

Geschäftsstelle

Kommission  
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe  
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

---

**Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter  
Brennelemente und verglaster Abfälle**

Vorgelegt von:

TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG, Hannover,  
Oktober 2015

---

<p><b>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 44</b></p>
---

**Gutachten**  
**zur**  
**Langzeitzwischenlagerung**  
**abgebrannter Brennelemente**  
**und verglaster Abfälle**

Oktober 2015

erstellt im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe

Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung, Rahmenbedingungen und Grundannahmen</b>	<b>8</b>
2.1	Gesellschaftliche, politische und rechtliche Rahmenbedingungen (Ist-Zustand)	8
2.2	Grundannahmen für die Langzeitzwischenlagerung in Deutschland	9
<b>3</b>	<b>Langzeitzwischenlagerung in Deutschland</b>	<b>12</b>
3.1	Schutzziele und sicherheitstechnische Anforderungen bzgl. der Langzeitzwischenlagerung	12
3.2	Ausführungsoptionen für ein LZZL	13
3.3	Darstellung und Bewertung technischer Aspekte	14
3.3.1	Bauanlagen	14
3.3.1.1	Zusätzliche Anforderungen an LZZL gegenüber den derzeitigen Zwischenlager	14
3.3.1.2	Vor- und Nachteile der drei grundsätzlichen Möglichkeiten der LZZL aus bautechnischer Sicht	18
3.3.1.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonstrukturen eines LZZLs	20
3.3.2	Technische Einrichtungen im LZZL	23
3.3.3	Mögliche Veränderungen der Abfallbehälter und Inventare im Verlauf der Langzeitzwischenlagerung	29
3.3.3.1	Allgemeines	29
3.3.3.2	Inventar	30
3.3.3.3	Transport und Lagerbehälter	41
3.3.4	Anforderungen hinsichtlich der Anlagensicherung	44
3.4	Relevante nichttechnische Einflussgrößen	46
3.4.1	Kompetenzerhalt für den sicheren Betrieb	46
3.4.2	Personalverfügbarkeit für den sicheren Betrieb eines LZZL	48
3.4.3	Auswirkungen potenzieller demografischer Effekte	50
3.4.4	Auswirkungen potenzieller kriegerischer Auseinandersetzungen	50
3.4.5	Gesetzlicher und regulatorischer Rahmen	51
3.4.6	Institutioneller Rahmen	53

3.4.7	Langfristige Finanzierung	55
3.5	Zeitbedarf bis zur Inbetriebnahme	56
<b>4</b>	<b>Aspekte langer Zwischenlagerzeiträume in ausgewählten Ländern</b>	<b>60</b>
4.1	Synopse	60
4.2	Niederlande	64
4.2.1	Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle	64
4.2.2	Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeit-Zwischenlagerung im Entsorgungskonzept	65
4.2.3	Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung	66
4.2.4	Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen	67
4.2.5	Anforderungen an die Anlagensicherheit	69
4.2.6	Finanzierungsmechanismen	70
4.2.7	Institutionelle und organisatorische Randbedingungen	71
4.3	Frankreich	73
4.3.1	Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle	73
4.3.2	Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeitzwischenlagerung im Entsorgungskonzept	73
4.3.3	Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung	75
4.3.4	Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen	76
4.3.5	Anforderungen an die Anlagensicherheit	76
4.3.6	Finanzierungsmechanismen	77
4.3.7	Institutionelle und organisatorische Randbedingungen	77
4.4	Großbritannien	79
4.4.1	Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle	79
4.4.2	Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeit-Zwischenlagerung im Entsorgungskonzept	79
4.4.3	Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung	80
4.4.4	Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen	80
4.4.5	Anforderungen an die Anlagensicherheit	81
4.4.6	Finanzierungsmechanismen	81

---

4.4.7	Institutionelle und organisatorische Randbedingungen	82
4.5	USA	83
4.5.1	Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle	83
4.5.2	Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeitzwischenlagerung im Entsorgungskonzept	83
4.5.3	Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung	85
4.5.4	Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen	86
4.5.5	Anforderungen an die Anlagensicherheit	87
4.5.6	Finanzierungsmechanismen	88
4.5.7	Institutionelle und organisatorische Randbedingungen	88
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>99</b>

### Abkürzungsverzeichnis

ALARA	As Low As Reasonably Achievable („so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar“)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Staatliches französisches Entsorgungsunternehmen für radioaktive Abfälle)
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire (Französische Aufsichtsbehörde)
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH (Versuchsreaktor der Hochtemperaturreaktor Linie in Jülich)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Französische Kernenergiekommission)
CIGEO	Centre industriel de stockage géologique (Französisches Endlagerprojekt)
CNE	Commission nationale d'évaluation (Französische Kommission zur Evaluierung der Forschungsergebnisse zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle)
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (Staatliches niederländisches Entsorgungsunternehmen für radioaktive Abfälle)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DoE	Department of Energy (Energieministerium in den USA)
EDF	Electricité de France (Französisches staatliches Energieversorgungsunternehmen)
ESK	Entsorgungskommission beim Bundesumweltministerium
FRM-II	Forschungsreaktor München II
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandeling- en Opslag Gebouw (Zentrales Zwischenlager für hoch radioaktive Abfälle in den Niederlanden)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie Organisation)
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LZZL	Langzeitzwischenlager
MOX	Brennstoff aus Uran-Plutonium Mischoxid
NDA	Nuclear Decommissioning Authority (Britische staatliche Organisation zur Abwicklung von Stilllegungs- und Entsorgungsprojekten)
NORM	Naturally occurring radioactive material (Natürlich vorkommendes radioaktives Material)
NRC	Nuclear Regulatory Commission (Regulierungsbehörde der USA)
PSÜ	Periodische Sicherheitsüberprüfung
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
StandAG	Standortauswahlgesetz
Stand von W+T	Stand von Wissenschaft und Technik
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
THTR	Thorium Hochtemperaturreaktor
TLB	Transport- und Lagerbehälter
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor (Druckwasserreaktor russischer Bauart)

## 1 Kurzfassung

Das vorliegende Gutachten betrachtet im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe des Deutschen Bundestags die mit einer hypothetischen Zwischenlagerung abgebrannter Brennelementen und verglaster Abfälle über einige hundert Jahre verbundenen technischen und nichttechnischen Herausforderungen und Erfordernisse. Eine derartige Langzeitzwischenlagerung ist eine grundsätzlich denkbare Strategie, die allerdings eine bewusste Entscheidung und Begründung voraussetzt. Sie ist keine Form der endgültigen Entsorgung, sondern verschiebt die Endlagerung in die Verantwortung zukünftiger Generationen.

Ausgehend von der trockenen Zwischenlagerung in den heute verwendeten Transport- und Lagerbehältern werden ein Zwischenlagerzeitraum von einigen hundert Jahren in den Blick genommen und die damit verbundenen technischen und nicht technischen Aspekte beleuchtet.

Als Ausführungsoptionen werden die Weiternutzung der bestehenden Standorte, der Neubau einer oder mehrere übertägiger sowie untertägiger, oberflächennaher Zwischenlager betrachtet.

Der Erhalt der erforderlichen baulichen Anlagen erscheint mit entsprechendem Aufwand (bis hin zu Neubauten) grundsätzlich auch über mehrere Jahrhunderte hinweg realisierbar. Die Nutzung der bestehenden Zwischenlager hat dabei den grundsätzlichen Nachteil, dass sie nicht auf Betriebszeiten von einigen hundert Jahren hin ausgelegt wurden und daher einen Mangel an Flexibilität gegenüber zukünftigen Lastannahmen aufweisen.

Das Verhalten der Inventare während einer Langzeitzwischenlagerung ist derzeit nicht sicher prognostizierbar. Es wären daher Konzepte vorzusehen, wie die Abfälle neu verpackt werden können, wenn Untersuchungen Hinweise auf unerwünschte Degradationen liefern. Der Erhalt des erforderlichen industriellen Know-hows und die Verfügbarkeit qualifizierten Personals sind aus heutiger Sicht ebenfalls unsicher.

Eine Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung zieht eine Überarbeitung der rechtlichen Grundlagen und des untergesetzlichen Regelwerkes nach sich. Für die Genehmigung und deren Aufrechterhaltung bedarf es neuer Konzepte, um mit Genehmigungsvorbehalten umzugehen, die sich aus den über den langen Zeitraum nicht prognostizierbaren Einflüssen auf das Sicherheits- und Sicherungskonzept ergeben. Schließlich wirft die Finanzierung einer Langzeitzwischenlagerung eine Reihe offener Fragen auf.

Der vollständige Zeitbedarf bis zur Inbetriebnahme eines Langzeitzwischenlagers ist aus heutiger Sicht nicht quantifizierbar, insbesondere weil sich der Zeitbedarf für den

gesellschaftlichen und politischen Diskurs, der zunächst zu einem Konsens für die Langzeitzwischenlagerung führen müsste, nicht absehen lässt. Eine Inbetriebnahme eines ausgewiesenen Langzeitzwischenlagers während der Laufzeit der bestehenden Zwischenlager erscheint jedenfalls nicht möglich.

Das vorliegende Gutachten hat ergänzend Aspekte langer Zwischenlagerzeiträume für hoch radioaktive Abfälle in ausgewählten Staaten betrachtet: Eine Langzeitzwischenlagerung über mehrere Jahrhunderte spielt in den geprüften Entsorgungskonzepten keine Rolle. Am Ende einer längeren Zwischenlagerperiode wird in allen Fällen die geologische Endlagerung angestrebt. Lange Zwischenlagerzeiträume gehen de facto mit einer Übernahme der Abfälle in staatliche Obhut einher. Lagerzeiträume von einhundert Jahren werden allgemein als machbar angesehen; an die Stelle einer Auslegung über den Gesamtzeitraum tritt eine ggf. mehrfache Erneuerung der Anlagen. Das Alterungsmanagement wird wichtiger Bestandteil des Betriebs und die Möglichkeit, hoch radioaktive Abfälle auch nach längeren Zeiträumen noch behandeln zu können, wird als Herausforderung und Forschungsfeld verstanden.



## **2 Einleitung, Rahmenbedingungen und Grundannahmen**

### **2.1 Gesellschaftliche, politische und rechtliche Rahmenbedingungen (Ist-Zustand)**

Die Beendigung der Kernenergienutzung in Deutschland ist eine von einem mehrheitlichen gesellschaftlichen Konsens getragene und nicht in Frage gestellte Grundsatzentscheidung. Mit der Abschaltung des letzten Kernkraftwerks im Jahr 2022 wird der Ausstieg aus der Kernenergienutzung vollzogen sein. Das endgültige Aufkommen abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (im Folgenden zusammengefasst als "hoch radioaktive Abfälle" bezeichnet) ist damit im Wesentlichen bekannt. Prognostiziert werden zum Ende der Kernenergienutzung ca. 1.100 Lagerbehälter mit abgebrannten Brennelementen, ca. 291 Lagerbehälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, 461 aus den Versuchs- und Demonstrationsreaktoren, 18 Behälter aus stillgelegten Forschungsreaktoren, sowie ca. 35 Behälter aus den laufenden Forschungsreaktoren. Insgesamt geht es also um die Langzeitzwischenlagerung von hoch radioaktiven Abfällen in ca. 1.900 Behältern /2.1-1/.

Die Frage nach Ort und Art der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle ist dabei nach wie vor offen. Aktuell lagern die bereits vorhandenen abgebrannten Brennelemente und hoch radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in zentralen und dezentralen Zwischenlagern, deren Genehmigungen in den 2030/2040er Jahren auslaufen. Es ist davon auszugehen, dass auch bei einer zügigen Umsetzung des Standortauswahlprozesses das Endlager für insbesondere hoch radioaktive Abfälle bis zum Auslaufen der ersten Genehmigungen noch nicht annahmefähig sein wird. Auch ist bis dato noch keine Klärung dahingehend erfolgt, wie die Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle nach Ablauf der Genehmigungsfristen organisiert werden soll.

Der in 2011 begonnene politische Diskurs um die Endlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung führte im Ergebnis zu einem Neustart der Suche nach einem Endlagerstandort für diese Abfallstoffe und zur Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) im Jahr 2013. Die gemäß StandAG vom Deutschen Bundestag eingesetzte Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (im Folgenden "Endlagerkommission") hat im Rahmen der Prüfung des StandAG u. a. die Aufgabe, Vorschläge zum Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen zu erarbeiten.

In diesem Kontext befasst sich die Endlagerkommission auch mit Fragen zur "*Lagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle über einige hundert Jahre als Form der Entsorgung*", was Anlass zur Vergabe des hier vorgestellten Gutachtens war.

Die dauerhafte Lagerung von abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfällen im Sinne eines „Hütekongzeptes“ als eine Form der Dauerlagerung /2.1-2/, ist ebenso

wie eine Zwischenlagerung über nur wenige Jahrzehnte nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Ziel des Gutachtens ist die umfassende Darstellung, Ableitung und Würdigung der technischen und nichttechnischen Herausforderungen und Erfordernisse, die mit einer Langzeitzwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfällen über einige hundert Jahre verbundenen sind.

Im vorliegenden Gutachten werden zunächst die übergeordneten Randbedingungen und Grundannahmen zusammengestellt. Auf dieser vorgegebenen bzw. angenommenen Basis werden dann die potenziell bei einer Langzeitzwischenlagerung zu lösenden Aufgaben und Herausforderungen technischer und nicht technischer Art in ihrer Breite dargestellt, sowie der potenzielle Zeitbedarf bis zur Realisierung einer Langzeitzwischenlagerung abgeschätzt.

Darüber hinaus werden exemplarisch die Situationen in den Niederlanden, Frankreich, Großbritannien und den USA anhand der Fragestellung dargestellt, inwieweit hier die Option einer Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über lange Zeiträume (jenseits einiger Jahrzehnte) in den jeweiligen Entsorgungskonzepten eine Rolle spielt oder in der Vergangenheit gespielt hat, und wie in den jeweiligen Ländern insbesondere das Thema der Langfristigkeit der Zwischenlagerung in technischer, gesellschaftlicher, organisatorischer und finanzieller Hinsicht adressiert wird/wurde.

Die wesentlichen Erkenntnisse des Gutachtens werden abschließend thesenartig zusammengefasst und offene Punkte und Prüfgegenstände aufgezählt, die bei einer intensiveren Befassung mit dem Thema oder prinzipieller Entscheidungen in Richtung auf eine Langzeitzwischenlagerung zu klären bzw. in Zukunft regelmäßig zu überprüfen wären.

## **2.2 Grundannahmen für die Langzeitzwischenlagerung in Deutschland**

Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre ist eine denkbare Strategie zum Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, die einer diesbezüglichen Entscheidung und ihrer Begründung bedarf. Langzeitzwischenlagerung in dem hier diskutierten Kontext bedeutet, dass in absehbarer Zukunft keine Entscheidung über den endgültigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen getroffen bzw. erwartet wird.

Langzeitzwischenlagerung ist ein geplanter Zustand. Hieraus folgt, dass bereits bei der Auslegung des Langzeitzwischenlagers (LZZL) mit einer Betriebszeit von einigen hundert Jahren das Gesamtsystem zu berücksichtigen ist. Durch die Langfristigkeit rücken dabei potenzielle Entwicklungen als auslegungsrelevant in den Fokus, die bis dato für die Auslegung kerntechnischer Anlagen keine Rolle spielten.

### Technische Grundannahmen und Auslegungsanforderungen

Die Ausführungen zu den technischen Aspekten eines LZZL im Kapitel 3.3 dieses Gutachtens basieren auf zwei technischen Grundannahmen, die sich direkt aus der Aufgabenstellung ergeben haben:

- Der Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung erstreckt sich über einige hundert Jahre und grenzt sich somit deutlich von der in Deutschland bestehenden Zwischenlagerung einschließlich ihrer derzeit diskutierten möglichen Verlängerung über einige Jahre bzw. Jahrzehnte ab.
- Bei den Betrachtungen zu den Abfallgebinden wird von einer trockenen Aufbewahrung in den derzeit existierenden, bzw. bis 2022 noch anfallenden Transport- und Lagerbehältern ausgegangen /2.1-1/.

Überlegungen über die Notwendigkeit oder die technische Ausführung von neu zu fertigenden Behältern, die explizit für eine Langzeitzwischenlagerung oder bereits für eine spätere Endlagerung nutzbar sind, sind nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Sowohl aus den Grundannahmen, als auch bereits aus dem Sachverhalt, dass zum Zeitpunkt der Auslegung eines LZZL die genaue Art der später eingesetzten Endlagerbehälter noch nicht feststeht, ergeben sich u. a. folgende technischen Auslegungsanforderungen, die zu berücksichtigen sind:

- Die Integrität der gelagerten Inventare muss über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung sichergestellt werden, da bis zur Endlagerung voraussichtlich noch mindestens ein Umladen in die zur Endlagerung vorgesehenen Behälter erfolgen muss.
- Die Handhabbarkeit und Transportfähigkeit der Behälter muss gewährleistet werden, um Reparaturen und erforderliche Konditionierungsschritte (z. B. Umladen) bis zur Herstellung eines Endlagergebindes zu ermöglichen.

### Grundannahmen zur gesellschaftlichen Entwicklung

Eine belastbare Vorhersage der gesellschaftlichen Entwicklungen in Deutschland über einige hundert Jahre ist grundsätzlich nicht möglich. Die Nichtprognostizierbarkeit gesellschaftlicher Veränderungen über lange Zeiträume wird daher beispielsweise im Instrumentarium für Sicherheitsbewertungen von Endlagern (s. z. B. /2.2-1/) als Argument dafür angeführt, Endlager nachsorgefrei und damit unabhängig von gesellschaftlich bedingten Einwirkungen zu konzipieren.

Eine Langzeitzwischenlagerung ist allerdings nicht nachsorgefrei möglich. Deshalb müssen Einflüsse gesellschaftlicher Veränderungen auf die Lagerung der Abfälle bei

Betrachtungen über einige hundert Jahre hinweg berücksichtigt werden. Wesentliche, bereits für die kommenden Jahrzehnte prognostizierte Entwicklungen sind dabei:

- Allgemeiner Bevölkerungsrückgang, wobei je nach Prognose die Bevölkerung Deutschlands auf Werte zwischen ca. 75 bis 55 % des heutigen Wertes zurückgehen könnte (/2.2-2/, /2.2-3/, /2.2-4/, /2.2-5/)
- Alterung der Gesellschaft, verbunden mit einem Rückgang der "Erwerbsbevölkerung" und der jungen Bevölkerungsgruppe /2.2-6/
- Konzentration der Bevölkerung in urbanen Räumen, während in ländlichen Räumen mit überdurchschnittlichem Bevölkerungsrückgang zu rechnen ist /2.2-3/

Für die kommenden Jahrzehnte wird als Folge des demografischen Wandels bei gleichbleibend hoher Nachfrage nach hochqualifiziertem Personal in gängigen Prognosen mit einer deutlichen Verschärfung des Mangels an Fachkräften gerechnet /2.2-4/.

Über Zeiträume von einigen hundert Jahren wird außerdem das Eintreten extremer gesellschaftlicher Ereignisse wahrscheinlicher. Daher können bei Sicherheitsbetrachtungen kriegerische Auseinandersetzungen auf dem Territorium der Bundesrepublik Deutschland nicht mehr grundsätzlich ausgeschlossen werden.

### Grundannahmen zum Klimawandel

Klimaprognosen über einige hundert Jahre sind derzeit nicht verfügbar. Zu berücksichtigen ist allerdings die nach derzeitigen Prognosen abzusehende Klimaentwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, soweit sie Einfluss auf die Auslegung von LZL in Deutschland hat.

Aus Szenarienrechnungen werden seitens des Umweltbundesamtes folgende wesentliche Klimaänderungen bis 2100 abgeleitet /2.2-7/:

- Mittlere Temperaturzunahmen von 1990 bis Ende des 21. Jahrhunderts um 1,0 bis 5,5 Grad Celsius
- Zunehmende Niederschläge für Mittel- und Nordeuropa in den Wintermonaten, trockenere Sommer für viele Teile Europas
- Häufiger auftretende, intensivere und länger andauernde Hitzewellen. Im Winter nehmen die kalten Tage und die Frosttage weiter ab
- Zunehmende Starkniederschlagsereignisse in ganz Europa

Abgeleitet hiervon ergeben sich ggf. standortspezifisch neue Auslegungsanforderungen und Szenarien wie z. B. erhöhte Dachlasten (Schneelasten), ansteigender Meeresspiegel und Überflutungsschutz.

### **3 Langzeitzwischenlagerung in Deutschland**

#### **3.1 Schutzziele und sicherheitstechnische Anforderungen bzgl. der Langzeitzwischenlagerung**

Für eine sichere Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle ist es erforderlich, dass für die technische Auslegung und den Betrieb eines oder mehrerer Langzeitzwischenlager (LZZL) die radiologischen Schutzziele eingehalten werden. Diese bestehen darin, jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden (§ 6 Abs. 1, Nr. 1 StrlSchV) und unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der festgesetzten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 Abs. 2 StrlSchV).

Die hieraus abzuleitenden grundlegenden Schutzziele für eine Langzeitzwischenlagerung unterscheiden sich nicht von denen der bisher diskutierten und in Deutschland bestehenden Zwischenlagerung von Transport- und Lagerbehältern /3.1-1/. Somit gilt auch für den gesamten Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung, dass

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

gewährleistet sein muss. Hieraus lassen sich die folgenden Anforderungen ableiten:

- 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
- Maßnahmen zur Reduzierung der Schadensauswirkungen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen

Zusätzliche Anforderungen bestehen im Hinblick auf die Haftung bei Schäden, auf den Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter sowie auf die Kontrolle spaltbaren Materials aufgrund internationaler Vereinbarungen.

### 3.2 Ausführungsoptionen für ein LZZL

Die Darstellung und Bewertung der Einflussgrößen für eine Langzeitzwischenlagerung erfordert zunächst die Entwicklung und Typisierung grundsätzlicher Ausführungsoptionen. Im Rahmen dieses Gutachtens werden diesbezüglich drei grundsätzliche, als realistisch annehmbare Ausführungsoptionen näher betrachtet:

1. **Weiternutzung von derzeit bestehenden Zwischenlagern.** Aufgrund der abgeschätzten Abfallmenge von ca. 1.900 Behältern sind bei dieser Ausführungsoption eine große Anzahl sowohl der vorhandenen zentralen Transportbehälterlager (Ahaus, Gorleben und Lubmin) wie auch der an den Standorten der Kernkraftwerke befindlichen dezentralen Zwischenlager über einige hundert Jahre zu nutzen.
2. **Neubau von einem oder mehreren übertägigen Zwischenlagern,** in Analogie zu den heute bestehenden und genehmigten Zwischenlagern. Die erforderlichen Lagerflächen zur Aufnahme aller hoch radioaktiven Abfälle können hierbei sowohl an einem Standort oder aber mit entsprechend kleiner ausgeführten Lagerhallen an mehreren Standorten verteilt errichtet werden.
3. **Neubau von einem oder mehreren LZZL in einer untertägigen, oberflächennahen Ausführung.** Hinsichtlich der baulichen Ausführung wurden im Wesentlichen das Tunnelkonzept (siehe Standort-Zwischenlager Neckarwestheim) und oberflächennahe Ausführungen mit mehreren Metern Bodenüberdeckung betrachtet, die beide einen ausreichenden Schutz gegen äußere Einwirkungen bieten, aber keine bergmännischen Schachtaufahrungen erforderlich machen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die drei o. g. Ausführungsoptionen hinsichtlich technischer und nicht technischer Einflussgrößen detailliert eingegangen.

Das Erfordernis einer Heißen Zelle besteht für alle drei betrachteten Ausführungsoptionen für die Langzeitzwischenlagerung in gleicher Weise. Bei allen genannten Ausführungsoptionen muss als Möglichkeit zur Reparatur und ggf. zur Umladung der Behälter eine Heiße Zelle vorhanden sein. Auch hinsichtlich der Ausführung und der Ausrüstung einer solchen Heißen Zelle sind für die drei Ausführungsoptionen keine grundsätzlich unterschiedlichen Anforderungen zu stellen. Außerhalb der Heißen Zelle wird ein Handhabungssystem benötigt, um den Behälter unter die Andocköffnung der Zelle zu verfahren und an die Andocköffnung anzukoppeln. Innerhalb der Heißen Zelle werden Systeme zum Öffnen und Verschießen des Primärdeckels sowie zum Be- und Entladen des Inventars benötigt.

Die Heiße Zelle kann an jedem Lagerstandort innerhalb des Lagergebäudes oder in unmittelbarer Umgebung bzw. zentral (für mehrere Standorte) eingerichtet werden. Im Fall der zentralen Ausführung fallen zusätzliche Transporte vom Zwischenlager zur Heißen Zelle und zurück an.

Für die aus dem Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen (Reparatur oder Umladung eines Zwischenlagerbehälters, Konditionierung zu Endlagergebinden) entstehenden Sekundärabfälle werden geeignete Entsorgungsmöglichkeiten benötigt.

### **3.3 Darstellung und Bewertung technischer Aspekte**

#### **3.3.1 Bauanlagen**

Die Bauanlagen eines Zwischenlagers haben im Hinblick auf die Anlagensicherheit und die Anlagensicherung grundlegende Schutzfunktionen für die eingelagerten Behälter zu erfüllen:

- Schutz vor Witterungseinflüssen
- Schutz vor natürlichen Einwirkungen von Außen
- Schutz vor zivilisatorisch bedingten Einwirkungen von Außen
- Schutz vor Einwirkungen Dritter

Sie müssen außerdem folgende Funktionen erfüllen:

- Abfuhr der Zerfallswärme der eingelagerten Brennelemente
- Sicherstellung der Zuwege zur Einlagerung und zur Auslagerung der Behälter
- Sicherstellung der Zugänglichkeit zur Kontrolle und zur Wartung der Behälter
- Sicherstellung einer ausreichenden Lagerkapazität

Die grundsätzlichen Anforderungen an Zwischenlager sind in den „Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern“ /3.1-1/ definiert.

Neben den aufgeführten generellen Anforderungen an Zwischenlager ergeben sich aufgrund der vorgesehenen langen Nutzungsdauer eines LZZL zusätzliche Anforderungen an die Bauanlagen eines LZZL.

##### **3.3.1.1 Zusätzliche Anforderungen an LZZL gegenüber den derzeitigen Zwischenlagern**

Für LZZL resultieren aus der vorgesehenen Nutzungsdauer von einigen hundert Jahren aus bautechnischer Sicht eine Reihe zusätzlicher Anforderungen gegenüber bestehenden Zwischenlagern, die durch eine angepasste Konstruktion der baulichen Anlagen hinsichtlich

- der funktionalen Ausstattung der baulichen Anlagen,

- der Robustheit der Baukonstruktionen,
  - der Dauerhaftigkeit der Baukonstruktionen,
  - der Gründung der Bauwerke sowie
  - den Störfallbetrachtungen für Einwirkungen von Außen
- erfüllt werden müssen.

### Funktionale Ausstattung der baulichen Anlagen

Wegen der Unwägbarkeiten in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Behälter über Zeiträume von einigen hundert Jahren muss in Betracht gezogen werden, dass die in den bestehenden Zwischenlagern vorhandenen Maßnahmen zur Behälterreparatur für ein LZZL nicht ausreichend sind und Behälterinventar in neue Behälter umgeladen werden muss. Zur Umladung von bestrahlten Brennelementen aus geschädigten in ungeschädigte Behälter muss im Rahmen der Langzeitzwischenlagerung eine Heiße Zelle am Standort des LZZL oder zentral vorgesehen werden.

### Robustheit der Baustrukturen

In Anbetracht der langen Lagerzeiten und der aus heutiger Sicht damit verbundenen Unwägbarkeiten stellt die Robustheit der Baukonstruktionen einen relevanten Faktor dar. Hinsichtlich der Robustheit ist das LZZL so auszulegen, dass selbst bei temporärem Ausfall vorgesehener sicherungs- bzw. sicherheitstechnischer Maßnahmen die Funktionalität des Gebäudes bestehen bleibt. Die Basisfunktionalität der Bauwerke (Wärmeabfuhr, Rückhaltung radioaktiver Stoffe, Schutz vor Einwirkungen von Außen, Schutz vor Einwirkungen Dritter) muss auch beim (zeitlich begrenzten) Ausfall technischer Systeme oder organisatorischer Maßnahmen gewährleistet bleiben.

### Dauerhaftigkeit der Baustrukturen

Die verlängerte Nutzungsdauer gegenüber den bisher gebauten Zwischenlagern verlangt besondere Beachtung der Dauerhaftigkeit der verwendeten Baustrukturen und Baustoffe. Derzeit gehen die baurechtlich in den DIN-Normen und Eurocodes festgelegten Vorkehrungen und Schutzmaßnahmen gegen den Verlust der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bei Hoch- und Industriebauten von einer Nutzungsdauer von ca. 50 Jahren aus. Es müssen daher über die o. g. Regelwerke hinausgehende Anforderungen definiert und deren technische Umsetzung erarbeitet werden.

Infolge der langen Nutzungsdauer sind mangels Erfahrungen über das Verhalten der verwendeten Baustoffe über Zeiträume von einigen hundert Jahren auch bei sorgfältiger Auslegung Alterungserscheinungen, die zu Minderungen der Tragfähigkeit und der Ge-



brauchstauglichkeit führen, nicht auszuschließen. Es ist deshalb ein wirksames Alterungsmanagement für die Bauwerke erforderlich. Im Rahmen des Alterungsmanagement ist der Bauwerkszustand zu überwachen und zu dokumentieren. Der Verlauf aufgetretener Schäden ist festzustellen, gleichzeitig sind Prognosen über die zu erwartenden Schadensverläufe vorzunehmen, um geeignete Instandsetzungsstrategien festzulegen. Darauf aufbauend sind geeignete Instandsetzungsmaßnahmen zu planen und durchzuführen. Grundsätzlich kann auch ein Neubau der Gebäude erforderlich werden.

Detailliertere Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit von Baustrukturen haben wir im Kapitel 3.3.1.3 angestellt.

### Gründung der Baustrukturen

Wegen der langen Nutzungsdauer kommt der Ermittlung des Setzungsverhaltens der Baukonstruktionen eine höhere Bedeutung zu als bei üblichen Bauwerken. Abhängig von der vorherrschenden Bodenart kann der Vorgang der Bauwerkssetzung bereits nach wenigen Jahren als praktisch abgeschlossen angesehen werden oder aber der Vorgang der Bauwerkssetzung dauert während der gesamten Nutzungsdauer des LZZL an und verlangsamt sich dabei aber stetig.

Es ist daher erforderlich, die zu erwartenden Setzungen über den gesamten Nutzungszeitraum bereits in der Auslegungsphase auf Basis umfangreicher standortspezifischer Baugrundinformationen und mit ausreichender Sicherheitsreserve abzuschätzen und die Baukonstruktionen auf das ermittelte Setzungsverhalten abzustimmen. Dabei sind außer lastabhängigen Bauwerkssetzungen auch mögliche Entwicklungen wie veränderte Grundwasserspiegel und mögliche Setzungen infolge von menschlichen Eingriffen in den Untergrund wie Bergbautätigkeit und Gasförderung in Betracht zu ziehen. Darüber hinaus sind außer den bereits heute bekannten Bergbautätigkeiten auch potenzielle zukünftige Bergbauggebiete zu betrachten - bspw. schon bekannte oder vermutete Rohstoffvorkommen, die heute aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen noch nicht erschlossen werden.

Während der langen geplanten Nutzungsdauer sind deutliche Veränderungen der Oberflächengewässer oder des Grundwasserspiegels nicht auszuschließen. Bei der Auslegung bzw. bei der Standortwahl für ein neu zu errichtendes LZZL sind damit unter anderem die nachfolgend aufgeführten zukünftigen Veränderungen zu berücksichtigen:

- Langfristige Veränderungen des Meeresspiegels, der Küstenlinie oder des Uferverlaufs größerer Flüsse und Seen
- Langfristige anthropogene Veränderungen des Uferverlaufs größerer Flüsse durch bspw. Flussbegradigungen oder Staustufen
- Natürliche Veränderungen des Grundwasserspiegels

- Anthropogene Veränderungen des Grundwasserspiegels (bspw. Inbetriebnahme bzw. Außerbetriebnahme von Tiefbrunnen oder Bergwerken)

Aus heutiger Sicht können diese Einflussfaktoren für neu zu errichtende Anlagen abgeschätzt und im Rahmen der Auslegung des LZZL berücksichtigt werden.

### Störfallbetrachtungen für Einwirkungen von Außen

Die ESK-Leitlinien /3.1-1/ fordern für Zwischenlager eine Auslegung für naturbedingte Einwirkungen von Außen wie Erdbeben, Hochwasser und extreme Witterungen. Diese Einwirkungen entstehen infolge stochastischer Prozesse, wobei die anzusetzenden Bemessungsgrößen auf Basis einer akzeptierten Überschreitungswahrscheinlichkeit innerhalb der gesamten Nutzungsdauer der Anlage festgelegt werden. Auf Grundlage dieser akzeptierten Überschreitenswahrscheinlichkeiten wurden zur Festlegung der Einwirkungsgrößen Eintrittshäufigkeiten für die Einwirkungen von Außen in den maßgebenden KTA-Regeln festgeschrieben. Da die Überschreitungswahrscheinlichkeit von der Länge der Nutzungsdauer abhängt, ergeben sich aufgrund des längeren Nutzungszeitraums des LZZL gegenüber bestehenden kerntechnischen Anlagen mit kürzerem Nutzungszeitraum, selbst bei gleicher Eintrittshäufigkeit der auslösenden Ereignisse, höhere Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Darüber hinaus können, z. B. aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen (siehe Kapitel 2.2), weitere auslösende Ereignisse hinzukommen, oder bereits berücksichtigte Ereignisse an Intensität zunehmen.

Als Grundlage für die Auslegung von Baustrukturen müssten daher regulatorische Grundlagen geschaffen werden, die, trotz der zunehmenden Prognoseunsicherheiten über klimatische Entwicklungen über einige hundert Jahre, die Art und Höhe der standortbezogenen naturbedingten Einwirkungen sowie deren zulässige statistische Eintrittshäufigkeit festlegen.

Die ESK-Leitlinien /3.1-1/ fordern für Zwischenlager eine Auslegung für zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von Außen wie Flugzeugabsturz und Explosionsdruckwelle, deren Entwicklung (z. B. zukünftige Flugzeuge/Flugkörper) über den fraglichen Zeitraum kaum abzusehen sind und daher im Genehmigungsverfahren grundsätzlich nicht abdeckend berücksichtigt werden können. Für ein LZZL ist es daher aufgrund der langen Nutzungsdauer von einigen hundert Jahren wahrscheinlich, dass bei regelmäßigen Überprüfungen der Störfallanalysen, z. B. im Rahmen einer PSÜ, zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden.

Da eine nachträgliche Verstärkung von Baustrukturen nur mit größerem Aufwand möglich ist, sind möglichst bereits bei der Planung eines LZZL noch festzulegende Auslegungsreserven zu berücksichtigen, um zumindest die in naher Zukunft eintretenden Weiterentwicklungen der zivilisatorisch bedingten Einwirkungen von Außen ohne bauli-

che Verstärkungen abzudecken. Da das aber nicht abdeckend für mehrere Jahrhunderte erfolgen kann, sind entsprechende regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich.

### **3.3.1.2 Vor- und Nachteile der drei grundsätzlichen Möglichkeiten der LZZL aus bautechnischer Sicht**

In Bezug auf die unter 3.3.1.1 aufgeführten Zusatzanforderungen gegenüber den bisherigen Auslegungsgrundlagen der Zwischenlager ergeben sich für die drei grundsätzlichen Ausführungsoptionen der LZZL spezifische Vor- und Nachteile:

- Aspekt - Funktionale Ausstattung der baulichen Anlagen:

Bei Weiternutzung bestehender Zwischenlager als LZZL (Ausführungsoption 1) müssen notwendige bauliche Einrichtungen, wie Heiße Zellen, durch Erweiterungen der bestehenden Baustrukturen nachgerüstet werden. Die bestehenden Zwischenlager bieten gegenüber neu zu errichtenden Anlagen eine geringere Flexibilität.

Bei einem Neubau von zentralen oder dezentralen LZZL (Ausführungsoptionen 2 und 3) können notwendige bauliche Einrichtungen, wie Heiße Zellen, bereits bei der Auslegung der Baustrukturen berücksichtigt werden.

- Aspekt - Robustheit der Baukonstruktionen:

Bei Weiternutzung bestehender Zwischenlager als LZZL müssen Robustheitsanforderungen, die über das bereits vorhandene Maß hinausgehen, über Nachrüstmaßnahmen berücksichtigt werden.

Bei den Ausführungsoptionen 2 und 3 können bauliche Anlagen so geplant und ausgelegt werden, dass auch beim Ausfall geplanter sicherheits- und sicherungstechnischer Maßnahmen die Funktionalität der Anlage gegeben ist.

- Aspekt - Dauerhaftigkeit der Baukonstruktionen:

Die bestehenden Zwischenlager sind nicht für eine Nutzungsdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt. Da ein entsprechendes Regelwerk, an dem die Auslegung bemessen werden könnte, erst noch zu entwickeln wäre, ist eine eindeutige Aussage, ob bestehende Gebäude durch Instandsetzungsmaßnahmen ertüchtigt werden könnten, derzeit nicht möglich. Es ist nicht auszuschließen, dass Ertüchtigungen nicht wirtschaftlich realisierbar sind, so dass ein Neubau an den bestehenden Standorten einzuplanen wäre.

Bei der Ausführungsoption 2 und 3 sind wirksame Maßnahmen zur Sicherstellung einer gegenüber den bisherigen Zwischenlagern verbesserten Dauerhaftigkeit der

Baustrukturen durch Wahl einer geeigneten Bauweise und geeigneter Materialien möglich.

Instandsetzungsmaßnahmen im Falle von Bauschäden sind bei den untertägigen, oberflächennahen Bauweisen schwieriger realisierbar. Außerdem ist bei untertägigen, oberflächennahen Bauweisen zur Abdichtung der Baustruktur gegen das umgebende Erdreich der Einsatz spezieller, für den langfristigen Einsatz geeigneter Abdichtungsstoffe erforderlich.

- **Aspekt - Gründung der Bauwerke:**

Inwieweit die bestehenden Zwischenlager durch zukünftige Veränderungen der Oberflächengewässer und des Grundwasserspiegels oder durch zukünftig zu erwartende Baugrundsetzungen beeinträchtigt werden, ist standortspezifisch zu untersuchen. Nachbesserungen der Gründung sind kaum durchführbar.

Für die neu zu errichtende LZL können zukünftig zu erwartende Baugrundsetzungen und Veränderungen der Hydrologie bereits bei der Auslegung der Baustrukturen auf Basis entsprechender Baugrunduntersuchungen berücksichtigt werden. Erkenntnisse über mögliche Bauwerkssetzungen sind im Rahmen der Standortwahl zu berücksichtigen.

- **Aspekt - Einwirkungen von Außen:**

Für die bestehenden Zwischenlager liegen für die bisher vorgesehene Nutzungsdauer von 40 Jahren geeignete Auslegungen gegen Einwirkungen von Außen vor. Inwieweit die Baukonstruktionen auch den aus der Nutzungsdauer von einigen hundert Jahren resultierenden erhöhten Lasten widerstehen können, muss im Rahmen von nachträglichen Überprüfungen standortspezifisch festgestellt werden. Eine nachträgliche Schaffung von Auslegungsreserven ist nicht möglich.

Bei den Ausführungsoptionen 2 und 3 können die Baustrukturen nach Festlegung der zu berücksichtigenden Einwirkungen für das erforderliche Niveau ausgelegt werden. Die in Zukunft zu erwartenden höheren Lasten, z. B. infolge größerer oder schnellerer Verkehrsflugzeuge, können bis zu einem gewissen Grad durch Einplanung von Auslegungsreserven berücksichtigt werden. Durch solche Reserven kann die Wahrscheinlichkeit, dass zur Erhöhung des Schutzes gegen Einwirkungen Dritter die Notwendigkeit aufwändiger Nachrüstungen entsteht, reduziert werden.

Ein LZL in untertägiger, oberflächennaher Bauweise weist wegen der Bodenüberdeckung gegenüber oberirdischen Bauwerken deutliche Vorteile auf. Für Bauweisen, bei denen Zugänge oder Durchbrüche unterhalb des Geländeneiveaus angeordnet sind, sind geeignete Maßnahmen gegen Hochwasser und extreme Niederschläge zu

treffen um die Dichtheit und die Zugänglichkeit der Gebäude sicherzustellen. Dies macht eine aufwändige Abdichtung der unterirdischen Öffnungen und Zugänge sowie deren regelmäßige Instandhaltung erforderlich. Für LZZL, die in Tunnelbauweise horizontal in Bergmassiven angelegt werden, ergeben sich hinsichtlich einer Gefährdung durch Hochwasser und extreme Niederschläge Vorteile sowohl gegenüber untertägigen, oberflächennahen als auch gegenüber oberirdischen Bauweisen.

- weitere Aspekte:

Bei den Ausführungsoptionen 2 und 3 ist in Abhängigkeit von der zum Zeitpunkt der Einlagerung verbliebenen Wärmeleistung der hoch radioaktiven Abfälle zu untersuchen, ob ein ausreichender Wärmeabfluss eine Naturkonvektion erfordert oder ob eine Wärmeabgabe über die Außenhülle bzw. über das umgebende Erdreich ausreichend ist. Bei der Ausführungsoption 3 ist zusätzlich zu untersuchen, welche Auswirkungen der Wärmeabfluss aus dem Bauwerk in das umgebende Erdreich nach sich zieht. Dabei sind Aspekte der Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen.

Unter Aspekten der Anlagensicherung wäre ein Verzicht auf Naturkonvektion vorteilhaft.

In der Regel ergibt sich für ein obertägiges LZZL eine einfache Erschließung und bessere Zugänglichkeit gegenüber untertägigen, oberflächennahen LZZL, bei denen die Verbringung der Behälter entweder den Einsatz von Rampen oder von speziellen Fördergeräten erfordert.

### **3.3.1.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonstrukturen eines LZZLs**

Bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonstrukturen ist es sinnvoll, die Bestandteile des Stahlbetons, den Beton und den eingelegten Bewehrungsstahl, getrennt zu behandeln.

Unbewehrter Beton kann aus heutiger Sicht als dauerhaft angesehen werden. So bestehen beispielsweise die Kuppel des Pantheons in Rom teilweise aus einer Art Beton (Bauzeit: ca. 120 n.Chr.). Zement im heutigen Sinne wird seit ca. 150 Jahren verwendet. Bei Verwendung von geeigneten Betonrezepturen und bei Beachtung der relevanten betontechnologischen Vorgaben sind derzeit keine chemischen Mechanismen bekannt, die zu einer Alterung des unbewehrten Betons führen, welche die Tragfähigkeit deutlich beeinträchtigt.

Voraussetzung für eine jahrhundertelange Dauerhaftigkeit von unbewehrtem Beton ist allerdings eine entsprechende Zusammensetzung (bspw. Betonrezeptur zur Vermei-

derung von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen oder von Sulfatreiben/Etringitbildung) in Verbindung mit einer entsprechend hohen Qualität beim Einbau des Betons.

Auf Basis der aktuellen technischen Regelwerke in Verbindung mit den aktuellen Erkenntnissen der Baustoffindustrie kann davon ausgegangen werden, dass mit heutigen Mitteln unbewehrte Betonbauwerke hergestellt werden können, die über mehrere Jahrhunderte hinweg eine gleichbleibende Tragfähigkeit aufweisen.

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken wird allerdings durch Korrosionseffekte an der eingebauten Bewehrung begrenzt. Die zur Verlangsamung bzw. zur Verhinderung dieser Korrosionseffekte erforderlichen betontechnologischen Maßnahmen werden seit vielen Jahrzehnten erforscht, so dass heute diverse Möglichkeiten bestehen, den Beginn einer Bewehrungskorrosion deutlich zu verzögern. Gesicherte Erfahrungen bezüglich der Bewehrungskorrosion bei Bauwerken, welche über 100 Jahre alt sind, liegen kaum vor.

Durch geeignete betontechnologische Maßnahmen lässt sich die Bewehrungskorrosion verzögern:

- Die Bewehrung im Stahlbeton wird durch das alkalische Milieu des Betons vor Korrosion geschützt. Bei Zutritt (Diffusion) von  $\text{CO}_2$  in die äußere Schicht des Stahlbetonbauteils entsteht eine sich mit der Zeit vergrößernde Karbonatisierungszone, in welcher der pH-Wert des Betons absinkt. Wenn diese Zone den Bewehrungsstahl erreicht und gleichzeitig Feuchtigkeit und Sauerstoff vorhanden sind, korrodiert die Bewehrung.
- Um den Schutz des Betonstahls über einen ausreichend langen Zeitraum zu gewährleisten, ist eine große Betondeckung in Verbindung mit einer geringen Zementsteinporosität anzuordnen.
- Beim Auftreten von Zugspannungen im Beton, die unter Last, infolge von Temperaturbeanspruchungen und infolge von Zwangsbeanspruchungen beim Betonieren entstehen, treten im Beton Risse auf. Wenn die Breite dieser Risse ein gewisses Maß überschreitet, können über diese  $\text{CO}_2$ , Salz oder andere Stoffe eintreten und die Bewehrungskorrosion beschleunigen.
- Zur Vermeidung breiter Risse ist deshalb eine oberflächennahe, die Rissbreite beschränkende Bewehrung einzulegen. Bei besonders großer Betondeckung kann die Anordnung einer zusätzlichen rissverteilenden Bewehrung, ggf. auch aus Edelstahl, sinnvoll sein.
- Die Rissbildung an der Oberfläche kann durch sorgfältige Bauausführung und eine geeignete Nachbehandlung des Betons verringert werden.

- Zur Erhöhung der Widerstandfähigkeit der Betonoberfläche, z. B. gegen Abrieb, kann besonders widerstandfähiger Beton mit Zement hoher Festigkeit und niedrigem Wasser-Zement-Wert eingesetzt werden.
- Das Eindringen von CO<sub>2</sub> oder anderen Stoffen kann durch das Aufbringen von Beschichtungen stark reduziert oder verhindert werden. Die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen selbst wird allerdings begrenzt sein.

Zusätzlich können durch eine geeignete Standortauswahl und durch geeignete konstruktive Maßnahmen die Beaufschlagung des Stahlbetons durch korrosionsfördernde Medien und die Beeinflussung der Baustoffe durch sonstige Umgebungsbedingungen verringert werden:

- Vermeidung von Gebieten mit chloridhaltigen Wässern (Meeresküste, Gebiete mit Salzbergwerken, Lage am Unterlauf salzbelasteter Flüsse). Chloridhaltige Wässer würden eine Bewehrungskorrosion insbesondere bei den Gründungsbauteilen fördern.
- Vermeidung von Gebieten mit sulfathaltigen Wässern (intensive Landwirtschaft, Massentierhaltung). Sulfathaltige Wässer würden eine Bewehrungskorrosion insbesondere bei den Gründungsbauteilen fördern.
- Besondere Anforderungen an die verwendeten Betonrezepturen sind bei einem möglichen Zutritt von Chloriden (z. B. Tausalz) erforderlich.

Erforderlichenfalls sind Maßnahmen zur Instandsetzung von Betonstrukturen möglich, soweit diese zugänglich sind:

- Beschichtungen können erneuert werden.
- Karbonatisierte oder anderweitig geschädigte Betonoberflächen können mechanisch entfernt und durch neuen Beton ersetzt werden. Korrodierte Bewehrung, deren Tragfähigkeit noch ausreichend ist, kann entrostet oder mit Schutzanstrichen versehen werden. Anschließend wird die Betonüberdeckung wieder hergestellt.

Bezüglich der Dauerhaftigkeit liegen zwischen oberflächennahen LZZL und Oberflächenlagern Unterschiede vor. Oberflächenlager sind in verstärktem Maße Witterungseinflüssen, Temperaturschwankungen und dem Zutritt von CO<sub>2</sub> und anderen Stoffen ausgesetzt. Sanierungsmaßnahmen sind einfacher durchführbar als bei oberflächennahen Lagern. Bei oberflächennahen Lagern liegen bezüglich der Exposition gegenüber der Witterung, Temperaturschwankungen und CO<sub>2</sub>-Zutritt günstigere Verhältnisse vor. Eine Sanierung ist jedoch wegen der Erdüberdeckung bzw. -anschüttung aufwändiger.

### **3.3.2 Technische Einrichtungen im LZZL**

#### Handhabungseinrichtungen

Unabhängig von der jeweils betrachteten Ausführungsoption eines Lagers müssen Handhabungseinrichtungen für die Ein- und Auslagerung der Transport- und Lagerbehälter (TLB) vorhanden sein und im Hinblick auf ggf. erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an den TLB während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung betriebsbereit zur Verfügung stehen.

Für die Ausführungsoption 1 (Weiternutzung bestehender Standort-Zwischenlager) könnte für die Handhabungen der TLB eine weitere Nutzung der vorhandenen Transporteinrichtungen (Lagerhallenkran mit Lastaufnahmetraverse) erfolgen. Hierzu ist anzumerken, dass die vorhandenen Einrichtungen nicht für eine Lebensdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt sind und dass während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung ein mehrfacher Austausch von Krankomponenten oder ggf. auch der kompletten Krananlage erforderlich sein wird. Andere Transportkonzepte für die TLB sind aufgrund der baulichen Gegebenheiten der bestehenden Zwischenlager nicht ohne weiteres umsetzbar.

Für die Ausführungsoption 2 (Neubau von zentralen oder dezentralen Zwischenlagern in oberirdischer Bauweise) und die Ausführungsoption 3 (Neubau von zentralen oder dezentralen LZZL in oberflächennaher Bauweise mit Überdeckung) wäre es auch möglich, die Handhabungen der TLB statt mit Brückenkränen z. B. mit deutlich mobileren auf dem Hallenboden fahrenden Portalhubwagen auszuführen. Derartige Einrichtungen wären von Vorteil, da sie – ausgenommen einen ebenen Hallenboden, der für die Lagerung der TLB ohnehin erforderlich ist – keine besondere Infrastruktur im Lager wie z. B. Schienen beim Kran benötigen und aufgrund der Eigenmassen und Abmessungen vergleichsweise einfach komplett getauscht werden können. Allerdings müsste das Lagerkonzept auf das Befahren mit solchen Fahrzeugen abgestimmt sein (Freiräume zwischen den TLB). Ein solches Lagerkonzept führt zu einer Vergrößerung der benötigten Lagerfläche.

#### Behälterwartungsstation mit Hubbühne und Einrichtungen

Die Deckeldichtsysteme der TLB für hoch radioaktive Abfälle sind als Doppeldeckelsysteme ausgeführt, bei denen jeder der beiden Deckel über eine metallische Dichtung gegen den Behälterkörper abgedichtet ist. Die Dichtheit beider Deckel wird über den Sperrraumdruck zwischen den beiden Deckeln kontinuierlich überwacht. Der Sperrraumdruck wird bei der Abfertigung auf ca. 6 bar eingestellt. Nach den bisherigen Erfahrungen mit der Lagerung von einigen hundert TLB in Deutschland ist die Dichtheit der Deckel über mehrere Jahrzehnte sichergestellt. Da hinsichtlich der langfristigen Dicht-



heit über einigen hundert Jahre derzeit keine sicherheitstechnisch belastbaren Aussagen getroffen werden können, ist die Dichtheitsüberwachung aufrechtzuerhalten und für den Fall von Leckagen am Dichtungssystem oder Fehlern am Druckschalter das Dichtungssystem und die Einrichtungen zur Leckageüberwachung wieder instandzusetzen. Auch für eine Langzeitzwischenlagerung ist es erforderlich, wie auch bei der derzeitigen Zwischenlagerung eine Behälterwartungsstation vorzuhalten, an der die erforderlichen Arbeiten am Deckelsystem und ggf. auch das Aufschweißen eines Fügedeckels, durchgeführt werden können.

Derartige Behälterwartungsstationen sind in den bestehenden Zwischenlagern vorhanden und können bei Verfolgung der Ausführungsoption 1 weitergenutzt werden. Bei Verfolgung der Ausführungsoptionen 2 und 3 müssten Wartungsstationen mit vergleichbarer technischer Ausrüstung vorgehalten werden. Auch hier ist anzumerken, dass die erforderlichen Einrichtungen der Wartungsstation nicht für eine Lebensdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt werden können und dass während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung ein mehrfacher Austausch von Komponenten erforderlich sein wird.

#### Heiße Zelle für Wartungsmaßnahmen am Primärdeckeldichtsystem

Das bisherige Wartungs- und Instandhaltungskonzept sieht bei einem Versagen der Primärdeckeldichtbarriere entweder den Austausch der Primärdeckeldichtung oder als Alternative das Aufschweißen eines dritten Deckels, den sogenannten Fügedeckel, vor. Für den Tausch der Primärdeckeldichtung ist es nach dem derzeitigen Stand erforderlich,

- den betreffenden TLB entweder ins Kernkraftwerk zurückzubringen, dort rückzukühlen und zu öffnen und in Abhängigkeit des Zustands der Dichtflächen dem TLB den Primärdeckel neu aufzusetzen oder den TLB zu entladen oder
- den betreffenden TLB an eine Heiße Zelle anzudocken und das Primärdeckeldichtsystem mit der in der Heißen Zelle vorhandenen Technik instandzusetzen.

Da die Kernkraftwerke für solche Arbeiten in absehbarer Zeit nicht mehr zur Verfügung stehen werden, bleibt für eine Instandsetzung des Primärdeckeldichtsystems allein die Option einer Heißen Zelle. Für den Fall, dass die Dichtflächen des Behälters schadhaft sind, wird eine fernbetätigte Instandsetzung des Primärdeckeldichtsystems in der Heißen Zelle kaum möglich sein. Demzufolge wäre eine solche Heiße Zelle derart zu konzipieren, dass das Inventar eines TLB mit schadhaftem Primärdeckeldichtsystem entladen und in einen zweiten TLB umgeladen werden kann.

Das Erfordernis einer Heißen Zelle besteht für alle drei betrachteten Ausführungsoptionen für die Langzeitzwischenlagerung in gleicher Weise. Auch hinsichtlich der Ausfüh-

ung und der Ausrüstung einer solchen Heißen Zelle sind für die drei Ausführungsoptionen keine grundsätzlich unterschiedlichen Anforderungen zu stellen. Außerhalb der Zelle wird ein Handhabungssystem benötigt, um den Behälter unter die Andocköffnung der Zelle zu verfahren und an die Andocköffnung anzukoppeln. Innerhalb der Zelle werden Systeme zum Öffnen und Verschließen des Primärdeckels sowie zum Be- und Entladen des Inventars benötigt.

Auch für die Einrichtungen der Heißen Zelle ist anzumerken, dass diese nicht für eine Lebensdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt werden können und dass während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung ein mehrfacher Austausch von Komponenten erforderlich sein wird.

### Behälter-Überwachungssystem

Bei der derzeitigen Zwischenlagerung von hoch radioaktiven Abfällen wird der Druck im Sperrraum zwischen dem Primärdeckel und dem Sekundärdeckel überwacht. Dazu ist jeder eingelagerte TLB über Kabelverbindungen an das im Lager an zentraler Stelle befindliche Behälterüberwachungssystem angeschlossen. Die Überwachung erfolgt über im Sekundärdeckel eingebaute Druckschalter, die bei Unterschreiten eines Mindestsperrraumdrucks ein elektrisches Signal (veränderter Widerstand) an das eigentliche Behälterüberwachungssystem meldet. Die Druckschalter sind selbstüberwachend ausgeführt, so dass Funktionsfehler an das Behälterüberwachungssystem gemeldet werden.

Die Druckschalter selbst sind Bestandteil der Sekundärdeckeldichtbarriere. Aufgrund der funktionalen Anforderungen sind in den Druckschaltern dünnwandige Membranen und aufwändige Kabeldurchführungen als Bauteile enthalten, die ursächlich für etliche in der Vergangenheit aufgetretene Druckschaltereignisse sind. Hierbei wurden die Defekte an den Druckschaltern zwar anforderungsgerecht an das Behälterüberwachungssystem gemeldet. Im Ergebnis ist jedoch festzustellen, dass diese Bauteile insgesamt recht wartungsintensiv sind. Im Hinblick auf eine Langzeitzwischenlagerung wird demzufolge bei dem derzeitigen Überwachungskonzept ein Druckschaltertausch als mehr oder weniger regelmäßig erforderliche Instandhaltungsmaßnahme durchzuführen sein. Daher ist auf eine dauerhafte Verfügbarkeit insbesondere von Dichtungen und Druckschaltern ein besonderes Augenmerk zu richten.

Auch für die übrigen Einrichtungen und Bauteile des Behälterüberwachungssystems ist festzustellen, dass diese nicht für eine Lebensdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt werden können und dass während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung ein mehrfacher Austausch von Komponenten und Bauteilen erforderlich sein wird.

Sofern keine Möglichkeit zur Verfügung steht, das Dichtsystem der TLB durch geeignete technische Maßnahmen in einen wartungsfreien Zustand zu bringen und diesen wartungsfreien Zustand für die Langzeitzwischenlagerung zu qualifizieren, wird die Überwachung des Sperrraumdrucks auch für die langfristige Zwischenlagerung der TLB erforderlich sein. Hierbei sind im Hinblick auf die Ausführung und die Funktion für die drei Ausführungsoptionen eines Lagers keine unterschiedlichen Anforderungen zu stellen.

### Elektro- und leittechnische Einrichtungen, Energieversorgung

Für die langfristige Zwischenlagerung muss die Energieversorgung für die Krananlagen und die Transporteinrichtungen, die Lüftungsanlagen und die Beleuchtungseinrichtungen sowie für die Einrichtungen der Anlagensicherung und die übergeordnete Leittechnik, die Kommunikationsanlagen und die Strahlenschutzeinrichtungen sichergestellt werden. Grundsätzliche Unterschiede in den Anforderungen an die Ausführung sind bei den drei Ausführungsoptionen des Lagers nicht vorhanden. Wie bei den bestehenden Lagern für die längerfristige Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in TLB werden jedoch unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit der Versorgung zu stellen sein:

- Für Krananlagen, Transporteinrichtungen, Lüftungsanlagen und Beleuchtungseinrichtungen sind keine besonderen Anforderungen an die Verfügbarkeit der Energieversorgung zu stellen.
- Für die Einrichtungen der Anlagensicherung sowie die übergeordnete Leittechnik, die Kommunikationsanlagen, die Sicherheitsbeleuchtung und das Behälterüberwachungssystem ist nach den derzeitigen Regelungen eine unterbrechungsfreie Energieversorgung erforderlich. Diese Anforderung wäre aus sicherheitstechnischer Sicht auf die betreffenden Einrichtungen bei einer langfristigen Lagerung von hoch radioaktiven Abfällen in TLB übertragbar.

Auch für die elektro- und leittechnischen Einrichtungen und Bauteile ist anzumerken, dass diese nicht für eine Lebensdauer von einigen hundert Jahren ausgelegt werden können. Insbesondere Isoliermaterialien und elektronische Bauteile sind von Alterungseffekten betroffen. Es ist daher zu erwarten, dass während des Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung ein mehrfacher Austausch von Komponenten und Bauteilen erforderlich sein wird.

### Wartung und Instandhaltung, Ersatz- und Reserveteilehaltung

Aus der bisherigen Erfahrung aus dem Betrieb der bestehenden Lager für die Zwischenlagerung von hoch radioaktiven Abfällen ist aus derzeitiger Sicht davon auszugehen, dass die technischen Einrichtungen eines Lagers für die Langzeitzwischenlage-

rung von hoch radioaktiven Abfällen nur einer geringen aktiven Nutzung unterliegen werden. Demzufolge wird die Betriebsbereitschaft der technischen Einrichtungen weniger durch Verschleiß als durch Alterungseffekte beeinträchtigt werden.

Um sowohl dem Verschleiß als auch den Alterungseffekten entgegenzuwirken, wird ein effizientes Wartungs- und Instandhaltungsmanagement oder auch Alterungsmanagement erforderlich sein. Die Tragwerke und Stahlbaukonstruktionen der technischen Lagereinrichtungen und auch die Maschinenbauteile werden üblicherweise für ein erwartetes Beanspruchungsgeschehen (Anzahl und Dauer der Arbeitsspiele, Größe der jeweils zu transportierenden Lasten) ausgelegt und könnten damit rein rechnerisch für das erwartete Beanspruchungsgeschehen während der Langzeitzwischenlagerung ausgelegt werden. Für eine langfristige sichere Nutzung der Stahlkonstruktionen und der technischen Einrichtungen sind jedoch weitere Effekte zu berücksichtigen.

Der Werkstoff „Stahl“ unterliegt an sich zwar keiner Alterung und keinem Verschleiß, solange er keinen äußeren Einflüssen wie mechanischen Beanspruchungen oder korrosiven Medien ausgesetzt ist. Mit den marktüblichen Korrosionsschutzbeschichtungen lässt sich zwar unter günstigen atmosphärischen Bedingungen ein Korrosionsschutz von mehreren Jahrzehnten sicherstellen, ein sicherer Korrosionsschutz über mehrere Jahrhunderte ist aus heutiger Sicht nicht realisierbar. Denkbar wären Instandsetzungsmaßnahmen der Beschichtung bei auftretenden Befunden oder komplette Neubeschichtungen nach Bedarf. Denkbar wäre auch eine Konditionierung der Lagerhallenatmosphäre mit der Zielsetzung, kondensierende Feuchte zu verhindern und damit einem Korrosionsangriff vorzubeugen. Zunächst wird die Wärmeleistung der TLB-Inventare noch ausreichend sein, um eine trockene Lageratmosphäre sicherzustellen. Für die Langzeitzwischenlagerung ist nach derzeitiger Kenntnis davon auszugehen, dass eine Klimatisierung erforderlich wäre, um die Korrosion der Stahlerzeugnisse sicher auszuschließen. Die Klimatisierung der Lagerhallen für die längerfristige Zwischenlagerung schwach radioaktiver Abfälle ist als Vorsorgemaßnahme gegen Korrosion an Lagerbehältern aus Stahlblech Stand der Technik.

Die Maschinenbauteile der technischen Einrichtungen enthalten unter anderem Schmiermittel, Dichtungen und z. T. Kunststoffteile. Diese Medien bzw. Teile unterliegen einer Alterung und müssen daher im Rahmen der Wartung in regelmäßigen Zeitabständen getauscht werden. Elektrische Einrichtungen und elektrische Komponenten enthalten Isoliermaterialien, die ebenfalls einer Alterung unterliegen. Auch Elektronische Baugruppen und Bauteile unterliegen der Alterung und verlieren längerfristig ihre Funktionsfähigkeit. Die erwarteten Lebensdauern der genannten Bauteile sind im Wartungs- und Instandhaltungskonzept anforderungsgerecht zu berücksichtigen.

Die o. g. Alterungserscheinungen treten grundsätzlich auch dann auf (z. T. zwar deutlich langsamer), wenn die betreffenden Einrichtungen nicht in Betrieb sind. Dies hat

entscheidenden Einfluss auf die Ersatz- und Reserveteilhaltung. Es wird sofort ersichtlich, dass eine langfristige Ersatz- und Reserveteilhaltung über einige hundert Jahre für alle diejenigen Medien und Bauteile, die einer gewissen zeitabhängigen Alterung unterliegen (Schmiermittel, Dichtungen, Isolierungen, Schlauchleitungen, Kabel, elektronische Bauteile und Baugruppen) nicht möglich ist. Eine Ersatz- und Reserveteilhaltung ist für diese Bauteile zwar in dem Umfang erforderlich, dass Wartungen und Instandsetzungen kurzfristig ohne Wartezeiten für Neufertigungen durchgeführt werden können. Derartige Medien und Bauteile müssen aber über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung nachgefertigt werden, um langfristig die Betriebsfähigkeit der Einrichtungen aufrecht zu erhalten.

Lediglich für solche Bauteile, die bei geeigneter Lagerung über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung keine Veränderungen ihrer Eigenschaften erfahren, könnte eine langfristige Ersatz- und Reserveteilhaltung überhaupt sinnvoll sein.

#### Erfordernis einer langfristigen Ersatzteilversorgung oder alternativ Kompletttausch der Einrichtungen

Unter Berücksichtigung der o. g. Ausführungen besteht zu jedem Zeitpunkt der Langzeitzwischenlagerung das Erfordernis, dass die technischen Einrichtungen betriebsfähig sind, und damit auch das Erfordernis einer gesicherten Ersatzteilversorgung. Da eine Ersatz- und Reserveteilvorhaltung über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung - wie oben erläutert - nicht realisierbar ist, wird eine Ersatzteilhaltung immer nur für einen überschaubaren Zeitraum von bis zu einigen Jahrzehnten sinnvoll sein. Sich im Laufe der Jahrzehnte einstellende Änderungen in der Ausführung von Standard- und Serienbauteilen und elektronischen Einrichtungen können dazu führen, dass zu einem jetzt nicht absehbaren Zeitpunkt ein Kompletttausch der Einrichtungen eine wirtschaftlichere Alternative zu weiteren Instandhaltungsmaßnahmen darstellt.

Für einen Kompletttausch von technischen Einrichtungen, aber auch für den Tausch von einzelnen Baugruppen, einzelnen Komponenten, Kabeln usw. müssen die baulichen Voraussetzungen bereits bei der Planung berücksichtigt werden. Bei den bestehenden Standort-Zwischenlagern, deren weitere Nutzung als Ausführungsoption 1 der Langzeitzwischenlagerung betrachtet wird, sind diese baulichen Voraussetzungen für den Tausch der größten dort vorhandenen technischen Einrichtungen gegeben: Die nach dem konventionellen Regelwerk errichteten Lagerhallenkrane an acht Standorten wurden als komplette Einrichtungen gegen Lagerhallenkrane getauscht, die nach dem kerntechnischen Regelwerk ausgelegt und gefertigt wurden. Für zwei weitere Standorte ist ein solcher Tausch kurzfristig vorgesehen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das für die Langzeitzwischenlagerung vorzusehende Lagerkonzept die Option auf einen Kompletttausch der technischen Einrichtungen beinhalten muss.

### Änderung der Anforderungen an die technischen Einrichtungen im Lauf der Zwischenlagerung

Hinsichtlich des eingelagerten Inventars ist festzustellen, dass die Wärmeleistung der TLB und die Dosisleistung über die Lagerdauer kontinuierlich abnehmen. Aus der abnehmenden Dosisleistung resultiert eine abnehmende Strahlenexposition des Personals, weitergehende Auswirkungen sind hier nicht abzuleiten. Die Verminderung der Wärmeleistung der TLB hat allerdings Auswirkungen auf das Raumklima. Um Taupunktunterschreitungen im Lager zu vermeiden und dadurch begünstigte Korrosionserscheinungen an den technischen Einrichtungen und an den TLB zu verhindern, sind in Abhängigkeit der Wärmeleistung der TLB und in Abhängigkeit der bautechnischen Ausführung des Lagers ggf. geänderte oder zusätzliche Lüftungs- oder Klimatisierungseinrichtungen vorzusehen. Eine diesbezügliche Überprüfung sollte in einem Intervall von 10 Jahren erfolgen.

Im Hinblick auf während der Lagerzeit eintretende Änderungen im Regelwerk für die im Lager betriebenen Einrichtungen und die daraus resultierenden geänderten Anforderungen an die technischen Einrichtungen des Lagers sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Annahmen möglich. Zwar kann aus einer erteilten Genehmigung für ein solches Lager ein gewisser Bestandsschutz für die technische Ausführung der Einrichtungen abgeleitet werden. Aufgrund der fortschreitenden Entwicklung und insgesamt des weitreichenden Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass die zunächst realisierten technischen Einrichtungen auch den zukünftigen Anforderungen entsprechen werden. Mit der in dem für die Langzeitzwischenlagerung vorzusehenden Lagerkonzept zu berücksichtigenden Option des Kompletttausches der technischen Einrichtungen wäre eine Anpassung an die künftigen Anforderungen anforderungsgerecht realisierbar.

### **3.3.3 Mögliche Veränderungen der Abfallbehälter und Inventare im Verlauf der Langzeitzwischenlagerung**

#### **3.3.3.1 Allgemeines**

In Deutschland werden nach Beendigung der Erzeugung von Elektrizität aus Kernenergie ca. 1.900 Behälter mit bestrahlten, abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung anfallen. Diese hoch radioaktiven Abfälle sind wärmeentwickelnde Abfälle mit einer langen Abklingzeit. Bei den ver-

glasten hoch radioaktiven Abfällen handelt es sich im Wesentlichen um Spaltprodukte und Transurane, die bei der Wiederaufarbeitung vom bestrahlten Brennstoff getrennt wurden und in einer Glasmatrix eingeschmolzen wurden. Diese Glaskörper (Kokillen) sind in Stahlkannen verpackt, die wiederum in einen Transport- und Lagerbehälter (TLB) eingestellt sind. Die Verglasung (Vitrifizierung) gilt zurzeit als eine sichere Immobilisierung der radioaktiven Isotope und deren Zerfallsprodukte.

International wird in vielen Ländern die Zeitdauer der Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und wärmeentwickelnder hochaktiver Abfälle diskutiert. Die IAEA beschäftigt sich seit längerem mit dieser Thematik und gibt mit ihren Safety Standards gesammelte Informationen zu dem Thema der Zwischenlagerung heraus und veranstaltet internationale Konferenzen hierzu. Die letzte Konferenz „International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle“ fand im Juni 2015 in Wien statt.

In den zentralen bzw. standortnahen Zwischenlagern werden derzeit Brennelemente von folgenden Reaktortypen aufbewahrt:

- Druckwasserreaktoren westlicher Bauart
- Siedewasserreaktoren unterschiedlicher Baureihen
- Druckwasserreaktoren östlicher Bauart (WWER 440) aus der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik
- Forschungsreaktor AVR mit Kugel-Brennelementen und dem FRM II
- Hochtemperatur-Reaktor THTR

Neben den zum Zeitpunkt der Einlagerung intakten abgebrannten Brennelementen sollen in naher Zukunft auch defekte Brennstäbe in speziellen Köchern, die eine neue gasdichte Umschließung des Spaltmaterials wieder herstellen, in TLB verpackt und in den Standort-Zwischenlagern zwischengelagert werden. Bei den Brennelementen aus den WWER 440 Reaktoren, die zurzeit im Zwischenlager Nord zwischengelagert sind, konnte die Defektfreiheit vor der Einlagerung in die Transport- und Lagerbehälter nicht eindeutig nachgewiesen werden. Deshalb wurden diese Behälter zusätzlich mit Feuchtigkeitsabsorbentien ausgestattet, um eine Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr durch einen zu hohen Wasserdampfgehalt in der Behälteratmosphäre auszuschließen.

### **3.3.3.2 Inventar**

#### Barrieren zur Umschließung des Brennstoffs

Als die erste Barriere für die Rückhaltung der radioaktiven Spaltprodukte und der bei der Bestrahlung erzeugten Transurane sind anzusehen:

- Die Rückhaltefunktion des Brennstoffes selbst, der einen großen Teil der Spaltprodukte zurückhält
- Die intakte Umschließung des Brennstoffes durch ein Hüllrohr bei den Brennelementen der Druckwasser- und Siedewasserreaktoren
- Die Beschichtung der Brennstoffpartikel bei den AVR- und THTR-Brennelementen

In gleicher Weise fungieren die Glaskokillen und deren Umschließung durch einen Stahlbehälter sowie die gasdichten Köcher bei der Einlagerung von defekten Brennstäben als Rückhaltebarrieren. Bei den metallischen Brennelementen einiger Forschungsreaktoren übernimmt die Metallmatrix, in der der Brennstoff enthalten ist, und deren äußere Ummantelung diese Funktion.

Bei einer Verletzung der Barriere „Umschließung des Brennstoffes“ während der Lagerung in den Transport- und Lagerbehältern gewährleistet dieser selbst mit seiner Integrität und seinem Dichtungssystem die Rückhaltung der Spaltprodukte und verhindert somit eine Freisetzung in die Umgebung. Auf diese Funktion der Behälter wird später vertieft eingegangen.

Eine Verletzung der „Umschließung des Brennstoffes“ während der Lagerung führt bzw. kann zu folgenden Konsequenzen führen:

- Bei einer Leckage werden Spaltprodukte in die Behälteratmosphäre entlassen. Insbesondere gasförmige Spaltprodukte erhöhen den Innendruck des Behälters. Welche Spaltprodukte gasförmig vorliegen hängt von den Temperaturen im Behälter und in den Brennelementen ab. Diese Temperaturen werden durch die noch erzeugte Wärme und durch die Wärmeabfuhrbedingungen an die Umgebung der Behälter bestimmt. Feste Spaltprodukte sind weniger mobil und verbleiben meist im Brennstoff und damit innerhalb der Umschließung, sofern es nicht zu einem direkten Brennstoffaustritt kommt. Brennelemente, die bereits mit defekten Brennstäben eingelagert wurden, haben in der Regel ihr flüchtiges radioaktives Inventar während des Reaktorbetriebes verloren. Freisetzungen von gasförmigen Spaltprodukten während der Zwischenlagerung sind bei diesen Brennstäben eher gering, aber nicht auszuschließen, da insbesondere bei höheren Lagertemperaturen oder aber über lange Lagerzeiträume das Rückhaltevermögen des Brennstoffes nachlassen kann.
- Die freigesetzten Spaltprodukte können durch ihre chemische Wirkung den Behälter und dessen Dichtungssysteme langfristig schädigen. Auch sind Auswirkungen auf das noch intakte Inventar langfristig nicht auszuschließen.
- Die Handhabung des Inventars zum Zwecke einer weiteren Konditionierung, Instandsetzung des Dichtungssystems oder Umladung des Inventars in einen neuen Behälter, wird erschwert oder ist mit den vorgesehenen Technologien nicht durchführbar. Auch ist eine Freisetzung von gasförmigen Spaltprodukten, die nicht gebun-



den werden können, zu erwarten. Des Weiteren wird das Kontaminationsrisiko erhöht.

- Bei einer starken Degradation der Brennelemente, bei der die Geometrie der Brennelemente stark beeinträchtigt oder nicht mehr gegeben ist, ist eine Handhabung der Brennelemente erschwert oder unmöglich. Je nach Art, Menge und Zusammensetzung des Brennstoffes ist z. B. bei einer möglichen Flutung des Behälters mit Wasser durch die veränderte geometrische Anordnung auch die Frage nach einer möglichen Kritikalität zu betrachten. Ob in diesem Szenario die in der DIN 25472 /3.3-1/ beschriebene Vorgehensweisen zur Betrachtung einer möglichen Kritikalität angewandt werden können oder andere Betrachtungen erforderlich sind, ist zu klären.

Aus oben angeführten Gründen sind der Erhalt der Integrität der „Umschließung des Brennstoffes“ und der Erhalt der „Geometrie der Brennelemente“ wesentliche Kriterien auch während einer Langzeitzwischenlagerung, die bei den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegt werden.

Insbesondere kann eine begrenzte Lebensdauer der TLB, bedingt durch Alterung, begrenzte Lebensdauer von Komponenten wie z. B. des Dichtungssystems oder durch den Abbau und Verlust des in die Behälter integrierten Moderators, der die Abschirmung der Neutronenstrahlung sicherstellt, ein Umladen der Inventare in neue Behälter erforderlich machen. In diesem Fall ist die Sicherstellung der Integrität der Inventare von essentieller Bedeutung bezüglich möglicher Freisetzungen und Kontaminationen, die während der Umladung auftreten können. Dadurch wird der technologische Aufwand für die Umladung beeinflusst, der sich auch auf die Kosten auswirkt.

### Parameter für die Hüllrohrbelastungen

Aufgrund der bekannten äußeren Bedingungen für die Wärmeabfuhr können die thermischen Lasten auf die Inventare bewertet und eine gesicherte Prognose über das Verhalten des Inventars für einen Zeitraum von 40 Jahren erstellt werden. Für die eingelagerten Brennelemente aus Druck- und Siedewasserreaktoren (Leichtwasserreaktoren) wird z. B. der Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens während der zurzeit genehmigten 40-jährigen Lagerzeit über die Einhaltung eines Spannungs- und eines Dehnungskriteriums geführt. Des Weiteren sind die maximalen Brennstabhüllrohrtemperaturen auf für diese Art der Zwischenlagerung zulässigen Werte begrenzt. Diese Kriterien sind durch Versuche für die verschiedenen in deutschen Leichtwasserreaktoren eingesetzten Hüllrohrmaterialien und Brennstoffarten abgesichert. Um verlässliche Aussagen aus den Experimenten abzuleiten, wurden auch Versuche mit höheren Belastungen für die Hüllrohre durchgeführt, um eine schnellere „Alterung“ zu simulieren.

Die Höhe des Brennstabinnendruckes ist abhängig von den jeweiligen Temperaturen der Gasvolumina im Brennstab und wird neben den thermischen Randbedingungen der Wärmeabfuhr im Lager und der eigenen Wärmeleitung des Brennelementes auch von der gesamten thermischen Leistung des Behälterinventars, dessen Abklingverhalten und der Position des Brennelementes im Behälter beeinflusst.

Zurzeit gelten folgende Kriterien für den Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens:

- Maximale Tangentialspannung

Bei den Brennstabhüllrohren führt der innere Überdruck zu Spannungen im Hüllrohr, deren tangentielle Komponente aus geometrischen Gründen die Hauptbelastung darstellt. Die Tangentialspannung ist bei den heutigen Zwischenlagerbedingungen ein Kriterium für den Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens und ist auf 120 MPa begrenzt. Diese Begrenzung soll Spannungsrissskorrosion und die Umlagerung der ausgeschiedenen Hydride aufgrund hoher Spannungen als Schadensmechanismen ausschließen. Des Weiteren ist die Tangentialspannung die treibende Kraft für das tangentielle Hüllrohrkriechen (Tangentialdehnung), dem zweiten mechanischen Kriterium für den Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens.

- Maximale Tangentialdehnung

Die Tangentialdehnung ist so zu begrenzen, dass 1 % zum Ende der 40-jährigen Lagerzeit nicht überschritten wird. Dabei ist die Spannung so zu begrenzen, dass bei den vorherrschenden Temperaturen keine selbsterhaltende Dehnung auftritt.

- Maximale Temperatur

Als maximale Temperatur, die in den jetzigen Verfahren in der Regel bei der Abfertigung der Behälter auftreten, wurde aus den Versuchen eine Temperatur von 370 °C abgeleitet, die nicht überschritten werden soll. Eine Korrosion der Brennelemente ist durch die nahezu sauerstofffreie Behälteratmosphäre und der geringen zulässigen Restwassermenge nicht zu besorgen.

Diese Kriterien können, nach einer entsprechenden Überprüfung ihrer weiteren Gültigkeit, auch für eine Verlängerung (um 10 bis 20 Jahre) der zurzeit genehmigten Zeitdauer von 40 Jahren für die Lagerung herangezogen werden, sofern die für die Wärmeabfuhr zurzeit gültigen thermischen Randbedingungen, die durch die Lagergebäude und Aufstellung der Behälter sichergestellt sind, nicht verändert werden.

Zurzeit ist nicht nachgewiesen, ob die Kriterien für die jetzt praktizierte Zwischenlagerung auch für eine Langzeitzwischenlagerung den Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens sicherstellen können.

Für die Brennelemente aus den Forschungsreaktoren wurden im Rahmen der Nachweisführungen zur Einlagerung auch mögliche Freisetzungen von Spaltprodukten aus dem Brennstoff bewertet. Diese Bewertungsergebnisse sind für eine längere Zwischenlagerung erneut und regelmäßig dahingehend zu überprüfen, ob sie alle noch ihre Gültigkeit besitzen und ob sich Erkenntniszuwächse ergeben haben, die eine erneute Bewertung erforderlich machen.

### Temperatureinflüsse während der Zwischenlagerung

Wesentlichen Einfluss auf die thermo-mechanischen Belastungen der Inventare haben die thermischen Randbedingungen, d. h. die Temperaturen in den Behältern, die sich aus der Umgebungstemperatur im Lager, der abgeführten Wärmemenge und der Wärmeerzeugung in den Behältern zusammen mit den wärmetechnischen Eigenschaften der Behälter ergeben. In den jetzigen Nachweisen für die 40-jährige Lagerzeit wird bei einigen Inventaren Kredit vom Abklingverhalten der Brennelemente genommen und sogar der Jahresgang der Umgebungstemperatur in den Nachweisen berücksichtigt. Wird z. B. zukünftig aufgrund der Sicherheit eine Lagerung in einem geschlossenen massiven Gebäude oder Untertage ohne eine Wärmeabfuhr durch Konvektionen favorisiert, ist sicherzustellen, dass sich in den Lagerräumen nicht Umgebungstemperaturen einstellen, welche die Inventare nachhaltig schädigen können. Auch bei bereits weit abgeklungenen Inventaren mit geringer Wärmeleistung treten bei unzureichender Wärmeabfuhr Temperaturen auf, welche die jetzigen Nachweisgrenzen überschreiten können.

Brennelemente mit hohem Abbrand (größer als 55 MWd/kgSM) und Brennelemente mit Mischoxid Brennstoff (MOX) gelten aufgrund ihrer Einsatzgeschichte und der Art des Brennstoffs als die Brennelemente mit den am höchsten abzutragenden Lasten /3.3-2/. Diese Brennelemente verfügen in der Regel über das größte Inventar an Spaltprodukten und Transuranen. Letztere tragen maßgeblich zur Nachzerfallsleistung über längere Zeiträume bei. Beim Brennstabinnendruck, der sich aus den Mengen an Füllgas bei der Herstellung der Brennstäbe und der in die freien Volumina des Brennstabes freigesetzten gasförmigen Spaltprodukte zusammensetzt, sind die hochabgebrannten Brennelemente und die MOX-Brennelemente führend.

Bei den heutigen Behälterbeladungen wird zum Teil Kredit vom Absinken der Tangentialspannung bei abnehmender Temperatur durch die abklingende Wärmeleistung des Inventars genommen, um das Dehnungskriterium einzuhalten. Eine Veränderung des Brennstabinnendruckes zu höheren Werten würde diese Nachweisführung in Frage stellen und die Kriterien könnten verletzt werden. Der Brennstabinnendruck wird sich entsprechend dem Gasinventar und der Temperaturen der Gasvolumina einstellen. Das bedeutet, dass bei einer Lagerung unter anderen Umgebungsbedingungen die thermischen Randbedingungen, die heute unterstellt sind, auch weiterhin gesichert sein müs-

sen. Sollte dies nicht der Fall sein, ist die Einhaltung der Kriterien erneut mit den dann unterstellten Randbedingungen zu bewerten.

### Gasfreisetzung aus dem Brennstoff

Ein weiterer Mechanismus, der zu einer Erhöhung des Brennstabinnendruckes führen kann, ist eine weitere Gasfreisetzung aus dem Brennstoff in die freien Volumina der Umschließung des Brennstoffes. Auch bei hochabgebrannten Brennstoffen verbleiben ca. 80 % der entstandenen Spaltgase innerhalb des Brennstoffes. Folgende Mechanismen sind dabei zu betrachten, die insbesondere langfristig einen Beitrag zur Gasfreisetzung liefern können:

- Gasfreisetzung durch Diffusion der entlang der Korngrenzen gefangenen Gasanteile zum offenen Volumen. Dieser Prozess wird zum einen durch die Temperatur- und Druckdifferenzen in den Gasblasen und das freie Volumen, zu dem auch das offene Porenvolumen zählt, gesteuert. Zum anderen kann die Strahlung zu einer sogenannten athermischen Freisetzung führen.
- Produktion von Helium durch den Alpha-Zerfall, das wie anderes Spaltgas freigesetzt wird. Diesem Prozess wird zurzeit eine untergeordnete Rolle zugewiesen, er sollte aber in der Gesamtbilanz betrachtet werden.
- Gasfreisetzungen aus den Hochabbrandzonen des Brennstoffes durch Degradation der Brennstoffmatrix. Die Hochabbrandzonen bilden sich bei Uran-Brennstoff im äußeren Bereich der Pellets und bei MOX-Brennstoff um die in der Uranmatrix eingelagerten Plutoniumoxidpartikel. Diese Bereiche besitzen eine schwammartige Struktur mit hoher geschlossener Porosität. In den Poren herrscht ein hoher Gasdruck. Bei einer Degradation des Brennstoffes durch Rissbildung oder aber chemisch durch weitere Oxidation des UO<sub>2</sub> kann dieses Gas freigesetzt werden.
- Änderung des Gasrückhaltevermögens des Brennstoffes durch chemische oder physikalische Veränderungen des Brennstoffes. Hier sind auch Änderungen der Kristallstruktur zu betrachten.

Diese Mechanismen führen zu einer Erhöhung des Gasinventars in der Umschließung und erhöhen den Innendruck und damit die mechanische Belastung der Umschließung. Diese erhöhte Belastung hat bei den LWR-Brennelementen insbesondere eine negative Rückkopplung auf das Dehnverhalten, die Hydrid-Reorientierung und ggf. auf ein mögliches Auftreten von Spannungsrisskorrosion über längere Zeiträume.

Ein weiterer Effekt, der sich auf die Tangentialdehnung direkt auswirkt, ist bei einigen Hüllrohrmaterialien, die sich zurzeit in den Behältern befinden, die Ausheilung der Strahlungsversprödung. Die Strahlungsversprödung wird durch Wechselwirkung der Strahlung mit den Atomen des Hüllrohrmaterials erzeugt, die zu Defekten in der Kris-

tallgitterstruktur durch Versetzungen führen. Diese härten das Material und es wird weniger duktil, was sich auf das Kriechverhalten positiv auswirkt. Eine schnelle Ausheilung dieser Defekte erfolgt bei höheren Temperaturen. Deshalb wurden die maximal zulässigen Hüllrohrtemperaturen bei der jetzt praktizierten Zwischenlagerung auf 370 °C begrenzt. Für eine Langzeitzwischenlagerung ist zu untersuchen, ob dieser Effekt nicht bereits bei niedrigeren Temperaturen und längeren Zeiträumen zu einer Ausheilung der derzeit kreditierten Strahlungsversprödung führt. Dies hätte zur Folge, dass die jetzige Begrenzung der Tangentialdehnung auf 1 % für lange Zeiträume nicht mehr sicher nachgewiesen ist und es zu einem systematischen Versagen der Hüllrohre mit diesen Materialien kommen könnte.

#### Wandern von Versetzungen und Liniendefekten in der kristallinen Matrix

Ein weiterer längerfristiger Effekt, der mit den Betrachtungen zur 40-jährigen Lagerzeit als nicht relevant eingestuft wurde, ist das Versagen der Umschließungen durch das Wandern von Versetzungen und Liniendefekten in der kristallinen Matrix des Hüllrohrmaterials. Diese können über längere Zeiträume zu größeren Defekten in der Hüllrohrstruktur führen, die die Spannungsbelastungen nicht mehr abtragen können und somit zu einem Versagen der Hüllrohre führen. Inwieweit diese Effekte in den betrachteten Zeiträumen zum Tragen kommen und welche Materialvarianten davon am meisten betroffen sein können, ist weitgehend unbekannt. Falls dieser Effekt zukünftig zu unterstellen ist, ist er als ein systematischer Effekt einzustufen.

#### Chemische Reaktionen

Die Veränderung des Brennstoffes durch eine chemische Reaktion mit z. B. Spaltprodukten, kann wie bei der weiteren Oxidation von  $\text{UO}_2$  zu  $\text{U}_2\text{O}_3$  zu einer Volumenvergrößerung führen, die eine entsprechende Belastung der Umschließung zur Folge hätte. Bei den bisherigen Betrachtungen sind die Spannungen und Dehnungen durch den inneren Überdruck betrachtet worden. In dem Fall der Volumenvergrößerung des Brennstoffs kommt neben der Gasdruckerhöhung durch Verkleinerung des freien Volumens noch ein Festkörperkontakt zwischen Brennstoff und Hüllrohr hinzu, der zu einer Überschreitung der Belastungen der Hüllrohre führen kann und damit als potentieller Schadensmechanismus in Betracht gezogen werden muss. Auch dieser Effekt ist als systematischer Schädigungsmechanismus anzusehen.

Ein bisher in der langfristigen trockenen Zwischenlagerung noch nicht in allen Facetten betrachteter Schädigungsmechanismus der Umschließung ist die mögliche chemische Interaktion des Brennstoffes und der Spaltprodukte mit der Umschließung des Brennstoffes. Bei der Spaltung werden nahezu alle Elemente des Periodensystems erzeugt, so dass vom Vorhandensein aggressiver chemischer Elemente aber auch chemischer

Verbindungen ausgegangen werden muss. Dem Effekt der Spannungsrissskorrosion, bei der das Vorhandensein von Halogeniden eine wesentliche Rolle spielt, tritt man mit einer Spannungsbegrenzung in den betroffenen Werkstoffen entgegen, bei der nach jetziger Kenntnis eine Schädigung vermieden wird. Langzeiteffekte, die eine Spannungsrissskorrosion auch bei niedrigeren Spannungsverhältnissen begünstigen, sind dabei nicht berücksichtigt bzw. nicht bekannt. Weitere längerfristige chemische Interaktionen zwischen dem Brennstoff, Spaltprodukten und deren Umschließung, wie z. B. eine Oxidation durch freien Sauerstoff aus der Spaltung oder aus anderen chemischen Reaktionen oder eine weitere Wasserstoffaufnahme sind ebenfalls zu betrachten. Hier sind gegebenenfalls entsprechende Untersuchungen bzw. die Lagerung begleitende Langzeitexperimente erforderlich, wenn diese Effekte nicht anderweitig ausgeschlossen werden können.

#### Langfristige Umorientierung der Hydride in den Hüllrohren

Der Effekt der langfristigen Umorientierung der Hydride in den Hüllrohren der LWR-Brennelemente wurde schon in Ausführungen zu den jetzigen Lagerkriterien für den Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens und bei den thermischen Wechselnlasten betrachtet. Diese Hydride entstehen durch eine Wasserstoffaufnahme bei der wasserseitigen Korrosion der Hüllrohre im Reaktorbetrieb. Bei der Zirkonium-Wasser-Reaktion wird ein Teil des freiwerdenden Wasserstoffs im Metall der Umschließung aufgenommen. Dieser Anteil, die sogenannte Pickup-Fraction, ist abhängig vom verwendeten Material. Der Gesamtwasserstoffgehalt im Hüllrohrmaterial hängt von der Oxidationstiefe im Reaktorbetrieb und der Pickup-Fraction ab.

Moderne korrosionsresistente Hüllrohrmaterialien wie M5 und Optimized-ZIRLO weisen daher einen erheblich geringeren Wasserstoffgehalt auf als die älteren Hüllrohrmaterialien Zircaloy-4 und Zircaloy-2. Zunächst ist im Reaktorbetrieb der aufgenommene Wasserstoff im Metall des Hüllrohres gelöst. Ab einer gewissen Konzentration scheiden sich dann Metallhydride aus, deren Orientierung und Lage vom Temperaturgradienten im Hüllrohr und vom Spannungszustand im Hüllrohr abhängt. Im Reaktorbetrieb scheiden sich die Hydride zunächst an der kälteren Seite zum Kühlmittel hin aus. Sie sind dabei in Umfangsrichtung orientiert, da der Ausscheidungsprozess vom Temperaturgefälle dominiert wird. Der Spannungszustand im Hüllrohr spielt im Reaktorbetrieb dabei eine untergeordnete Rolle. Die Metallhydride gelten als spröde und können keine größeren mechanischen Lasten abtragen. Da sie im und nach dem Reaktorbetrieb in Umfangsrichtung orientiert sind und damit der Hauptspannungsrichtung in tangentialer Richtung folgen, haben sie nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeit des Hüllrohres.

Während der Lagerung ist der thermische Gradient über der Hüllrohrwand aufgrund der erheblich geringeren Wärmeleistung gegenüber dem Reaktorbetrieb klein und ist be-

züglich der Hydridausscheidungen für die Orientierung der Hydride vernachlässigbar. Die bei der weiteren Abkühlung ausgeschiedenen Hydride folgen nun dem Spannungsverlauf im Hüllrohr und sind in radialer Richtung orientiert. Während der Lagerung ist die Spannungsbelastung des Hüllrohres durch den Innendruck aufgrund des fehlenden äußeren Druckes wie im Reaktorbetrieb besonders hoch. Haben sich genügend der ausgeschiedenen Hydride durch diesen Prozess in radialer Richtung orientiert oder sich über die Hüllrohrwand verbunden, können die mechanischen Lasten nicht mehr abgetragen werden und das Hüllrohr versagt. Dieser Prozess zeigt sich als ein ernstzunehmender Schädigungsmechanismus, von dem insbesondere Brennstäbe mit hohen Abbränden und die älteren Hüllrohrmaterialien betroffen sein werden. Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen werden zurzeit international diskutiert. Die NRC hat hierzu ein Programm aufgelegt /3.3-5/, in dem unter anderem mit Versuchen die Effekte näher untersucht werden. Die Entwicklungen auf diesem Sektor sollten weiter verfolgt und die Ergebnisse sollten in die Bewertung der Inventare für eine längere Zwischenlagerung einfließen.

### Duktilitätsverlust

Bei einer Abkühlung der LWR-Brennelemente durch das Abklingen der Wärmeleistungen kann die Duktilität der Brennstäbe und der Brennelementtragstruktur nachlassen. Als Ursachen dieses Duktilitätsverlustes sind die Versprödung durch die Wasserstoffaufnahme im Reaktorbetrieb und die Strahlungsversprödung des Materials aus Reaktorbetrieb und Lagerung anzusehen. Für die Lagerung selbst werden durch den Duktilitätsverlust keine Auswirkungen gesehen, solange die mechanischen Belastungen klein und Wechsellasten durch Schwankungen der Umgebungstemperatur langsam vorstattengehen. Jedoch sind bei der Handhabung der Behälter oder der Inventare diese Effekte im Vorfeld zu bewerten und gegebenenfalls zu berücksichtigen. Dies schließt den Transport unter normalen wie auch Unfallbedingungen mit ein. Dieser Aspekt wird zurzeit bei den Transporten lang gelagerter LWR-Brennelementen zu einem Endlager oder zu einem anderen Lagerort international diskutiert /3.3-6/, /3.3-7/.

### Verhalten von Kokillen und Brennstoff-Kannen

Die Umschließung des Brennstoffes und deren Belastungen können bei der Lagerung anderer Brennelementtypen in Kannen (THTR- und AVR-Kugeln) oder der Kokillen bei den verglasten hoch radioaktiven Abfällen analog zu den Brennstabhüllrohren der Leichtwasserreaktoren angesehen werden. Hier sind neben den thermischen Spannungen auch die mechanischen Belastungen durch die Druckdifferenz innen zu außen zu betrachten, die sich über längere Zeiträume einstellen können. Als Ursachen sind neben der Abkühlung, die eine Verminderung des Druckes bewirkt, gegebenenfalls auch die Freisetzung gasförmiger Spaltprodukte aus dem Brennstoff bzw. dem Glaskörper zu

betrachten /3.3-3/. Da es sich bei den Umschließungen meist um austenitische Stähle handelt, sind hier die Schädigungsmechanismen Spannungsrisskorrosion und Rissfortschreitung bei wechselnden Lasten zu betrachten.

Aussagen über das Langzeitverhalten der Glaskokillen in dem hier in Rede stehenden Zeitraum und deren Eigenschaften in Bezug auf Stabilität und Rückhaltevermögen der radioaktiven Isotope und der Zerfallsprodukte werden in den Berichten /3.3-3/ und /3.3-4/ getroffen. Nach den Ausführungen in diesen Berichten ist eine größere Freisetzung radioaktiver Isotope sowie eine erhöhte Gasfreisetzung aus den Glaskörpern nicht zu unterstellen, die zu einer Schädigung der Gebinde führen würden. Diese Aussagen sind aus der Untersuchung von einzelnen unterstellten Effekten abgeleitet. Integrale Aussagen aufgrund von Langzeitversuchen liegen nicht vor, so dass bei einer längeren Lagerung Untersuchungen im Hinblick auf die Verifizierung der postulierten Langzeiteigenschaften erforderlich erscheinen.

#### Experimentelle Untersuchungen des langfristigen Inventarverhaltens

Im Vorhergehenden wurden einige Effekte kurz beschrieben, die zur Gewährleistung der Integrität der Umschließung des Brennstoffes und der hoch radioaktiven Abfallprodukte eine Rolle spielen können. Wie bereits zuvor beschrieben ist die Intaktheit der Umschließung des Brennstoffes und der Spaltprodukte essentiell für eine spätere Handhabung nach oder sogar während einer Langzeitzwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven Abfällen. Diese Betrachtungen schließen einen etwaigen Transport der Behälter mit ein.

Wie aus den vorhergehenden Ausführungen ersichtlich ist, sind einige der zu beschreibenden Effekte nicht durch zeitnah abzuschließende experimentelle Untersuchungen zu klären. Wenn heutige Experimente schon zeigen, dass die Ergebnisse unter den heutigen Lagerbedingungen bereits eine Relevanz für den Ausschluss eines systematischen Versagens der Umschließung des Brennstoffes und der Spaltprodukte haben, wie bei der Umorientierung der Hydridausscheidungen vermutet wird /3.3-5/, so sind diese Effekte für den Zeitraum einer Langzeitzwischenlagerung zu untersuchen und ggf. zu berücksichtigen. Bei den hier betrachteten Effekten steht das langfristige Verhalten der Inventare im Vordergrund. Aussagen auf rein experimenteller Basis, gestützt auf im Verhältnis zur Lagerzeit sehr kurzzeitigen Experimenten, führen hier, auch wenn Alterungseffekte durch höhere Belastungen simuliert werden, nicht zu den erforderlichen Aussagen.

Die Aussagekraft von Untersuchungen von Einzeleffekten ist ebenfalls zu überprüfen, da sich Effekte gegenseitig in ihren Auswirkungen begünstigen oder behindern können. Sollen die Aussagen für kurze Lagerzeiträume von Experimenten gestützt werden, wird in der Regel untersucht, wie sich Einzeleffekte gegenseitig beeinflussen. Bei langfristi-



gen Aussagen sind die Kopplungen der Einzeleffekte jedoch mit einer solchen Unsicherheit behaftet, dass diese die Aussagesicherheit stark beeinflussen oder aber führend in der Bestimmung der Aussagesicherheit sein können. Deshalb sollte ein ganzheitlicher Ansatz gewählt werden, der einen zuvor festgelegten Umfang an Effekten beinhaltet und regelmäßig auf seine Gültigkeit hin überprüft wird. Die Überprüfung der geforderten Kriterien sollte daher auf einer die Lagerzeit begleitende experimentellen Untersuchungsmethode beruhen, die in regelmäßigen Zeitabständen den Ist-Zustand der Inventare berücksichtigt. Dieser Anspruch wird nur durch eine internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der langfristigen Zwischenlagerung zu bewältigen sein.

Bei den Voraussagen, die auf dem jeweils zum Zeitpunkt der Analyse vorhandenen Kenntnisstands beruhen, sind rein deterministische Methoden nur für kürzer Zeiträume geeignet. Probabilistische Methoden und Unsicherheitsanalysen, die als Ergebnis Eintrittswahrscheinlichkeiten ermitteln, lassen Schlussfolgerungen zu, welche Effekte führend sein können. Die Unsicherheitsanalysen sollten eingesetzt werden, um auch die in den bisherigen Betrachtungen zugrunde gelegten Konservativitäten ausweisen zu können, um so eventuelle Sicherheitsmargen besser zu quantifizieren. Diese Vorgehensweise muss zunächst einmal implementiert werden. Hierzu ist es erforderlich die angewandten Methoden als geeignet zu identifizieren und diese einer Verifizierung und Validierung zu unterziehen. Wie auch die Inventare selbst bedürfen die verwendeten Methoden zur Voraussage des Inventarverhaltens einer regelmäßigen Überprüfung auf ihre weitere Anwendbarkeit hin. Eine Aussage über das Verhalten der Inventare während einer Langzeitzwischenlagerung wird zum Zeitpunkt des Beginns der Zwischenlagerung bis zum geplanten Ende nicht möglich oder mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sein. Daher kommen realistisch nur Methoden in Frage, die eine regelmäßige Überprüfung nach einem Konzept der wiederkehrenden Prüfungen vorsehen.

Da die Untersuchungen des Inventarverhaltens inklusive der Voraussagen auf periodisch wiederkehrende Überprüfungen basieren sollten, sind an die Dokumentation der Vorgehensweisen und der Ergebnisse besondere Anforderungen zu stellen. Für die sichere Verwahrung der Informationen kann nach dem heute dafür vorgesehenen Regelwerk Sorge getragen werden. Schwieriger jedoch ist es, festzulegen welche Informationen verwahrt werden müssen. Es muss sichergestellt werden, dass z. B. Experimente auch nach Jahrzehnten noch so nachvollzogen werden können, dass eine nachfolgende Generation die Aussagekraft erneut bewerten und so einen gewissen Vertrauensgrad auf die Ergebnisse aufbauen kann. Informationen sollen nicht zur Vereinfachung gebündelt und abdeckend abgelegt werden. Dies führt unweigerlich zum Verlust der gegebenenfalls vorhandenen Konservativitäten und Sicherheitsmargen. So kann z. B. nicht der Abbrand eines Brennelementes die wichtige Information sein, sondern wie der Abbrand zustande gekommen ist. Hierzu gehören unter anderem die Leistungsgeschichten und die Betriebsbedingungen des Brennelementes. Ebenso sollten die vorhandenen Informationen über die verwendeten Materialien, Brennstofftypen bis hin zu den

Informationen der Herstellung mit in den Informationspool aufgenommen werden. Dies ermöglicht nachfolgenden Generationen auf Basisdaten zurückzugreifen, gegebenenfalls neue weiterentwickelte Methoden zur Anwendung zu bringen und die Sicherheitsmargen neu zu bewerten.

Aus heutiger Sicht wäre bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung zu unterstellen, dass die oben beschriebenen Anforderungen an die Integrität und Handhabbarkeit der Brennelemente nicht über den gesamten geplanten Lagerzeitraum aufrechterhalten werden können. Es wären daher auch Konzepte vorzusehen, z. B. die Brennelemente neu zu verpacken, wenn Untersuchungen Hinweise auf unerwünschte Degradationen geben.

Neben den reinen Informationen ist der Umgang mit den Informationen generationenübergreifend sicherzustellen. Nach den jetzigen Zeitskalen der Nutzung der Kernenergie in Deutschland wird nur die zurzeit auf diesem Sektor tätige Generation über das nötige Know-how verfügen. Da keine wirtschaftlichen Anreize mehr bestehen, wird eine umfassende Ausbildung auf dem Sektor der Kernenergienutzung nicht selbstverständlich aufrechterhalten bleiben. Hier bedarf es einer gesellschaftlichen Anstrengung, das Wissen lange genug und über mehrere Generationen hinweg sicher weiterzugeben, um die vorhandenen Daten auch richtig nutzen zu können. Es bedarf des gesellschaftlichen Konsenses, dies politisch und finanziell sicherzustellen. Dieses Thema wird an in Kapitel 3.4.1 weiter vertieft behandelt.

### **3.3.3.3 Transport und Lagerbehälter**

Bei den zurzeit in Deutschland eingelagerten hoch radioaktiven Abfällen aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie sind umfassende Betrachtungen angestellt worden, um eine sichere Lagerung über einen Zeitraum von 40 Jahren sicherzustellen. Diese umfassen neben den Gebäuden auch die Transport- und Lagerbehälter.

Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind für die bestehenden Transport- und Lagerbehälter in den Behälterspezifikationen festgeschrieben.

Für die bestehenden Transport- und Lagerbehälter wurden Werkstoffe und Erzeugnisformen eingesetzt, für die entsprechende Nachweise der Eignung für die bisher genehmigte Aufbewahrungsdauer von 40 Jahren vorliegen. Es ist für eine Langzeitzwischenlagerung zu überprüfen, ob diese Nachweise auch für einen längeren Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung angewendet werden können oder ob entsprechende Nachweise über den Erhalt der Eigenschaften erbracht werden müssen.

Neben dem inhärenten Rückhaltevermögen des radioaktiven Inventars besteht die Anforderung an den TLB sicher zu stellen, dass keine Stoffe des Inventars in die Umwelt

gelangen. Es ist zu überprüfen, ob die zurzeit verwendeten Behälter diese Anforderung über einen Zeitraum von einigen hundert Jahren erfüllen können.

Neben den Einflüssen des Inventars (z. B. Strahlung, Wärme und chemische Stoffe), die von innen auf den Behälter einwirken, sind hier auch die äußeren Einflüsse (z. B. Temperaturgang und chemische Stoffe) zu betrachten. Letztere werden durch das jeweilige Lagerkonzept bestimmt und können erst bewertet werden, wenn dieses feststeht. Wird eine Ausführungsoption der Lagerung gewählt, die den Zugang zu den TLB gewährleistet, so können die Behälter einer wiederkehrenden Prüfung unterzogen werden, und, soweit erforderlich, instandgesetzt werden. Dies ist bei der Bewertung zu berücksichtigen.

Als Wirkfaktoren des Inventars auf den Behälterkörper sind die Strahlung und ggf. chemische Wechselwirkungen mit Stoffen, die aus einem defekten Inventar in den Behälter freigesetzt wurden, anzusehen.

Die Strahlung kann zu einer Beeinflussung der Eigenschaften des Behältermaterials führen wie z. B. Versprödung, die sich weniger bei der Lagerung selbst als bei notwendigen Handhabungen und Transporten negativ auswirken kann. Es bedarf entsprechender Untersuchungen darüber, welchen Einfluss die Bestrahlung mit den hierfür anzunehmenden Fluenzen des Inventars auf die erforderlichen Eigenschaften der Behälterwerkstoffe zur Gewährleistung der Integrität hat.

Es ist bekannt, dass sich die Strahlung degradierend auf einige zurzeit verwendeten Moderatormaterialien, die der Abschirmung der hochenergetischen Neutronenstrahlung durch Moderation dienen, auswirkt. Somit können diese Materialien die ihnen zugeordnete Funktion über längere Zeiträume komplett verlieren, so dass eine Abschirmung der Neutronenstrahlung nicht mehr im erforderlichen Maße gegeben ist. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die Durchführung von Handhabungs- und Transportvorgängen sowie die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen, die zu bewerten wären.

Ein weiterer zu betrachtender Aspekt ist die Lebensdauer der Deckeldichtungen. Diese wird von der Strahlung, der chemischen Wechselwirkung mit Stoffen aus dem Behälterinventar und der eigenen Alterung beeinflusst. Es werden hierzu zwar Langzeitversuche durchgeführt, aber eine Aussage über die angestrebten Zeiträume von einigen hundert Jahren wird nicht möglich sein. Aus dem heutigen Stand der Technik und der hierzu vorliegenden Wissensbasis lässt sich ableiten, dass der Funktionserhalt der Dichtungssysteme für eine Langzeitzwischenlagerung zurzeit nicht bestätigt werden kann, so dass hier Konzepte für eine Instandsetzung entwickelt werden müssen.

In einige TBL für WWER-Brennelemente sind zur Trocknung des Behälterinnenraumes und somit zur Sicherstellung der Wärmeabfuhr im erforderlichen Maß Filterkerzen ein-

gebracht worden. Diese Filterkerzen geben aufgrund der energetisch günstigeren Zirkonium-Wasser-Reaktion das gebundene Wasser über längere Zeiträume wieder ab. Nach heutiger Kenntnis wird unterstellt, dass das Wasser allein mit dem Zirkonium der Brennstabhüllrohre reagieren wird. Bei dieser Reaktion entsteht Wasserstoff, der langfristig sowohl den Behälter als auch das Inventar schädigen kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass bei der Handhabung, wie z. B. beim Öffnen eines Behälters in einer Luftatmosphäre, beim Vorhandensein von genügend gebildetem Wasserstoff ein zündfähiges Gasgemisch entstehen kann. Dies wird bei der heute durchgeführten Zwischenlagerung bei Behältern mit erhöhtem Restwassergehalt berücksichtigt, jedoch muss diese Information entsprechend für die Zukunft bereitgehalten werden.

### Zwischenfazit

Im Vorgehenden wurde gezeigt, dass in Bezug auf die Anforderungen an die Integrität der Inventare und der Transport- und Lagerbehälter die jetzigen Anforderungen der 40-jährigen Zwischenlagerung nicht für eine Langzeitzwischenlagerung ausreichen. Es sind zusätzliche Fragestellungen technischer aber auch gesellschaftlicher Art, wie beispielsweise der Know-how-Erhalt sichergestellt wird, zu beantworten.

Für die Inventare und die Transport- und Lagerbehälter ergeben sich unter der Grundannahme, dass die Handhabbarkeit auch nach einer längeren Zwischenlagerung gegeben sein soll, folgende Aspekte, die Gegenstand einer ersten Überprüfung und auch Bestandteil einer wiederkehrenden Überprüfung sein könnten:

- Überprüfung, ob die heute verwendeten Kriterien zum Ausschluss eines systematischen Hüllrohrversagens bei LWR-Brennelementen auch für die Langzeitzwischenlagerung anwendbar sind. Hierbei sollten auch Kriterien erarbeitet werden, die einen Ausschluss eines systematischen Versagens der Umschließung (Kokillen und Kannen) der anderen Inventare erarbeitet werden.
- Entwicklung einer Methodik zur Prognose des Verhaltens des Inventars und der Behälter über lange Zeiträume mit einem begleitenden Monitoring zur Verifizierung der Methoden.
- Das Langzeit-Rückhaltevermögen des Brennstoffs bzw. des Glaskörpers bei den HAW-Gebinden sollte in Hinblick auf das Freisetzen von gasförmigen Spaltprodukten und von Zerfallsprodukten, wie z. B. Helium, die zu einer Erhöhung des Innendrucks führen und somit die mechanischen Belastungen erhöhen, untersucht werden.
- Das Langzeit-Rückhaltevermögen des Brennstoffs bzw. des Glaskörpers bei den HAW-Gebinden sollte in Hinblick auf das Freisetzen von Spaltprodukten und von Zerfallsprodukten, die zu einer chemischen Reaktion mit dem Inventar oder dem Behälter führen und diese nachhaltig schädigen, untersucht werden.

- Weitere Erforschung der Auswirkungen der Hybrid-Reorientierung bei LWR-Brennelementen auf die Intaktheit der Inventare und ggf. die Entwicklung von Strategien, wie diese Auswirkungen abgemildert werden können.
- Dokumentation der Inventare und Behälter in Hinblick auf die Möglichkeit, auch nach längerer Zeit Analysen mit Basisdaten durchführen zu können, um neue Möglichkeiten der Analyse-Methodiken in Zukunft nutzen zu können.
- Dokumentation der durchgeführten Experimente und Analysen derart, dass der Informationsgehalt zukünftigen Bearbeitern der Thematik auch über Generationen hinweg erhalten bleibt und ermöglicht wird, deren Dokumentation zu Vertrauen.
- Da für die Materialien der jetzigen Transport- und Lagerbehälter, einschließlich der Dichtsysteme die erforderlichen Nachweise für einige hundert Jahre nicht geführt werden können, wären entsprechende Untersuchungskonzepte zu planen und durchzuführen, mit denen die erforderlichen Informationen und Nachweise sukzessive gewonnen werden können. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist für die Langzeitzwischenlagerung eine Heiße Zelle vorzuhalten, in der Instandsetzungsarbeiten am Primärdeckel oder auch eine Umladung eines Behälters erfolgen kann.

### **3.3.4 Anforderungen hinsichtlich der Anlagensicherung**

Die folgenden Betrachtungen zur Sicherung gelten prinzipiell für alle betrachteten Ausführungsoptionen zur Langzeitzwischenlagerung.

Die derzeit bekannten baulichen Sicherungseinrichtungen (z. B. verstärkte Wände, einbruchhemmende Türen und Tore) können bei Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) nur für eine begrenzte Zeit und gegen eine begrenzte Anzahl von Angriffen Widerstand leisten. Diese Einrichtungen alleine können daher nicht bei allen anzunehmenden SEWD eine Verletzung der Schutzziele der Anlagensicherung verhindern. Die baulichen Sicherungseinrichtungen dienen dazu, die Vollendung von Angriffen so lange zu verzögern, sodass ausreichend Zeit zur Verfügung steht, um weitere Maßnahmen einzuleiten. Die sonstigen technischen Sicherungssysteme (z. B. Einbruchmeldeanlage, Videoüberwachung, Detektionssysteme) unterstützen bei SEWD das Sicherungspersonal bei der Erkennung und Verifizierung von Tatvorbereitungen und Angriffen. Um einen erkannten Angreifer an der Tatausführung zu hindern und somit eine Schutzzielverletzung durch SEWD zu verhindern, ist das Eingreifen von Sicherungspersonal und von staatlichen Einsatzkräften erforderlich. Zur Sicherung kerntechnischer Einrichtungen gegen SEWD fordern das deutsche und das internationale kerntechnische Regelwerk daher ein integriertes Sicherungs- und Schutzkonzept. Dieses umfasst bauliche und sonstige technische sowie personelle Maßnahmen. Es ist nach dem derzeitigen Stand von Wissen und Erkenntnis nicht absehbar, dass dies zukünftig durch ein Konzept ohne personelle Maßnahmen ersetzt werden kann. Daher sind bei

dem Betrieb eines LZL neben baulichen und sonstigen technischen Sicherungseinrichtungen auch Sicherungspersonal oder staatliche Einsatzkräfte erforderlich.

Zur Sicherung eines LZL gegen SEWD wären nach heutigem Kenntnisstand mindestens die gleichen technischen Einrichtungen und Systeme erforderlich, die hierzu gemäß der SEWD-Richtlinie Zwischenlager /3.3-8/ bei der derzeitigen Zwischenlagerung eingesetzt werden. Dies umfasst neben passiven Einrichtungen (bauliche Sicherungseinrichtungen) auch aktive Systeme (elektronische Überwachungseinrichtungen einschließlich der notwendigen Versorgungssysteme wie Notstromversorgung sowie Klima- und Lüftungstechnik). Der langfristige Betrieb dieser Einrichtungen und Systeme erfordert regelmäßige Prüfung, Wartung, Reparatur und Instandhaltung.

Darüber hinaus ergeben sich für die Langzeitzwischenlagerung weitere Anforderungen, da hier aufgrund des Betrachtungszeitraumes von einigen hundert Jahren auch SEWD mit militärischen Waffen aufgrund von staatlichen Konflikten nicht ausgeschlossen werden können.

Als Auslegungsgrundlage für die Sicherungsmaßnahmen für Zwischenlager dienen die Lastannahmen /3.3-9/ in Verbindung mit den Erläuterungen und Hinweisen zu den Lastannahmen /3.3-10/. In diesen Lastannahmen /3.3-9/ werden die Tatmuster, Auslegungstätter, Hilfsmittel und das Tätervorgehen dargestellt. Die Lastannahmen /3.3-9/ basieren u. a. auf den Erkenntnissen der staatlichen Behörden. Auch für ein LZL sind entsprechende Auslegungsgrundlagen für die Sicherungsmaßnahmen festzulegen.

Die Lastannahmen für die Zwischenlager /3.3-9/ werden grundsätzlich nach drei Jahren und außerzyklisch bei Feststellung des Erfordernisses durch die zuständigen Behörden evaluiert. Aufgrund des allgemeinen technischen Fortschrittes ist davon auszugehen, dass auch langfristig die Bedrohung durch die ansteigende Wirksamkeit der unterstellten Tat- und Hilfsmittel zunehmen wird. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass zukünftig neue, derzeit noch unbekannte Tat- und Hilfsmittel zu Verfügung stehen können. Des Weiteren zeigen die bisherigen Erfahrungen, dass mit einer stetig anwachsender Verbreitung und Verfügbarkeit der Tat- und Hilfsmittel zu rechnen ist. Dies gilt insbesondere auch für die zuvor erwähnten militärischen Waffen. Daher ist es notwendig, dass auch die noch festzulegenden Lastannahmen für die Auslegung der Sicherungsmaßnahmen eines LZL zukünftig in regelmäßigen Abständen und außerzyklisch bei Feststellung des Erfordernisses durch die zuständigen Behörden evaluiert werden.

Aufgrund dieser Evaluierungen werden regelmäßige Ertüchtigungen der Sicherungsmaßnahmen notwendig sein, damit auch zukünftig bei den aufgrund von Wissen und Erkenntnis anzunehmenden Tatszenarien eine Einhaltung der Schutzziele bei SEWD gewährleistet ist.

Die Bedrohung durch die zukünftig zu unterstellenden verbesserten oder neuen Tat- und Hilfsmittel kann für den hier betrachteten Zeitraum von einigen hundert Jahren nicht abgeschätzt werden. Ebenfalls kann nicht beurteilt werden, ob zukünftig verbesserte oder neue technische Sicherungsmaßnahmen in dem Maße zur Verfügung stehen, um die zukünftigen und derzeit unbekanntes Bedrohungen sicher zu beherrschen. Daher kann nicht prognostiziert werden, ob langfristig eine Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen technisch möglich ist, so dass auch Angriffe mit verbesserten oder neuartigen Tat- und Hilfsmitteln im ausreichenden Maße beherrscht werden können.

### **3.4 Relevante nichttechnische Einflussgrößen**

Eine heute zu treffende Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung wäre auch mit dem Eingeständnis verbunden, dass unter den heutigen Sicherheitsanforderungen, der heutigen Risikowahrnehmung und den heutigen gesellschaftlichen Randbedingungen keine Lösung für den dauerhaften Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen gefunden wurde, und dass die hiermit verbundenen Entscheidungen deshalb von zukünftigen Generationen getroffen werden müssen. Die Entscheidung über den endgültigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen müsste also an die jeweils nachfolgende Generation weiter gegeben wird.

Vor diesem Hintergrund sind über einen Betrachtungszeitraum von einigen hundert Jahren Randbedingungen, bzw. deren mögliche Änderung, in den Blick zu nehmen, die über die rein technische Machbarkeit einer sicheren Zwischenlagerung hinausgehen, sondern vielmehr die Fähigkeit einer Gesellschaft beeinflussen, die mit einer Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle verbundenen Aufgaben dauerhaft zu erfüllen.

#### **3.4.1 Kompetenzerhalt für den sicheren Betrieb**

Die Aufrechterhaltung des sicheren Betriebs eines LZZLs für hoch radioaktive Abfälle über einen langen Zeitraum erfordert den Erhalt spezifischer Kompetenzen. Zu berücksichtigen sind hierbei Kompetenzen in Zusammenhang mit den Lagerbehältern und dem Inventar, Gebäude/Gebäudetechnik, Betriebsgelände, Standort, aber auch in Zusammenhang mit der Verfügbarkeit qualifizierter Zulieferer (Lieferketten, Ersatzteilversorgung), externer Dienstleistungen und externer Infrastruktur (Verkehrswege, Medienversorgung).

Dabei steht unter der Perspektive einer Langzeitzwischenlagerung nicht nur die Ersterichtung und anschließende Erhaltung der Infrastruktur durch Vorbeugen gegen Schäden und Alterungseffekte oder deren Behebung im Fokus. Auch die Fähigkeit, das Gesamtsystem in Abständen von mehreren Jahrzehnten entsprechend dem sich weiter

entwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik und sich ändernder Anforderungen weiter zu entwickeln muss gewährleistet sein.

Heute und in den kommenden Jahren kann die Verfügbarkeit der erforderlichen Kompetenzen, z. B. zum Bau und Wartung der Lagerbehälter, erforderlichen Gebäude, Handhabungs- und Überwachungstechniken vorausgesetzt werden (s. a. Kapitel 3.3). Auf lange Sicht von einigen hundert Jahren ist dieser Status Quo aber, auch unter der Prämisse grundsätzlich stabiler gesellschaftlicher Verhältnisse, nicht selbstverständlich. Für die technische Realisierung von Gebäuden, Gebäudetechnik und umgebende Infrastrukturen kann, aufgrund der hierfür erforderlichen wenig spezialisierten Kompetenzen, noch begründet vermutet werden, dass das diesbezügliche Know-how auch zukünftig verfügbar sein wird, ggf. mit an den Fortschritt angepassten Technologien. Für höher spezialisierte Fähigkeiten kann dies aber auf lange Sicht nicht einfach vorausgesetzt werden. Zu nennen sind hier insbesondere die für den sicheren Einschluss der hoch radioaktiven Abfälle im LZZL zentrale Behältertechnologie und der Umgang mit den eingelagerten Brennelementen.

Heute werden die für hoch radioaktive Abfälle verwendeten Lagerbehälter, sowie die Druckschalter zur Überwachung des Sperrraums zwischen Primär- und Sekundärdeckel, von wenigen spezialisierten Anbietern in kleiner Stückzahl hergestellt. Mit dem Vollzug des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung wird die derzeit noch vorhandene Nachfrage an den spezifischen Fähigkeiten für die Lagerung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland enden: Die Anzahl und Bauart der noch benötigten Behälter ist i. W. bekannt, bis Mitte der 2020er Jahre werden alle heute noch nicht trocken verpackten bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bzw. Lagerbecken in die Lagerbehälter verladen sein. Einrichtungen zur Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle werden nach dem Rückbau der Kernkraftwerke die letzten verbleibenden Infrastrukturen aus dem Betrieb deutscher Kernkraftwerke sein. Ob mittelfristig in diesem Umfeld bei fehlender Einbettung in eine kerntechnische Industrie entsprechende Kompetenzen und Kapazitäten in Deutschland unter wirtschaftlichen Randbedingungen erhalten bleiben, ist zumindest sehr unsicher. Ähnliches gilt für das regulatorische Umfeld.

Die angestrebte Langlebigkeit und Wartungsarmut des Systems der Langzeitzwischenlagerung kann den Kompetenzerhalt dabei zusätzlich erschweren: Überwachung, Wartung und episodisch erforderlicher Ersatz eines Lagerbehälters erfordern einerseits die ständige Verfügbarkeit spezifischer Technologie (Behälter- und Komponentenherstellung, Wartung, Reparatur in einer Heißen Zelle), die andererseits aber nur in geringem Umfang bzw. nur sporadisch angewandt wird, so dass der Erhalt der hierfür erforderlichen Kompetenzen im Rahmen gewerblicher Dienstleistungen schon aufgrund der geringen Nachfrage bereits in wenigen Jahrzehnten nicht mehr ohne Weiteres vorausgesetzt werden kann.



Ein weiterer Bedarf an spezifischen Kompetenzen besteht in besonderer Weise bezüglich des sicheren Umgangs mit den abgebrannten Brennelementen. Da aus heutiger Sicht nicht auszuschließen ist, dass es während der Lagerung über einige hundert Jahre zu systematischen Degradationseffekten bei bestimmten Brennelementtypen kommt (siehe Kapitel 3.3.3.2), sind Konzepte zur Überwachung des Brennelementverhaltens und ggf. zum Umpacken erforderlich. Spätestens nach Abschluss der Langzeitzwischenlagerung ergibt sich je nach den Anforderungen der sich anschließenden Maßnahmen (erneut) der Bedarf, die Brennelemente zu bearbeiten oder zumindest umzupacken.

Bereits nach vollzogenem Ausstieg aus der Kernenergienutzung in Deutschland wird es sehr bald eine Herausforderung sein, die benötigten Kompetenzen bei dem zu erwartenden, eher geringen Tätigkeitsumfang und bei einer mittelfristig in Deutschland nicht mehr präsenten kerntechnischen Industrie betreiberseitig, aber auch seitens der behördlichen Aufsicht, verfügbar zu halten.

Eine noch weitergehende Dimension erhält der Kompetenzerhalt bei Berücksichtigung der Konzeptionierung, Planung und Realisierung der folgenden Entsorgungsschritte, wenn gleichzeitig mit der Langzeitzwischenlagerung auf eine dauerhafte Entsorgungsstrategie verzichtet wird. Wie für solche, bei einer Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre rein generische Fragestellungen die dafür erforderlichen Kompetenzen bereitzustellen sind, ist aus heutiger Perspektive nicht sinnvoll prognostizierbar oder planbar. Es wird jedenfalls eine Herausforderung sein, derartige Kompetenzen, die erst in Generationen benötigt werden, über den langen Zeitraum in der erforderlichen Qualität aufrecht zu erhalten bzw. zum erforderlichen Zeitpunkt verfügbar zu haben.

### **3.4.2 Personalverfügbarkeit für den sicheren Betrieb eines LZL**

Der Vollzug des Ausstiegs aus der Kernenergie bis 2022 hat in erster Linie Auswirkungen auf die Personalverfügbarkeit für die heutige Arbeitnehmergeneration. Der Wechsel vom Leistungsbetrieb zum Stilllegungsbetrieb und schließlich zum Rückbau der Anlagen wird über die Zeit zu großen Veränderungen im Personalstamm führen: Vorhandenes Personal mit spezifischen kerntechnischen Kompetenzen wird im Rahmen von Stilllegung und Rückbau weiter benötigt, das Aufgabenspektrum wird sich aber sukzessive verschieben. Gleichzeitig wird der Personalbedarf insgesamt zurückgehen. Personalstellen werden nach dem Eintreten des Inhabers in den Ruhestand nicht mehr besetzt, damit werden Neueinstellungen von Nachwuchskräften seltener. Eine hierzu parallele Entwicklung lässt sich für den Forschungssektor, das Gutachterwesen und nicht zuletzt für die behördlichen Kapazitäten skizzieren. Andererseits erfordert die Aufrechterhaltung des Lagerbetriebs über einen langen Zeitraum eine Mindeststärke an technischem,

wissenschaftlichem und administrativem Personal bei allen Beteiligten, das in der Lage sein muss, die Lagereinrichtung sicher zu betreiben und zu überwachen.

Aus heutiger Perspektive ist zu konstatieren, dass die Gewinnung von Nachwuchskräften in Zukunft ein Problem mit zunehmender Relevanz sein wird. Demografische Effekte (s. a. Kapitel 2.2 und die dort zitierte Literatur) werden langfristig Druck auf die Gewinnung qualifizierten Personals in weniger attraktiven Berufsfeldern ausüben, insbesondere in Konkurrenz zu beruflich attraktiveren Alternativen. Langfristig gesehen kann es unter dem Blickwinkel einer Langzeitzwischenlagerung, bei gleichzeitig nicht entschiedener Frage des endgültigen Verbleibs hoch radioaktiver Abfälle, daher zu einer Herausforderung werden, die verbleibenden Berufsfelder im Bereich des Managements radioaktiver Abfälle so auszugestalten, dass sie für zukünftige Arbeitnehmer hinreichend attraktiv bleiben, um ausreichend viele Bewerber zu entsprechender Ausbildung, Bewerbung bzw. Berufswahl zu motivieren. Ob es hierbei langfristig gelingen kann, den Personalbedarf in hinreichender Zahl und mit der erforderlichen Qualifikation zu decken, kann über einige hundert Jahre nicht prognostiziert werden.

Eine der Herausforderungen in diesem Zusammenhang wird es sein, die erforderlichen Aufgaben mit positiven und attraktiven Berufsbildern zu verbinden. In der Vergangenheit haben die Konflikte um die Kerntechnik und die Erfahrungen aus schweren Unfällen und Störfällen das gesellschaftliche Ansehen kerntechnischer Berufe beschädigt. Letztlich ist aus der Erkenntnis heraus, die mit der Kerntechnik verbundenen Risiken nicht mehr tragen zu wollen, bereits zu Beginn diesen Jahrtausends die gesellschaftlich breit getragene Entscheidung für einen Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergienutzung getroffen worden. Die langfristige Überwachung der letzten Hinterlassenschaften der Kernenergienutzung als gesellschaftliche Aufgabe wäre vor diesem Hintergrund als gesellschaftlich wertgeschätzte Aufgabenstellung zu vermitteln. Dies fiel sicherlich leichter, wenn mit der Zwischenlagerung eine Perspektive auf eine sich anschließende Endlagerung verbunden wäre, was aber bei der hier betrachteten Langzeitzwischenlagerung von einigen hundert Jahren praktisch nicht gegeben ist.

Gelingt es nicht, in ausreichendem Maße qualifiziertes Personal zu gewinnen, kann dies mittelfristig zum Verlust wertvollen Know-hows führen. Über den hier zu betrachtenden langen Zeitraum von einigen hundert Jahren kann darunter nicht nur die Qualität im sicheren Umgang mit den zwischengelagerten hoch radioaktiven Abfällen leiden. Es besteht auch ein großes Risiko des Know-how-Verlusts für Fähigkeiten, die wir heute für eine in weiterer Zukunft zu treffende Entscheidung zum endgültigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen als notwendig voraussetzen müssen. Die heute vorhandenen, immerhin über Jahrzehnte gewachsenen Kompetenzen zur Konzeption und Planung von Endlagern, zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen und komplexen sicherheitsgerichteten Genehmigungsverfahren für Endlager werden mit einer Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung über lange Zeiträume nicht mehr benötigt

und damit obsolet. Zu erwarten ist daher ein völliger Kenntnis- und Erfahrungsverlust, der zur Realisierung der Endlagerung in der ferneren Zukunft einen vollständigen Neuaufbau des Know-hows erforderlich machen wird.

### **3.4.3 Auswirkungen potenzieller demografischer Effekte**

Mit einer Perspektive von einigen hundert Jahren ist aus heutiger Sicht damit zu rechnen, dass die Bevölkerung in Deutschland deutlich zurückgeht (s.a. Kapitel 2.2). Ländliche Räume werden davon stärker betroffen sein als urbane Räume und ihre Einzugsgebiete: neben dem allgemeinen Bevölkerungswachstum beobachten Demographen eine fortschreitende Konzentration in den Städten und eine Abwanderung aus ländlichen Regionen. Langfristig gesehen kann dies Auswirkungen auf die externe Infrastruktur eines LZL in abgelegenen ländlichen Regionen haben: Ländliche Infrastruktur verfällt oder wird rückgebaut. Die Bevölkerungsverteilung und ihre Auswirkung auf die allgemeine Infrastruktur werden dadurch zu einem Standort- und Auslegungsfaktor, der bei der Auswahl von Zwischenlagerstandorten an Bedeutung gewinnen wird: Der Aufwand für den Erhalt von Verkehrsanbindung und Medienversorgung in entlegenen Gebieten muss auf lange Sicht zunehmend der Zielinfrastruktur selbst (z. B. einem LZL) und ihrem Erhalt zugerechnet werden. Ggf. wird hierdurch auch die Auslegung auf einen weitgehend personallosen, fernüberwachten Normalbetrieb wichtiger.

### **3.4.4 Auswirkungen potenzieller kriegerischer Auseinandersetzungen**

Wie in Kapitel 2.2 festgestellt, werden kriegerische Auseinandersetzungen auf dem heutigen Territorium der Bundesrepublik Deutschland über lange Zeiträume betrachtet wahrscheinlicher. Kriegerische Auseinandersetzungen erzeugen Einwirkungen von Außen, deren Bandbreite vom Ausfall der Medienversorgung über die Aufgabe des Lagers durch das betroffene Personal, Beschädigung durch Beschuss oder Flugkörperabsturz bis zur direkten Zerstörung des Lagers durch Waffeneinwirkung reicht. Im Unterschied zu Einwirkungen von Außen, wie sie im Rahmen der Anlagensicherung nach heutigen Maßstäben auslegungsrelevant sind (s. a. Kapitel 3.3.4), ist es zusätzlich von Bedeutung, dass kriegerische Auseinandersetzungen neben physischen Zerstörungen auch die Handlungsfähigkeit von politischen und Verwaltungsstrukturen über längere Zeiträume (ggf. auch nach Beendigung des Konflikts) in Frage stellen.

Da derartige Einwirkungen über Zeiträume von einigen hundert Jahren als wahrscheinlich eingestuft werden müssen, werden sie für eine aus heutiger Sicht anzustellende Planung auslegungsrelevant. Gegen Verlust der Medienversorgung wären unabhängige Versorgungssysteme vorzusehen, gegen eine Aufgabe des Lagers durch das Personal

und den Wegfall der institutionellen Kontrolle wäre die Möglichkeit eines befristeten (ggf. mehrjährigen) personallosen Betriebs anzunehmen.

Ggf. führt die auf lange Sicht höhere Wahrscheinlichkeit kriegerischer Auseinandersetzungen und einer damit verbundene Zerstörung des Lagers zusätzlich dazu, dass bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung oberirdische Anlagen unter Sicherheitsaspekten in der Abwägung deutliche Nachteile gegenüber unterirdischen Anlagen haben.

### **3.4.5 Gesetzlicher und regulatorischer Rahmen**

#### Grundsätzliches

Das hier diskutierte Konzept der Langzeitzwischenlagerung ist mit den derzeitigen Regelungen des § 6 AtG nicht vereinbar, da gemäß Absatz 3 die Zwischenlagerung mit dem Ziel der Ablieferung an ein Endlager erfolgt und gem. Absatz 5 einen Zeitraum von 40 Jahren ab Einlagerung des ersten Behälters nicht überschreiten soll. Eine Verlängerung dieser Zwischenlagerung über 40 Jahre hinaus ist nur aus unabweisbaren Gründen zulässig. Die Überführung in ein LZL (selbst wenn dieses am selben Standort wäre) oder die Überführung eines bestehenden Lagers in den Status eines LZLs ist durch diese Regelungen nicht abgedeckt.

Ein Langzeitzwischenlagerkonzept, das während einer mehrhundert jährigen Betriebszeit praktisch keine Aktivitäten zur Realisierung der geologischen Endlagerung vorsieht, steht auch im Widerspruch zu den Vorgaben der Richtlinie 2011/70 EURATOM /3.4-1/, gemäß der die Mitgliedsländer „die Planung und Umsetzung von Endlagerungsoptionen in ihre nationale Politik einbeziehen“ sollten.

#### Zuständigkeiten

Gemäß den Regelungen des Atomgesetzes sind die Zuständigkeiten für die hoch radioaktiven Abfälle heute dergestalt geregelt, dass die Abfallerzeuger für alle Schritte zur sicheren Entsorgung ihre Abfälle verantwortlich sind, bis diese an ein Endlager abgegeben werden. Die Endlagerung liegt nach § 9a (3) in der Verantwortung des Bundes. Bei der Langzeitzwischenlagerung ist allerdings realistischerweise nicht davon auszugehen, dass die Abfallerzeuger der Verantwortung für die sichere Entsorgung bis zur Endlagerung über einige hundert Jahre hinweg nachkommen können, (detaillierter Ausführungen dazu siehe Kapitel 3.4.6).

Der regulatorische Rahmen wäre entsprechend dahingehend anzupassen, dass bereits die Langzeitzwischenlagerung unter staatlicher Verantwortung erfolgt und dass mit der

Abgabe der hoch radioaktiven Abfälle eine staatliche Institution die Eigentümerschaft über die Abfälle übernimmt.

Des Weiteren stellt sich unter diesen Bedingungen die Frage nach den Zuständigkeiten für die Genehmigung und Aufsicht über die LZZL, wenn aus Effizienzgründen die Aufsicht von der Landes- auf die Bundesebene übertragen wird (siehe dazu Kapitel 3.4.6).

Aus verwaltungsrechtlicher Sicht stellt sich bei einer Verstaatlichung der Betreiberaufgaben auch die grundsätzliche Frage, ob die behördlichen Kontrollmechanismen in der heute praktizierten Form aufrechterhalten werden sollen. Zur Gewährleistung des in der Kerntechnik etablierten Systems von „Checks-and-balances“ ist es anzustreben, auch im Falle eines staatlichen Betreibers eine davon unabhängige Genehmigung und Aufsicht zu gewährleisten. Ein entsprechendes System klar zugewiesener und getrennter Zuständigkeiten wird auch von der EU-Direktive /3.4-1/ gefordert.

### Genehmigungsvoraussetzungen

Das Atomgesetz /3.4-2/ schreibt in § 6 Abs. 2 für die Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen vor, dass grundsätzliche Anforderungen an

1. die Zuverlässigkeit des Antragstellers sowie die Zuverlässigkeit und Fachkunde der verantwortlichen Personen,
2. die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden (Sicherheit),
3. die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen und
4. den erforderlichen Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (Sicherung)

zu erfüllen sind. Bei den Genehmigungsvoraussetzungen für ein - durch den Bund zu errichtendes und zu betreibendes - Endlager entfällt gemäß § 9b Abs. 1a in Verbindung mit § 7 Abs. 2 AtG entfällt der Nachweis der Erfüllung der Schadensersatzverpflichtungen, ergänzend kommt der Nachweis der notwendigen Kenntnisse des sonst tätigen Personals hinzu.

Insbesondere hinsichtlich der Prüfung der Punkte 2 (Sicherheit) und 4 (Sicherung) ergibt sich im Zusammenhang mit einer Langzeitzwischenlagerung erheblicher Klärungsbedarf, da für einen Betriebszeitraum von einigen hundert Jahren zum Zeitpunkt der Antragstellung/Genehmigung belastbare Prognosen über mögliche Schadensszenarien oder Störmaßnahmen nicht möglich sind. Es wären daher neue Bewertungsmaßstäbe zu entwickeln, die zur Bewertung der Einhaltung dieser Genehmigungsvor-

raussetzungen zu verwenden sind. Diese werden sich in der zugrunde liegenden Sicherheitsphilosophie grundsätzlich von heutigen Herangehensweisen unterscheiden.

### Fazit

Die Regelungen des deutschen Atomgesetzes spiegeln das aktuelle Entsorgungskonzept für die hoch radioaktiven Abfälle basierend auf einer einige Jahrzehnte dauernden Zwischenlagerung mit anschließender Endlagerung in staatlicher Verantwortung wider. Eine Langzeitzwischenlagerung ist hierin aktuell nicht vorgesehen. Anpassungen an geänderte Entsorgungskonzepte (wie die Langzeitzwischenlagerung) sind, unter der Voraussetzung politischer Mehrheiten im Bundestag und Bundesrat, selbstverständlich möglich, wie auch verschiedene Beispiele aus der Vergangenheit zeigen (z. B. Errichtung von Standort-Zwischenlagern, Verbot der Ausfuhr abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung etc.). Allerdings wäre ein Konzept der Langzeitzwischenlagerung, das nicht durch Aktivitäten zur Realisierung der Endlagerung begleitet wird, nicht mit der EU-Direktive /3.4-1/ vereinbart.

Betrachtungen zum Anpassungsbedarf bezüglich der gesetzlich geregelten Zuständigkeiten in der Entsorgung zeigen beispielhaft, dass in der weiteren Ausdifferenzierung eines auf Langzeitzwischenlagerung basierenden Entsorgungskonzepts erhebliche Inkompatibilitäten erkennbar werden, die eine weitgehende Überarbeitung bzw. Neufassung der atomgesetzlich geregelten Verfahrens- und Verwaltungsgrundlagen nahelegen.

Mit Blick auf die gesetzlich geregelten Genehmigungsvoraussetzungen wird darüber hinaus deutlich, dass ein für einige hundert Jahre zu genehmigender Zwischenlagerbetrieb eine grundsätzliche Neuorientierung der Sicherheitsphilosophie erfordert, die gesetzlich und im untergesetzlichen Regelwerk zu verankern ist.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Atomgesetz, Verordnungen und untergesetzliche Regelwerke bei der Einführung einer Langzeitzwischenlagerung in vielfältiger Weise anzupassen bzw. neu entwickeln wären.

### **3.4.6 Institutioneller Rahmen**

Die Festlegung von Zuständigkeiten für den Betrieb kerntechnischer Anlagen beruht in der Regel auf der Annahme, dass die zuständigen Institutionen möglichst über die gesamte Betriebszeit verfügbar und in der Lage sind, den Betrieb sicher und zuverlässig durchzuführen. Im Falle der Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre kann eine derartige Beständigkeit im Falle einer privatwirtschaftlichen Zuständigkeit realistischerweise nicht unterstellt werden. Um einen späteren Wechsel der Betreiber-

verantwortung möglichst zu vermeiden, empfiehlt es sich daher aus heutiger Sicht, dass diese Aufgabe von vornherein durch die öffentliche Hand wahrgenommen wird.

Der Staat würde mit der Zwischenlagerung eine Entsorgungsaufgabe für die hoch radioaktiven Abfälle übernehmen, die heute im Zuständigkeitsbereich der Energieversorgungsunternehmen als (privaten) Abfalleigentümer liegt. Im Hinblick auf die Langfristigkeit der Aufgabe und sich daran anschließende weitere Entsorgungsschritte und die absehbare Beendigung kerntechnischer Aktivitäten der privaten Energiewirtschaft, wird ein staatlicher Betreiber eines LZZLs sinnvollerweise auch die Eigentümerschaft der Abfälle übernehmen. Auf ähnliche Weise wird heute in den Niederlanden vorgegangen: COVRA, als staatlicher Betreiber des LZZLs HABOG ist auch der Eigentümer der darin eingelagerten Abfälle (s. a. Kapitel 4.2). Dies bedeutet, dass bei der Übernahme der Abfälle in ein staatlich betriebenes LZZL auch die finanziellen Modalitäten unter Berücksichtigung des Verursacherprinzips so zu regeln wären, dass eine Finanzierung der für die Langzeitzwischenlagerung und die folgenden Entsorgungsschritte voraussichtlich anfallenden Kosten gewährleistet ist.

Seitens der Genehmigung und Aufsicht bestehen heute noch vielfältige Zuständigkeiten für die verschiedenen Entsorgungsschritte Zwischenlagerung, Konditionierung, Transporte und Endlagerung. In einem kerntechnischen Umfeld in Deutschland, das abgesehen von Anwendungen in der Medizin und Forschung auf Entsorgungsaufgaben beschränkt ist, liegt es aus heutiger Sicht nahe, dass alle Aufgaben bei einer Behörde auf Bundesebene konzentriert werden, um Kompetenzen zu bündeln, Schnittstellen zwischen den verschiedenen Entsorgungsschritten zu optimieren und Kosten zu begrenzen. Für eine derartige Konzentrierung wären Vereinbarungen zwischen Bund und Ländern erforderlich, die heute gleichermaßen Genehmigungs- und Aufsichtstätigkeiten durchführen.

In diesem Kontext wäre auch über die Wahrnehmung der Regulierungsaufgaben zu entscheiden, die heute beim BMUB angesiedelt sind und auf der Ebene von Empfehlungen mit höherem Detaillierungsgrad durch Arbeiten von Expertengruppen wie Entsorgungskommission (ESK) und kerntechnischem Ausschuss (KTA) ergänzt werden. Die Weiterentwicklung von Regelwerken wird auch in Zukunft eine zentrale Aufgabe sein, um dem Fortschritt im Stand von Wissenschaft und Technik Rechnung zu tragen. Eine intensive Diskussion und vielfältige Beiträge durch Expertengruppen oder Gutachterorganisationen werden jedoch kaum noch stattfinden, da eine derartige Vielfalt von Organisationen über einige hundert Jahre mit geringen kerntechnischen Aktivitäten nicht aufrechterhalten werden kann.

Neue Randbedingungen ergeben sich bei einer Langzeitzwischenlagerung auch hinsichtlich der Beteiligung zivilgesellschaftlicher Akteure und Repräsentanten. Während der Betriebszeit wird es sicherlich zu wesentlichen Änderungen der Anlage kommen,

die aus heutiger Sicht von formalen und ggf. auch informellen Maßnahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung zu begleiten wären. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass entsprechende Kompetenzen und Strukturen in der Gesellschaft über lange Zeiträume mit geringen kerntechnischen Aktivitäten erhalten werden können, so dass es fraglich ist, wie die heute üblichen Elemente einer demokratischen Entscheidungsfindung umgesetzt werden sollen.

Im Kontext der gesetzlichen Anforderungen wurde bereits darauf hingewiesen, dass für einen Betriebszeitraum von einigen hundert Jahren zum Zeitpunkt der Antragstellung/Genehmigung belastbare Prognosen über potenzielle Schadensszenarien oder Störmaßnahmen nicht möglich sind, so dass eine Genehmigung, anders als in der heutigen Praxis, unter erheblichen Vorbehalten stehen wird. Es bedarf daher während der Betriebsphase eines LZZLs einer regelmäßigen formellen Überprüfung der Genehmigung sowie der Voraussetzung, die dieser zugrunde liegen. Dies schließt auch die Notwendigkeit ein, dass unter Berücksichtigung der beobachteten und erwarteten sicherheitsrelevanten Entwicklungen frühzeitig Planungen vorzunehmen sind, welche Maßnahmen zu treffen sind oder getroffen werden können, wenn die bestehende Anlage die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen nicht mehr ausreichend gewährleistet.

Ferner müssen die beteiligten Akteure jederzeit in der Lage sein, politische oder gesellschaftliche Diskurse über das Entsorgungskonzept fachlich zu unterstützen und ggf. auf politische Entscheidungen zur Änderung der Zwischenlagerstrategie zu reagieren.

### **3.4.7 Langfristige Finanzierung**

Die Finanzierung einer Langzeitzwischenlagerung wirft gegenüber der heutigen Praxis eine Reihe von Fragen auf, die im Zusammenhang mit einer Entscheidung für die Langzeitzwischenlagerung geklärt werden müssten. Hierzu gehören:

- Gemäß AtG § 9a Abs. 3 hat der Bund "Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten" /3.4-2/. Kann eine Langzeitzwischenlagerung als staatliche Aufgabe im Sinne des AtG als Sicherstellung begriffen und damit die Erhebung regelmäßiger Gebühren über einige hundert Jahre begründet werden?
- Kann das Verursacherprinzip als Rechtfertigung für kontinuierliche Kostenbeiträge der Abfallverursacher über einige hundert Jahre aufrechterhalten werden?
- Kann davon ausgegangen werden, dass die Abfallverursacher auf Basis der bereits erzeugten und derzeit zwischengelagerten hoch radioaktiven Abfälle auch rückwirkend finanziell in die Pflicht genommen werden können?
- Können die seitens der Abfallerzeuger zum Zwecke der Endlagerfinanzierung gebildeten Rückstellungen bei einem Scheitern der Endlagerung für die Finanzierung der Langzeitzwischenlagerung herangezogen werden?



Der derzeit vorhandene Rechtsrahmen auf Basis von §§ 21b und 54 AtG bzw. der hierauf aufbauenden Endlagervorausleistungsverordnung (EndlagerVIV) /3.4-3/ ist hier wahrscheinlich nicht unmittelbar einschlägig bzw. bedürfte einer entsprechenden Weiterentwicklung.

In Kapitel 2.1 ist ausgeführt worden, dass eine Langzeitzwischenlagerung Entscheidungen über den endgültigen Verbleib der hoch radioaktiven Abfälle nicht ersetzt. Insofern kann nicht davon ausgegangen werden, dass hierdurch Finanzmittel gegenüber den heutigen Überlegungen zur Endlagerung eingespart werden könnten. Ganz im Gegenteil: Die Zwischenlagerung über einige hundert Jahre wird zusätzliche Kosten verursachen, ohne dass hierdurch eine endgültige Entscheidung über den Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen überflüssig werden würde. Sie wird lediglich auf unbestimmte Zeit vertagt.

Die für eine Endlagerung erforderlichen finanziellen Ressourcen werden bei einer Langzeitzwischenlagerung deutlich später benötigt. Die grundsätzliche Notwendigkeit der Vorsorge für zukünftige Endlagerkosten bleibt während des gesamten Zwischenlagerzeitraums aber zunächst bestehen. Die mit einer Langzeitzwischenlagerung verbundenen Kosten für Errichtung, Betrieb und Überwachung der Zwischenlager wären mithin zusätzlich zur Endlagervorsorge aufzubringen.

### **3.5 Zeitbedarf bis zur Inbetriebnahme**

Vor der eigentlichen Inbetriebnahme eines Langzeitzwischenlagers ist es rechtlich aus heutiger Sicht erforderlich, dass der Betreiber der Anlage über eine Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen verfügt. Aufgrund der Erfahrungen aus bisherigen Genehmigungsverfahren und der Vielzahl von Einzelschritten, die hierbei durchgeführt werden müssen, ist auch für ein LZZL davon auszugehen, dass sich die diesbezüglichen zeitlichen Abläufe über mehrere Jahre erstrecken. Bei Ausführungsoptionen, die einen Neubau beinhalten sind hierbei neben den Anforderungen aus dem Atomrecht auch immer die aus dem Baurecht zu erfüllen. Die Abläufe in beiden Rechtsgebieten sind aufgrund der Gemeinsamkeiten generell in folgende Schritte unterteilbar:

- Phase der Standortfindung

Der Aspekt der Standortsuche hat für die Ausführungsoption „Weiternutzung bestehender Zwischenlager“ keine Relevanz. Ebenso entfällt die Standortsuche, sofern für das LZZL ein Betriebsgelände ausgewählt wird, das sich bereits in Besitz des Betreibers des LZZL befindet.

- Planungsphase beim Antragsteller

Planung des LZZL und Erstellung der Antragsunterlagen einschließlich aller benötigter Angaben zum Abfall, zur baulichen Ausführung, zur technischen Ausstattung, zum Betrieb (einschließlich organisatorischer Aspekte) und zur Anlagensicherung.

- Antragsstellung

Einreichung der Antragsunterlagen bei der zuständigen Genehmigungsbehörde

- Prüfungsphase

Prüfung der eingereichten Antragsunterlagen auf Vollständigkeit und inhaltliche Richtigkeit.

- Öffentlichkeitsbeteiligung

Aus derzeitiger Sicht ist für alle Neuanträge auf der Grundlage der Bestimmungen des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) und aus der Atomrechtlichen Verfahrensverordnung (AtVfV) eine Beteiligung der Öffentlichkeit erforderlich.

Die Beteiligung der Öffentlichkeit umfasst hierbei die Bekanntmachung des Vorhabens, die öffentliche Auslegung der Unterlagen und einen Erörterungstermin.

- Erteilung der Genehmigung

- Bauphase

Der Bau kerntechnische Anlagen unterliegt aus heutiger Sicht sowohl baurechtlichen als auch atomrechtlichen Gesetzgebungen. Der Baubeginn selbst ist hierbei unabhängig von der atomrechtlichen Genehmigung. Sobald die baurechtliche Genehmigung vorliegt, kann eigenverantwortlich bereits mit dem Bau der Anlage begonnen werden.

- Inbetriebsetzungsprüfung und Inbetriebnahme

Als Grundlage für eine erste Abschätzung des erforderlichen Zeitbedarfs bis zur Inbetriebnahme eines LZZL können in erster Linie die Erfahrungen aus nationalen Referenzprojekten genutzt werden. Danach ergibt sich anhand beispielhafter Zwischenlager folgendes Bild:



für Planung, Bau und Inbetriebnahme eines LZZL jedoch eine eher untergeordnete Rolle.

Von entscheidender Bedeutung für die weitergehenden Überlegungen zum Zeitbedarf ist der aus der tabellarischen Darstellung nicht erkennbare und bislang unberücksichtigte Aspekt, dass für ein Projekt derartiger gesellschaftlicher und technischer Relevanz auch die in den Kapiteln 3.4.5 bis 3.4.7 angesprochenen Einflussgrößen zeitlich nicht vernünftig quantifizierbar sind.

Hierbei ist die Klärung der Fragen zur Finanzierung einer Langzeitzwischenlagerung (vgl. Kapitel 3.4.7) eher als eine Grundvoraussetzung für die generellen Überlegungen für oder wider einem LZZL anzusehen und aus bisherigen vergleichbaren Fragestellungen im Rahmen der Endlagerproblematik zeitlich auf wenige Jahre reduzierbar.

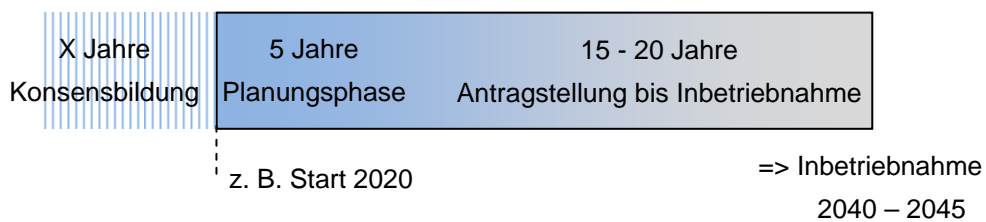
Wesentlicher ist vielmehr, dass vor dem Beginn der Erstellung von technischen Unterlagen (Planungsphase) für ein bzw. mehrere LZZL sowohl ein überparteilicher wie auch ein gesellschaftlicher Konsens erreicht werden muss, um ausreichende Verfahrenssicherheit bis zur Inbetriebsetzung und Akzeptanz während der Betriebsphase des LZZL zu erreichen. Erst nach Erreichung eines derartigen Konsenses kann davon ausgegangen werden, dass sich der Zeitbedarf für die vorgeschaltete Standortauswahl für ein oder mehrere LZZL und die während des Genehmigungsverfahrens aus rechtlicher Sicht durchzuführende Öffentlichkeitsbeteiligung deutlich reduziert. Nutzbare Erfahrungen für eine Abschätzung des erforderlichen Zeitbedarfs für das Erreichen einer breiten gesellschaftlichen Einwilligung liegen bislang jedoch weder aus konventionellen oder kerntechnischen Projekten noch auf Länder- oder Bundesebene vor. Die bereits über Jahrzehnte hinweg geführte Diskussion zur Lösung der Endlagerproblematik gibt vielmehr Anlass zu der Annahme, dass Entscheidungen zu Bauprojekten, die auch von nachfolgenden Generationen mitzutragen sind, entweder einer „zwingenden – z. B. gesundheitlich begründete – Notwendigkeit“ oder einer eindeutigen rechtlichen Grundlage bedürfen.

Somit lässt sich feststellen, dass sich unabhängig von der gewählten Ausführungsoption des Langzeitzwischenlagers auf Basis der bisherigen Erfahrungen aus nationalen Zwischenlager-Referenzprojekten zwar der erforderliche Zeitbedarf für die Zeiträume von der Planungsphase bis zur Inbetriebnahme konservativ mit etwa 20 – 25 Jahren abschätzen lässt, der Gesamtzeitbedarf jedoch nicht aufzeigbar ist, da aus heutiger Sicht hinsichtlich des Zeitbedarfs zur Erreichung des erforderlichen politischen und gesellschaftlichen Konsens in Analogie zur Endlagerproblematik keinerlei Vergleichswerte auf nationaler Ebene bestehen.

Ohne eine Konsensbildung ist der Zeitbedarf bis zur Inbetriebnahme eines LZZL nicht nachvollziehbar quantifizierbar.

Für die drei in diesem Gutachten angesprochenen beispielhaften Ausführungsoptionen haben wir nachfolgend den potenziellen Zeitbedarf zur Realisierung einer Langzeitzwischenlagerung in einen Zeitstrahl übertragen und endlagerrelevanten Terminen gegenübergestellt. Der beispielhaft gewählte zeitliche Beginn der Planungsphase im Jahre 2020 berücksichtigt nicht den Zeitraum, der zur Erreichung eines politischen sowie gesellschaftlichen Konsens benötigt wird, da eine diesbezügliche qualitative Abschätzung nicht möglich ist.

Zeitbedarf für die „Ausführungsoption LZZL“



Zeitstrahl „Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle“ und weitere Fixtermine



4 Aspekte langer Zwischenlagerzeiträume in ausgewählten Ländern

4.1 Synopse

In den nachfolgenden Kapiteln werden exemplarisch Überlegungen aus den Niederlanden, Frankreich, Großbritannien und den USA zur Lagerung hoch radioaktiver Abfälle über lange Zeiträume untersucht. Zur Verfügung standen hierfür ausschließlich öffentlich zugängliche Dokumente und Quellen.

Allgemein ist vorauszuschicken, dass in keinem der untersuchten Staaten eine Langzeitzwischenlagerung als Form der Entsorgung angesehen wird. Unisono wird immer wieder darauf verwiesen, dass am Ende der Zwischenlagerung grundsätzlich eine Langzeitlösung in Gestalt eines Endlagers zur Verfügung stehen muss. Es lassen sich einige zentrale Aspekte zusammenfassen, die für eine Langzeitzwischenlagerung in dem hier diskutierten Kontext von Interesse sind.

Die Zeiträume, die hierzu ins Auge gefasst werden, sind zwar durchaus lang, aber in der Regel nicht unbefristet.

In den Niederlanden wird davon ausgegangen, dass innerhalb der kommenden hundert Jahre (bzw. bis etwa 2130) eine Endlagerlösung gefunden wird, wobei offen bleibt, ob diese ein nationales Endlager oder eine Beteiligung an einem internationalen Endlager sein soll. Dabei wird die Entscheidung, was nach Ablauf der geplanten Nutzungsdauer mit den hoch radioaktiven Abfällen geschehen soll, bewusst an die nachfolgenden Generationen weitergegeben, zusammen mit den bis dahin in einem Fonds für die Entsorgung angesparten Finanzmitteln.

Frankreich hat die Möglichkeiten der Langzeitzwischenlagerung über einen angenommenen Zeitraum von 300 Jahren als Option im Zeitraum 1991 bis 2006 mit geprüft und entschieden, dass eine geplante Zwischenlagerung über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren als nicht akzeptable Belastung zukünftiger Generationen keinen gangbaren Weg darstellt. Seither wird das Endlagervorhaben CIGÉO in der Gemeinde Bure vorangetrieben und hierauf das Management hoch radioaktiver Abfälle ausgerichtet.

Großbritannien hat bei der Suche nach einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle bis dato keine konkreten Fortschritte erzielt, richtet sich hinsichtlich der Zwischenlagerung deswegen aber nicht auf unbefristete Lagerdauern ein, sondern plant eine Zwischenlagerung bis etwa 2080, bei einer Auslegung, zumindest neuerer Zwischenlager, für einen Betriebszeitraum von ca. 100 Jahren.

In den USA ist nach dem Scheitern des Endlagerprojekts Yucca Mountain die tatsächlich erforderliche Lagerdauer für hoch radioaktive Abfälle unbestimmt. Hinsichtlich potenzieller Umweltfolgen wurden drei Szenarien näher betrachtet, die auf generischer Basis Zeiträume von 60 und 160 Jahren nach Stilllegung eines Kernkraftwerks in den Blick nehmen. Inklusive der einzurechnenden Betriebsdauer eines Kraftwerks von bis zu 60 Jahren ergeben sich damit Lagerdauern für abgebrannte Brennelemente von bis zu 120 resp. 240 Jahren. Als "What-If-Szenario" wurde außerdem die Situation betrachtet, dass es nie gelingen wird ein Endlager zur Verfügung zu stellen. Allen Szenarien gemeinsam ist die Einschätzung, dass die technischen Anlagen in einem Turnus von 100 Jahren vollständig erneuert werden müssen. Bis dahin gilt die heute verfügbare Technik der trockenen Zwischenlagerung als sicher und robust. Darüber hinaus wird insbesondere Alterungseffekte bei abgebrannten Brennelementen als relevanter Aspekt identifiziert der weiterer Forschung bedarf.

Die technische Ausgestaltung der Zwischenlager entspricht im Wesentlichen dem heute auch in Deutschland implementierten Stand der Technik. In Europa ist das Konzept eines Bauwerks mit passiven Systemen und Naturzugkühlung und massiven Transport- und/oder Lagerbehältern verbreitet. In den USA findet hauptsächlich eine modulare

Bauweise Anwendung, bei der dünnwandige Behälter einzeln in massive Betonbunker eingestellt werden. Allen gemeinsam ist die begrenzte Lebensdauer, die durch Wartung und/oder regelmäßigen Ersatz bei Bedarf verlängert werden soll: Alterungs-Management wird zum wichtigen Bestandteil des Betriebs, die Möglichkeit, hoch radioaktive Abfälle auch nach längeren Zeiträumen noch behandeln zu können, wird als Herausforderung und Forschungsfeld begriffen.

Unter technischen Aspekten wird die Zwischenlagerung über längere Zeiträume, bzw. im Rahmen der jeweils angenommenen Zeitspanne als machbar angesehen, die USA beispielsweise gehen in der Betrachtung einer unbefristeten Zwischenlagerung davon aus, dass die Lager regelmäßig neu zu bauen und die Abfälle alle einhundert Jahre entsprechend in ein neues Lager umzulagern sind. Dabei gilt offenbar die heute verfügbare Technologie als ausgereift und über einen Zeitraum von einhundert Jahren sicher einsetzbar. Dies schließt Weiterentwicklungen nicht aus, in den französischen Dokumenten wird allerdings darauf hingewiesen, dass die regelmäßige Anpassung an den Stand der Entwicklung mit hohem Aufwand verbunden sei und dieser als Teil der Belastung zukünftiger Generationen gesehen werden müsse.

Allerdings werden Veränderungen gesellschaftlicher Art und deren Rückwirkungen auf die Zwischenlagerung in den geprüften Dokumenten weitgehend ausgeblendet; über die betrachteten Zeiträume wird offenbar unausgesprochen eine Kontinuität der gesellschaftlichen Randbedingungen angenommen. Gleiches gilt für die derzeitigen administrativen Randbedingungen, wobei bemerkenswert erscheint dass in den Niederlanden die hoch radioaktiven Abfälle mit der Abgabe an das Zwischenlager in staatliche Verwahrung genommen werden, und das dies in den USA mittelfristig durch den Bau staatlicher Zwischenlager ebenfalls der Fall sein wird. In Großbritannien hat der Staat die Verantwortung für die Abfälle aus sämtlichen Altanlagen bis zur Übernahme der noch in Betrieb befindlichen Reaktorflotte durch EDF im Jahr 2008 bereits übernommen. In Frankreich ist dies durch die staatliche Dominanz über den Abfallerzeuger EDF de facto ebenfalls der Fall.

Zusammenfassend kann hieraus für die Betrachtung einer Langzeitzwischenlagerung in Deutschland festgehalten werden, dass international

- eine explizite Langzeitzwischenlagerung über mehrere Jahrhunderte in den Entsorgungskonzepten keine Rolle spielt oder bestenfalls generisch betrachtet wurde,
- grundsätzlich eine am Ende auch einer längeren Zwischenlagerperiode die geologische Endlagerung angestrebt wird,
- Lagerzeiträume von einhundert Jahren als unkritisch angesehen werden,
- zur Lagerung i. W. die heute verfügbare Technologie als ausgereift betrachtet wird,

- anstelle einer Auslegung über einige hundert Jahre ggf. eine mehrfache Erneuerung der Anlagen ins Auge gefasst wird,
- Langzeitverhalten von Behältern und Inventaren Gegenstand aktueller Forschungen ist,
- mögliche gesellschaftliche Veränderungen und ihre Rückwirkungen auf die Zwischenlager ausgeblendet werden,
- die Abfälle mit einer längeren Perspektive in staatlicher Obhut gelagert werden.



## **4.2 Niederlande**

### **4.2.1 Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle**

In den Niederlanden wird am Standort Borssele seit 1973 ein Kernkraftwerk kleinerer Leistung (485 MWel) betrieben. Nach einer Verlängerung im Jahr 2006 verfügt das Kernkraftwerk aktuell über eine Betriebsgenehmigung bis 2034 /4.2-1/. Ein älteres Kernkraftwerk (Dodewaard, 60 MWel) wurde 1997 abgeschaltet und befindet sich seit dem im sicheren Einschluss.

Abgebrannte Brennelemente dieser Anlage wurden bzw. werden grundsätzlich zur Wiederaufarbeitung abgegeben, die Wiederaufarbeitungsabfälle werden zurückgenommen und zwischengelagert.

Darüber hinaus sind zwei Forschungsreaktoren im Betrieb, ein weiterer wurde 2010 außer Betrieb genommen, sein Rückbau wird vorbereitet.

Pläne zum Neubau von Kernkraftwerken aus dem Jahr 2012 werden aktuell aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen nicht weiter verfolgt /4.2-2/.

Der Bestand an hoch radioaktiven Abfällen belief sich Ende 2013 auf rd. 80 m<sup>3</sup> HAW aus der Wiederaufarbeitung sowie rd. 6 m<sup>3</sup> abgebrannter Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die zentral im Zwischenlager HABOG am Standort der COVRA gelagert werden. Im Vergleich zum deutschen Inventar hoch radioaktiver Abfälle ist dieser Bestand sehr klein und wächst aufgrund des geringen Anfalls auch nur langsam an. Die derzeitige Lagerkapazität wird als ausreichend für das bestehende Nuklear-Programm bis 2015 bezeichnet. Der Mehrbedarf an Lagerkapazität durch die Laufzeitverlängerung des KKW Borssele kann durch Kapazitätserweiterung des Lagers HABOG abgedeckt werden. Ein entsprechender Genehmigungsantrag dazu wurde gestellt /4.2-2/.

Am COVRA-Standort Borssele werden außer den hoch radioaktiven Abfällen im HABOG-Lager in weiteren Standortbereichen auch alle anderen in den Niederlanden anfallenden radioaktiven Abfälle, derzeit etwa 10.600 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktiver Abfälle sowie rd. 17.300 m<sup>3</sup> NORM-Abfälle gelagert. Zu letzteren zählt auch angereichertes Uran aus der Uran-Anreicherungsanlage der Urenco in Almelo. Für den Kontext der hier diskutierten Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind diese Abfälle nicht von Belang.

#### **4.2.2 Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeit-Zwischenlagerung im Entsorgungskonzept**

Die Grundsätze, denen die Entsorgungsstrategie in den Niederlanden folgt, sehen vor, alle radioaktiven Abfälle zu isolieren, zu kontrollieren und sie zu überwachen, bis sie auf Grund des Zerfalls nicht länger als radioaktiv gelten oder in einem Endlager dauerhaft von der Biosphäre abgeschlossen werden können. Diese Grundsatzentscheidung zur nuklearen Entsorgungspolitik wurde bereits 1984 getroffen und hat bis heute Bestand /4.2-3/. Sie ist das Ergebnis einer intensiven Diskussion in niederländischen Parlament über die Beendigung der Versenkung schwach radioaktiver Abfälle im Meer, die wiederum Teil einer grundsätzlichen gesellschaftlichen Diskussion in den Jahren 1981 – 83 über Fragen der Energieerzeugung war /4.2-4/.

Da abgebrannte Brennelemente aus den Kernkraftwerken grundsätzlich zur Wiederaufarbeitung verbracht wurden und werden, zählen in den Niederlanden ausschließlich verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die abgebrannten Brennelemente aus den Forschungsreaktoren zu den hoch radioaktiven Abfällen. Diese sollen in den Niederlanden zunächst über einen Zeitraum von mindestens hundert Jahren zwischengelagert werden. Auch diese Festlegung stammt bereits aus dem Jahr 1984. In diesem Sinne wird in den Niederlanden auch der Begriff der Langzeitzwischenlagerung verstanden.

Die Niederlande haben frühzeitig beschlossen, radioaktive Abfälle zentral an einem Standort zu konzentrieren und dort auch zu konditionieren. Die örtliche Zentralisierung ging einher mit einer institutionellen Zentralisierung, indem alle Entsorgungsaufgaben bei einer Organisation gebündelt wurden. Zur Wahrnehmung aller Entsorgungsaufgaben wurde daher das staatliche Unternehmen COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval) gegründet. COVRA verwaltet und besitzt die ihr in Obhut gegebenen radioaktiven Abfälle, d. h. mit der Abgabe übernimmt COVRA alle Aufgaben und Pflichten des Abfalleigentümers.

An die Langzeitzwischenlagerung anschließend sollen alle Arten radioaktiver Abfälle in ein gemeinsames geologisches Endlager verbracht werden. Für hoch radioaktive Abfälle ist die geologische Tiefenlagerung ohnehin die angestrebte Form der Entsorgung, eine oberflächennahe Deponierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle kommt in den Niederlanden aufgrund des hohen Grundwasserspiegels nicht in Frage. Während der mindestens 100-jährigen Zwischenlagerung sollen alle technischen, finanziellen und gesellschaftlichen Fragen der Endlagerung hinreichend geklärt werden /4.2-2/. Die Niederlande betonen hierbei regelmäßig, dass es sich nicht um eine „wait and see“ Option handelt sondern um einen geplanten Prozess, an dessen Ende die Endlagerung stehen soll (siehe z. B. /4.2-5/).

Die Entsorgungspolitik ist also ausgesprochen konsequent auf eine Konzentrierung der Entsorgungsaktivitäten für die relativ geringen Abfallmengen ausgerichtet. Bemerkenswert ist, dass dieses, im Jahr 1984 etablierte Konzept, nunmehr seit über 30 Jahren Bestand hat. Grundsätzliche Veränderungen der organisatorischen Randbedingungen finden sich seither nur auf der Seite der Regulierungs- und Genehmigungsbehörden, wo lange eine sehr starke Aufgliederung der Kompetenzen bestand, die erst kürzlich durch die Gründung einer zentralen Behörde ANVS aufgehoben wurde (s. a. Kapitel 4.2.7).

Das Gesamtvolumen an radioaktiven Abfällen, die derzeit in den Niederlanden zwischengelagert werden, beträgt rund 28.000 m<sup>3</sup>. Davon zählen nur rd. 86 m<sup>3</sup> zu den hoch radioaktiven Abfällen. Diese Menge wird als zu gering angesehen, als dass derzeit der Aufwand für ein geologisches Endlager wirtschaftlich vertretbar wäre /4.2-2/. Die Langzeitzwischenlagerung soll daher dazu führen, dass die Menge der endzulagernden radioaktiven Abfälle soweit anwächst, dass ein Endlager in einer bautechnisch sinnvollen Größe benötigt werden wird. Außerdem soll die lange Zeit die Akkumulation der erforderlichen finanziellen Ressourcen durch Verzinsung der in dem bestehenden Fonds angelegten Entsorgungsbeiträge ermöglichen. Ein weiterer Vorteil der Langzeitzwischenlagerung wird in der Reduzierung der Wärmeleistung der hoch radioaktiven Abfälle gesehen. Sie soll außerdem ermöglichen, ohne Zeitdruck mögliche Langzeitlösungen zu untersuchen und ggf. internationale oder regionale Lösungen zu finden, an denen sich die Niederlande beteiligen können /4.2-2/.

Gleichzeit wird angeführt, dass die Langzeitzwischenlagerung die Entscheidungsfreiheit zukünftiger Generationen hinsichtlich des Umgangs mit den Abfällen (weitere Zwischenlagerung, Endlagerung oder Anwendung fortschrittlicher Technologien) offen hält /4.2-2/. Der Aspekt der Generationengerechtigkeit wird in diesem Zusammenhang mit der Weitergabe und der Verfügbarkeit der im Fonds angesparten Finanzmittel gerechtfertigt.

### **4.2.3 Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung**

Nach /4.2-6/ werden die Spaltprodukte und die Actiniden aus der Wiederaufarbeitung in eine Glasmatrix eingeschmolzen und das Glasprodukt in einen Edelstahlbehälter (Kokille) fixiert. Diese Abfälle haben durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte zu Beginn eine relativ hohe Wärmeleistung von etwa 2,5 kW pro Kokille.

Die abgebrannten Brennelemente der Forschungsreaktoren werden in mit Helium gefüllte Edelstahlbehälter gepackt. Das Helium dient der Überprüfung der Dichtheit der Schweißnaht und schafft eine inerte Umgebung für die Abfälle /4.2-2/.

Ein zentraler Bestandteil der Langzeitzwischenlagerung in den Niederlanden ist die Aufbewahrung der Edelstahlkokillen mit verglasten hoch radioaktiven Abfällen und der

Behälter mit den abgebrannten Brennelementen. Zu diesem Zweck wurde 2003 das Zwischenlager HABOG ("Hoogradioactief Afval Behandeling- en Opslag Gebouw") in Vlissingen nahe dem KKW-Standort Borssele in Betrieb genommen.

Das Lager verfügt über passive, auf eine lange Lagerzeit ausgelegte Sicherheitsmerkmale. Die Lagebehälter für wärmeentwickelnde Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden vertikal fünffach übereinander in röhrenförmigen Betonkammern gelagert. Die Röhren sind mit Inertgas (Argon) gefüllt, um Korrosion der Kokillen zu vermeiden. Sie sind außerdem doppelwandig ausgestattet: Zwischen Außen- und Innenwand zirkuliert Luft nach dem Naturzug-Prinzip und führt Wärme ab. Die Methode entspricht der in den Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield (GB) und La Hague (F) angewandten Technologie zur Lagerung verglaster hoch radioaktiver Abfälle.

HABOG verfügt außerdem über hiervon getrennte Lagerbereiche für nicht wärmeentwickelnde hoch radioaktive Abfälle.

Das Betriebskonzept für das HABOG sieht zwei Phasen vor: in der ersten, aktiven Phase erfolgt die Einlagerung der Abfälle. Daran schließt sich die zweite, passive Phase an, in der sich die Tätigkeiten auf Wartungs- und Überwachungsmaßnahmen beschränken, da keine weiteren Einlagerungen mehr erfolgen. Diese Phase ist mit mindestens 100 Jahren bzw. bis etwa 2130 vorgesehen /4.2-7/. In der Folgezeit soll ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle zur Verfügung stehen. Durch die Laufzeitverlängerung des Kernkraftwerks Borssele ergibt sich eine verlängerte „aktive Betriebsphase“ des HABOG, die Zielvorstellung zur Verfügbarkeit eines Endlagers und damit für das Ende der Zwischenlagerung wurde beibehalten.

Im Sicherheitsbericht der HABOG-Anlage (/4.2-6/, s. a. /4.2-2/) wird bei der allgemeinen Beschreibung der Anlagen darüber berichtet, dass angesichts der relativ langen Lebensdauer beim Design und beim Bau der Gebäude und Anlagen die Möglichkeit berücksichtigt wurde, sämtliche Anlagenteile zu inspizieren und ggf. zu reparieren. Hierin enthalten ist auch die Möglichkeit, Abfallgebände in größere Umverpackungen zu transferieren. Außerdem sei bei der Auswahl der Materialien deren Lebensdauer berücksichtigt.

#### **4.2.4 Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen**

Bei der Auslegung von HABOG wurden laut /4.2-2/ u. a. terroristische Anschläge betrachtet. Es gibt allerdings keine Hinweise, dass für die Auslegung darüber hinaus auch denkbare gesellschaftliche Entwicklungen und ihre Auswirkung auf die Langzeitzwischenlagerung betrachtet wurden. In einem Forschungsprogramm zwischen 1995 und 2001 wurden verschiedene Aspekte der Endlagerung untersucht und dabei in einer Überblicksstudie lokale Umweltorganisationen nach ethischen Aspekten bei einer Lang-

zeitzwischenlagerung im Vergleich zu einer rückholbaren Endlagerung befragt /4.2-2/. Eines der in /4.2-2/ berichteten Ergebnisse war, dass etliche der befragten Umweltgruppen die Haltung vertreten, dass eine staatlich überwachte Langzeitzwischenlagerung an der Oberfläche die "am wenigsten schädliche" Option sei. Die Möglichkeit von gesellschaftlicher Instabilität wurde zwar als Risiko wahrgenommen, gegen das aber keine Vorkehrungen getroffen werden könne. Diese Grundhaltung, die eine gesellschaftliche Stabilität über den avisierten Zeitraum als gegeben annimmt und daher Instabilität als geringes Risiko einstuft, mag eine Erklärung dafür sein, warum gesellschaftliche Entwicklungen über die Lagerzeit von 100 Jahren oder mehr bei der Auslegung und dem Sicherheitsnachweis der HABOG-Anlage nicht oder nur am Rande betrachtet wurden.

Nichts desto trotz sind einige Aspekte in der Auslegung der HABOG-Anlage berücksichtigt, die indirekt auf Einflussfaktoren gesellschaftlicher Art zurückgeführt werden können. Im Sicherheitsbericht /4.2-6/ wird u. a. auf den Aspekt der "unbeabsichtigten Verwahrlosung" eingegangen, außerdem wird darauf hingewiesen, dass die passiven Sicherheitsfunktionen nicht von der Anwesenheit von Personal und dem Betrieb mechanischer und elektrischer Systeme abhängen. Es wird betont, dass die überwiegend passiven Systeme bei der Lagerung der wärmeentwickelnden Abfälle eine gewisse Unabhängigkeit bzw. Robustheit gegenüber gesellschaftlichen oder institutionellen Veränderungen mit sich bringen (/4.2-6/, /4.2-2/).

Ein markanter Aspekt, der direkt auf gesellschaftliche Verantwortung verweist, ist der gewollte Zusammenhang zwischen der HABOG-Anlage und der Kunst. Dahinter steckt die Überlegung, dass reine Zweckbauten im Laufe gesellschaftlicher Entwicklungen über längere Zeiträume häufiger verwahrlosen und im Extremfall dem Verfall preisgegeben werden, während Stätten der Kunst wie Museen oder historisch bedeutsame Bauwerke im Bewusstsein einer Gesellschaft einen hohen Stellenwert haben und der die Verantwortung für Ihren Erhalt als gesellschaftliche Aufgabe wahrgenommen und stetig fortgeführt wird /4.2-5/. Vor diesem Hintergrund wurde die HABOG Anlage unter zwei Gesichtspunkten künstlerisch aufgewertet: Zum einen soll das Gebäude selbst als Kunstwerk betrachtet werden, hierzu gibt es ein modernes künstlerische Konzept zur farblichen Gestaltung der Außenhülle<sup>3</sup>. Auch innerhalb des Gebäudes wird das Thema der Lagerung künstlerisch aufgegriffen und im Rahmen von Besucherführungen präsentiert. Zum anderen werden Teile des HABOG-Gebäudes gleichzeitig als Lager für nicht wärmeentwickelnde Abfälle und als Museumsdepot für historische Kunstgegenstände genutzt. Beides soll dazu beitragen, dass das LZZL im Bewusstsein der Gesellschaft verankert bleibt und damit auch die Verpflichtung zum Erhalt des Lagers über längere Zeiträume aus gesellschaftlicher Sicht wahrscheinlicher eingehalten wird.

---

<sup>3</sup> "Metamorphosis 2003 - 2103", Künstler: William Verstraeten

#### 4.2.5 Anforderungen an die Anlagensicherheit

Die Leitprinzipien für einen sicheren Betrieb des HABOG sind Einschluss, Kontrolle und Überwachung.

- Für den Einschluss sorgen mindestens zwei Barrieren zwischen den radioaktiven Abfällen und der Umwelt. Für eine ausreichende Abschirmung sorgen die Betonstrukturen von 1,7 m Dicke.
- Die Unterkritikalität wird durch Neutronen-Absorber und eine entsprechende Geometrie der abgebrannten Brennelemente erreicht.
- HABOG ist im Bereich der Lagerräume für die hoch radioaktiven Abfälle soweit wie möglich mit passiven Komponenten ausgestattet. Wärme generierender Abfall wird in inerter Edelgas-Atmosphäre gelagert und mittels thermisch induzierter Konvektion luftgekühlt.
- Die Anlage ist darauf ausgerichtet, die Abfallgebinde aus den Lagerröhren zu entnehmen, um Reparaturen an den Lagerröhren durchführen zu können. Hierfür werden freie Lagerkapazitäten für die entnommenen Gebinde vorgehalten.
- Die Dichtheit der Lagerröhren wird überwacht, ebenso die Temperatur der Röhren, die Ortsdosisleistung und die Emissionen.

Darüber hinaus gilt das ALARA-Prinzip und das „Defence-in Depth“-Prinzip. Die Grundlage des "Defense-in-Depth"-Prinzips ist, dass mögliches menschliches Versagen oder der Ausfall der Anlage durch mehrere Sicherheitsstufen kompensiert werden muss. So soll die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt verhindert werden /4.2-6/. Zu diesen Sicherheitsstufen gehörten beispielsweise Qualitätssicherung, die Pflege einer angemessenen Sicherheitskultur und das Sicherheitsmanagement.

Bei den Design-Anforderungen des HABOG-Lagers wurden 15 verschiedene Einwirkungen von Außen und von Innen berücksichtigt, z. B. Überflutung, Erdbeben, Tornado, Brand, Gasexplosion außerhalb der Anlage, Absturz eines Gebindes vom Kran /4.2-2/. Als auslegungsrelevanter Störfall wurde außerdem der Absturz eines Militärflugzeugs des Typs F-16 betrachtet.

Als auslegungsüberschreitendes Ereignis wurde untersucht, welche Auswirkungen der Absturz eines Flugzeugs mit einer höheren Masse und Geschwindigkeit als der des auslegungsrelevanten Typs F-16 auf das Gebäude haben würde /4.2-6/. Aus diesen Betrachtungen heraus wurden offenbar keine weiteren Anpassungen der Anlagenauslegung abgeleitet, da das Risiko für eine derartige Einwirkung zu gering sei, um eine technische Anpassung zu rechtfertigen /4.2-7/. Die wesentlichen Sicherheitsfunktionen sind auslegungstechnisch auch bei einer Evakuierung der Anlage aufrecht zu erhalten.

Diese Sicherheitsfunktionen sind daher passiv ausgelegt, d. h. nicht von der Anwesenheit von Personal und dem Betrieb mechanischer und elektrischer Systeme abhängig.

Gemäß /4.2-7/ wurde als Genehmigungsgrundlage für das Lagergebäude der französische Stand der Technik zur Lagerung verglaster hoch radioaktiver Abfälle herangezogen und adaptiert. Außerdem wurde auf die Auslegungsmerkmale des amerikanischen Standards ANS/ANSI 57-9-1992 für die trockene Lagerung abgebrannter Brennelemente verwiesen.

Es fanden sich keine Hinweise darauf, dass die langfristige Perspektive der Lagerdauer von mindestens 100 Jahren zu spezifischen Designmerkmalen der HABOG-Anlage geführt hätte, die über das nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle allgemein angewandte technische Niveau hinausgehen. Auch für die Berücksichtigung eines erweiterten Störfallspektrums beim Design der Anlage, das aus einer Extrapolation möglicher Einwirkungen bzw. deren Eintrittswahrscheinlichkeiten über den Zeitraum von 100 Jahren abgeleitet wurde, finden sich keine Hinweise.

Periodische Sicherheitsüberprüfungen sind im niederländischen Regelwerk festgeschrieben und in den Genehmigungen konkretisiert. Für das Zwischenlager HABOG sind laut Genehmigung alle fünf Jahre der Sicherheitsstatus auf Grund von Betriebserfahrungen sowie generellen neuen Entwicklungen zu bewerten. Alle 10 Jahre muss eine grundsätzlichere Überprüfung durchgeführt werden. Diese kann auch eine Überprüfung der Auslegungsgrundlagen im Lichte neuer Entwicklungen in der Forschung, im Sicherheitsdenken oder in der Risikoakzeptanz umfassen /4.2-2, p. 20/.

Als Ergebnis eines Post-Fukushima-Stresstests wurde für die HABOG-Anlage festgestellt, dass die Anlage den allgemeinen Anforderungen entspricht. Um die Robustheit der Anlage zusätzlich zu verbessern, wurden Maßnahmen in Bezug auf die Zunahme möglicher Extremwetterereignisse, den Notfallplan, die mobilen Überwachungseinrichtungen und den Fall eines Stromausfalls vorgeschlagen.

#### **4.2.6 Finanzierungsmechanismen**

Für die spätere Endlagerung wurde ein langfristiges Finanzierungskonzept über einen Kapital-Wachstums Fond eingerichtet. In diesen Fond bezahlen die Abfallverursacher ein. Alle fünf Jahre werden die Grundlagen der Kostenschätzungen für die Entsorgung neu bewertet, um evtl. Anpassungen vornehmen zu können. Letzter Bürge für die Finanzierung der anfallenden Kosten ist der Staat.

Mit Einsetzung der COVRA als staatseigenem Betreiber haben die privaten Erzeuger von HAW und SF beschlossen, die Zuständigkeit und Verantwortung vollständig an die

COVRA zu übertragen, indem sie die voraussichtlichen Kosten für den 100-jährigen Betrieb und die Unterhaltung des HABOG an die COVRA gezahlt haben.

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle gibt es definierte Tarife, die von den Abfallerzeugern an die COVRA zu zahlen sind und die die Zwischen- sowie die spätere Endlagerung abdecken. Eine Überprüfung der Tarife erfolgt alle 5 Jahre.

Über die Einnahmen bezüglich der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sollen etwa 1/3 der zukünftigen Endlagerkosten gedeckt werden, 2/3 durch die Einnahmen bezüglich der hoch radioaktiven Abfälle. Die Gelder werden in einem gemeinsamen Fonds („Waste Management Fund“) durch die COVRA verwaltet und zwecks Kapitalwachstum angelegt /4.2-2/. Bei der Kalkulation wurde eine Verzinsung von 3,5 % über 130 Jahre zugrunde gelegt. Bei nicht erwartungsgemäßer Entwicklung der Fondserträge werden die Gebühren angepasst, diesbezüglich wird der Fond alle fünf Jahre überprüft.

#### **4.2.7 Institutionelle und organisatorische Randbedingungen**

Die langfristige Verantwortung für die Abfalllagerung liegt in staatlicher Hand; die Abfallerzeuger tragen hierfür die Kosten über ihre Beiträge zum Entsorgungsfond.

Mit der Zwischenlagerzeit von mindestens 100 Jahren planen die Niederlande die Weitergabe von Lasten an die nächste Generation als Bestandteil ihres Entsorgungskonzeptes ein. Nach Auffassung der Niederlande werden aber auch finanzielle Ressourcen und technische Kompetenz weitergegeben und damit für zukünftige Generationen geeignete Bedingungen für ein Entsorgungsmanagement geschaffen.

Als zentrale Aufgaben auf lange Sicht werden die Aufrechterhaltung des Wissens und die Erhaltung von Informationen und Daten während des langen Zwischenlagerzeitraums erkannt. Für den Wissenserhalt bei COVRA, der Betreiberorganisation, wurden finanzielle Mittel bereitgestellt, um ein Minimum an Fachpersonal über die kommenden einhundert Jahre zu finanzieren. Darüber hinaus ist geplant, dass bei fehlender eigener Expertise Fachkräfte aus dem Ausland hinzugezogen werden können. Es wird nicht weiter präzisiert, für welche Aufgaben externer Sachverstand vermutlich benötigt werden wird /4.2-2/.

Die Betreiberorganisation COVRA wurde jüngst personell vergrößert. Die Angestellten erhalten spezielle Trainings zum Erhalt und zur Weiterentwicklung ihrer Kompetenzen /4.2-2/. COVRA soll sich dabei auch über die Zeit verändernden Langzeitanforderungen anpassen und einen robusten Personalstamm gewährleisten können.

Für den Erhalt von Informationen und Daten sind verschiedene technische Maßnahmen, wie redundante, klimatisierte Archive an unterschiedlichen Orten, unterschiedliche



Medien (digital und Papier) sowie regelmäßige Updates elektronischer Datenträger vorgesehen. Für Daten, deren Relevanz über einen Zeitraum von 15 Jahren hinausgeht, werden bereits bei der Ablage in Papierform spezielles Papier und spezielle Drucktinte verwendet.

Ebenso wie auf der Betreiberseite wurden auch auf Seite der behördlichen Aufsicht und Überwachung die Zuständigkeiten zentralisiert. Im Januar 2014 wurde beschlossen, eine neue unabhängige Behörde für nukleare Sicherheit und Strahlenschutz (Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection ANVS) als unabhängige Verwaltungsbehörde im Geschäftsbereich des Ministeriums für Infrastruktur und Umwelt zu etablieren. Ihre Aufgabe ist es, das bis dato in verschiedenen Zuständigkeiten fragmentierte Wissen und Know-how auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes in einer Behörde zusammenzufassen.

Insgesamt gesehen stellen sich die Niederlande darauf ein, die vorgesehene Phase der Langzeitzwischenlagerung nach Abschluss der aktiven Einlagerungsphase mit einer möglichst zentrierten, schlanken Struktur zu bewältigen. Im Hinblick auf die noch zu treffenden Entscheidungen zur Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle wird kein Zeitdruck verspürt. Ob es unter den damit verbundenen Randbedingungen während der kommenden ca. einhundert Jahre gelingen kann, das für eine spätere Endlagerung erforderliche Know-how durch eigene Kompetenzen dauerhaft abzubilden, muss als Herausforderung betrachtet werden, insbesondere in Ländern mit kleinen, stagnierenden Nuklearprogrammen wie den Niederlanden.

## **4.3 Frankreich**

### **4.3.1 Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle**

Frankreich betreibt derzeit 58 Kernkraftwerke und erzeugt damit 75 % seines Strombedarfs. Frankreich plant langfristig eine Reduzierung seines nuklearen Anteils an der Stromerzeugung auf 50 %. Die Kernenergie wird aber maßgeblich bleiben. Das aktuelle Entsorgungskonzept adressiert dabei die Aufgaben, die aus dem Betrieb der heutigen oder bereits stillgelegten Anlagen erwachsen, für zukünftige Aufgaben sind zusätzliche Entsorgungslösungen zu finden.

Kern der französischen Entsorgungsstrategie ist die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente. Vor diesem Hintergrund sind aktuell ausschließlich hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung zur geologischen Endlagerung vorgesehen, zusammen mit langlebigen mittelradioaktiven Abfällen. Mit dem geplanten Endlagervorhaben CIGÉO soll hierfür ein Endlager in absehbarer Zukunft bereitgestellt werden. Auszulegen ist das Endlager auf ein Volumen von 10.000 m<sup>3</sup> hoch radioaktiven Abfall und 70.000 m<sup>3</sup> langlebigen mittelradioaktiven Abfall. Frankreich plant derzeit folgerichtig keine langfristige Zwischenlagerung über einige hundert Jahre.

Die Option einer Langzeitzwischenlagerung an der Erdoberfläche wurde nichts desto trotz aber in früheren Diskussionsphasen untersucht. Dieser Prozess wurde 2006 mit der Entscheidung abgeschlossen, dass eine Langzeitzwischenlagerung keine in Frage kommende Option für die zukünftigen Planungen ist. Zwischenlagerung wird seither ausschließlich als Zwischenschritt auf dem Weg zu einer Endlagerung begriffen.

### **4.3.2 Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeitzwischenlagerung im Entsorgungskonzept**

Mit dem Abfallgesetz „Loi 91-1381 du décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs“ von 1991, auch Bataille Gesetz genannt, wurde nach Aufgabe eines früheren Entsorgungsprogramms im Wesentlichen die Standortsuche für ein Endlager erneut aufgenommen, dabei aber auch die Option einer Langzeitzwischenlagerung adressiert. Das Gesetz enthielt folgende Eckpunkte /4.3-1/:

- Durchführung eines Forschungsprogramms über 15 Jahre zu den drei Optionen:
  - Partitionierung und Transmutation (P+T) langlebiger Abfälle
  - Tiefe Endlagerung mittels Untertagelabore
  - Langzeitzwischenlagerung an der Erdoberfläche

- Entsprechend dem auf 15 Jahre angelegten Programm sollte 2006 ein Bericht zu den Ergebnissen vorgelegt werden, gefolgt von einer rechtlichen Festlegung zur weiteren Entsorgungsstrategie.
- Einbindung der Öffentlichkeit während des Vorhabens.

Die Aufsichtsbehörde "Autorité de Sûreté Nucléaire" (ASN) beurteilte die Forschungsergebnisse und kam 2006 zu dem Schluss /4.3-2/, dass weder P+T noch die langfristige Zwischenlagerung Entsorgungsalternativen sind. Lediglich die Endlagerung in geologischen Formationen wurde als geeignet bewertet.

Mit den Forschungsarbeiten der CEA und der Bewertung durch die ASN wurde eine langfristige Zwischenlagerung über 300 Jahre untersucht. Herausgearbeitet wurde, dass ein solches Zwischenlager regelmäßig bewertet werden müsste. Wissenschaftliche und technische Weiterentwicklungen müssten regelmäßig berücksichtigt und sowohl die Anlage als auch das Regelwerk an den jeweils neuesten Stand herangeführt werden, bis hin zum vollständigen Neubau. Als problematisch werden Wissensverlust oder Szenarien des Ausfalls einer Überwachung über Monate oder Jahre bewertet. Letztlich wird eine langfristige Zwischenlagerung als nicht akzeptable Belastung zukünftiger Generationen eingestuft. Nach dieser Bewertung wurde die Option einer geplanten Langzeitzwischenlagerung nicht weiter verfolgt /4.3-2/.

Noch in 2006 wurde das "Loi Bataille" durch das „Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs /4.3-3/ ersetzt. Mit diesem Gesetz wurde auch der Zeitrahmen für die Endlagerung sowie für zukünftig damit verbundene Forschungsaktivitäten festgelegt. Zwischenlagerung in der heute praktizierten Form und über überschaubare Zeiträume wird als notwendiger Schritt vor einer Endlagerung gesehen und in dieser Hinsicht weiter entwickelt und optimiert.

An der Bewertung der Langzeitzwischenlagerung hat sich in den Folgejahren nichts geändert. Sie wird nach wie vor als nicht Entsorgungsoption eingestuft /4.3-4/. Zukünftige Untersuchungen sollen darauf abzielen, die Zwischenlagerung optimal auf die Endlagerung auszurichten. Dabei ist vorgesehen den hoch radioaktiven Abfall für mindestens 60 Jahre zwischenzulagern. Dies dient einerseits der Abkühlung der Abfälle, andererseits ermöglicht es mehr Flexibilität bei Errichtung und Betrieb des Endlagers.

Das heute gültige Entsorgungskonzept sieht vor, dass abgebrannte Brennelemente zum überwiegenden Teil wiederaufgearbeitet werden. Ausnahme sind die MOX-Brennelemente, für die derzeit keine geeignete Aufbereitungstechnologie zur Verfügung steht. Abgebrannte MOX-Brennelemente gelten dennoch grundsätzlich als "wiederaufarbeitbar" und sollen daher zunächst gelagert und ggf. zu einem nicht definierten, späteren Zeitpunkt wiederaufgearbeitet werden, um den resultierenden Brennstoff in zukünftigen

Leistungsreaktoren ("Generation-IV-Reaktoren") verwenden zu können. Die Lagerdauer und der grundsätzliche Umgang mit abgebrannten MOX-Brennelementen werden also von der zukünftigen Entwicklung dieses Reaktortyps abhängig gemacht. Aktuell werden abgebrannte MOX-Brennelemente in La Hague gelagert.

Für die Endlagerung vorgesehen sind demzufolge zunächst ausschließlich die hoch radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Abgebrannte Brennelemente werden nach ihrem Anfall zunächst in den Nasslagern an den Kernkraftwerken und später im Nasslager der Wiederaufarbeitungsanlage (WAA) in La Hague zwischengelagert.

Nach der Wiederaufarbeitung ist die Zwischenlagerung der Wiederaufarbeitungsabfälle erforderlich. Die verglasten Abfälle aus der WAA werden derzeit in drei Anlagen in La Hague gelagert. Ein weiterer Ausbau ist bis 2018 geplant. Das französische Entsorgungskonzept sieht vor, diese hoch radioaktiven Abfälle gemeinsam mit langlebigen mittelradioaktiven Abfällen der tiefen geologischen Endlagerung zuzuführen. Nach derzeitiger Planung soll das diesbezügliche Endlager ab 2025 in eine erste (Pilot)-Betriebsphase eintreten.

#### **4.3.3 Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung**

Untersuchungen zur Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über Zeiträume bis zu 300 Jahren auf Basis des "Loi Bataille" wurden in den Jahren 1991 bis 2006 durch die französische Atomenergiekommission CEA (Commissariat à l'énergie atomique<sup>4</sup>) koordiniert. Dabei wurde eine Langzeitzwischenlagerung von bis zu 100 Jahren auf Basis vorhandener Technologien und Materialien als grundsätzlich machbar eingestuft /4.3-5/. Über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren seien solche Aussagen aber nicht mehr sicher zu treffen, da die Dauerhaftigkeit der Anlagen nicht zu gewährleisten sei. Eine längere Lagerung wäre daher nur durch umfangreiche Wartung und bedarfsweisen Neubau von Lagereinrichtungen zu gewährleisten /4.3-5/. Die Folge wäre eine nicht akzeptable Belastung nachfolgender Generationen.

Die Zwischenlagerung wird daher heute als reine Ergänzung zur Endlagerung begriffen, die sich in das Management hoch radioaktiver Abfälle einfügt. Eine Lagerdauer von 100 Jahren soll dabei nicht überschritten werden. Für diesen Zweck und die vorgesehene Dauer werden die vorhandenen Technologien als geeignet und die vorhandenen Zwischenlagereinrichtungen als ausreichend angesehen. Verglaste hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung französischer Brennelemente werden bis zur Endlagerung am Standort La Hague zwischengelagert. Die verschweißten Edelstahlkokillen werden in mit Inertgas gefüllte Lagerröhren eingestellt. Die Wärmeabfuhr erfolgt passiv über Luftkühlung nach dem Prinzip der Naturkonvektion.

---

<sup>4</sup> heute: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

#### **4.3.4 Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen**

Hinsichtlich einer Veränderung der französischen Gesellschaft innerhalb der kommenden Jahrhunderte und möglichen Rückwirkungen auf die Lagerung hoch radioaktiver Abfälle finden sich in der Literatur keine Angaben. Da letztlich eine Langzeitzwischenlagerung als nicht akzeptable Belastung zukünftiger Generationen angesehen und daher als Option verworfen wurde, ist es auch konsequent zu den Wechselwirkungen keine weitergehenden Betrachtungen anzustellen. Für die im Entsorgungskonzept avisierten Zeiträume wird das Risiko gesellschaftlicher Instabilitäten offenbar als gering angesehen. Mit dem Übergang zur Endlagerung entfällt die Notwendigkeit, Zwischenlager auf langfristige gesellschaftliche Veränderungen hin auszulegen, diese Aufgaben übernimmt folgerichtig das zukünftige Endlager.

#### **4.3.5 Anforderungen an die Anlagensicherheit**

Grundlage der nuklearen Entsorgung ist das Gesetz "2006-739 du 28 juin 2006" /4.3-3/, auch als Abfallgesetz bezeichnet. Neben der Definition der aktuellen Forschungsschwerpunkte enthält es auch Angaben zur Finanzierung der Entsorgung, zur Beteiligung der Öffentlichkeit und das Verbot, ausländische Abfälle in Frankreich zu entsorgen. Das Gesetz wird durch verschiedene Verordnungen untersetzt, in denen Anforderungen konkretisiert werden.

Relevant ist zudem die Umweltgesetzgebung, in der sicherheitsgerichtete Anforderungen an Genehmigungen enthalten sind. Auch dieses Gesetz wird mit einem Regelwerk unterlegt. Die Entsorgungsstrategien der kommenden Jahre werden in einem Nationalen Entsorgungsprogramm (PNGMDR) /4.3-9/ dargelegt. Den jeweils aktuellen Status des vorhandenen Abfallinventars wird von der ANDRA veröffentlicht ([www.andra.fr](http://www.andra.fr)).

Nuklearanlagen brauchen in Frankreich generell eine Genehmigung, in deren Rahmen die Sicherheit der Anlage nachzuweisen ist. Zudem findet mindestens alle 10 Jahre eine Sicherheitsüberprüfung statt, bei der nachgewiesen werden muss, dass die Anlage dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Konkrete Anforderungen an Auslegung, Konstruktion und Betrieb einer Anlage werden dann von der Aufsichtsbehörde ASN vorgegeben. Niedergelegt sind relevante Vorgehensweisen und technische Anforderungen in spezifischen technischen Regeln und in grundlegenden Sicherheitsregeln (Règles fondamentales de sûreté).

Mit /4.3-6/ hat die Andra 2012 einen Abschlussbericht vorgelegt, der im Hinblick auf die Zwischenlagerung verschiedene Prinzipien, Kriterien und technische Optionen der Zwischenlagerung beleuchtet. Diese Erkenntnisse sind in das Dekret 2013-1304 vom 27. Dezember 2013 /4.3-7/ eingeflossen, dass u. a. die Andra dazu verpflichtet konkrete

Empfehlungen für die Zwischenlagerung zu entwickeln. Diese Empfehlungen hat die Andra 2015 vorgelegt /4.3-8/.

#### **4.3.6 Finanzierungsmechanismen**

Die französische Umweltgesetzgebung legt fest, dass für die Entwicklung des Endlagers CIGÉO die Abfallerzeuger kostenbasiert Gebühren an Andra als Träger des Abfallmanagements abzuführen haben die diese für das Abfallmanagement mit dem Ziel der Endlagerung verwendet. Für Forschungsaufgaben der Andra existiert ein gesonderter Fond, in den die Abfallerzeuger über eine Steuer einzahlen. Entsprechende Regelungen finden sich in /4.3-3/.

Für die Erfüllung der finanziellen Verpflichtungen ist jeweils der Anlagenbetreiber verantwortlich. Der wesentliche Betreiber von nuklearen Anlagen in Frankreich ist Electricité de France (EDF). Zur Finanzierung von Entsorgung und Rückbau von Nuklearanlagen bildet EDF Rückstellungen aus dem laufenden Betrieb der Kernkraftwerke. Diese Rückstellungen werden bereits für laufende Entsorgungsaufgaben verwendet. Für die langfristigen Verpflichtungen wie die Endlagerung aber auch den KKW-Rückbau betreffend werden weitere Rückstellungen gebildet. Der Umfang dieser Rückstellungen betrug Ende 2013 ca. 21,7 Mrd. €. Als i. W. staatlich dominiertes Unternehmen werden die Rücklagen von EDF langfristig durch den Staat als Haupteigentümer abgesichert.

#### **4.3.7 Institutionelle und organisatorische Randbedingungen**

Der wesentliche Betreiber von nuklearen Anlagen in Frankreich ist die "Electricité de France" (EDF), die sich i. W. in Staatsbesitz befindet. Die Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague wird derzeit von Areva betrieben, einem ebenfalls mehrheitlich in Staatsbesitz befindlichen Konzern.

Wesentlicher behördlicher Akteur ist in Frankreich die unabhängige Aufsichtsbehörde "Autorité de Sureté Nucléaire" (ASN). Sie ist zuständig für Regulierung und Aufsicht der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes.

Für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist die "Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs" (Andra) verantwortlich. Sie ist von den Abfallerzeugern unabhängig und steht unter Aufsicht des Ministeriums für Energie, Forschung und Umwelt. Andra wurde im Zusammenhang mit dem "Loi Bataille" von 1991 umorganisiert und war zunächst für die Forschung zum Thema geologische Endlagerung verantwortlich. Ihr Aufgabengebiet hat sich mittlerweile erheblich erweitert z. B. generell auf Forschung und Entwicklung zu nuklearen Entsorgungsfragen und den Umgang mit radioaktiven

Abfällen, sowie zur Wahrnehmung von Aufgaben im Zusammenhang mit der Information der Öffentlichkeit.

Die französische Atomenergiekommission ist das "Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives" (CEA). Sie war für die Forschung zur Langzeitzwischenlagerung (300 Jahre) und zur Partitionierung und Transmutation verantwortlich. Die Aufgabe der Commission nationale d'évaluation (CNE) war es zunächst, die Forschungsergebnisse zwischen 1991 und 2006 zu bewerten. Sie wurde explizit zu diesem Zweck gebildet und wird heute rückblickend als "CNE1" bezeichnet. Die heutige "CNE2" bewertet die Forschungsergebnisse nach 2006, die sich auf die reversible geologische Endlagerung beziehen.

#### **4.4 Großbritannien**

##### **4.4.1 Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle**

In Großbritannien werden derzeit 16 Kernreaktoren zur Energieerzeugung betrieben, 29 Reaktoren befinden sich in der Stilllegung. Zur Behandlung abgebrannter Brennelemente wird die Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield betrieben. Neubauvorhaben sind in Vorbereitung, wurden aber noch nicht begonnen.

Aktuell wird das Inventar an abgebrannten Brennelementen mit ca. 5.300 tSM angegeben, hinzu kommen etwa 3.000 m<sup>3</sup> hoch radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Bis zum Betriebsende der älteren Kernkraftwerke und Aufarbeitung der dabei angefallenen abgebrannten Brennelemente werden weitere ca. 1.400 m<sup>3</sup> hoch radioaktiver Abfälle erwartet. Die abgebrannten Brennelemente aus der 40-jährigen Betriebszeit von Sizewell B, die nicht für die Wiederaufarbeitung vorgesehen sind, entsprechen prognostisch einer Menge von ca. 1.050 tSM.

##### **4.4.2 Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeit-Zwischenlagerung im Entsorgungskonzept**

Für die bis dato betriebenen älteren Kernkraftwerke ist die Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente die bevorzugte Option. Dies gilt für die jüngste Anlage, Sizewell B, sowie für zukünftige Kernkraftwerke nicht mehr uneingeschränkt: Auf Basis wirtschaftlicher Überlegungen soll hier die Zwischenlagerung und anschließende Endlagerung abgebrannter Brennelemente den Kern der Management-Strategie bilden, Wiederaufarbeitung stellt dann nur unter dem Vorbehalt wirtschaftlichen Nutzens einen Option dar, von der aber aktuell nicht ausgegangen wird. Diese Entscheidung obliegt, innerhalb der regulatorischen Anforderungen, den wirtschaftlichen Entscheidungen der Betreiber /4.4-1/. Insofern wird sich die Wiederaufarbeitung auf die Brennelemente der älteren Anlagen beschränken.

In Großbritannien werden abgebrannte Brennelemente derzeit überwiegend in Nasslagern bis zur Wiederaufarbeitung gelagert. Lediglich am KKW-Standort Wylfa gibt es Trockenlagerbereiche zur Einlagerung von Magnox-Brennelementen. Am Standort des jüngsten und größten britischen Kernkraftwerks Sizewell B im Südosten Englands befindet sich ein weiteres Trockenlager im Bau, das 2015 in Betrieb gehen und die weitgehend erschöpften Nasslagerkapazitäten ersetzen soll. Bis zum Jahr 2045 sollen alle am Standort angefallenen und noch anfallenden Brennelemente trocken gelagert werden /4.4-2/. Die abgebrannten Brennelemente sollen zwischengelagert werden, bis sie, nach derzeitiger Planung ungefähr in 2080, zu einem Endlager gebracht werden können. Der Transport der Behälter vom Trockenlager zum Endlager soll etwa weitere



20 Jahre dauern /4.4-2/. Daraus ergibt sich eine Betriebsdauer des Zwischenlagers von bis zu 85 Jahren. Ausgelegt ist das Lager für eine Lagerdauer von einhundert Jahren.

Ein tiefes geologisches Endlager wird als die beste Option für das Langzeit-Management von hoch radioaktiven Abfällen gesehen /4.4-1/. Die Zwischenlagerung ist demnach ein Teil dieses Langzeit-Managements. Sie stellt selbst keine Entsorgungslösung dar. Die Zwischenlagerung bietet aber eine zeitlich begrenzte sichere Umgebung für die Abfälle, bis diese endgelagert werden können.

#### **4.4.3 Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung**

Verglaste hoch radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung britischer Brennelemente werden am Standort Sellafield im sogenannten "Vitrified Product Store" zwischengelagert. Die verglaste Abfallform gilt als "geeignet zur Langzeitzwischenlagerung" /4.4-2/. Die verschweißten Edelstahlkokillen mit verglasten Abfällen werden zu zehnt in mit Inertgas gefüllte Lagerröhren ("storage channels") eingestellt. Die Wärmeabfuhr erfolgt passiv über Luftkühlung nach dem Prinzip der Naturkonvektion. Das Lager hat eine Kapazität von 8.000 Kokillen /4.4-3/.

Zur trockenen Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente am Standort Sizewell soll ein Gebäude errichtet werden, in welchem die abgebrannten Brennelemente in Beton-Metall-Behältern lagern. Das Gebäude hat eine geplante Betriebszeit von bis zu einhundert Jahren /4.4-4/. Das Behältersystem besteht aus einem austauschbaren, verschweißten, metallischen Mehrzweck-Behälter, welcher die Brennelemente in einer inerten Gasatmosphäre enthält, einer vertikal belüfteten Umverpackung, welche den Mehrzweck-Behälter während der Lagerung enthält und einem Transportbehälter, in den der Mehrzweck-Behälter während der Be- und Entladevorgängen verpackt wird /4.4-5/. Die Wärme wird über die Oberfläche der Behälter per Luftkühlung durch natürliche Konvektion abgeführt.

#### **4.4.4 Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen**

Nach /4.4-4/ wurden für die Umweltverträglichkeitsprüfung für das Trockenlager am Standort Sizewell zwar die derzeitige Situation bezüglich Menschen, Tiere, Pflanzen und andere Schutzgüter betrachtet und die Auswirkungen der Anlage auf die Schutzgüter bewertet, die mögliche Veränderung des derzeitigen Zustands über die vorgesehen Lagerdauer aber nicht. Auch die umgekehrte Sichtweise, inwieweit Veränderungen gesellschaftlicher Art den Betrieb des Zwischenlagers beeinträchtigen, wird nicht adressiert. Im Rahmen der Recherche gab es keine Hinweise darauf, dass für die Sicher-

heitsbetrachtungen der Lagerung über mehrere Dekaden gesellschaftliche Entwicklungen berücksichtigt werden müssen.

In den Leitlinien für die Sicherheit bei der Lagerung von abgebrannten Brennelemente /4.4-6/ sind Anforderungen an die Berücksichtigung zukünftiger Veränderungen formuliert. Demnach soll der Design- und Optimierungsprozess einer Anlage zur Lagerung von abgebrannten Brennelementen eine Gap-Analyse enthalten, bei der die vorhersehbaren künftigen Betriebsanforderungen und Anlagenänderungen berücksichtigt werden sollen. Hierunter fallen nach /4.4-6/ technische Aspekte wie die Verlängerung der Betriebsdauer, Weiterentwicklungen des Brennstoff-Designs oder die Anforderung, andere Abfallarten zu lagern. Die Berücksichtigung gesellschaftlicher Entwicklungen wird nicht gefordert.

#### **4.4.5 Anforderungen an die Anlagensicherheit**

Die britischen Leitlinien für die Sicherheit bei der Lagerung von abgebrannten Brennelemente /4.4-6/ gelten sowohl für die Nass- als auch für die Trockenlagerung.

Für die Lagerung von hoch radioaktiven Abfällen muss neben dem Sicherheitsbericht ein "Radioactive Waste Management Case" (RWMC) erstellt werden. Darin sollen die wesentlichen Aspekte der Langzeit-Sicherheit dargestellt werden. Der Genehmigungsinhaber muss die vorgesehene Betriebsdauer der Anlage darstellen und über diesen Zeitraum nachweisen, dass er hinreichende Maßnahmen zur Sicherheit der Anlage berücksichtigt hat bzw. ergreift. Dazu dienen verschiedene Designanforderungen, Anforderungen an den Betrieb und die Überwachung. So ist beispielsweise

- die kontinuierliche Möglichkeit der Inspektion des Inventars bezüglich seiner Integrität vorzusehen,
- ein robustes Wissensmanagement zu praktizieren und
- die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur auch für den Fall zu gewährleisten, dass andere Anlagen am Standort außer Betrieb genommen werden.

Design und Betrieb der Anlage sollen so weit wie möglich auf dem Prinzip der passiven Sicherheit basieren, d. h. dass aktive Sicherheitssysteme oder geplante menschliche Eingriffe soweit wie möglich zu minimieren sind.

#### **4.4.6 Finanzierungsmechanismen**

Auch in Großbritannien gilt grundsätzlich das Prinzip der Kostentragung durch den Abfallverursacher. 2005 wurde für die in Betrieb befindlichen Leistungsreaktoren ein neuer Finanzierungsmechanismus auf Basis eines Fonds erarbeitet, der Nuclear Liabilities

Fund (NLF). Der Betreiber ist verpflichtet, anhand eines Zeitplans regelmäßige Zahlungen in diesen Fond zu leisten. Aus dem Fond werden dann Mittel für den vorgesehenen Verwendungszweck ausbezahlt. Die Verwendung der Gelder wird durch die Aufsichtsbehörde kontrolliert. Damit soll sichergestellt werden, dass die Gelder zum einen nur für die vorgesehenen Zwecke eingesetzt werden und zum anderen, dass die Strategie des Betreibers mit der des britischen Staates übereinstimmt, der im Wesentlichen für die Kosten der stillgelegten Anlagen und des letzten noch in Betrieb befindlichen Magnox-Reaktors in Wylfa aufkommen muss. Die Finanzierung orientiert sich an den aktuellen Annahmen hinsichtlich der Zwischenlagerung und der Bereitstellung eines Endlagers in den 2080er Jahren.

#### **4.4.7 Institutionelle und organisatorische Randbedingungen**

Seit Ende 2006 ist die "Nuclear Decommissioning Authority" (NDA) für die Überwachung der Stilllegungsprojekte und die Implementierung der Endlagerung zuständig. Seit 2014 ist die "Radioactive Waste Management Ltd." (RWM) als Tochtergesellschaft der NDA für die Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen zuständig. Das "Office for Nuclear Regulation" (ONR) ist seit 2011 für alle Aspekte der Kernenergie, inkl. Sicherheitsfragen, verantwortlich.

Nach /4.4-6/ soll der Betreiber ein System zur Daten- und Informationsspeicherung entwickeln, das sämtliche Informationen zu den Abfällen enthält. Die wesentlichen Informationen müssen gegen jeden Verlust geschützt werden. Außerdem besteht die Anforderung, ein Markierungssystem zu entwickeln, so dass alle Abfälle zweifelsfrei zu jeder Zeit identifiziert werden können.

## **4.5 USA**

### **4.5.1 Überblick zur Kernenergienutzung und dem Aufkommen hoch radioaktiver Abfälle**

In den USA werden derzeit 99 zivile Kernreaktoren zur Stromerzeugung betrieben, 33 Reaktoren befinden sich in der Stilllegung, 5 gelten als in Bau befindlich.

Mit Stand Ende 2013 hat die USA 71.700 tSM an abgebrannten Brennelementen erzeugt /4.5-1/. Davon befinden sich 22.000 tSM in trockenen Zwischenlagern an KKW-Standorten. Die ersten Lagerbehälter wurden 1986 beladen. Ende 2013 befanden sich in den USA 66 nasse Zwischenlager und 61 trockene Zwischenlager an Kernkraftwerksstandorten in Betrieb. Sie werden von den Kernkraftwerksbetreibern betrieben. Weitere 32 nasse Zwischenlager und 8 trockene Zwischenlager befinden sich in staatlicher Hand.

Wiederaufarbeitung wird seit den frühen 70er Jahren im zivilen Sektor nicht mehr betrieben. Der Anteil hoch radioaktiver Abfälle aus früheren Aktivitäten zur Wiederaufarbeitung ist sehr klein. Auf diesen Abfall wird hier nicht weiter eingegangen.

### **4.5.2 Grundzüge der Politik zur nuklearen Entsorgung und Rolle einer Langzeitzwischenlagerung im Entsorgungskonzept**

Die USA strebt keine Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über Zeiträume von einigen hundert Jahren an. Das Entsorgungskonzept sieht vor, abgebrannte Brennelemente in einem geologischen Endlager zu entsorgen, die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente dient der Überbrückung bis zur Abgabe an ein annahmefähiges Endlager.

Ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle ist in den USA derzeit nicht vorhanden. Durch das Scheitern des Endlagerprojektes Yucca Mountain und der derzeit fehlenden Aussicht auf ein anderes geeignetes Endlager sind allerdings längere Zwischenlagerzeiten erforderlich und als Problemfeld erkannt worden. Ursprünglich ging die US-amerikanische Regierung von einer Annahme abgebrannter Brennelemente in einem Endlager ab 1998 aus /4.5-2/. Die nun tatsächlich erforderliche Zwischenlagerdauer ist hingegen in der aktuellen Situation unbestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Zwischenlagergenehmigungen, die befristet erteilt werden, ggf. mehrmals verlängert werden müssen bis ein Endlager zur Verfügung steht.

Die aufgrund der aktuellen Problemlage verlängerte Zwischenlagerdauer hat Konsequenzen hinsichtlich der Regulierung, der Organisation und dem Informationsbedarf zu Alterungseffekten. Die amerikanischen Behörden folgen dem durch Anpassung der Re-

gulation und durch Forschung im Hinblick auf Alterungseffekte und deren Management.

Im Regelwerk der NRC sind keine maximalen Lagerfristen für abgebrannte Brennelemente spezifiziert. NRC hat mehrfach betont, dass aus Sicht der Behörde eine Lagerung abgebrannter Brennelemente sowohl in Nasslagern als auch in Trockenlagern für mindestens 60 Jahre jenseits der genehmigten Betriebsdauer des zugehörigen Kernkraftwerks ohne signifikante Umwelteffekte möglich sei. Dieser 60-Jahres-Horizont im Anschluss an den Reaktorbetrieb wird als "short-term timeframe" bezeichnet und gilt als wahrscheinlichstes Szenario für die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente, verbunden mit der Erwartung, dass am Ende dieser Periode ein geologisches Endlager zur Verfügung steht. Da sich auf diese Weise Reaktorbetriebsphase und Zwischenlagerung addieren, rechnet NRC damit, dass am Ende dieser Periode ein Teil der abgebrannten Brennelemente zwischen 100 und 140 Jahre alt sein werden /4.5-3/.

Es werden allerdings keine Genehmigungen über diesen Zeitraum erteilt: Die Genehmigungen sind auf 40 Jahre befristet, die Option mehrfacher Verlängerung ist aber explizit vorgesehen, verbunden mit entsprechenden Reviews und Inspektionen sowie einem Prüfschwerpunkt im Bereich Alterungsmanagement.

Zusätzlich zu dieser "short-term timeframe" hat sich die NRC auf generischer Basis zusätzlich mit Fragen möglicher Umweltfolgen einer Langzeitperspektive ("long-term timeframe") und einer unbefristeten Perspektive "indefinite timeframe" beschäftigt.

Die Langzeitperspektive nimmt eine Lagerdauer von 160 Jahre nach Beendigung des Reaktorbetriebs in den Blick. Dabei wird angenommen, dass sämtliche Brennelemente in Trockenlagerung überführt werden. Gegen Ende dieser Periode wären einige Brennelemente zwischen 200 und 240 Jahren alt. Wesentliches Merkmal der "long-term timeframe" ist dabei der rechtzeitige und ggf. mehrfache Ersatz der kompletten Lageranlage (ISFSI) inklusive der Umverpackung der Brennelemente (Container) und der eigentlichen Lagerbehälter (Cask) sowie der Anlagen zur Behälterhandhabung.

Die unbefristete Perspektive wird grundsätzlich zwar als unrealistisch bezeichnet, dient aber der Untersuchung von Langzeiteffekten. Grundlage hierfür sind die Randbedingungen der Langzeitperspektive, ergänzt um die Annahme, dass der vollständige Ersatz aller Anlagenbestandteile in einer Frequenz von 100 Jahren wiederkehrt.

Die möglichen Umweltfolgen der drei betrachteten Zwischenlagerszenarien wurden in einem "Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel" (GEIS) betrachtet /4.5-5/. Sie werden in Summe als gering eingeschätzt (s. a. /4.5-3/, dort Tabelle 1 und 2).

### 4.5.3 Technisches Konzept zur (Langzeit-)Zwischenlagerung

Abgebrannte Brennelemente werden in den USA sowohl nass (Beckenlagerung unter Wasser) als auch trocken in luftgekühlten Zwischenlagereinrichtungen verschiedener Bauarten gelagert. Die Trockenlagerung gilt als die langfristig stabilere Lagerart. Bei Zubauten wegen Kapazitätsengpässen werden trockene Zwischenlagereinrichtungen daher bevorzugt und haben in den letzten Jahren einen deutlichen Zubau erfahren. Die technischen Anforderungen werden von der U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) vorgegeben.

Als verbreitetste Bauart für trockene Zwischenlager (als "ISFSI - Independent Spent Fuel Storage Installation" bezeichnet) wird das Konzept der "Dry Cask Storage" beschrieben /4.5-1/. Abgebrannte Brennelemente werden dabei in verschweißte und mit Inertgas beaufschlagte Metallbehälter ("Canister") eingebracht. Diese werden in Lagerbehälter ("Cask") bzw. Transport- und Lagerbehälter sowie in einer Kammer-/Bunkeranlage („vaults/bunker“) eingebracht, die der Abschirmung und dem Schutz vor äußeren Einflüssen dient. Die Wärmeabfuhr erfolgt passiv durch natürliche Konvektion. Diese Bunker sind modular aufgebaut und stehen ohne weitere Umhausung im Freien. "Dry Cask Storage" wird als "inhärent robust, massiv und hochgradig widerstandsfähig gegen Beschädigung" angesehen /4.5-3/.

Trockene Zwischenlager (ISFSI) werden für 40 Jahre genehmigt. Nach Ablauf der Genehmigung hat der Genehmigungsinhaber die Möglichkeit einer Erneuerung der Genehmigung. Diese erfordert u. a. die Bewertungen von Alterungseffekten, insbesondere an sicherheitsrelevanten technischen Komponenten. Als Leitfaden zur Genehmigungserneuerung dient der „Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance“ von 2011 /4.5-4/. Der Leitfaden widmet sich umfassend der Bewertung von Alterungseffekten. So sind beispielsweise konkrete Angaben zu Alterungseffekten bei Materialien und Komponenten aufgeführt.

Die USA sehen sich bei der Untersuchung und Bewertung technischer Alterungseffekte in einer Vorreiterrolle. Kenntnisse über Alterungseffekte spielen bereits bei den in den USA angestrebten kürzeren Zwischenlagerzeiten eine wichtige Rolle. Für die in diesem Bericht zu untersuchende Langzeitzwischenlagerung von einigen hundert Jahren sind diese Kenntnisse aber bei weitem noch nicht ausreichend. Zur Umsetzung von Langzeitzwischenlagerung sind neben Alterung Kenntnisse zu rechtzeitigem Ersatz, Reparaturkonzepte und Technologien zum Umgang mit Abfällen, die nicht mehr ihrem Ursprungszustand entsprechen, relevant. Beim Thema Langzeitzwischenlagerung würde auch in den USA mit ihrem fortgeschrittenem Kenntnisstand zur Alterung noch ein erheblicher Forschungsbedarf bestehen.

Insbesondere Alterungseffekte bei abgebrannten Brennelementen sind Gegenstand aktueller Forschung. NRC geht derzeit davon aus, dass abgebrannte Brennelemente in der "short-term timeframe" (Alter der Brennelemente zwischen 100 und 140 Jahren) nur einer minimalen Degradation unterliegen und diese weder die Lagerung noch den anschließenden Transport beeinträchtigt /4.5-3/. Brennelemente höheren Abbrands, darunter auch MOX-Brennelemente, werden im Vergleich zu Niedrig-Abbrand-Brennelementen in der zeitlichen Perspektive als instabiler angesehen. Zu Lagerfristen jenseits von 120 Jahren äußert sich die NRC nicht, hier wird auf den erkannten Forschungsbedarf verwiesen. Angenommen wird eine Standzeit des Systems von 100 Jahren mit anschließendem Ersatz, der auch das Umpacken der abgebrannten Brennelemente einschließt. Der tatsächliche Zeitpunkt des Ersatzes soll durch regelmäßige Überprüfung festgestellt werden, dabei werden auch längere Standzeiten nicht ausgeschlossen. Die Überprüfung der eingelagerten Brennelemente ist dabei an den Ersatzzeitraum gekoppelt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Öffnung der Behälter in einem abgeschirmten Gebäude stattfinden wird /4.5-5/.

#### **4.5.4 Behandlung von Aspekten gesellschaftlicher Entwicklungen**

Das derzeitige System der Zwischenlagerung geht davon aus, dass zunächst ein Zwischenlagerstandort gefunden wird, dort eine Genehmigung zur Zwischenlagerung über 40 Jahre beantragt und ausgesprochen wird und nach Ablauf der Frist im Bedarfsfall eine Verlängerung der Lagergenehmigung beantragt wird. Hierbei werden Alterungseffekte untersucht, es finden sich aber derzeit keine Hinweise darauf, wie sich über längere Zeiträume ändernde gesellschaftliche Randbedingungen auf Standortauswahl, Design oder Genehmigungsfähigkeit eines Zwischenlagers auswirken.

In /4.5-1/ wird berichtet, dass in den USA die Bedeutung von Fragen der Beteiligung zugenommen hat und dementsprechend in die Regulierung der USA Eingang fand und findet. Die bezieht sich auch (aber nicht nur) auf die Standortauswahl zukünftiger Zwischenlager und eines zukünftigen Endlagers. Eine entsprechende Empfehlung der Blue Ribbon Commission findet sich in der Entsorgungsstrategie des Department of Energy (DOE) wieder /4.5-6/. Mögliche Standortgemeinden werden als Partner angesehen, um deren Vertrauen gewonnen werden muss. Wie ein entsprechender konsensbasierter Standortauswahlprozess aussehen soll, steht noch nicht fest. Das DOE ist diesbezüglich noch dabei Informationen zu sammeln und Erfahrungen auszuwerten.

Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die Frage der gesellschaftlichen Entwicklung auch für bereits bestehende Zwischenlager spätestens im Rahmen von Genehmigungsverlängerungen mit geprüft wird, um abzugleichen, inwieweit sich der zum Zeitpunkt der Erstgenehmigung vorhandene gesellschaftliche Status Quo in der Standort-

umgebung verändert hat und ob dies die Genehmigungsfähigkeit einer verlängerten Zwischenlagerfrist beeinträchtigt. Hierfür gibt es derzeit kein zitierbares Beispiel.

Forschungsaktivitäten des DOE haben ihren Fokus darauf, zukünftige Entscheidungsträger zu befähigen, informierte Entscheidungen hinsichtlich des bestmöglichen Umgangs mit den zwischengelagerten Abfällen zu treffen. Zudem sollen sie die Machbarkeit hierzu erforderlicher Technologien dokumentieren.

Eine von vorne herein langfristige Betrachtung über mehrere Generationen ist in dem praktizierten Verfahren mit befristeter Genehmigung und Genehmigungsverlängerung jedenfalls nicht angelegt. In /4.5-5/ werden soziökonomische Aspekte<sup>5</sup> als Effekte in Bezug auf die drei dort in den Blick genommene Zwischenlagerfristen zwar betrachtet, der Einfluss der Zwischenlagerung auf diese Aspekte aber als gering eingestuft. Die umgekehrte Sichtweise, inwieweit gesellschaftliche Veränderungen die Integrität der Zwischenlagerung beeinträchtigen, wird nicht hinterfragt.

#### **4.5.5 Anforderungen an die Anlagensicherheit**

Der Genehmigungsinhaber muss die Sicherheit seiner Anlage mit einer Sicherheitsbewertung gegenüber der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde NRC nachweisen, die hierfür auch Anforderungen formuliert. Der Genehmigungsinhaber erstattet gegenüber NRC regelmäßig Bericht. Die Sicherheitsbewertung muss immer dann aktualisiert werden, wenn neue sicherheitsrelevante Erkenntnisse vorliegen, z. B. in Bezug auf den Verzehr von Sicherheitsmargen. Turnusmäßig muss die der Bewertung zugrunde liegende Sicherheitsanalyse des Zwischenlagers aktualisiert werden.

Hinsichtlich einer verlängerten Zwischenlagerdauer sehen die Behörden weiteren Forschungsbedarf insbesondere zu technischen Alterungseffekten. Neben dem grundsätzlichen Bedarf an einer fortgesetzten Endlagerforschung wird Forschungsbedarf außerdem hinsichtlich höherer Abbrände des Kernbrennstoffs sowie der Transportfähigkeit im Anschluss an die Zwischenlagerung gesehen. Hinsichtlich der Zwischenlagerung ist das internationale Forschungsprogramm "Extended Storage Collaboration Program (ESCP)" von Bedeutung, das vom Electric Power Research Institute (EPRI), der Forschungsinstitution der amerikanischen Kernenergiebetreiber, koordiniert wird. Deutschland ist mit der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) in diesem Forschungsprogramm vertreten.

Im "Extended Storage Collaboration Program International Subcommittee Report" von 2012 /4.5-7/ wurden Kenntnislücken zu technischen Alterungseffekten identifiziert. Der

---

<sup>5</sup> Definition aus /NRC 2014b/: "Regional social, economic, and demographic conditions, including employment, taxes, public services, housing demand, and traffic"



Bedarf, diese Effekte weiter zu untersuchen und die Kenntnislücken zu schließen, wird als besonders hoch eingeschätzt. Die USA strebt die Weiterführung und ggf. die Intensivierung derartiger Forschungsvorhaben an /4.5-1/, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Anforderungen an eine längerfristige Zwischenlagerung.

#### **4.5.6 Finanzierungsmechanismen**

Zur Finanzierung von Rückbau, Störfallsanierung etc. bei Nuklearanlagen gibt es konkrete staatliche Vorgaben, die durch den Genehmigungsinhaber zu erfüllen sind. Der Genehmigungsinhaber ist darin frei, wie er die Vorgaben erfüllt, z. B. über Fondslösungen, Bürgschaften, vertragliche Verpflichtungen oder Kombinationen daraus. Der überwiegende Teil der Finanzierung wird aber über Fondslösungen (Trust Funds) sichergestellt /4.5-1/.

Hinsichtlich der Endlagerung bildet das Nuclear Waste Policy Act von 1982 das Rahmengesetzeswerk. Das Gesetz sieht vor, dass die Regierung mit den KKW Betreibern Verträge eingeht, die festlegen, dass gegen Gebühren, die der Betreiber bezahlt, die Regierung die Verantwortung für die Endlagerung der abgebrannten Brennelemente übernimmt. Mit den Gebühren soll sichergestellt werden, dass die Kosten für die Endlagerung durch den Betreiber gedeckt werden. Gemäß /4.5-6/ werden jährlich rund \$ 750 Millionen über Gebühren eingenommen und in den staatlichen "Nuclear Waste Fund" eingezahlt. Die Regierung hat allerdings ihren Teil des Vertrages, nämlich ab 1998 abgebrannte Brennelemente anzunehmen, bis dato nicht einhalten können.

Nach entsprechenden Rechtsstreitigkeiten wird der Regierung nun ein teilweiser Vertragsbruch vorgeworfen. Sie muss seither die Kosten für die Zwischenlagerung an den KKW Standorten tragen. Die Kosten werden über den "Judgment Fund" der US-Regierung beglichen. Damit werden die Kosten für die verlängerte Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente derzeit im Wesentlichen durch den Staat erbracht /4.5-6/.

In /4.5-6/ wird darüber hinaus dargelegt, dass die Fond-Lösung gemäß /4.5-2/ nicht mehr dem aktuellen Bedarf entspricht. Eine Reform des Systems wird deshalb angestrebt. Angaben, wie eine sehr langfristige Finanzierung organisiert werden soll, gibt es derzeit keine. Aufgrund der finanziellen Verpflichtung für die Zwischenlagerung ist die Regierung zudem an einer zügigen Umsetzung einer Endlagerlösung interessiert.

#### **4.5.7 Institutionelle und organisatorische Randbedingungen**

Nach dem Scheitern der Endlagerprojekts Yucca Mountain wurde 2010 die "Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future" (BRC) 2010 beauftragt, die nukleare Entsorgung auf den Prüfstand zu stellen. Der entsprechende Bericht erschien im Janu-

ar 2012. Als Konsequenz auf die darin enthaltenen Empfehlungen veröffentlichte das Department of Energy (DOE) im Januar 2013 ihre „Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste“/4.5-6/.

Die Strategie sieht als nächste Schritte vor:

- Die Inbetriebnahme eines zentralen ("Pilot")-Zwischenlagers in 2021, das die abgebrannten Brennelemente stillgelegter Kernkraftwerke aufnehmen soll.
- Die Inbetriebnahme eines größeren zentralen Zwischenlagers in 2025. Dieses staatliche Zwischenlager soll dazu dienen, die gesetzlichen Verpflichtungen der Regierung aus dem NWPA 1982 zur Annahme abgebrannter Brennelemente zumindest teilweise zu erfüllen und damit die abgebrannten Brennelemente in staatliche Obhut zu nehmen.
- Hinsichtlich der Standortfestlegung und Charakterisierung der Endlagerung sollen in den nächsten 10 Jahren Fortschritte erzielt werden. Ziel ist die Verfügbarkeit eines geologischen Endlagers bis 2048.

Zur Umsetzung der Strategie muss die Gesetzgebung angepasst werden. Es sind Anforderungen erforderlich für eine konsensbasierte Standortauswahl, für eine reformierte Finanzierung und für die Einrichtung einer neuen unabhängigen Organisation, die die Strategie umsetzt. Gemäß /4.5-1/ von 2014 ist dieser Prozess im Gange.

Das Strategiepapier /4.5-6/ sieht in der Umsetzung der BRC Empfehlung eines konsensbasierten Standortauswahlprozesses derzeit praktisch nur die Möglichkeit, dass sich Gemeinden freiwillig melden. Tatsächlich haben sich mittlerweile die Staaten Texas und New Mexiko als potenzielle Standortstaaten für das befristet zu betreibende Pilot-Zwischenlager angeboten /4.5-8/. Beide Staaten sind daran interessiert, ihr nukleares Engagement auszubauen und haben für das Zwischenlager konkrete Konzepte vorgelegt. Beide Staaten haben aber auch anklingen lassen, dass sie dann nicht mehr in die Endlagersuche einbezogen werden wollen.

## 5 Zusammenfassung

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe des Deutschen Bundestages befasst sich in ihrer Arbeitsgruppe 3 (Gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen) u. a. mit Fragen einer möglichen alternativen "Lagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle über einige hundert Jahre als Form der Entsorgung". Der vorliegende Bericht gibt daher eine umfassende Darstellung, Ableitung und Würdigung der mit einer Langzeitzwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfällen über einige hundert Jahre verbundenen technischen und nichttechnischen Herausforderungen und Erfordernissen.

Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre ist eine grundsätzlich denkbare Strategie zum Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, die einer bewussten Entscheidung und ihrer Begründung bedarf. Langzeitzwischenlagerung in dem hier diskutierten Kontext bedeutet, dass in absehbarer Zukunft keine Entscheidung über den endgültigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen getroffen wird. Langzeitzwischenlagerung ist keine Form der endgültigen Entsorgung, sondern vielmehr das Verschieben der Endlagerung in eine entferntere Zukunft. Ein unbefristetes „Hütekonzep“ ist daher nicht Gegenstand der Betrachtung.

### Grundannahmen

Ausgehend von einer trockenen Lagerung in den heute verwendeten Transport- und Lagerbehältern werden die langfristigen Implikationen einer Zwischenlagerung über einige hundert Jahre betrachtet. Als geplanter Zustand wäre das Gesamtsystem eines Langzeitzwischenlagers (LZZL) auf wahrscheinliche Entwicklungen während einiger hundert Jahre auszulegen. Die Schutzziele wären dabei mit den heutigen identisch:

- Der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe
- Die sichere Abfuhr der Zerfallswärme
- Die sichere Einhaltung der Unterkritikalität
- Die Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, die Begrenzung und die Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung

Als Ausführungsoptionen werden

1. die Weiternutzung von bestehenden Zwischenlagern,
2. der Neubau von einem oder mehreren übertägigen LZZL sowie
3. der Neubau von einem oder mehreren LZZL in einer untertägigen, oberflächennahen Ausführung

betrachtet.

Die technischen Randbedingungen einer Langzeitzwischenlagerung sind aus heutiger Sicht zwar vollständig beschreibbar, deren langfristige Entwicklung über Zeiträume von einigen Jahrhunderten ist aber nur eingeschränkt prognostizierbar und mit relevanten Unsicherheiten verbunden. Dies gilt in gleichem Maße für das Verhalten technischer Komponenten. Außerdem werden einige Aspekte gesellschaftlichen Wandels (z. B. Atomausstieg und Demografie) Herausforderungen für den Erhalt eines LZZL bilden. Auf lange Sicht sind auch kriegerische Auseinandersetzungen auslegungsrelevant. Ferner werden einige Aspekte des zu erwartenden Klimawandels (z. B. Starkniederschlagsereignisse) zu berücksichtigen sein.

### Bauanlagen

Hinsichtlich der Robustheit wäre ein LZZL so auszulegen, dass selbst bei temporärem Ausfall vorgesehener sicherungs- bzw. sicherheitstechnischer Maßnahmen die Funktionalität des Gebäudes bestehen bleibt. Für die Auslegung der baulichen Anlagen des LZZL sind seitens der Behörde Anforderungen bzgl. der Dauerhaftigkeit zu definieren und deren technische Umsetzung zu erarbeiten. Darüber hinaus wäre ein wirksames, auf die lange Nutzungsdauer abgestimmtes Alterungsmanagement für die Bauwerke zu installieren, in dem Bauwerksschäden festgestellt, dokumentiert und verfolgt werden. Darauf aufbauend wären Instandsetzungsmaßnahmen zu planen und durchzuführen. Grundsätzlich kann dabei auch ein Neubau der Gebäude erforderlich werden.

Für die Auslegung von Baustrukturen gegen Einwirkungen von Außen müssen regulatorische Grundlagen geschaffen werden, die trotz der zunehmenden Prognoseunsicherheiten über einige hundert Jahre die Art und Höhe der standortbezogenen Einwirkungen von Außen sowie deren zulässige statistische Eintrittshäufigkeit festlegen. Auslegungsreserven können die Robustheit gegenüber zukünftig relevanten äußeren Einwirkungen verbessern. Da die Prognose der Einwirkungen von Außen aber nicht abdeckend für einige hundert Jahre erfolgen kann, sind regulatorische Rahmenbedingungen erforderlich, mit denen während der Betriebszeit des LZZL die sicherheitstechnischen Auswirkungen der geänderten Einwirkungen von Außen überprüft und ggf. Nachrüstmaßnahmen realisiert werden können.

Alle Ausführungsoptionen zur Langzeitzwischenlagerung weisen sowohl Vor- als auch Nachteile gegenüber den jeweils anderen Optionen auf. Die Nutzung der bestehenden Zwischenlager hat dabei den grundsätzlichen Nachteil, dass sie nicht im Hinblick auf Betriebszeiten von einigen hundert Jahren hin ausgelegt wurden. Sie weisen daher einen Mangel an Flexibilität gegenüber Lastannahmen auf, die aufgrund der langen Lagerzeit deutlich über die heutigen Annahmen hinausgehen, oder die auf zusätzlich zu berücksichtigenden Einwirkungen beruhen. Einzelne Aspekte wären daher immer

standortspezifisch zu untersuchen und im Hinblick auf eine mehrhundertjährige Betriebszeit zu bewerten. Bei Neubauten könnten dem gegenüber im Rahmen der Auslegung die erforderlichen Anforderungen einschließlich Reserven eingeplant werden. Das dazu notwendige technische Regelwerk und der regulatorische Rahmen wären noch zu entwickeln.

Übertägige LZZL böten gegenüber untertägigen, oberflächennahen Bauwerken mit Ausnahme von Tunnellösungen Vorteile hinsichtlich des Schutzes gegen Überflutungen. Die erforderlichen Zuwegungen können gegenüber untertägigen, oberflächennahen LZZL einfacher gestaltet werden. Instandsetzungsmaßnahmen von Außen sind wegen der Zugänglichkeit der Baustruktur mit weniger Aufwand verbunden. Untertägige, oberflächennahe LZZL und Tunnellösungen bieten gegenüber übertägigen Lagern Vorteile hinsichtlich des Schutzes gegen Einwirkungen Dritter und gegen zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von Außen. Mögliche Aufpralllasten können durch Erdüberdeckungen bzw. Anschüttungen gedämpft werden.

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonstrukturen kann zwar bereits heute durch geeignete Maßnahmen wie Auswahl geeigneter Betonrezepturen, Vorsehen einer vergrößerten Betonüberdeckung und Aufbringung von Schutzschichten gegenüber üblichen Betonbauwerken erhöht werden. Da aber keine Erfahrungen über das Alterungsverhalten von Stahlbeton über Zeiträume von einigen hundert Jahren vorliegen, ist davon auszugehen, dass im Laufe der Nutzungsdauer Sanierungen der Betonstrukturen notwendig werden.

### Technische Einrichtungen

Unabhängig von der jeweils betrachteten Ausführungsoption eines Lagers müssen Handhabungseinrichtungen (Krananlagen, Flurförderfahrzeuge o. ä) für die Ein- und Auslagerung der TLB vorhanden sein und im Hinblick auf ggf. erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an den TLB während des Zeitraums einer Zwischenlagerung über einige hundert Jahre der Langzeitzwischenlagerung betriebsbereit zur Verfügung stehen. Um den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars in den Lagerbehältern während der Langzeitzwischenlagerung sicherzustellen, ist nach derzeitigem Kenntnisstand zu unterstellen, dass an den Lagerbehältern Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen sind, die insbesondere auch das Dichtungssystem betreffen. Demzufolge ist eine Behälterwartungsstation mit geeignetem Equipment für diese Arbeiten vorzuhalten. Für Instandsetzungsmaßnahmen des Primärdeckeldichtungssystems muss eine Heiße Zelle mit entsprechendem Handhabungsequipment vorhanden sein. Die Heiße Zelle ist derart zu konzipieren, dass ein Umladen des Inventars in einen zweiten Lagerbehälter erfolgen kann. Darüber hinaus ist die dauerhafte Verfügbarkeit der Komponenten des Dichtungssystems sicherzustellen.

Zum Nachweis des sicheren Einschlusses des radioaktiven Inventars ist die Dichtheit der Lagerbehälter mit Hilfe eines Behälterüberwachungssystems über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung zu überwachen. Für den Betrieb des Lagers und der Lager-einrichtungen ist langfristig die Energieversorgung sicherzustellen.

Im Hinblick auf die Langzeiteignung der technischen Einrichtungen ist festzustellen, dass die Stahlbauteile und auch die Maschinenbauteile grundsätzlich für das während der Langzeitzwischenlagerung zu erwartende Beanspruchungsgeschehen ausgelegt werden könnten. Allerdings wird die Langzeiteignung der technischen Einrichtungen durch andere Effekte wie z. B. Alterung des Korrosionsschutzes, Alterung von Betriebsstoffen, Alterung von Kunststoffteilen, Isolierungen, Schlauchleitungen und elektronischen Bauteilen und Baugruppen beeinträchtigt. Aufgrund dieser Effekte ist es notwendig, für den Erhalt der Betriebsbereitschaft der technischen Einrichtungen ein Wartungs- und Instandhaltungskonzept zu entwickeln, im Rahmen dessen die nicht länger zu verwendenden Bauteile bei Erfordernis getauscht werden. Eine Ersatzteilbevorratung für die gesamte Dauer der Langzeitzwischenlagerung ist dabei allein deswegen nicht realisierbar, da ein Großteil der Ersatzteile auch dann einer Alterung unterliegt, wenn die Teile nicht genutzt werden. Daher besteht das Erfordernis, diejenigen Bauteile und Baugruppen, die einer Alterung unterliegen, über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung nachzufertigen.

Aufgrund des sich während der Langzeitzwischenlagerung verändernden Stands der Technik ist davon auszugehen, dass andere Anforderungen an die Einrichtungen zu Nachrüstmaßnahmen führen und ggf. einen Kompletttausch erforderlich machen. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass das für die Langzeitzwischenlagerung vorzusehende Lagerkonzept die Option auf einen Kompletttausch der technischen Einrichtungen beinhalten müsste.

### Behälter und Inventare

Für eine Langzeitzwischenlagerung wäre eine erneute Betrachtung der Inventare und der Behälter unter Berücksichtigung des langen Lagerzeitraums erforderlich. Eine Langzeitzwischenlagerung würde einen späteren Transport der Behälter und eine Handhabung der Inventare erfordern. Hierzu wären die Integrität und Handhabbarkeit der Inventare eine wichtige Voraussetzung.

Die heute zu diesem Zweck angewandten Kriterien wären an sich und insbesondere im Hinblick auf die bei einer Langzeitzwischenlagerung anzusetzenden thermischen Randbedingungen zu überprüfen. In der derzeitigen Nachweisführung zur Sicherstellung der Integrität des Inventars sind einige Aspekte zum Teil ausgeschlossen, wie z. B. chemische Interaktionen, Versprödungsverhalten der Inventare und Hybrid-Reorientierung.

Diese wären für lange Lagerzeiträume neu zu analysieren und wiederkehrend über die Lagerzeit zu bewerten.

Des Weiteren wären die heute verwendeten Analysemethoden zur Sicherstellung der Inventarintegrität auf ihre Eignung hin für Aussagen zur Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre zu überprüfen und ggf. neue Bewertungsmethoden zu entwickeln. Die Dokumentation der Inventare und der Behälter müssten so umfassend sein, dass auch nach längerer Zeit eine grundlegende Bewertung mit Basisdaten möglich wäre. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist die Speicherung und das Auffinden der Daten sowie der Erhalt der Lesbarkeit. Diese wäre über Generationen hinweg sicherzustellen.

Aus heutiger Sicht wäre bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung zu unterstellen, dass die Anforderungen an die Integrität und Handhabbarkeit der Brennelemente nicht über den gesamten geplanten Lagerzeitraum aufrechterhalten werden können. Es wären daher auch Konzepte vorzusehen, z. B. die Brennelemente neu zu verpacken, wenn Untersuchungen Hinweise auf unerwünschte Degradationen geben.

### Anlagensicherung

Zur Gewährleistung der Schutzziele der Anlagensicherung wären bei dem Betrieb eines LZZLs neben baulichen und sonstigen technischen Sicherungseinrichtungen auch Sicherungspersonal oder staatliche Einsatzkräfte erforderlich. Zur Sicherung gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter wären dabei mindestens die gleichen technischen Einrichtungen und Systeme erforderlich, die hierzu bei der derzeitigen Zwischenlagerung eingesetzt werden. Dies umfasst neben passiven Einrichtungen (bauliche Sicherungseinrichtungen, z. B. verstärkte Wände) auch aktive Systeme (z. B. elektronische Überwachungseinrichtungen). Zusätzlich könnte der Einsatz militärischer Waffen aufgrund von staatlichen Konflikten bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung nicht ausgeschlossen werden und müsste bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Für die Planung der Anlagensicherungsmaßnahmen für ein LZZL wären also spezifische, von heutigen Annahmen ggf. abweichende Lastannahmen festzulegen, in denen auf der Grundlage der Erkenntnisse staatlicher Behörden die zu unterstellenden Tatmuster, Auslegungstäter, Hilfsmittel und das Tätervorgehen dargestellt werden, für die die Sicherungsmaßnahmen auszulegen sind. Diese Lastannahmen wären in regelmäßigen Abständen und außerzyklisch bei Feststellung des Erfordernisses durch die zuständigen Behörden zu evaluieren. Eine regelmäßige Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen wäre notwendig, damit auch zukünftig bei der Annahme veränderter Lastannahmen die Einhaltung der Schutzziele der Anlagensicherung bei Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter gewährleistet ist. Ob langfristig eine Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen technisch möglich ist, so dass auch Angriffe mit verbesserten

oder neuartigen Tat- und Hilfsmitteln im ausreichenden Maße beherrscht werden können, kann nicht prognostiziert werden.

### Nichttechnische Einflussgrößen

Eine heute zu treffende Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung über einige Jahrhunderte wäre mit dem Eingeständnis verbunden, dass unter den heutigen Sicherheitsanforderungen, der heutigen Risikowahrnehmung und den heutigen gesellschaftlichen Randbedingungen keine Lösung für den dauerhaften Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen gefunden wurde, und dass die hiermit verbundenen Entscheidungen deshalb von zukünftigen Generationen getroffen werden müssten. Vor diesem Hintergrund sind Randbedingungen, bzw. deren mögliche Änderung, in den Blick zu nehmen, die über die rein technische Machbarkeit einer sicheren Zwischenlagerung hinausgehen, sondern vielmehr die Fähigkeit einer Gesellschaft beeinflussen, die mit einer Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle verbundenen Aufgaben dauerhaft zu erfüllen.

Der hohe Spezialisierungsgrad hinsichtlich der Behältertechnologie, die angestrebte Wartungsarmut und die nach Beendigung der Kernenergienutzung fehlende Inlandsnachfrage können dazu führen, dass ein Erhalt der erforderlichen Kompetenzen bereits in wenigen Jahrzehnten nicht mehr ohne weiteres vorausgesetzt werden kann. Ähnliches gilt für die Fähigkeit zum Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen, sei es im Rahmen von Behälterreparaturen oder in Zusammenhang mit den auf eine Langzeitzwischenlagerung folgenden Entsorgungsschritten bis hin zur Realisierung der Endlagerung. Auch die Verfügbarkeit qualifizierten technischen, wissenschaftlichen und administrativen Personals für eine Nischen-Technologie wie die Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle kann über einen Zeitraum von einigen hundert Jahren nicht als sicher gelten. Mit dem Verlust von Know-how können Einbußen an der Qualität im Umgang mit den Abfällen einhergehen. Es wird daher eine Herausforderung sein, derartige Kompetenzen in der erforderlichen Qualität über einige hundert Jahre aufrecht zu erhalten.

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

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



Die Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über einige hundert Jahre, unter Verzicht auf ein aktives Verfahren mit dem Ziel der Endlagerung, wäre unter regulatorischen Gesichtspunkten mit dem heutigen nationalen und europäischen Rechtsrahmen nicht kompatibel. Der Nachweis der Erfüllung der heutigen atomgesetzlichen Genehmigungsvoraussetzungen wird für ein mehrhundertjähriges Vorhaben nach heutigen Maßstäben nicht zu erbringen sein. Eine potenzielle Entscheidung in dieser Richtung müsste also eine weitgehende Überarbeitung der atomgesetzlich geregelten Verfahrens- und Verwaltungsgrundlagen inklusive des untergesetzlichen Regelwerkes nach sich ziehen, die auch eine grundsätzliche Neuorientierung der Sicherheitsphilosophie im Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen umfasst.

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

Für die Genehmigung und deren Aufrechterhaltung wird es neuer Konzepte bedürfen, die geeignet sind, mit Genehmigungsvorbehalten umzugehen, die sich aus den über den langen Zeitraum nicht prognostizierbaren Einflüssen auf das Sicherheits- und Sicherungskonzept ergeben.

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

### Zeitbedarf

Unabhängig von der gewählten Ausführungsoption des Langzeitzwischenlagers lässt sich auf Basis der bisherigen Erfahrungen aus nationalen Zwischenlager-Projekten lediglich der erforderliche Zeitbedarf für die Zeiträume von der Planungsphase bis zur In-

betriebsnahme konservativ mit etwa 20 – 25 Jahren abschätzen. Nicht quantifizierbar ist jedoch der vorlaufende Prozess des gesellschaftlichen und politischen Diskurses, der zunächst zu einem Konsens für die Langzeitzwischenlagerung führen muss. Insofern ist schon der Zeitpunkt des Beginns eines formalen Verfahrens mit dem Ziel der Langzeitzwischenlagerung nicht absehbar. Damit ist auch der vollständige Zeitbedarf bis zur Inbetriebnahme eines LZL derzeit nicht quantifizierbar. Unter den derzeit gültigen genehmigungsrechtlichen Randbedingungen ist davon auszugehen, dass die Inbetriebnahme eines Langzeitzwischenlagers nicht mehr während der derzeitigen Laufzeit der bestehenden Zwischenlager möglich wäre.

### Langzeitzwischenlagerung in ausgewählten Ländern

In keinem der zum Vergleich betrachteten Staaten (NL, F, GB, USA) wird eine Langzeitzwischenlagerung als Form der Entsorgung angesehen. Unisono wird immer wieder darauf verwiesen, dass am Ende der Zwischenlagerung ein Endlager zur Verfügung stehen muss.

In den Niederlanden wird davon ausgegangen, dass innerhalb der kommenden hundert Jahre (bzw. bis etwa 2130) eine Endlagerlösung gefunden wird, wobei offen bleibt, ob diese ein nationales Endlager oder eine Beteiligung an einem internationalen Endlager sein soll. Die Entscheidung über den endgültigen Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen wird bewusst an die nachfolgenden Generationen weitergegeben, zusammen mit den bis dahin in einem Fonds für die Entsorgung angesparten Finanzmitteln.

Frankreich hat nach Prüfung der Möglichkeiten einer Langzeitzwischenlagerung entschieden, dass eine geplante Zwischenlagerung über einen Zeitraum mehr als 100 Jahren als nicht akzeptable Belastung zukünftiger Generationen keinen gangbaren Weg darstellt. Seither wird das Endlagervorhaben CIGÉO vorangetrieben und hierauf das Management hoch radioaktiver Abfälle ausgerichtet.

Großbritannien hat bei der Suche nach einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle bis dato keine konkreten Fortschritte erzielt, richtet sich hinsichtlich der Zwischenlagerung deswegen aber nicht auf unbefristete Lagerdauern ein, sondern plant eine Zwischenlagerung bis etwa 2080, bei einer Auslegung, zumindest neuerer Zwischenlager, für einen Betriebszeitraum von ca. 100 Jahren.

In den USA ist nach dem Scheitern des Endlagerprojekts Yucca Mountain die tatsächlich erforderliche Lagerdauer für hoch radioaktive Abfälle unbestimmt. Allen Szenarien zur Zwischenlagerung gemeinsam ist die Einschätzung, dass die technischen Anlagen in einem Turnus von 100 Jahren vollständig erneuert werden müssen. Bis dahin gilt die heute verfügbare Technik der trockenen Zwischenlagerung als sicher und robust. Darü-

ber hinaus wird insbesondere Alterungseffekte bei abgebrannten Brennelementen als relevanter Aspekt identifiziert, der weiterer Forschung bedarf.

Aus den Beispielen der betrachteten Staaten kann festgehalten werden, dass international eine Langzeitzwischenlagerung über mehrere Jahrhunderte in den Entsorgungskonzepten keine Rolle spielt, und dass grundsätzlich am Ende auch einer längeren Zwischenlagerperiode die geologische Endlagerung angestrebt wird. Lagerzeiträume in der Größenordnung von einhundert Jahren werden als unkritisch und mit heutiger Technik bewältigbar angesehen. Anstelle einer Auslegung über einige hundert Jahre wird eine ggf. mehrfache Erneuerung der Anlagen ins Auge gefasst. Alterungs-Management wird zum wichtigen Bestandteil des Betriebs, die Möglichkeit, hoch radioaktive Abfälle auch nach längeren Zeiträumen noch behandeln zu können, wird als Herausforderung und Forschungsfeld begriffen. Die Übernahme der hoch radioaktiven Abfälle in staatliche Obhut ist bei längeren Zwischenlagerfristen in allen betrachteten Staaten de Facto der Fall. Mögliche gesellschaftliche Veränderungen und ihre Rückwirkungen auf die Zwischenlager werden allerdings weitgehend ausgeblendet.

**6 Literatur**

- /2.1-1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit  
Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter  
Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)  
August 2015
- /2.1-2/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe  
Arbeitsgruppe 3, Wortprotokoll der 5. Sitzung am 27. Februar 2015
- /2.2-1/ GRS, BGR, DBEtec: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für  
eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW - ISIBEL, Arbeitspa-  
ket 10: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz, Braun-  
schweig, Hannover, Peine 2008
- /2.2-2/ Herwig Birg: „Die demographische Zeitenwende - Der Bevölkerungsrückgang  
in Deutschland und Europa“ C.H.Beck Verlag
- /2.2-3/ Bundesministerium des Innern: Bericht der Bundesregierung zur demografi-  
schen Lage und zukünftigen Entwicklung des Landes - Demografiebericht;  
Berlin 2011
- /2.2-4/ Deutsches Demografie Netzwerk e.V.: Dossier: Fachkräftesicherung -  
Deutschland droht ein Fachkräftemangel, <http://demographie-netzwerk.de>
- /2.2-5/ United Nations Department of Economic and Social Affairs: World Population  
Prospects - The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables; New  
York 2015
- /2.2-6/ Erwerbsbevölkerung nach Altersgruppen, 1950-2060; Demografieportal des  
Bundes und der Länder, <https://www.demografie-portal.de>
- /2.2-7/: Zu erwartende Klimaänderungen bis 2100 - Klimaänderungen in Europa bis  
2100, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/zu-erwartende-klimaaenderungen-bis-2100>
- /3.1-1/ Entsorgungskommission (ESK)  
Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und  
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern  
revidierte Fassung vom 10.06.2013
- /3.3-1/ DIN 25472  
Kritikalitätssicherheit bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe  
Ausgabe August 2012

- /3.3-2/ International Atomic Energy Agency  
Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standard Series No. SSG-15  
International Atomic Energy Agency, Vienna 2012
- /3.3-3/ Forschungszentrum Karlsruhe  
Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten  
- Charakterisierung und Bewertung -  
Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte  
Bericht FZKA 6651 von 2001
- /3.3-4/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von be-  
strahlten Brennelementen und verglastem HAW  
Bericht GRS - A – 3597 vom April 2010
- /3.3-5/ R. E. Einzinger, US NRC, M. C. Billone, ANL  
Hydriding Effects in HBU Cladding  
International Seminar on Spent Fuel Storage  
15. – 17. November, 2010, Tokyo, Japan
- /3.3-6/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von Brennstäben mit hohem  
Abbrand bei mechanischen Unfallbelastungen beim Transport  
Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 3606R02558  
Bericht GRS - A – 3490 vom März 2010
- /3.3-7/ T. Saegusa, R. Einziger, B. Carlsen, G. Demazy, J. van. Aarle  
Potential Interface Issues in Spent Fuel Management  
Paper No. IAEA-CN-226-73  
International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power  
Reactors: An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle  
Vienna, Monday 15 June 2015 - Friday 19 June 2015
- /3.3-8/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
„Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder  
sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD); (SEWD-RL Zwischenlager)“  
RS I 6 – 13151-6/22  
Stand: 10.05.2012  
VS – Nur für den Dienstgebrauch
- /3.3-9/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
„Lastannahmen zur Auslegung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen  
gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (Lastannahmen)“

- RS I 6 – 13143/20.10  
Rev. 2.0, Stand: 25.05.2012  
VS – Vertraulich – amtlich geheimgehalten
- /3.3-10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
„Erläuterungen und Hinweise zu den Lastannahmen“  
RS I 6 – 13143/20.10  
Rev. 2.0, Stand: 25.05.2012  
VS – Vertraulich – amtlich geheimgehalten
- /3.4-1/ Rat der Europäischen Union: RICHTLINIE 2011/70/EURATOM DES RATES vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle
- /3.4-2/ "Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das durch Artikel 307 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist"
- /3.4-3/ Endlagervorausleistungsverordnung vom 28. April 1982 (BGBl. I S. 562), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 6. Juli 2004 (BGBl. I S. 1476) geändert worden ist
- /4.2-1/ Ministry of Economic Affairs: Convention on Nuclear Safety (CNS). National Report of the Kingdom of the Netherlands for the Sixth Review Meeting in April 2014. July 2013
- /4.2-2/ Bericht der Niederlande zur fünften Überprüfungskonferenz der Joint Convention 2015
- /4.2-3/ Ministry of Housing, Physical Planning and Environment: Radioactive Waste Policy in the Netherlands
- /4.2-4/ Arentsen, M. J.: With Access to the Future - Nuclear Waste Governance in The Netherlands. In: Brunnengräber et. al. (Hrsgb.): Nuclear Waste Governance – An International Comparison. Springer 2015
- /4.2-5/ Codee, Hans (COVRA): The Netherlands: Long-term storage and disposal; IAEA International Workshop on High-level Radioactive Waste and Spent Fuel Management: Storage and Disposal, 29 November 2011 – 1 December 2011, Stockholm, Sweden
- /4.2-6/ COVRA: Veiligheidsrapport. Bijlage 4 behorend bij de aanvraag tot wijziging van de Kew-vergunning van COVRA N.Y. 15. August 1995
- /4.2-7/ Bericht der Niederlande zur ersten Überprüfungskonferenz der Joint Convention 2003

- /4.3-1/ Organisation for economic Co-Operation and Development/ Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Partnering for Long-term Management of Radioactive Waste, Evolution and Current Practice in Thirteen Countries, 2010
- /4.3-2/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN): Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire sur recherché relatives sur la gestion des déchets radioactifs a haute activite et a vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV, Paris Februar 2006
- /4.3-3/ République Française: The 2006 Programme Act of the sustainable management of radioactive materials and waste; englische Fassung des Gesetzes 2006-739 vom 28.6.2006
- /4.3-4/ France - Fifth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations, September 2014
- /4.3-5/ Commission Nationale d'Evaluation (CNE) : Rapport d'Evaluation No. 11, Juni 2005
- /4.3-6/ Andra: Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue, Dezember 2012
- /4.3-7/ Décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L.542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs
- /4.3-8/ Andra: Recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage, 2015
- /4.4-1/ Department of Energy & Climate Change: Implementing Geological Disposal. A framework for long-term management of higher active radioactive waste. July 2014
- /4.4-2/ Department of Energy & Climate Change: The United Kingdom's fifth National report on Compliance with the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Oktober 2014
- /4.4-3/ HM Nuclear Installations Inspectorate: The Sstorage of Liquid High Level Waste at BNFL Sellafield: An updated review of safety, 2000
- /4.4-4/ British Energy, Royal Haskoning: Sizewell B Dry Fuel Store. Environmental Statement. February 2010
- /4.4-5/ Homepage der Fa. Holtec International: Hi-STORM. Download am 08.09.2015  
<http://www.holtecinternational.com/productsandservices/wasteandfuelmanagement/hi-storm/>

- /4.4-6/ Office for Nuclear Regulation: ONR Guide- Safety Aspects specific to storage of Spent Nuclear Fuel. Nuclear Safety Technical Assessment Guide. June 2015
- /4.5-1/ United States of America, Fifth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Oktober 2014
- /4.5-2/ US Congress: Nuclear Waste Policy Act of 1982, Public Law 97-425, in Kraft getreten am 7. Januar 1983
- /4.5-3/ Nuclear Regulatory Commission: Continued Storage of Spent Nuclear Fuel, NRC-2012-0246; Federal Register / Vol. 79, No. 182 / Friday, September 19, 2014
- /4.5-4/ Nuclear Regulatory Commission: Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance Final Report, NUREG-1927, 2011
- /4.5-5/ Nuclear Regulatory Commission: Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel, NUREG-2157, Volume 1, 2014
- /4.5-6/ Department of Energy, USA: Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, Januar 2013
- /4.5-7/ Electric Power Research Institute: Extended Storage Collaboration Program International Subcommittee Report, 2012
- /4.5-8/ Nuclear Engineering International: Is a path opening on US used fuel management?, Juli 2015