



DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission

Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung und Aufgabenstellung	2
2	Beratungshergang.....	3
3	Begriffsdefinition und Schutzziele.....	4
3.1	Begriffsdefinition	4
3.2	Schutzziele	5
4	Aspekte in Zusammenhang mit einer verlängerten Zwischenlagerung	5
4.1	Überblick.....	5
4.2	Langzeiteignung von Behältern	6
4.3	Inventarverhalten	7
4.4	Abtransportierbarkeit der Behälter am Ende der Zwischenlagerzeit	9
4.5	Alternative Zwischenlagerkonzepte.....	10
4.6	Sicherheitstechnische Nachweisführung im Genehmigungsverfahren für eine verlängerte Zwischenlagerung	12
4.7	Know-how-Erhalt.....	13
4.8	Übergreifende Betrachtung	13
5	Ökonomische und ethische Aspekte	15
6	Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte bei einer verlängerten Zwischenlagerung.....	16
7	Abkürzungsverzeichnis	20
8	Literatur.....	21

1 Einführung und Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund des Standortauswahlgesetzes vom Juli 2013 (StandAG) [1] ist davon auszugehen, dass die bisher unterstellten Zwischenlagerzeiträume von bis zu maximal 40 Jahren den Zeitraum bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers für bestrahlte Brennelemente und sonstige Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle nicht abdecken. Gemäß StandAG ist die Standortentscheidung für das Endlager bis 2031 zu treffen. Daran schließen sich die Genehmigung, die Errichtung und die Inbetriebnahme an, wofür nach derzeitigen Erfahrungen mindestens etwa 20 Jahre (bis ca. 2050) zu veranschlagen sind. Für die Zwischenlagerzeiträume sind etwa 65 bis 100 Jahre für einen nennenswerten Teil der bis etwa 2027 nach Abschaltung aller Kernkraftwerke zu beladenden Behälter (insgesamt etwa 1.900¹ Behälter) unvermeidlich. Die aktuellen Zwischenlagereignisungen laufen zwischen 2034 und 2047 aus. Unabhängig davon ist die in den Aufbewahrungsgenehmigungen festgelegte Frist für einen Zeitraum von 40 Jahren zu sehen, die mit dem Verschließen des Behälters bei der Beladung beginnt. Für die ersten Transport- und Lagerbehälter läuft diese Frist 2032 aus. Unterschiede bezüglich des Auslaufens der 40-Jahresfrist zwischen Behälter und Lager können beispielsweise daher rühren, dass der Behälter zunächst in einem Interimslager gelagert wurde. Die Genehmigungsinhaber haben in der Regel sechs bis acht Jahre vor Auslaufen der Genehmigung der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde den weiteren Verbleib der radioaktiven Abfälle nachzuweisen. Ergänzend gilt nach derzeitiger Rechtslage § 6 Abs. 5 Atomgesetz [3] wie folgt (Zitat):

„Die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen in kerntechnischen Anlagen nach Absatz 3 in Verbindung mit Absatz 1 soll 40 Jahre ab Beginn der ersten Einlagerung eines Behälters nicht überschreiten. Eine Verlängerung von Genehmigungen nach Satz 1 darf nur aus unabwiesbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen.“

Die o. g. Zwischenlagerzeiträume von ca. 65 bis 100 Jahren liegen deutlich außerhalb der national und international für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern bereits zugrunde gelegten Zeiträume von bis zu 50 Jahren (z. B. Ungarn, Japan, USA), siehe Abbildung 1 nach [4]. Die vor diesem Hintergrund in Deutschland in absehbarer Zeit notwendig werdende Erweiterung der genehmigten Zwischenlagerzeiträume führt zu einer Reihe von sicherheitstechnischen Fragestellungen, die im Rahmen der bisherigen Genehmigungsverfahren nicht zu behandeln waren.

Das deutsche Atomgesetz (AtG) [3] schreibt vor, alle radioaktiven Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen innerhalb Deutschlands zu entsorgen. Ziel der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle, um radiologisch relevante Freisetzungen in die Biosphäre über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahre auszuschließen [5].

Die Entsorgungskommission (ESK) ist zusammen mit vielen deutschen Fachorganisationen und in Übereinstimmung mit internationalen Verlautbarungen der OECD/NEA, IAEA und der 2011 verabschiedeten EU-Richtlinie zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle [6] der Meinung, dass nur mit der Endlagerung radioaktiver und insbesondere hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen

¹ Laut [2] ca. 1.100 Behälter aus Leistungsreaktoren, ca. 291 Behälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, 461 Behälter aus den Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 18 Behälter aus den Forschungsreaktoren (zusätzlich ca. 35 Behälter aus den laufenden Forschungsreaktoren).

Formationen eine nachsorgefreie Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Umwelt („passive Sicherheit“) erreicht werden kann.

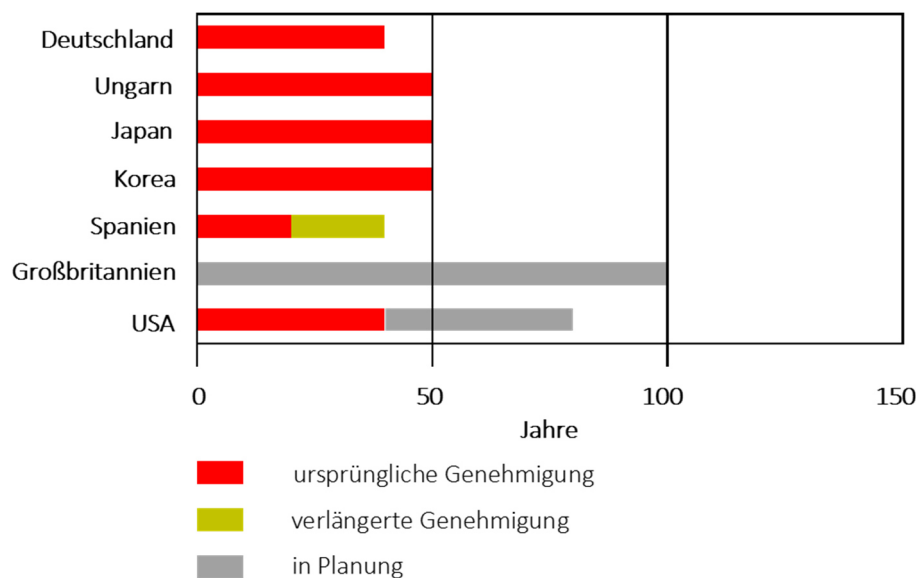


Abbildung 1: National und international derzeit genehmigte bzw. geplante Zeiträume für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente nach [4].

Die ESK ist der fachlichen Überzeugung, dass Konzepte wie langzeitlich offen zu haltende Zwischenlager im tiefen geologischen Untergrund, Langzeitzwischenlager im oberflächennahen Untergrund oder direkt an der Erdoberfläche keine sicherheitstechnisch gleichwertigen Alternativen zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen darstellen. Dieses Diskussionspapier erstreckt sich nicht auf solche alternativen Konzepte.

Aus Sicht der ESK ist die Zwischenlagerung auf den unbedingt notwendigen Zeitraum bis zu einer Überführung in ein Endlager in tiefen geologischen Formationen zu begrenzen.

In diesem Diskussionspapier geht die ESK auf diejenigen Anforderungen ein, die sich aus den sicherheitstechnischen Aspekten einer aus den oben genannten Zeiten zwangsläufig verlängerten Zwischenlagerung in Deutschland ergeben. Zusätzliche Anforderungen, die im Hinblick auf den Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter sowie auf die Kontrolle spaltbaren Materials aufgrund internationaler Vereinbarungen bestehen, werden hier nicht ausgeführt.

2 Beratungshergang

In der 35. ESK-Sitzung am 12.09.2013 teilte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (jetzt: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit – BMUB) mit, dass es eine Befassung der ESK mit dem Thema verlängerte Zwischenlagerung für sinnvoll und

angebracht halte, u. a. um auf eventuelle Fragen der damals noch einzurichtenden Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe vorbereitet zu sein. Die ESK bat daraufhin den Ausschuss ABFALL-KONDITIONIERUNG, TRANSPORTE UND ZWISCHENLAGERUNG (AZ), die Beratungen vorzubereiten. In seiner 28. Sitzung am 13./14.11.2013 beriet der Ausschuss AZ darüber, welche Argumente und Fragestellungen zum Thema verlängerte Zwischenlagerung zu betrachten wären; sie wurden der ESK in ihrer 37. Sitzung am 12.12.2013 vorgestellt. Die ESK richtete daraufhin eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe ein und beauftragte sie, sich mit den Aspekten zur verlängerten Zwischenlagerung zu befassen und ein Diskussionspapier zu erstellen.

Die erste Sitzung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe fand am 26.08.2014 mit einem ersten Gedankenaustausch zu den formulierten Argumenten und Fragestellungen statt. In den folgenden Sitzungen am 31.10.2014, 12.12.2014, 06.02.2015, 09.03.2015 und 29.05.2015 sowie im anschließenden Umlaufverfahren erarbeitete die Ad-hoc-Arbeitsgruppe einen Textentwurf, der der ESK in ihrer 49. Sitzung am 03.09.2015 und in ihrer 50. Sitzung am 29.10.2015 zur Beschlussfassung vorlag.

3 Begriffsdefinition und Schutzziele

3.1 Begriffsdefinition

Die aufgeführten Begriffe werden in diesem Diskussionspapier mit der im Nachfolgenden formulierten Bedeutung verwendet. Alle Definitionen beziehen sich auf bestrahlte Brennelemente und sonstige Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle.

Zwischenlager: Ein vorübergehender Aufbewahrungsort für bestrahlte Brennelemente und sonstige Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle.

Zwischenlagerung: Auf einen atomrechtlich genehmigten Zeitraum befristete Aufbewahrung von bestrahlten Brennelementen und sonstigen Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen bis zur Abgabe an ein Endlager.

Verlängerte Zwischenlagerung: Über den ursprünglich genehmigten Zeitraum hinausgehende Zwischenlagerung.

Übertägige Zwischenlagerung: Die bestrahlten Brennelemente und sonstigen Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle werden in Transport- und Lagerbehältern in Zwischenlagergebäuden unter kontrollierten Bedingungen aufbewahrt.²

Oberflächennahe Zwischenlagerung: Die bestrahlten Brennelemente und sonstigen Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle werden in Transport- und Lagerbehältern oberflächennah (z. B. nur mit einer geringen Bodenbedeckung oder in geringen Teufen bis etwa 100 m) unter kontrollierten Bedingungen aufbewahrt.

² Dazu zählt hier auch das Standortzwischenlager im Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim

3.2 Schutzziele

Auch bei einer verlängerten Zwischenlagerung sind die in der ESK-Leitlinie für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern [7] definierten primären radiologischen Schutzziele in vollem Umfang gültig (*Zitat*):

- 1 *jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt (ist) zu vermeiden (§ 6 Abs. 1, Nr. 1 StrlSchV),*
- 2 *jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls (ist) auch unterhalb der festgesetzten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 Abs. 2 StrlSchV).*

Bei der Planung baulicher oder sonstiger technischer Schutzmaßnahmen gegen auslegungsbestimmende Störfälle sind die Anforderungen von §§ 49 bzw. 50 i. V. m. § 117 Abs. 16 StrlSchV zu Grunde zu legen.

Hieraus abgeleitet ergeben sich folgende grundlegende Schutzziele:

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

sowie folgende abgeleitete Anforderungen:

- *Abschirmung der ionisierenden Strahlung,*
- *Betriebs- und instandhaltungsgerechte Auslegung und Ausführung der Einrichtungen,*
- *sicherheitsgerichtete Organisation und Durchführung des Betriebes,*
- *sichere Handhabung und sicherer Transport der radioaktiven Stoffe,*
- *Auslegung gegen Störfälle und*
- *Maßnahmen zur Reduzierung der Schadensauswirkungen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen.*

4 Aspekte in Zusammenhang mit einer verlängerten Zwischenlagerung

4.1 Überblick

In Deutschland wurde die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle als Aufbewahrung von Kernbrennstoffen bislang für einen Zeitraum von bis zu 40 Jahren atomrechtlich genehmigt. In die sicherheitstechnische Bewertung waren sowohl alle Behälter, ihre Komponenten und Werkstoffe als auch die Behältereinbauten und die radioaktiven Inventare unter Berücksichtigung betrieblicher Belastungen und zu unterstellender Störfallszenarien einbezogen. Für eine Verlängerung des bisher genehmigten Aufbewahrungszeitraums muss eine Bewertung zu unterstellender

Degradationserscheinungen und deren sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen vorgenommen werden. Dabei muss der zum entsprechenden Zeitpunkt vorliegende Wissensstand berücksichtigt werden. Zur Bewertung dieser Sachverhalte sind einerseits systematische Analysen zur Erfassung und Beschreibung von relevanten Eigenschaftsveränderungsprozessen über die betreffenden Zeiträume und andererseits die Bereitstellung belastbarer Daten notwendig. Hierzu können sowohl die Erfahrungsauswertung aus dem laufenden Zwischenlagerbetrieb einschließlich Alterungsmanagement und periodischen Sicherheitsüberprüfungen als auch zusätzliche gezielte Untersuchungsprogramme herangezogen werden.

4.2 Langzeiteignung von Behältern

Die für die trockene Zwischenlagerung verwendeten unfallsicheren Transport- und Lagerbehälter sind für einen Betriebszeitraum von bis zu 40 Jahren sicherheitstechnisch bewertet und atomrechtlich genehmigt worden. Wesentliche zu berücksichtigende Beanspruchungsgrößen sind neben mechanischen und thermischen Einwirkungen unter Betriebs- und Störfallbedingungen die Einwirkungen durch Neutronen- und Gammastrahlung sowie Medieneinflüsse (z. B. Feuchte, chemische Reaktionen). Aus diesem Grund sind die Behälter unter überwiegender Verwendung metallischer Werkstoffe einschließlich metallischer Dichtsysteme konzipiert. Auch der Druckschalter zur Überwachung der Dichtfunktion des Doppeldeckel-Dichtsystems besteht nahezu ausschließlich aus metallischen Komponenten. Oberflächen von Brennelementbehältern sind – soweit erforderlich – korrosionsgeschützt ausgeführt. Zur Neutronenmoderation werden Polymere und als Hilfsdichtungen Elastomere verwendet. Der Behälterinnenraum wird vakuumgetrocknet und mit Inertgas befüllt, so dass Restfeuchtemengen und mögliche Korrosionseffekte auf ein technisch machbares Minimum begrenzt werden. Nach außen hin ist das Deckeldichtsystem durch eine Schutzplatte zusätzlich vor Umgebungseinflüssen geschützt. Spalten und Hohlräume z. B. im Bereich der Tragzapfen sind mit Silikon versiegelt, um Feuchtezutritt und Korrosion zu verhindern.

Die bisherigen Betriebserfahrungen von rund 20 Jahren lassen keine sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaftsveränderungen der Behälter und ihrer Komponenten erkennen. Ein regelmäßiger Erfahrungsaustausch findet im Fachausschuss Nukleare Ver- und Entsorgung (FA VE) des Länderausschusses für Atomkernenergie (LAA) statt. Die Belade-, Abfertigungs- und Einlagerungsprozeduren wurden inzwischen an mehr als 1.000 Behältern zuverlässig durchgeführt. Diesbezügliche Informationen und Erfahrungen werden bundesweit im Rahmen der Koordinierungsstelle für Behälterabfertigung (KOB AF) ausgetauscht. Behälterhandhabungen zu Wartungszwecken wurden in einzelnen Fällen beim Ausfall eines Druckschalters und im Rahmen von Zehn-Jahres-Inspektionen sowie an den 305 CASTOR® THTR/AVR-Behältern im Zwischenlager Ahaus zur Erneuerung der Korrosionsschutzbeschichtung notwendig. Probleme mit der Handhabung der Behälter im Zwischenlager sind dabei nicht bekannt geworden.

Darüber hinaus wurden in Ahaus wiederkehrende Prüfungen (WKP) nach ca. zehn Jahren Zwischenlagerung an einzelnen CASTOR® MTR2-Behältern im Hinblick auf einen Abtransport aus dem Zwischenlager durchgeführt. Vergleichbare WKP wurden an zahlreichen CASTOR® THTR/AVR-Behältern im AVR-Behälterlager in Jülich im Rahmen der Vorbereitungen zum Abtransport nach Ablauf der dort für lediglich 20 Jahre genehmigten Zwischenlagerung durchgeführt. Dabei wurden an 20 % der eingelagerten Behälter

Dichtheitsprüfungen der Primärdeckelbarriere erfolgreich durchgeführt und auch die Überprüfung der Verschraubungselemente ergab keine Auffälligkeiten.

Im Hinblick auf eine verlängerte Zwischenlagerung sind die möglichen Eigenschaftsveränderungen aller Behälterwerkstoffe und Komponenten unter Berücksichtigung der relevanten Beanspruchungsbedingungen für den verlängerten Zeitraum zu betrachten und hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Relevanz zu bewerten. So werden beispielsweise seit mehr als 40 Jahren (die ersten Versuche wurden in 1973 gestartet) vorauseilende Langzeitversuche mit repräsentativen Behälterdichtungen durchgeführt, auf deren Basis das Dichtungsverhalten gut prognostiziert werden kann. Gleichwohl aufgrund der bisher vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen keine grundsätzlichen Zweifel am Erhalt des bestehenden Sicherheitsniveaus der Behälter auch bei einer verlängerten Zwischenlagerung bestehen, sind jedoch Nachweise explizit zu erbringen und durch belastbare Daten zu belegen. Gleiches gilt für den Nachweis der Transportfähigkeit im Anschluss an die verlängerte Zwischenlagerung (vgl. Kapitel 4.4).

Darüber hinaus stellt sich die Frage der langfristigen Verfügbarkeit austauschbarer Komponenten wie z. B. Druckschalter, Metaldichtungen, Tragzapfen, Schrauben. Aufgrund der derzeit vorliegenden Erfahrungen ist innerhalb der genehmigten Lagerzeiten nicht von einem systematischen Ausfall und Ersatzbedarf auszugehen. Es ist derzeit jedoch nicht geklärt, ob dies auch für verlängerte Zwischenlagerzeiten gilt. Es wäre daher für eine verlängerte Zwischenlagerung zu zeigen, dass die Funktionstüchtigkeit auch bei austauschbaren Komponenten weiterhin zuverlässig gewährleistet ist und dass für einen ggf. erforderlichen Austausch die benötigten Ersatzkomponenten zur Verfügung stehen.

Inwieweit die Behälter im Nachgang einer verlängerten Zwischenlagerung grundsätzlich für die Endlagerung geeignet sein könnten, hängt von den endlagerspezifischen Beanspruchungsbedingungen und Anforderungen unter Berücksichtigung handhabungstechnischer und wirtsgesteinsspezifischer Gesichtspunkte ab. Hierzu zählen auch Anforderungen an die Behälter hinsichtlich einer Rückholbarkeit während des Betriebszeitraums sowie ggf. hinsichtlich einer Bergung über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers [5] sowie ggf. Anforderungen an die Behälter als technische Barriere.

4.3 Inventarverhalten

Die wesentlichen Behälterinventare sind bestrahlte LWR-Brennelemente (dazu zählen auch die WWER-Brennelemente), HAW-Glaskokillen (verglaste Spaltprodukte CSD-V) aus der Wiederaufarbeitung sowie THTR- und AVR-Kugelhaufenreaktor-Brennelemente in Edelstahlkannen. Zusätzlich sind bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren sowie CSD-B (verglaste mittel radioaktive Abfälle) und später ggf. auch CSD-C (kompaktierte Hülsen- und Strukturteile, Rückführungsbeginn um das Jahr 2025) zu betrachten. Alle genannten Inventare sind in Behältern mit identischen Sicherheitsfunktionen eingeschlossen.

Für HAW-Glas in Edelstahlkokillen sind unter den inerten Bedingungen des dicht verschlossenen Behälterinnenraumes keine Prozesse bekannt, die relevante Eigenschaftsveränderungen selbst über lange Zeiträume erwarten ließen, so dass ihre uneingeschränkte Handhabbarkeit auch nach einer verlängerten

Zwischenlagerung nicht in Frage stehen dürfte [8], [9]. In Marcoule befinden sich die HAW-Glaskokillen schon seit 40 Jahren im Zwischenlager. Die CNE hat in 2008 und 2013 einen Sicherheitsnachweis mit Forschungsprogramm und Probenahme empfohlen, so dass hier Erfahrungswerte vorliegen werden. Unbeschadet dessen sollte aus Sicht der ESK in plausiblen Zeitabständen verifiziert werden, ob es neue Erkenntnisse zu relevanten Eigenschaftsveränderungen gibt.

Die THTR- und AVR-Brennelemente werden innerhalb der Lagerbehälter in sogenannten Edelstahl-Kannen gelagert. Aufgrund der Brennelementeigenschaften in Verbindung mit den niedrigen Brennelementtemperaturen unter Lagerbedingungen sind keine relevanten Eigenschaftsveränderungen absehbar, so dass eine uneingeschränkte Handhabbarkeit auch nach einer verlängerten Zwischenlagerung zu erwarten ist [10]. Allerdings ist der Kenntnisstand zu relevanten Eigenschaftsveränderungen von THTR- und AVR-Brennelementen unter Lagerbedingungen im Vergleich zu denen der o. g. HAW-Glaskokillen geringer, so dass verifiziert werden sollte, dass keine relevanten Eigenschaftsveränderungen auftreten.

Für bestrahlte LWR-Brennelemente aus Reaktoren westlicher Bauart wird vor der Beladung der Nachweis ihrer Intaktheit erbracht. Im Verlauf der Beladung, Trocknung und Zwischenlagerung wird vom Erhalt der Dichtheit der Brennstabhüllrohre ausgegangen und systematisches Hüllrohrversagen ausgeschlossen. Dieses ist bislang unter Berücksichtigung der mechanischen (Innendruck), thermischen und radiologischen Belastungsgrößen für 40 Jahre nachgewiesen, so dass von einer uneingeschränkten Handhabbarkeit der Brennelemente auch am Ende dieser Lagerzeit auszugehen ist. Für defekte LWR-Brennstäbe sind Sonderlösungen in Form von dicht verschlossenen Defektstabköchern im Behälterinnenraum vorgesehen.

Zu berücksichtigen sind außerdem Brennelemente vom Typ WWER. Für diese konnte bei der Einlagerung in Behälter zur Zwischenlagerung kein Einzelnachweis der Hüllrohrdichtheit geführt werden. Daher wurden hinsichtlich potenziell nicht trockenbarer Feuchtereservoire in einzelnen Brennstäben zusätzliche mineralische Feuchteabsorber (sog. Filterkerzen) in die Behälter eingebracht.

Für eine verlängerte Zwischenlagerung ist die Notwendigkeit zusätzlicher Nachweise zum Langzeitverhalten und möglichen Eigenschafts- bzw. Zustandsveränderungen aller o. g. Inventare sowie zusätzlicher Einbauten (wie z. B. Tragkörbe, Filterkerzen) absehbar. Gleiches gilt auch für nachfolgende Transporte und spätere Handhabungen (vgl. Kapitel 4.4).

Derartige Fragestellungen werden für LWR-Brennelemente gegenwärtig international z. B. seitens der US Nuclear Regulatory Commission (US NRC) [11], [12]) diskutiert. Thematisiert wird hierzu u. a. die Umorientierung von Hydriden in Brennstabhüllrohren bei abnehmenden Temperaturen und eine dadurch ggf. erhöhte Sprödbruchempfindlichkeit bei mechanischen Belastungen mit nachfolgendem Hüllrohrversagen bei Handhabungsvorgängen bzw. Transporten oder auch bei Störfallszenarien („Cladding Integrity“). Einflussgrößen hierbei sind die spezifischen Hüllrohrmaterialien sowie der Zustand der Brennelemente (z. B. Abbrand) bei der Behälterbeladung. Hierdurch können sich ggf. Konsequenzen für die Handhabbarkeit der Brennelemente nach der Zwischenlagerung ergeben. Inwieweit eine uneingeschränkte Handhabbarkeit im Hinblick auf das nachfolgende Endlagerkonzept zwingend gegeben sein muss, ist bisher offen. Allerdings können Einschränkungen in der Handhabbarkeit die möglichen Endlagerkonzepte beeinflussen.

Infolge des international diskutierten Nachweisbedarfs hinsichtlich der Intaktheit von Brennelementen während einer verlängerten Zwischenlagerung werden aktuell in den USA, Japan und Korea Demonstrationsprogramme mit repräsentativ beladenen Behältern begonnen (siehe z. B. [11], [13], [14], [15], [16], [17]). Hierbei sind begleitende Messprogramme, Untersuchungen an Referenzbrennstäben und Abschlussinspektionen vorgesehen. Bereits in der Vergangenheit wurde in den USA ein beladener CASTOR®-V/21-Behälter nach 15 Jahren geöffnet, inspiziert und dies als Nachweis des einwandfreien Zustands der Brennelemente (Abbrand bis zu 45 GWd/tSM) und des Behälters akzeptiert wurde, um eine bestehende 20-jährige Lagergenehmigung zu verlängern [18]. Auch in Japan wurden einzelne beladene Behälter visuellen Inspektionen des Innenraums unterzogen, ohne dass hierbei allerdings weitergehende Zustands- bzw. Materialuntersuchungen durchgeführt wurden [19].

Maßgebend für die Handhabbarkeit von Brennstäben nach längerer Zwischenlagerung ist der Zustand der Hüllrohre. Ist die Hüllrohrintegrität nicht gewährleistet, sind hinsichtlich des Freisetzungspotenzials Degradationsvorgänge in der Brennstoffmatrix selbst zu betrachten, die zu einer erschwerten Handhabung führen können. Bereits während der Bestrahlung im Kernkraftwerk treten Rissbildung und Volumenausdehnung im Brennstoff auf. Bei langfristiger Lagerung können weitere Prozesse relevant werden:

- Oxidation des Urandioxids führt zur Volumenvergrößerung und ggfs. zur Zerstörung der Brennstoffmatrix [20], [21].
- Durch fortschreitenden Alpha-Zerfall reichert sich in Hohlräumen und an Korngrenzen der Brennstoffmatrix Helium an. Im Zusammenspiel mit vorhandenen Spaltgasen kann dies unter bestimmten Bedingungen durch Druckaufbau ebenfalls zum Zerfall des keramischen oxidischen Materials führen [20], [21]. Insbesondere für Mischoxidbrennstäbe und bei hohen Abbränden werden solche Prozesse zunehmend zu betrachten sein. Dabei können in Pelletrandbereichen, in denen der Abbrand besonders hoch ist, vorzugsweise Mikrorisse auftreten und Spaltgase freigesetzt werden. Auch wenn bisherige Einschätzungen keinen wesentlichen Einfluss der Heliumentwicklung auf die Integrität von bestrahltem Kernbrennstoff in einem Zeitraum von mehreren Jahrzehnten zeigen, wird doch auf große Unsicherheiten im Verständnis ablaufender Langzeitprozesse hingewiesen [21], [22].

Die genannten Aktivitäten reflektieren den international diskutierten Untersuchungsbedarf hinsichtlich der verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter LWR-Brennelemente insbesondere mit Abbränden größer als 45 GWd/tSM. Erkenntnisse, die eine Extrapolation der Aussagen über das Hüllrohrverhalten über Zeiträume deutlich jenseits von 40 Jahren ermöglichen, liegen bisher nicht vor. Die Übertragbarkeit der internationalen Untersuchungsprogramme ist im Hinblick auf die spezifischen Randbedingungen in Deutschland zu prüfen [20]. Vergleichbare Betrachtungen zu den anderen Brennelementtypen liegen zurzeit nicht vor.

4.4 Abtransportierbarkeit der Behälter am Ende der Zwischenlagerzeit

Nach dem derzeitigen Konzept der 40-jährigen Zwischenlagerung und vor dem Hintergrund der Nebenbestimmungen in den Genehmigungen für zentrale und dezentrale Zwischenlager bezüglich der grundsätzlichen Abtransportierbarkeit der Behälter werden bisher von den Lagerbetreibern die

verkehrsrechtlichen Behälterbauartzulassungen dauerhaft aufrechterhalten. Aktuell werden die Zulassungen gemäß des verkehrsrechtlichen Regelwerks auf Zeiträume von in der Regel drei bis fünf Jahren und für nicht mehr gefertigte Behälterbauarten von maximal zehn Jahren befristet, so dass Zulassungen für eine Vielzahl an Behälterbauarten regelmäßig zu verlängern sind. Dies bedeutet einen erheblichen Aufwand auf Betreiber- wie Gutachter- und Behördenseite, ohne dass dadurch der sicherheitstechnische Zustand bei der Zwischenlagerung selbst unmittelbar beeinflusst würde. In diesem Zusammenhang wird gegenwärtig diskutiert, ob zukünftig auch längere Gültigkeitsdauern von deutlich mehr als zehn Jahren für Behälterbauarten möglich sind, die nicht mehr gefertigt und ausschließlich beladen in der Zwischenlagerung betrieben werden.

Darüber hinaus wird derzeit – wenn auch kontrovers – über mögliche Alternativen zur dauerhaften Aufrechterhaltung der verkehrsrechtlichen Zulassungen diskutiert. Die ESK-Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern [7] sehen aktuell vor, dass *„durch die während des Zwischenlagerbetriebs vorzusehenden Maßnahmen im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen und des Alterungsmanagements auch die notwendigen Voraussetzungen dafür zu schaffen sind, dass der technisch einwandfreie Zustand der Behälter kontinuierlich und im Rahmen verkehrsrechtlich geforderter wiederkehrender Prüfungen (WKP) vor dem Abtransport nachgewiesen bzw. überprüft werden kann“*. Damit könnte auf die Aufrechterhaltung der Zulassung während der Zwischenlagerung verzichtet werden, bei gleichzeitiger Einführung eines atomrechtlichen Monitorings, wenn dessen Ergebnisse gewährleisten, dass verkehrsrechtliche Anforderungen beim späteren Abtransport erfüllt werden. Wie allerdings auf diesen Grundlagen eine erneute Bauartzulassung für die betroffenen Behälter erwirkt werden kann, ist derzeit offen.

Dies macht deutlich, dass es sinnvoll wäre, Alternativen zur Aufrechterhaltung verkehrsrechtlicher Bauartzulassungen im Rahmen eines zu entwickelnden Regelwerks für die verlängerte Zwischenlagerung zu etablieren. Darin wäre insbesondere die Verschränkung zwischen den Maßnahmen zum Alterungsmanagement während der Zwischenlagerung und den Anforderungen zur Erlangung einer Transportgenehmigung im Anschluss an die Zwischenlagerung zu regeln, um den Abtransport der Behälter am Ende ihrer Zwischenlagerzeit sicherzustellen. In der Schweiz ist beispielsweise für den letzten und einmaligen Abtransport zu einem Endlager eine entsprechende nationale Regelung vorgesehen, die allerdings derzeit noch nicht ausgearbeitet ist.

4.5 Alternative Zwischenlagerkonzepte

Bestrahlte Brennelemente und sonstige Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle werden in Deutschland nach einem einheitlichen Konzept trocken in Transport- und Lagerbehältern in Zwischenlagergebäuden (Hallen) aufbewahrt [7]. Die Behälter gewährleisten dabei alle wesentlichen sicherheitstechnischen Funktionen sowie bei Bedarf die Abtransportierbarkeit. Ein Abweichen von diesem Prinzip – z. B. ein Übergang zu einer Nasslagerung (analog zum CLAB in Schweden für bestrahlte Brennelemente) oder einer Vault-Lagerung (analog zum HABOG in den Niederlanden für Wiederaufarbeitungsabfälle und bestrahlte Brennelemente aus Forschungsreaktoren) würde ein Öffnen und Entladen der Zwischenlager- und Transportbehälter und ein Umladen der Inventare in andere Behälter oder ein Nasslagerbecken bedingen. Angesichts des erheblichen technologischen und sicherheitstechnischen Aufwands werden in diesem Papier keine Konzepte betrachtet,

die mit einer Handhabung des Inventars verbunden sind und eine weitgehende Änderung des Zwischenlagerkonzepts darstellen.

Praktisch alle Zwischenlager sind übertägig errichtet, lediglich an einem Standort ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ein oberflächennahes Zwischenlager mit einer geringen Bodenüberdeckung vorhanden, das aber „ebenerdig“ angefahren wird. Maßgeblich für die Beurteilung der technischen Sicherheit ist die Einhaltung der in Kapitel 3.2 genannten Schutzziele. Die Lage eines Zwischenlagers – übertägig, oberflächennah, in Teufen bis zu etwa 100 m oder in tiefen geologischen Formationen – entlastet nicht von dieser Aufgabe.

Durch die kontinuierliche betriebliche Umsetzung der in den Aufbewahrungsgenehmigungen festgelegten Regelungen und Nebenbestimmungen einschließlich regelmäßiger periodischer Sicherheitsüberprüfungen alle zehn Jahre [23] und ein kontinuierliches Alterungsmanagement wird gewährleistet, dass der sicherheitstechnische Zustand der Zwischenlager sowie der im Zwischenlager überprüfbar zugänglichen Behälterbereiche beibehalten wird, mögliche Abweichungen rechtzeitig erkannt und Abhilfemaßnahmen veranlasst werden. Nach allen für inzwischen mehr als 20 Jahre vorliegenden Betriebserfahrungen ist Handlungsbedarf zur Umsetzung von Alternativen zur übertägigen Zwischenlagerung nach Ablauf der bislang genehmigten Aufbewahrungszeiträume derzeit nicht zu erkennen, kann aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Momentan besteht die Erwartung, dass das derzeit etablierte Konzept der trockenen Zwischenlagerung (Zwischenlagergebäude und Behälter) auch für deutlich längere Zeiträume als 40 Jahre seine Sicherheitsfunktionen beibehalten sollte. Eine explizite Nachweisführung nach dem dann aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ist für eine Verlängerung oder Neuerteilung von Aufbewahrungsgenehmigungen sicherlich erforderlich.

Ein Wechsel des Zwischenlagerkonzepts dürfte dagegen technisch, genehmigungsrechtlich und finanziell erhebliche Herausforderungen mit sich bringen. Die oberflächennahe Zwischenlagerung in geringen Teufen ist technisch machbar, jedoch schon bei der Errichtung mit sehr großem Aufwand verbunden, da technisch und genehmigungsrechtlich „Neuland“ betreten würde, ohne dass sicherheitstechnische Vorteile erkennbar bzw. sogar sicherheitstechnische Nachteile z. B. bezüglich der sicheren Abfuhr der Nachzerfallswärmeleistung nicht auszuschließen sind. Die bislang diskutierten sicherheitstechnischen Aspekte unter Berücksichtigung auslegungsbestimmender Störfälle und auslegungsüberschreitender Ereignisse blieben nahezu uneingeschränkt gültig. Allenfalls bei unmittelbaren mechanischen bzw. thermischen Einwirkungen infolge Einwirkungen von außerhalb der Anlage (z. B. durch Explosionen oder Flugzeugabsturz) könnten sich eventuell Vorteile ergeben. Mit zunehmender Teufe nimmt dagegen der Aufwand für die Errichtung und den Betrieb eines Zwischenlagers weiter deutlich zu.

Prinzipiell dürfte die Form der unterirdischen Zwischenlagerung auch in geringen Teufen gesellschaftlich leicht als vorweggenommenes Endlager angesehen werden; dies könnte die Akzeptanz zusätzlich erschweren. Die Standortauswahl wäre damit ungleich aufwändiger zu erwarten als für ein Oberflächenlager und vermutlich nicht weniger aufwändig als das Standortauswahlverfahren für ein tiefes geologisches Endlager.

Insgesamt erscheint damit die Variante alternativer Zwischenlagerkonzepte nach Auffassung der ESK technisch grundsätzlich machbar, ohne dass hierbei eine relevante Erhöhung des Sicherheitsniveaus derartiger

Anlagen erkennbar wäre. Somit verbleiben folgende realistische Szenarien, die bei einer verlängerten Zwischenlagerung zu betrachten sind:

- Verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten oder
- Bau eines zentralen Zwischenlagers ggf. am für diese Abfälle vorgesehenen Endlagerstandort oder
- Bau von bzw. Konzentration auf wenige(n) regionale(n) Zwischenlager(n).

Alle diese Optionen bedingen, dass die Einhaltung der Schutzziele für die verlängerte Lagerung der bestrahlten Brennelemente und der sonstigen Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle in den derzeit zum Einsatz kommenden Behältertypen auch über die bisher genehmigte Aufbewahrungsdauer hinaus nachgewiesen werden kann (siehe Kapitel 4.6).

Alle drei Optionen benötigen bundesweite und regionale Akzeptanz im gesellschaftlichen und politischen Raum.

Sofern bei einem Neubau das Zwischenlager nicht am für diese Abfälle vorgesehenen Endlagerstandort errichtet wird, hat dies zahlreiche zusätzliche Transporte zur Folge. In jedem Fall ist für notwendige Transporte von etwa 1.900 Behältern ein Zeitfenster von vielen Jahren zu berücksichtigen.

4.6 Sicherheitstechnische Nachweisführung im Genehmigungsverfahren für eine verlängerte Zwischenlagerung

Genehmigungsrechtlich stellt auch die Verlängerung eines bereits genehmigten Zwischenlagerzeitraums eine Neugenehmigung dar. Nach § 6 Abs. 5 AtG kann eine Verlängerung der Genehmigung nur nach vorheriger Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen. Für eine verlängerte Zwischenlagerung können dann die zu diesem Zeitpunkt sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften der konkreten Inventare (bspw. Nachzerfallswärmeleistung, Quellstärken, Spaltprodukte) und Behälter berücksichtigt werden. Erfahrungen, wie beispielsweise mit der Dichtheitsmessung an beladenen und bereits 20 Jahre gelagerten CASTOR® THTR/AVR Behältern, können genutzt werden.

Mit den gegenwärtig anlaufenden periodischen Sicherheitsüberprüfungen auf Grundlage der ESK-Leitlinien zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen und zum technischen Alterungsmanagement für Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle [24] wird der Zustand der derzeit betriebenen Zwischenlager zukünftig regelmäßig umfassend dokumentiert und bewertet. Dabei gewonnene Erkenntnisse und ggf. abgeleitete Maßnahmen dienen sowohl dem Erhalt des bestehenden Sicherheitsniveaus und können darüber hinaus auch für zukünftige Genehmigungsverfahren genutzt werden. Vergleichbare Programme für die Ermittlung sicherheitsrelevanter Entwicklungen der nicht zugänglichen Behälterbereiche und Inventare bestehen derzeit nicht und sind im Rahmen des Zwischenlagerbetriebs kaum realisierbar.

Insgesamt sind die notwendigen sicherheitstechnischen Nachweise für Behälter und Inventare im Rahmen von Genehmigungsverfahren für eine verlängerte Zwischenlagerung auf Grundlage hinreichend belastbarer Daten

und Erkenntnisse zu führen, die sowohl aus den laufenden Betriebserfahrungen der bislang betriebenen Anlagen als auch aus zusätzlichen Untersuchungsprogrammen generiert sein können. Im Hinblick auf die Inventare ist bisher weder geklärt, wie die erforderlichen Daten gewonnen werden, noch ist absehbar, ob die erforderlichen sicherheitstechnischen Nachweise geführt werden können.

4.7 Know-how-Erhalt

Unter den derzeitigen Randbedingungen mit einer Zwischenlagerung bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers voraussichtlich nicht vor 2050 stellt sich die Frage, wie das notwendige Know-how bei allen beteiligten Organisationen in Deutschland aufrecht erhalten werden kann. Eine kontinuierliche Befassung mit den Entsorgungsaufgaben kann dabei helfen – bei entsprechender Aufmerksamkeit – den Erhalt und die Weiterentwicklung der Kompetenzen zu gewährleisten. Es besteht aber ein erhebliches Risiko, dass bestehende Kompetenzen im Umgang mit den radioaktiven Abfällen und der Endlagerung zunehmend weniger bzw. nur unter erschwerten Bedingungen aufrechterhalten werden können, insbesondere wenn keine neuen Entsorgungsprojekte realisiert werden.

Es ist damit zu rechnen, dass sich in den nächsten Jahrzehnten im Verlauf der Außerbetriebnahme aller Kernkraftwerke und deren nachfolgendem Rückbau in Deutschland Veränderungen ergeben werden, da sich in einer praktisch ausschließlich auf die Entsorgung fokussierten Branche die Anzahl der Akteure reduzieren wird, da Zuständigkeiten sowohl auf der Betreiber- und als auch auf der Behörden- und Gutachterseite verloren gehen. Bei den verbleibenden Akteuren wird der Kompetenzerhalt wesentlich davon abhängen, ob Projekte und Aufgaben mit ausreichendem Praxisbezug realisiert und vorangebracht werden, die eine notwendige Anzahl fachkundiger Personen kontinuierlich beschäftigen und eine Tätigkeit in der Branche so attraktiv machen, dass der Personal- und Nachwuchsbedarf gedeckt werden kann. Die Notwendigkeit des Kompetenzerhalts gilt nicht nur für kerntechnische Kompetenzen, sondern auch für andere konventionelle für die Entsorgung wichtige Bereiche wie beispielsweise Planung, Bau und Betrieb von Bergbaubetrieben (Schachtförderung, Bergwerksbetrieb, Anlagensicherheit).

4.8 Übergreifende Betrachtung

Die derzeit geltenden rechtlichen Regelungen des Atomgesetzes (AtG) und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sehen vor, dass die Abfallerzeuger die bei dem Betrieb von Anlagen nach § 7 AtG sowie bei Tätigkeiten nach §§ 5, 6 und 9 AtG entstandenen radioaktiven Abfälle an das vom Bund betriebene Endlager abliefern (§ 76 Abs. 1 StrlSchV) und bis zur Ablieferung zwischenlagern müssen (§ 78 StrlSchV). Wie von den Abfallerzeugern im Hinblick auf die Konditionierung und die Verpackung abzuliefern ist, legt der Bund als Betreiber des Endlagers fest (§ 74 Abs. 1 StrlSchV). Damit verbleiben bis auf die Endlagerung selbst alle Entsorgungsschritte (Zwischenlagerung – Transport – Konditionierung; in dieser oder ggfs. einer anderen Reihenfolge) in der Durchführungs- und Kostenverantwortung der jeweiligen Abfallerzeuger (siehe Abbildung 2).

Die Verantwortung für die Entsorgung der mit dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken in Zusammenhang stehenden Abfälle und Brennelemente sowie der Rückbau der Kraftwerke liegt bei den Betreibern der Kernkraftwerke – im Falle der Kernkraftwerke Greifswald und Rheinsberg beim Bund.

Akteur	Abfallerzeuger			Bund
Entsorgungsschritt	Zwischenlagerung	Transport	Konditionierung	Endlagerung
Rechtsgrundlage (AtG)	§ 6	§ 4	§ 7	§ 9a

Abbildung 2:

Verantwortlichkeiten und gesetzliche Grundlagen (AtG: Atomgesetz [3]) im Bereich der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle.

Die Zwischenlagerung ist somit nur ein Teilaspekt bei der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Der gesamte Entsorgungspfad besteht i. d. R. aus den Teilschritten Zwischenlagerung, Transport und Konditionierung/Umladen in spezielle Endlagerbehälter (falls erforderlich), Transport zum Endlager und der Endlagerung selbst. Diese sind nicht unabhängig voneinander zu sehen, sondern sind miteinander verzahnt und beeinflussen sich gegenseitig. So können u. U. die Handhabbarkeit und Konditionierung bestrahlter Brennelemente durch eine eventuell ungünstige Veränderung des Zustands während einer verlängerten Zwischenlagerung beeinträchtigt werden. Auch setzt die Entwicklung von Konzepten zur Endlagerung von bestrahlten Brennelementen auf der Auswahl des Wirtsgesteins auf.

Bereits in der Vergangenheit wurden alle Schritte der Entsorgung bis zur Endlagerung betrachtet, allerdings i. d. R. jeder für sich bzw. in Teilsystemen und vor allem im Hinblick auf eine Endlagerung in Salzformationen (z. B. [9], [24], [25], [26]).

Eine sicherheitstechnische Verknüpfung zwischen Konditionierung, Endlagerbehälter und geologischem System des Endlagers wurde in Deutschland erstmals mit der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) [27] betrachtet. Dabei zeigte sich, dass diese sicherheitstechnische Verknüpfung zur Bewertung von Endlagersystemen zwingend notwendig ist. In iterativen Entwicklungsschritten ist – ausgerichtet an den geologischen Anforderungen – das technische Konzept zu Behältern (resp. Verpackungen) und zur Handhabung und evtl. Konditionierung zu entwickeln, um sicherzustellen, dass ein zum konkreten Standort passendes technisches Konzept rechtzeitig zur Verfügung steht. Hierbei sind die Gegebenheiten der bereits existierenden Behälter und Inventare zu berücksichtigen, um ein tragfähiges Gesamtkonzept zu erreichen. Die Notwendigkeit für ein iteratives Vorgehen wurde in der VSG [27] bestätigt. Unter Berücksichtigung des heutigen Zeithorizonts sind parallel zur Standortauswahl für das Endlager für den jeweiligen Standort geeignete Behälter- und Konditionierungskonzepte zu entwickeln. Zumindest in den

Grundzügen wird dies bereits für einen Vergleich verschiedener Standorte – insbesondere bei unterschiedlichen Wirtsgesteinen – erforderlich.

Die erwähnte sicherheitstechnische Verknüpfung zwischen dem geologischen System des Endlagers, dem Endlagerbehälter und der Konditionierung entfaltet mögliche Rückwirkungen zu den sicherheitstechnischen Fragen, die bei einer Verlängerung der Zwischenlagerzeiten von Bedeutung sein können: Ist es für die beabsichtigte Endlagerung z. B. bestrahlter Brennelemente erforderlich, diese in spezifische Endlagerbehälter umzupacken, so ist die Handhabbarkeit der Brennelemente sicherzustellen.

Wie bereits im Kapitel 4.4 dargelegt, spielt auch der Nachweis der sicheren Transportierbarkeit der Behälter nach einer verlängerten Zwischenlagerung eine wichtige Rolle. Die derzeitigen Regelungen sind dafür nicht oder nur unzureichend geeignet.

Daher scheint es sinnvoll, ein spezifisches Regelwerk für die verlängerte Zwischenlagerung unter Einbeziehung der für den Abtransport notwendigen Regelungen zu etablieren. Darüber hinaus ist es wichtig, dass für die Betrachtung und Realisierung des Gesamtsystems Entsorgung im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung klare Zuständigkeiten mit einer geeigneten Koordinierungsstelle festgelegt werden.

5 Ökonomische und ethische Aspekte

Finanzierung

Die privaten Betreiber bilden Rückstellungen zur Finanzierung des Rückbaus der Kernkraftwerke und zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung ihrer Anlagen, einschließlich der Kosten für die spätere Endlagerung ihrer Abfälle.

Die Entsorgung der Abfälle in der Zuständigkeit der öffentlichen Hand wird über Titel der öffentlichen Haushalte finanziert.

Während für den Rückbau der Kernkraftwerke aufgrund von Erfahrungen inzwischen relativ gute Abschätzungen der Kosten möglich sind, ist die Kalkulation der Aufwendungen für die Endlagerung mit erheblich größeren Unsicherheiten behaftet. Dies ist einerseits auf die national und international fehlenden Erfahrungen mit tatsächlichen Planungs-, Bau-, Betriebs- und Stilllegungskosten für ein Endlager und andererseits auf die Ungewissheiten bezüglich der Kostenentwicklung über den sehr langen Zeitraum von rund 100 Jahren zurückzuführen.

Außerdem werden nach dem Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie zur Energieerzeugung in dieser Branche keine Gewinne mehr erwirtschaftet werden, andererseits aber noch erhebliche Aufwendungen für die Entsorgung anstehen. Diese Randbedingungen sind im Hinblick auf die Möglichkeiten mittel- und langfristiger Anpassungen der Finanzierungsgrundlagen für die Entsorgung zu berücksichtigen.

Je weiter sich die Lösung der Entsorgungsfrage in die Zukunft verlagert oder neue technische Entsorgungskonzepte und -verfahren verfolgt werden, umso größer sind die zu erwartenden ökonomischen Unsicherheiten in Bezug auf die Höhe der zu erwartenden Kosten sowie hinsichtlich der Verfügbarkeit der finanziellen Mittel (beispielsweise durch Unternehmenskonkurs oder Störungen im Finanzsystem verbunden mit einem Wertverfall der Rückstellungen). Durch eine verzögerte Bereitstellung eines Endlagers und die daraus resultierende verlängerte Zwischenlagerung ist infolgedessen auch mit einer weiteren Zunahme der Unsicherheiten hinsichtlich der Höhe der Entsorgungskosten und einem Anstieg der zusätzlich von der öffentlichen Hand zu finanzierenden Kostenanteile zu rechnen.

Generationengerechtigkeit

Die Verantwortung gegenüber nachfolgenden Generationen wird auch als Generationengerechtigkeit bezeichnet. Darunter wird verstanden, dass die Generation, die den Nutzen aus einer Technik zieht oder gezogen hat, auch die damit verbundenen Lasten tragen und den nachfolgenden Generationen möglichst keine aufwändigen und außergewöhnlich bindenden Aufgaben hinterlassen sollte. Bezogen auf die Nutzung der Kernenergie bedeutet dies, dass die Entsorgung möglichst zeitnah und nachsorgefrei gelöst wird. Insofern ist der Begriff „alsbaldig“ als ohne wesentliche Verzögerung aufzufassen. Bei der Genehmigung der Standortzwischenlager für bestrahlte Brennelemente wurde diesem Aspekt durch die Begrenzung der Genehmigungsdauern auf unter damaligen Gesichtspunkten als ausreichend erachtete 40 Jahre bis zur Verbringung in ein Endlager Rechnung getragen.

Bereits mit den heutigen zeitlichen Perspektiven werden die administrative, finanzielle und gesellschaftliche Verantwortung und die praktische Ausführung von Entsorgungsaufgaben in wesentlichen Teilen auf die folgenden Generationen übertragen.

Würde dieser Zeitraum durch weitere Verzögerungen beim Standortauswahlprozess bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers und der damit einhergehenden verlängerten Zwischenlagerung zusätzlich ausgedehnt, würden weitere Aufgaben auf noch fernere Generationen übertragen werden. Die aus der Vertagung der Endlagerung auf zukünftige Generationen resultierende Entscheidungsfreiheit über weitergehende Nutzung oder endgültige Entsorgung der Abfälle unter Berücksichtigung eventuell weiterentwickelter Technologien ist somit gegen die Verpflichtungen zum sicheren Betrieb von Interimslösungen vor dem Hintergrund nicht vorhersehbarer gesellschaftspolitischer Entwicklungen und Risiken abzuwägen.

6 Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte bei einer verlängerten Zwischenlagerung

Die ESK ist der fachlichen Überzeugung, dass die Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und sonstigen Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen auf den unbedingt notwendigen Zeitraum bis zu ihrer Überführung in ein Endlager in tiefen geologischen Formationen zu begrenzen ist, um den bestmöglichen Schutz der Menschen und der Umwelt zu gewährleisten.

Derzeitige Betriebserfahrungen mit Behältern und Zwischenlagern von mehr als 20 Jahren lassen in Verbindung mit regelmäßigen Sicherheitsüberprüfungen und systematischen Maßnahmen zum Alterungs-

management auch für eine über 40 Jahre hinausgehende verlängerte Zwischenlagerung die Beibehaltung der bestehenden Sicherheitsfunktionen grundsätzlich erwarten. Dessen unbenommen ergeben sich eine Reihe von zu klärenden Aspekten im Hinblick auf die Zwischenlagerung und die daran anschließenden Entsorgungsschritte, die im Folgenden zusammenfassend dargestellt sind:

- Genehmigungsrechtlich stellt auch die Verlängerung eines bereits genehmigten Zwischenlagerzeitraums eine Neugenehmigung dar, der die erforderliche Vorsorge nach dem dann gültigen Stand von Wissenschaft und Technik zugrunde zu legen ist. Für eine verlängerte Zwischenlagerung müssen dann die zu diesem Zeitpunkt sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften der tatsächlich vorhandenen Inventare und Behälter berücksichtigt werden.
- Die notwendigen sicherheitstechnischen Nachweise für Behälter und Inventare im Rahmen von Genehmigungsverfahren für eine verlängerte Zwischenlagerung sind auf Grundlage hinreichend belastbarer Daten und Erkenntnisse zu führen, die teilweise aus den laufenden Betriebserfahrungen generiert werden können und teilweise durch zusätzliche Untersuchungsprogramme ergänzt werden müssen.
- Untersuchungsprogramme zum Nachweis des Langzeitverhaltens von Behälterkomponenten (z. B. Metalldichtungen) und Inventaren (z. B. Brennstabintegrität) für eine verlängerte Zwischenlagerung sind voraussichtlich mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden und sollten frühzeitig initiiert werden. Eine aktive Beteiligung an internationalen Untersuchungsprogrammen ist sinnvoll, um Erkenntnisse, soweit übertragbar, berücksichtigen zu können.
- Die Verfügbarkeit aller austauschbaren Behälterkomponenten (z. B. Druckschalter, Metalldichtungen, Tragzapfen, Schrauben) muss für den gesamten Zwischenlagerzeitraum gewährleistet sein, auch wenn nach Abschluss der letzten Behälterfertigung/-beladung grundsätzlich kein Fertigungsbedarf mehr besteht.
- Im Hinblick auf den erforderlichen Abtransport der Behälter sind Nachweise zur sicheren Transportierbarkeit während und nach einer verlängerten Zwischenlagerung zu erbringen. Da die derzeitigen verkehrsrechtlichen Regelungen dafür nicht oder nur unzureichend geeignet sind, wäre es sinnvoll, Alternativen zur Aufrechterhaltung verkehrsrechtlicher Bauartzulassungen im Rahmen eines zu entwickelnden Regelwerks für die verlängerte Zwischenlagerung zu etablieren. Hierbei muss insbesondere die Verschränkung zwischen den Maßnahmen zum Alterungsmanagement während der Zwischenlagerung und den Anforderungen zur Erlangung einer Transportgenehmigung im Anschluss an die Zwischenlagerung enthalten sein, um den Abtransport der Behälter am Ende ihrer Zwischenlagerzeit sicherzustellen.
- Inwieweit die Transport- und Lagerbehälter u. U. später auch als Endlagerbehälter geeignet sind, hängt nicht zuletzt von den endlagerspezifischen Beanspruchungsbedingungen und Anforderungen unter Berücksichtigung handhabungstechnischer und wirtsgesteinsspezifischer Gesichtspunkte ab.

- Die Zwischenlagerung ist nur ein Teilaspekt bei der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Der gesamte Entsorgungspfad besteht i. d. R. aus den Teilschritten Zwischenlagerung, Transport und Konditionierung/Umladen in spezielle Endlagerbehälter (falls erforderlich), Transport zum Endlager und der Endlagerung selbst. Diese sind miteinander verzahnt und beeinflussen sich gegenseitig.
- Das Brennelementverhalten ist von wesentlicher Bedeutung für erforderliche und geeignete Konditionierungskonzepte zur nachfolgenden Endlagerung. Einschränkungen hinsichtlich der Konditionierungsmöglichkeiten der Brennelemente haben Rückwirkungen auf die realisierbaren Endlagerkonzepte und sind daher möglichst frühzeitig bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten zu berücksichtigen.
- Zur Gewährleistung der integrierten Betrachtung und Realisierung des Gesamtsystems Entsorgung ist eine geeignete Koordinierungsstelle erforderlich. Diese sollte sowohl die Schnittstellen hinsichtlich der technischen Anforderungen und Wechselwirkungen als auch die Organisation der Zuständigkeiten für die verschiedenen Entsorgungsschritte – auch unter Berücksichtigung einer sich durch die Umsetzung des Kernenergieausstiegs ändernden Akteurslandschaft – im Blick haben.
- Alternative Zwischenlagerkonzepte erscheinen nach Auffassung der ESK technisch grundsätzlich machbar, ohne dass hierbei eine relevante Erhöhung des Sicherheitsniveaus derartiger Anlagen erkennbar wäre. Vielmehr entstünden erhebliche genehmigungsrechtliche und gesellschaftspolitische Risiken sowie Probleme hinsichtlich der Akzeptanz von Standorten und zusätzlicher Transporte, ganz zu schweigen von erheblichen Mehrkosten und zusätzlichen Terminrisiken hinsichtlich einer rechtzeitigen Betriebsbereitschaft.
- Sowohl der Bau neuer Zwischenlager als auch die Verlängerung der Lagerdauer an den 16 Standortgemeinden wird bundesweite Akzeptanz im gesellschaftlichen und politischen Raum benötigen. Aus Sicht der ESK verbleiben folgende realistische Szenarien für eine verlängerte Zwischenlagerung:
 - Verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten oder
 - Bau eines zentralen Zwischenlagers ggf. am für diese Abfälle vorgesehenen Endlagerstandort oder
 - Bau von bzw. Konzentration auf wenige(n) regionale(n) Zwischenlager(n).
- Durch Außerbetriebnahme aller Kernkraftwerke und deren nachfolgenden Rückbau in Deutschland ergeben sich Veränderungen bei den Zuständigkeiten und die Anzahl der Akteure reduziert sich. Bei einer signifikanten Verlängerung der Zwischenlagerung besteht daher ein erhebliches Risiko, dass bestehende Kompetenzen im Umgang mit den radioaktiven Abfällen und der Endlagerung zunehmend weniger bzw. nur unter erschwerten Bedingungen aufrechterhalten werden können. Dem Kompetenzerhalt über sehr lange Zeiträume kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Er kann u. a. durch F&E-Projekte mit ausreichendem Praxisbezug und aktive Beteiligung an internationalen Forschungsvorhaben und -kooperationen unterstützt werden.

- Durch eine verzögerte Bereitstellung eines Endlagers und die daraus resultierende verlängerte Zwischenlagerung ist mit einer weiteren Zunahme der Unsicherheiten hinsichtlich der Höhe der Entsorgungskosten und einem Anstieg der von der öffentlichen Hand zu finanzierenden Kostenanteile zu rechnen.
- Bereits mit den heutigen zeitlichen Perspektiven werden die administrative, die finanzielle und die gesellschaftliche Verantwortung sowie die praktische Ausführung von Entsorgungsaufgaben in wesentlichen Teilen auf die folgenden Generationen übertragen. Würde dieser Zeitraum durch weitere Verzögerungen beim Standortauswahlprozess bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers und der damit einhergehenden verlängerten Zwischenlagerung zusätzlich ausgedehnt, würden weitere Aufgaben auf noch fernere Generationen übertragen werden.

7 Abkürzungsverzeichnis

- AVR:** Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich, Hochtemperaturreaktor - Versuchskernkraftwerk
- CSD-B:** Colis Standard des Déchets Boues, verglaste mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen in La Hague
- CSD-C:** Colis Standard des Déchets Compactés, hochdruckkompaktierte radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen in La Hague
- FA VE:** Fachausschuss Nukleare Ver- und Entsorgung des Länderausschusses für Atomkernenergie
- HAW:** High Active Waste, hoch radioaktiver Abfall
- KOBAF:** Koordinierungsstelle für Informationen zur Behälterabfertigung
- LAA:** Länderausschusses für Atomkernenergie
- LWR:** Leichtwasserreaktor
- THTR:** Thorium-Hochtemperaturreaktor
- VSG:** Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
- WKP:** wiederkehrende Prüfung
- WWER:** wassermoderierter wassergekühlter Energie-Reaktor, Druckwasserreaktor russischer Bauart

8 Literatur

- [1] Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG) BGBl. I Nr. 41 vom 26. Juli 2013, S. 2553

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

- [3] Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3313)

- [4] Extended Storage Collaboration Program, International Subcommittee Report:
International perspectives on technical data gaps associated with extended storage and transportation of used nuclear fuel. EPRI, Palo Alto, CA: 2012.1026481

- [5] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 30.09.2010

- [6] Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle

- [7] Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern, Empfehlung der Entsorgungskommission, revidierte Fassung vom 10.06.2013

- [8] Arbeitskreis HAW-Produkte, veröffentlicht in Forschungszentrum Karlsruhe
Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten – Charakterisierung und Bewertung – Empfehlung des Arbeitskreises HAW-Produkte“; FZKA 6651, September 2001

- [9] Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern - ein umsetzbares technisches Konzept
R. Graf, K.-J. Brammer, W. Filbert
Jahrestagung Kerntechnik, Mai 2012
- [10] 2. Änderungsgenehmigung vom 07.07.2005 zur Aufbewahrungsgenehmigung für das AVR-
Behälterlager der Forschungszentrum Jülich GmbH vom 17.06.1993 – ET 3.1 – 2.4
- [11] Einziger, R.E., Billone, M.C.: Hydriding Effects in HBU Cladding. International Seminar on Spent
Fuel Storage (ISSF 2010), November 15-17, 2010, Tokyo, Japan
- [12] Velazquez-Lozada, A.: Extended Storage & Beyond. 30th INMM Spent Fuel Management
Seminar, 12-14 Jan. 2015, Arlington, USA
- [13] Kessler, J., Waldrop, K.: EPRI High Burnup Used Fuel Confirmatory Demonstration Project [The
“High Burnup Demo”]. NEI Used Fuel Management Conference, St. Petersburg, USA, 8 May 2013
- [14] High Burnup Dry Storage Cask Research and Development Project: Final Test Plan Contract No.:
DE-NE-0000593. Prepared by: the Electric Power Research Institute (EPRI), Rev.0
(February 27, 2014)
- [15] Kessler, J.: EPRI’s Long-Term Storage Projects. 30th INMM Spent Fuel Management Seminar,
12-14 Jan. 2015, Arlington, USA
- [16] Yamamoto, M.: Demonstration Test Program for Long-term Dry Storage of PWR Spent Fuel.
IAEA-CN-178/08-03, 02. June 2010
- [17] Kook, D., Choi, J., Kim, J., and Kim, Y.: Review of Spent Fuel Integrity Evaluation for Dry
Storage. Nuclear Engineering and Technology, Vol.45 No.1 February 2013
- [18] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Dry Cask Storage Characterization Project –
Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination, NUREG/CR-6745, Washington D.C.
(September 2001)

- [19] WATARU, M., et al., “Long-term Containment Performance Test of Metal Cask for Spent Nuclear Fuel Storage”, PSAM, 25-29 June, 2012, Helsinki, Finland, (2012)
- [20] Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und verglastem HAW
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
GRS – A - 3597, April 2010
- [21] FERRY, C., POINSSOT, C., CAPPELAERE, C., DESGRANGES, L., JEGOU, C., MISERQUE, F., PIRON, J.P., ROUDIL, D., GRAS, J.M., Specific outcomes of the research on the spent fuel long-term evolution in interim dry storage and deep geological disposal,
J. Nucl. Mat., 253 (2006), 246-253
- [22] POINSSOT, C., TOULHOAT, P., GRAS, J.M., VITORGE, P., Long term evolution of spent nuclear fuel in long term storage or geological disposal. New findings from the French PRECCI R&D program and implications for the definition of the RN source term in geological repository,
J. Nucl. Sci. Technol., 39, Suppl. 3, (2002), 473-476
- [23] ESK-Leitlinien zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen und zum technischen Alterungsmanagement für Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Empfehlung der Entsorgungskommission vom 13.03.2014
- [24] Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8191)
Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht Hauptband
September 1995, DEAB T 60
- [25] Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein (ERATO)
Abschlussbericht, Dezember 2008
DBE Technology GmbH; Pöhler, M. et al.
- [26] Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report (DBE TECHNOLOGY GmbH, Filbert, Bollingerfehr)

- [27] Synthesebericht für die VSG
 Bericht zum Arbeitspaket 13
 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
 GRS - 290, März 2013