentlichen Sicherheitsfunktionen der Behälter stellen der Erhalt des dichten Einschlusses des radioaktiven Inventars und die Gewährleistung der Unterkritikalität dar. Hierfür ist eine ausreichende mechanische Stabilität der maßgebenden Behälterkomponenten, z. B. auch von Deckeldichtsystemen, über entsprechend lange Zeiträume unter Berücksichtigung von Degradationserscheinungen ausschlaggebend. Eine hinreichende Abschirmung und ggf. Wärmeabfuhr kann unter Berücksichtigung der mit der Zeit abnehmenden Strahlungsintensität und Zerfallswärmeleistung auch durch zusätzliche Maßnahmen bei einer Bergung hergestellt werden. Ebenso kann die Handhabungstechnik für die Behälter den Erfordernissen, z. B. bei nicht mehr einsatzfähigen Tragzapfen, angepasst werden. Sofern gemäß [1] eine Bergung als Notfallmaßnahme anzusehen ist, sind nur die wahrscheinlichen Entwicklungen des Behälterzustands und der für sie relevanten Randbedingungen des Endlagersystems zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, in welchem Maße der Nachweis einer Bergbarkeit tatsächlich neue bzw. zusätzliche Anforderungen an die Behälter generiert. Bei Fokussierung auf den Integritätserhalt, können diese je nach Endlagersystem mit der erforderlichen Funktion der Behälter als Langzeitsicherheitsbarriere korrelieren. In nicht vollständig wasserundurchlässigen Wirtsgesteinen müssen der dichte Einschluss des radioaktiven Inventars und die Unterkritikalität durch technische oder geotechnische Barrieren gewährleistet werden, wobei der Endlagerbehälter für eine bestimmte Dauer eine maßgebliche Rolle einnehmen kann. Die entsprechenden Kriterien für die Auslegung der Konstruktion ergeben sich aus den mechanischen Beanspruchungen, denen der eingelagerte Behälter ausgesetzt ist. Sofern der Nachweis erbracht werden kann, dass die durch das

Wirtsgestein, Grundwasser oder Verfüllmaterial über den zu betrachtenden Zeitraum ausgeübten Kräfte sicher vom Behälter aufgenommen werden, sollten auch die durch eine Bergung verursachten Belastungen entsprechend beherrschbar sein. In diesem Zusammenhang sind vor allem äußere korrosive Einwirkungen durch das jeweilige Endlagermedium zu berücksichtigen. Zu beachten sind unterschiedliche Korrosionsarten wie u.a. aerobe und anaerobe Korrosion, Flächenkorrosion und lokale Schädigungen (Lochfrass), Spannungsrisskorrosion, mikrobiell induzierte Korrosion bzw. Korrosion infolge von Sulfiden in Abhängigkeit von Behälterwerkstoff, Wirtsgestein, Verfüllmaterial und Dauer der Lagerung.

Generell sind die diesbezüglichen Betrachtungen und Nachweise unter den gleichen Randbedingungen auch bereits für das Konzept der Rückholung für Zeiträume von voraussichtlich etwa 100 Jahren anzustellen, so dass dieses Wissen, ggf. sukzessive ergänzt durch ein zusätzliches Monitoring zum Zustand der Behälter, als Grundlage für entsprechende Betrachtungen zur Bergbarkeit über bis zu insgesamt 500 (oder ggf. auch 1.000) Jahre dienen kann. Ein entsprechend robustes Behälterdesign vorausgesetzt sollten also auch belastbare Nachweise zur Machbarkeit einer Bergung prinzipiell möglich sein bzw. sollte es gelingen, geeignete Endlagerbehälter entsprechend vorab festzulegender Anforderungen zu entwickeln oder ggf. vorhandene Behälter durch geeignete Maßnahmen zu ertüchtigen.

Anders als bei der Forderung nach Rückholbarkeit, ist ein ausgearbeitetes Konzept für die Bergung und damit die Spezifikation von betrieblichen und Störfallbeanspruchungen nicht zielführend, da Anlass und Eintritt der Notwendigkeit einer Bergung nicht vorhersehbar sind und erst in der Nachbetriebsphase festgestellt würden. Unter der Annahme einer robusten Auslegung des Endlagers einschließlich einer tragfähigen Sicherheitsanalyse, deren Gültigkeit während des gesamten Endlagerbetriebes bis zum Verschluss nicht durch neue Erkenntnisse in Zweifel gerät, dürfte das Risiko für die Notwendigkeit einer nachträglichen Bergung als gering einzuschätzen sein, zumal andernfalls bei signifikanten neuen Erkenntnissen und begründeten Zweifeln an der Sicherheit des Endlagers bereits noch während der Betriebsphase eine Rückholung der Behälter erfolgen müsste.

Sofern dennoch entsprechende Konzepte entwickelt und bewertet werden sollen, haben insbesondere auch Dimensionen (Abmessungen und Masse) und mögliche Varianz der Endlagerbehälter einen Einfluss auf die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Dies gilt grundsätzlich auch für das Rückholungskonzept. Allerdings sind dort notwendige Handhabungseinrichtungen bereits auch für den Einlagerungsbetrieb erforderlich und müssen ggf. lediglich ergänzt werden.

Generell liegt der Zeitpunkt für eine eventuelle Bergung sehr weit in der Zukunft und würde zudem die Genehmigung und Errichtung eines neuen Bergwerkes zum Zweck der Bergung der Behälter erfordern. Dabei könnten Kenntnisse und Erfahrungen aus dem vorhergehenden Endlagerbetrieb einschließlich des ausgearbeiteten Rückholungskonzeptes in entsprechende Lösungsansätze einbezogen werden, deren Erhalt und Zugänglichkeit über einen entsprechend langen Zeitraum von einigen Jahrhunderten sichergestellt werden müsste. Erhalt und Verfügbarkeit der vollständigen Dokumentation über das Endlager sind somit wichtige Voraussetzungen für jedes Bergungskonzept. Andererseits könnte der zum gegebenen Zeitpunkt verfügbare (fortgeschrittene) Stand von Wissenschaft und Technik bei den Bergwerks- und Handhabungstechnologien für das anzuwendende Bergungskonzept Berücksichtigung finden.

5 Beanspruchungsbedingungen und Behälterkonzepte

Eine Bewertung, inwiefern denkbare oder bereits existierende Behälterkonzepte die in den vorangehenden Kapiteln skizzierten Anforderungen erfüllen, ist untrennbar mit den Beanspruchungsbedingungen des jeweiligen Endlagersystems, speziell des Wirtsgesteins, verknüpft. Neben dieser Differenzierung besitzt der Aspekt, ob die Umschließungen speziell für die Endlagerung konzipiert oder bereits befüllte Behälter weiterverwendet werden sollen, erheblichen Einfluss. Für die gegenwärtige Entsorgungssituation in Deutschland sind folgende grundsätzlichen Optionen vorstellbar:

- Entwicklung spezieller Endlagerbehälter mit der Maßgabe, dass die vorhandenen Behälterinventare umgeladen bzw. umkonditioniert werden,
- Ertüchtigung der vorhandenen Transport- und Lagerbehälter (TLB) für die Endlagerung.

Zur Identifizierung geeigneter Lösungen werden nachfolgend auch ausgewählte internationale Entwicklungen betrachtet, wobei Neuentwicklungen von spezifischen Endlagerbehältern im Vordergrund stehen. Trotz der Vielzahl der möglichen Konzepte darf nicht vergessen werden, dass bisher kein Konzept für eine Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen vollständig realisiert oder gar einer praktischen Überprüfung unterzogen wurde. Vielmehr werden selbst bei fortgeschrittenen Projekten wie dem KBS-3 in Schweden und Finnland [2], trotz detaillierter Planungen zu Konstruktion, Auslegung und Fertigung der möglichen Behälter, Vorbehalte formuliert, gemäß denen eine stete Überprüfung und Überarbeitung des Designs im Hinblick auf den Fortschritt von Wissenschaft und Technik zu erfolgen hat. Diese Haltung ist vor dem Hintergrund des langen zeitlichen Vorlaufs absolut notwendig um zum Beginn der operativen Phase ein geeignetes und technisch umsetzbares Design zu gewährleisten. Sie ist außerdem konform mit den Hinweisen aus Kap. 4, dass für eine Bergbarkeit zwar Voraussetzungen hinsichtlich des Integritäts-erhalts der Behälter gegeben sein müssen, aber eine Detaillierung der Auslegung gegen festgeschriebene Handhabungsszenarien zum heutigen frühen Zeitpunkt nicht zielführend wäre.

Betrachtet man aus dieser Warte die Behälterkonzepte von aktuell im Ausland diskutierten Endlagersystemen, kann in der Regel eine prinzipielle Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Behälter unterstellt werden, auch wenn in den Sicherheitsanalysen derartige Szenarien entweder nicht oder nur skizzenhaft berücksichtigt werden.

Ein besonders einleuchtendes Beispiel hierfür ist der in Schweden / Finnland im Rahmen des KBS-3 Projektes für Kristallingestein entwickelte Kupferbehälter mit gusseisernen Einsätzen [2], [3]. Aufgrund des bei diesem Wirtsgestein zu unterstellendem Schadstofftransportes über Flüssigkeiten, dient der Behälter als primäre technische Langzeitbarriere, d.h. er selbst sichert den Einschluss des Inventars über den gesamten Auslegungszeitraum des Endlagersystems. Diese Funktionalität wird erreicht durch die Verwendung einer 50 mm Ummantelung aus nahezu reinem Kupfer, deren Korrosionsbeständigkeit in Verbindung mit den reduzierenden Eigenschaften des Wirtsgesteins und der Bentonit-Umhüllung für eine Million Jahre mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von maximal 1:6000 Behältern nachgewiesen wurde. Über den gleichen Zeitraum wird gezeigt, dass die Behälterkonstruktion, insbesondere der gusseiserne Einsatz, den zu erwar-

tenden mechanischen Beanspruchungen standhält, welche sich infolge des Drucks des Grundwassers und des umgebenden, sich unsymmetrisch verhaltenden Bentonits sowie aus Scherkräften bei Versetzungen des Gesteins ergeben.

Die im Rahmen der Langzeit-Sicherheitsanalyse für den Behälter erbrachten Nachweise beinhalten relativ wenige Unwägbarkeiten, was für die Frage der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit von hoher Bedeutung ist. Dies gründet sich auf das sehr robuste Design, basierend auf nur wenigen Komponenten sowie einem Schweißverfahren, mit dem im Endprodukt ein nahezu monolithischer Körper entsteht. Angesichts dieser Eigenschaften werden bei Fragen der Rückholbarkeit im KBS-3 Projekt weniger behälterspezifische als vielmehr geotechnische Aspekte diskutiert, davon ausgehend, dass der sichere Einschluss des Inventars im Behälter durch die hierfür erforderlichen Handhabungen nicht beeinträchtigt wird. Die Analyse von Rückhol- und Bergungs-Szenarien wird weiter vereinfacht durch die geringe Gebindegröße und die nach außen einheitlichen Behälterkonfiguration für alle geplanten Abfallströme, hier Brennelemente aus Druck- und Siedewasserreaktoren, deren Besonderheiten lediglich durch die unterschiedliche Einsätze berücksichtigt werden.

Bei Wirtsgesteinen, die nach Ablauf einer gewissen Zeitspanne selbst als geotechnische Barriere den Rückhalt der radioaktiven Stoffe gewährleisten, sind die Anforderungen an die Langzeitsicherheit der Endlagerbehälter erheblich geringer. In den Überlegungen, die für Endlagerbergwerke im gering wasserdurchlässigen Tongestein geführt werden, entspricht der Auslegungszeitraum der Behälter ungefähr der Zeitspanne, die hier für ihre Bergbarkeit diskutiert wird. So wird in der Schweiz die Aufrechterhaltung der Behälterbarriere über 1.000 Jahre als zielführend angesehen [4]. In einer vergleichenden Studie der NAGRA [5] wird gezeigt, dass neben Kupfer auch Stahl als Werkstoff für eine Behälterumschließung im Opalinus Ton möglich ist. Bei Berücksichtigung der erwarteten Korrosionsmechanismen ist innerhalb von 1.000 Jahren bei Kohlenstoffstahl eine korrosive Schädigung mit einer Eindringung von weniger als 15 mm zu erwarten, woran der kritische Lochfrass mit 10 mm beteiligt ist. Nach Ende der aeroben Phase, die im Opalinus Ton maximal 100 Jahre umfasst, nimmt die Korrosionsrate stark ab, so dass auch bei Extrapolation des Untersuchungszeitraums auf 10.000 Jahre von einer Schädigung der Stahlumschließung unter 20 mm ausgegangen wird. Unter Verwendung gängiger Bemessungs- und Herstellmethoden können auf Grundlage dieser Daten, den konservativ anzunehmenden mechanischen Beanspruchungen im Tongestein, v.a. lithostatischer Druck, sowie weiterer Randbedingungen des Endlagersystems geeignete Stahlbehälter geplant und realisiert werden. Der Detaillierungsgrad geht in [5] nicht über die Behälterschale hinaus, wobei davon ausgegangen wird, dass die technische Lösung zur Herstellung des Behälterverschlusses, das durch die Schale erreichte Sicherheitsniveau nicht beeinträchtigt. Vor diesem Hintergrund und einem Nachweis, dass das spätere Öffnen der mit Bentonit verfüllten Kammern beherrschbar ist, wird die Aussage getroffen, dass die Rückholbarkeit und Bergbarkeit über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren „leicht umsetzbar“ ist.

Die in Deutschland für Steinsalz durchgeführten Überlegungen weichen von den vorherigen Beispielen deutlich ab, da zunächst an die Integrität der Behälter keine besonderen Anforderungen in der Nachbetriebsphase gestellt wurden. Ihre einschlusswirksame Funktion ist grundsätzlich auf die Betriebsphase beschränkt da der Zustand „fester Salzgruss“ nach weniger als 10 Jahren erreicht [6] wird.

Der andere Unterschied, der einen mindestens ebenso großen Einfluss auf die Einhaltung von Anforderungen aus Rückhol- und Bergbarkeit besitzt, ist die Erwägung, auch bereits in Betrieb befindliche Transport- und Lagerbehälter endzulagern. In Berichten [7] und [8] zur Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) sind unter Beachtung der sehr unterschiedlichen Abfallformen in Deutschland mehrere Kombinationen aus spezifischen Endlagerbehältern, endzulagernden Brennstabkokillen (BSK) und Transport- und Lagerbehältern (TLB) betrachtet worden. Von besonderer Bedeutung ist die Option der Endlagerung der TLB, da hierdurch die mit vielen Nachteilen behaftete Umladung und ggf. zusätzliche Umkonditionierung der Abfälle vermieden werden kann. Gleichzeitig besteht neben dem Vorbehalt der prinzipiellen Eignung von TLB als Endlagerbehälter, bedingt u.a. durch die Gebindegröße und die damit verbundenen höheren Wärmeleistungen, logistische Herausforderungen an die bergmännische Handhabung sowie die große Varietät an Behältertypen, erheblicher Untersuchungs- und Nachweisbedarf hinsichtlich ihrer Rückhol- und Bergbarkeit.

Für eine erste Bewertung dieser Fragen am Standort Gorleben wurde untersucht, inwieweit die Behälter „über den betrachteten Zeitraum von ca. 600 Jahren formstabil bleiben und ihre mechanische Stabilität uneingeschränkt gewährleistet bleibt“, so dass darüber hinaus ihre Handhabbarkeit innerhalb von festgelegten Rückhol Szenarien bis zum Verschluss der untertägigen Strecken unter Verwendung der vorhandenen Anschlagmittel möglich ist. Zum Nachweis der Eignung der TLB wurden Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit im Salzstein vorgenommen, mit dem Ergebnis, dass integritätsgefährdende Schäden unter den dort betrachteten Korrosionsmechanismen nicht zu erwarten sind. Abhängig vom Wirtsgestein und vom Endlagerkonzept mit spezifischen Anforderungen bzgl. Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit der Behälter sind ggf. weitere zu erwartenden Korrosions- und Alterungsmechanismen der gusseisernen Behälterwerkstoffe ebenso zu betrachten wie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck (bei Salz höher als bei Kristallingestein) oder die mechanischen Belastung der Behälter bei der Rückholung bzw. Bergung selbst.

Im Unterschied zu neu zu entwickelnden Endlagerbehältern ist eine Optimierung der vorhandenen TLB gegen derartige Beanspruchungen nur eingeschränkt möglich. Dies gilt auch für alle Komponenten, die zur Abschirmung und Dichtwirkung der Behälterkonstruktion beitragen, darunter Polymerkomponenten zur Neutronenmoderation, Schrauben und Dichtungen. Bereits zum heutigen Zeitpunkt können diese Bauteile mehrere Jahrzehnte alt sein, wobei ihre Lebensdauer bei beabsichtigter Endlagerung mit Rückhol- und Bergungsoption sowie der bis dahin notwendigen Zwischenlagerzeit um ein Vielfaches davon verlängert werden müsste. Andererseits liegen für die verwendeten Behälter bereits umfangreiche Betriebserfahrungen vor und zukünftig sind weitergehende Betrachtungen zum Alterungsverhalten hinsichtlich verlängerter Zwischenlagerdauern gefordert, die auch für einen zusätzlichen Zeitraum im Endlager wichtige Erkenntnisse generieren dürften, wengleich dort andere Beanspruchungsrandbedingungen abhängig vom Wirtsgestein zu berücksichtigen sind. Schließlich wären die TLB durch geeignete Maßnahmen für die Verwendung in einem Endlager zu ertüchtigen, wozu z. B. eine Befüllung des Innenraums mit Magnetit oder ein nachträgliches Verschweißen der Deckeldichtsysteme zählen könnte.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ausgehend von den in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Sachverhalten werden wesentliche Schlussfolgerungen wie folgt zusammengefasst:

- *Durch die Forderungen nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit steigen die Anforderungen an die von den Behältern zu leistenden Sicherheitsfunktionen. Dem entsprechend müssen die zusätzlichen Beanspruchungen in verschlossenen Endlagerbereichen und deren Zeitdauer möglichst gut bestimmt sein, um entweder neue Behälter zu entwickeln oder die vorhandenen Transport- und Lagerbehälter ertüchtigen zu können.*
- *Da die Aussagegenauigkeit zu Auswirkungen von Alterungseffekten auf Werkstoffe und Behälterkonstruktionen mit dem Betrachtungszeitraum deutlich abnimmt (wenige Jahre bis Jahrzehnte für die Einlagerung; ca. 100 Jahre für die Rückholung; 500 bis ggf. 1.000 Jahre für eine Bergung), müssten Behälterkonzepte zunehmend robust, d.h. mit höheren Sicherheitsmargen ausgestattet sein.*
- *Die sicherheitsrelevanten Beanspruchungsgrößen wie Belastungen durch Handhabungsvorgänge, Strahlung, mechanische Gebirgsdrücke, Temperaturverhältnisse im und am Behälter, korrosive Medien hängen maßgeblich von der konkreten Endlagerformation ab. Dezierte Sicherheitsnachweise zu möglichen Behälterkonstruktionen erfordern deren hinreichende Kenntnis.*
- *Die Rückholbarkeit erscheint prinzipiell für alle bisher bekannten Behälterkonzepte machbar und sicherheitstechnisch beherrschbar. Zur Ertüchtigung der vorhandenen TLB für eine Endlagerung ist allerdings umfangreicher Untersuchungs- und Nachweisbedarf unter Berücksichtigung der Vielzahl verschiedener Bauarten absehbar. Neue Behälterkonstruktionen speziell für Endlagerung könnten dagegen zum gegebenen Zeitpunkt bei definiertem Anforderungsprofil für ein ausgewähltes Wirtsgestein zielgerichtet entwickelt und optimiert werden.*
- *Den Vorteilen anforderungsgerecht entwickelter neuer Endlagerbehälter stehen als Nachteile eine aufwändige Entladung der Inventare aus den TLB und deren Umkonditionierung und die damit verbundene große Zahl zusätzlich zu entsorgender Altbehälter gegenüber.*
- *Die Rückholung oder Bergung dürfte sich für große und schwere Behälter generell schwieriger als für kleinere gestalten. Dieses betrifft auch die derzeitigen großen Transport- und Lagerbehälter im Falle ihrer Ertüchtigung für die Endlagerung. Generell stünden für eine Rückholung im Gegensatz zur Bergung bereits die entsprechenden technischen Einrichtungen aus dem Einlagerungsprozess zur Verfügung.*
- *Es sind Entscheidungskriterien für eine Rückholung festzulegen. Dabei muss auch entschieden werden, ob und inwieweit ein Monitoring von Behältereigenschaften bzw. der Einlagerungsbereiche einschließlich der einzusetzenden Technik wie Sensoren, Datenübertragung und -erfassung erforderlich wird. Gleichzeitig darf mit diesen Maßnahmen jedoch keine Verringerung des Sicherheitsniveaus des Endlagers verbunden sein, was durchaus einen Zielkonflikt darstellen kann.*

- *Bei einer Endlagerung in Salz dürften durch die zügigen Fließprozesse sowohl die Rückholung aus bereits verschlossenen Endlagerbereichen als auch eine Bergung gegenüber anderen Wirtsgesteinen deutlich aufwändigere technische Konzepte erfordern. Ggf. könnte allein zum Zweck der Rückholung ein Offenhalten der Einlagerungsbereiche während des Betriebszeitraums erforderlich werden.*
- *Behälterspezifische Nachweise zur Erfüllung von Anforderungen an eine Bergbarkeit wären konkret zu definieren. Sie dürften angesichts erheblich größerer Betrachtungszeiträume im Vergleich zur Rückholung deutlich aufwändiger und mit größeren Unsicherheiten behaftet sein. Dies gilt in verstärktem Umfang für eine Endlagerung der bisherigen TLB mit ihren zahlreichen Bauarten.*
- *Die Notwendigkeit einer Bergbarkeit über 500 (oder sogar bis zu 1.000) Jahre erscheint nur schwer nachvollziehbar, wenn ein Endlager für einen Zeitraum von mindestens 1.000.000 Jahren als sicher qualifiziert worden ist und dies auch während der gesamten Betriebsphase über voraussichtlich etwa 100 Jahre bis zu seinem Verschluss nicht in Zweifel gerät. Abgesehen davon ist nicht geklärt, welche Informationen und Kriterien spätere Generationen für eine Entscheidung zur Bergung heranziehen könnten und welche technischen Möglichkeiten für die Umsetzung einer wie auch immer gearteten Bergung bestünden. Vor diesem Hintergrund wäre zu empfehlen, die Entscheidung über ein eventuelles Bergungskonzept im Zusammenhang mit der Genehmigung für den endgültigen Verschluss des Endlagers zu treffen, nachdem ersichtlich ist, dass der Sicherheitsnachweis bestand hat und eine Rückholung nicht erforderlich geworden ist. Dies würde zudem gestatten, den dann weit fortgeschrittenen Stand von Wissenschaft und Technik zu Grunde zu legen.*

Insgesamt soll diese Ausarbeitung einen Beitrag zur Identifikation geeigneter sicherheitstechnischer Anforderungen bzw. Kriterien leisten, die von Behältern für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle im Hinblick auf ihre Möglichkeit einer späteren Rückholung bzw. Bergung zu erfüllen wären und welche Rückwirkungen sich auf das Behälterdesign ergeben.

Quellen

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Bonn, Stand: 30.09.2010
- [2] SKB, Technical Report TR-11-01
Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark
Main report of the SR-Site project, March 2011
- [3] SKB, Technical Report TR-11-14
Design, production and initial state of the canister, December 2010
- [4] NAGRA Technical Report 02-06,
Project Opalinus Clay, Codes and Data for Safety Assessment, December 2002
- [5] NAGRA Technical Report 02-11
Canister Option for the Disposal of Spent Fuel, April 2003
- [6] DBE TEC, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL), AP 5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, April 2008
- [7] GRS – 272, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben,
Bericht zum Arbeitspaket 5: Endlagerkonzepte, Juli 2011
- [8] GRS – 281, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben,
Bericht zum Arbeitspaket 6: Endlagerauslegung und -optimierung, Juni 2012