

Wegemanagement bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland - WERA

Förderkennzeichen: 02E11789

Darmstadt, 14.10.2022



Autorinnen und Autoren

Angelika Spieth-Achtnich Saleem Chaudry Veronika Ustohalova Julia Neles Öko-Institut e.V.

Wilhelm Bollingerfehr BGE TECHNOLOGY GmbH

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FZK 02E11789 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kontakt

info@oeko.de www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71 79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173 79100 Freiburg Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2 13189 Berlin Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95 64295 Darmstadt Telefon +49 6151 8191-0



Kontakt Partner

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55 31224 Peine Telefon +49 5171 43-1521

Inhaltsverzeichnis

Abbildul	igsverzeichnis	О
Tabeller	nverzeichnis	7
Zusamn	nenfassung und Fazit	9
1.	Einleitung	18
1.1.	Zielsetzung und Vorgehensweise	18
1.2.	Grundlagen und Rahmenbedingungen	20
1.2.1.	Grundlegende Annahmen und Definitionen	20
1.2.2.	Zeitbedarf für den Entsorgungsweg	21
1.2.3.	Akzeptanz als Einflussfaktor für das Gelingen des Entsorgungswegs	24
1.2.4.	Radioaktive Abfälle	26
1.2.5.	Transporte hochradioaktiver Abfälle	28
1.2.6.	Behälter und Inventar	29
1.2.6.1.	Transport- und Lagerbehälter (TLB)	29
1.2.6.2.	Endlagerbehälter (ELB)	30
1.2.7.	Nationale und internationale Forschung	32
2.	Systematisierung und Analyse der einzelnen Entsorgungsschrit	
2.1.	Methodischer Ansatz	35
2.2.	Zwischenlagerung	35
2.2.1.	Anlagen zur Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen in Deutschland	35
2.2.2.	Aufgaben und Komponenten der Zwischenlager	37
2.2.3.	Beschreibung möglicher Optionen für die Umsetzung verlängerter Zwischenlagerung	38
2.2.3.1.	Verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten (Option ZL1)	40
2.2.3.2.	Bau eines Zentralen Zwischenlagers (Option ZL2)	42
2.2.3.3.	Konzentration auf wenige regionale Zwischenlager (Option ZL3)	45
2.2.3.4.	Nasslager als Option für das Zwischenlagerkonzept (Option ZL4)	47
2.3.	Eingangslager	48
2.3.1.	Nationales Regelwerk und Empfehlungen	48
2.3.2.	Mögliche Funktionen eines Eingangslagers	49
2.3.2.1.	Konzepte und Optionen für ein Eingangslager	50
2.3.2.2.	Funktionen eines Eingangslagers in den Entsorgungskonzepten Schwedens Finnlands und der Schweiz	
2.3.2.3.	Grundsätzliche Auslegung und technische Gestaltung	53

2.3.3.	Beschreibung möglicher Optionen für das Eingangslagerkonzept	53	
2.3.3.1.	Pufferlager für TLB (Option EG 1 a)		
2.3.3.2.	Pufferlager für ELB (Option EG 1 b)		
2.3.3.3.	Pufferlager für TLB und ELB (Option EG 1 c)		
2.3.3.4.	Pufferung der Rückholung (Option EG 1 d)	64	
2.3.3.5.	Zentrales Zwischenlager für TLB (Option EG 2 a)		
2.3.3.6.	Zentrales Zwischenlager für ELB (Option EG 2 b)		
2.3.3.7.	Zentrales Zwischenlager für TLB und Pufferung von ELB (Option EG 2		
2.3.3.8.	Zentrales Zwischen- und Rückholungslager (Option EG 2 d)		
2.4.	Konditionierungsanlage	80	
2.4.1.	Aufgaben der Konditionierungsanlage	80	
2.4.2.	Komponenten einer Konditionierungsanlage	81	
2.4.3.	Beschreibung möglicher Optionen für die Konditionierungsanlage	83	
2.4.3.1.	Konditionierungsanlage und Eingangslager sind eine zusammenhängend Anlage auf dem Gelände des Endlagers (Option K1)		
2.4.3.2.	Konditionierungsanlage und Eingangslager sind zwei getrennte Anlagen dem Gelände des Endlagers (Option K2)		
2.4.3.3.	Konditionierungsanlage steht nicht auf dem Gelände des Endlagers; sond an einem Standort in der Nähe des Endlagers (Option K3)	dern 87	
2.4.3.4.	Mehrere Konditionierungsanlagen (bis zu 16); an jedem Zwischenlagerstandort eine Anlage (Option K4)	89	
2.4.3.5.	Mehrere Konditionierungsanlagen (3); Getrennte Konditionierungsanlagen fü die verschiedenen Abfallarten an unterschiedlichen Standorten (Option K5)		
2.5.	Endlager	93	
2.5.1.	Aufgaben des Endlagers	93	
2.5.2.	Komponenten eines Endlagers	93	
2.5.3.	Beschreibung möglicher Optionen für ein Endlager	96	
2.5.3.1.	Tonstein; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E1)		
2.5.3.2.	Tonstein; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E2)		
2.5.3.3.	Steinsalz; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E3)	101	
2.5.3.4.	Steinsalz; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E4)		
2.5.3.5.	Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (drei BSK in einem Bohrloch (Option E5))		
2.5.3.6.	Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (kupferummantelte BSK in einem Bohrloch (Option E6))		
2.6.	Rückholung	107	
2.6.1.	Rahmenbedingungen für die Rückholung		
2.6.2.	Möglicher Ablauf der Rückholung	108	

3.	Entwicklung von Szenarien für den Entsorgungsweg hochradioaktiver Abfälle	110	
3.1.	Methodischer Ansatz	110	
3.2.	Referenzszenarium	111	
3.3.	Alternative Szenarien	112	
3.3.1.	Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit verlän Zwischenlagerung		
3.3.2.	Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit dem Eingangslager	122	
3.3.3.	Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit der Konditionierungsanlage		
3.3.4.	Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit dem Endlage		
3.3.5.	Plausibilitätsprüfung	142	
4.	Analyse kombinierter Szenarien	144	
4.1.	Zielsetzung und Vorgehensweise	144	
4.2.	Szenarium Zeitverzögerung bei der Standortauswahl des Endlage Beschreibung und Analyse	rs – 145	
4.3.	Szenarium Verteilung der Oberflächenanlagen auf mehrere Stande Beschreibung und Analyse	orte - 153	
4.3.1.	Eingangslager liegt nicht am Endlagerstandort	154	
4.3.2.	Konditionierungsanlage liegt nicht am Endlagerstandort		
4.3.3.	Eingangslager und Konditionierungsanlage liegen nicht am Endlagerst	andort 158	
Literatu	urverzeichnis	161	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Zeitbedarf/ zeitlicher Ablauf der Entsorgung	24
Abbildung 2-1:	Beispiel für Tagesanlagen eines HAW-Endlagers	95
Abbildung 2-2:	Schematische Zeichnung eines Endlagerkonzeptes in Salz mit übertägigen Anlagen, Gebindetransportschacht und untertägigen Transport- und Einlagerungsstrecken	96
	Transport- und Einagerungsstrecken	90
Abbildung 4-1:	Vorgehensweise bei der Entwicklung und Analyse von Szenarien	145
Abbildung 4-2:	Eingangslager liegt nicht am Endlagerstandort	155
Abbildung 4-3:	Konditionierungsanlage liegt nicht am Endlagerstandort	157
Abbildung 4-4:	Konditionierungsanlage und Eingangslager liegen nicht am	
	Endlagerstandort	159

WERA "Öko-Institut e.V.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Szenarien 1 & 2, Reparatur der TLB mit Behälteröffnung	114
Tabelle 3-2:	Szenarien 3 & 4, Umverpackung von TLB in alternative Behälter	116
Tabelle 3-3:	Szenarium 5 & 6, Neubau oder TLB Verlegung, weil Zwischenlag an einzelnen Standorten nicht fortgesetzt werden kann	erung 121
Tabelle 3-4:	Szenarium 8, Standort des Eingangslagers abseits des Endlagerstandorts	123
Tabelle 3-5: Szenarium 9 & 10, Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts		126
Tabelle 3-6:	Szenarium 11, nicht ausreichende Verfügbarkeit von Endlagerbel	nältern 128
Tabelle 3-7:	Szenarium 12: Verzögerungen durch technische Schwierigkeiten der Konditionierung	bei 129
Tabelle 3-8:	Zusammenhang zwischen möglichen Endlageroptionen und Behä und -anzahl, Teufe des Endlagerbergwerks und Dauer der Einlag	
Tabelle 3-9:	Szenarium 13, Längere Dauer des Standortauswahlverfahrens	133
Tabelle 3-10:	Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers	134
Tabelle 3-11:	Änderungen am Endlagersystem im laufenden Betrieb (I)	135
Tabelle 3-12:	Änderungen am Endlagersystem im laufenden Betrieb (II)	137
Tabelle 3-13:	Rückholung der eingelagerten Abfälle (I)	140
Tabelle 3-14:	Rückholung der eingelagerten Abfälle (II)	142

Zusammenfassung und Fazit

In Deutschland produzierte und zu entsorgende hochradioaktive Abfälle lagern derzeit in Transportund Lagerbehältern (TLB) in 16 Zwischenlagern. Deren Laufzeit soll nach Atomgesetz (AtG §6
Abs. 5) 40 Jahre ab Beginn der Einlagerung des jeweils ersten TLB nicht überschreiten; eine Verlängerung von darauf gründenden Genehmigungen "darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach
der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen". Gemäß Standortauswahlgesetz
(StandAG) soll bis 2031 ein Standort für ein Endlager für insbesondere hochradioaktive Abfälle festgelegt sein. Bis zum Betriebsbeginn bzw. dem Ende der Einlagerung aller hochradioaktiven Abfälle
in das Endlager ergeben sich für die Zwischenlagerung, die Eingangslagerung, die Konditionierung
und die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle verschiedene Variationen zukünftiger Entwicklungen. Um adäquat auf solche Variationen reagieren zu können, müssen Handlungsbedarfe und -optionen frühzeitig eruiert werden. Vor diesem Hintergrund sind im Forschungsvorhaben "Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland" (WERA) Szenarien entwickelt, analysiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen und Interdependenzen untersucht worden.

Das Forschungsprojekt verfolgt das Ziel, Handlungsoptionen und Handlungsbedarfe in Bezug auf die Entsorgung für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle im zeitlichen Ablauf aufzuzeigen. Es wird damit eine Basis geschaffen, die Integration der verschiedenen Entsorgungsschritte aktiv zu gestalten und ggf. resultierende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben abzuleiten.

In einem ersten Arbeitsschritt werden zunächst relevante **Annahmen und Definitionen** entwickelt und dargestellt, siehe Kapitel 1.2. Es werden die grundsätzlichen Entsorgungsschritte "Zwischenlagerung", "Eingangslagerung", "Konditionierung" und "Endlagerung" definiert. Ausgangspunkt der Betrachtungen in WERA ist der Zustand der Aufbewahrung aller abgebrannten Brennelemente und hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in 16 Zwischenlagern¹. Als Endpunkt der Betrachtung wird der Verschluss des Endlagers angenommen, d. h., auch eine noch während des Einlagerungsbetriebs des Endlagers notwendig werdende Rückholung ist Teil der Betrachtung, wird aber nicht als eigener Entsorgungsschritt betrachtet. Mögliche Abläufe nach einer Entscheidung zur Rückholung werden bei der Diskussion des Entsorgungsschritts "Endlagerung" aber dennoch aufgezeigt. Im Vorhaben wird zudem angenommen, dass die TLB nicht direkt endgelagert werden.

Grundlage aller in WERA angestellten Überlegungen ist das aktuelle gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk in der Bundesrepublik Deutschland. Es werden dennoch auch Optionen, die aufgrund der gegenwärtigen Gesetzeslage ausgeschlossen sind, betrachtet. Dem zugrunde liegt die Überlegung, ob - insbesondere vor dem Hintergrund langer Zeiträume - in Zukunft ggf. weitere Optionen relevant sein können.

Eine nach Verschluss des Endlagers gegebenenfalls notwendig werdende Bergung ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Nicht betrachtet werden außerdem Entsorgungsoptionen, die eine Alternative zur Endlagerung darstellen oder Szenarien, die aufgrund äußerer Umstände wie Krieg oder Terror entstehen. Ein Szenario aufgrund von Krieg oder Terror haben die Autorinnen und Autoren nicht für wahrscheinlich gehalten. Es ist durch den Krieg in der Ukraine leider zu einem denkbaren Szenario geworden und wäre aktuell neu zu bewerten.

Vorausgesetzt wird dabei, dass alle abgebrannten Brennelemente in die trockene Zwischenlagerung überführt werden, dass die Zwischenlager Brunsbüttel und Jülich über Genehmigungen verfügen und dass das ESTRAL in der beantragten Form errichtet wird.



Zur überschlägigen Abschätzung des Zeitbedarfs der Entsorgung werden vorhandene Informationen zusammengestellt und durch eigene Überlegungen ergänzt. Zeitbestimmend ist hier der Entsorgungsschritt Endlagerung - erst wenn alle Abfälle in das Endlager eingelagert wurden und das Endlager verschlossen ist, kann die Entsorgung als abgeschlossen betrachtet werden. Die anderen Entsorgungsschritte müssen zeitlich idealerweise so ausgerichtet werden, dass die Endlagerung, insbesondere der Einlagerungsbetrieb, dadurch nicht verzögert wird. Unter den Voraussetzungen, dass 2031 eine Standortentscheidung getroffen wird und die Errichtung des Endlagers in etwa 20 Jahren abgeschlossen werden kann, kann der Beginn der Einlagerung etwa 2050 starten. Unter der Annahme, dass, abhängig von Sicherheitskonzept und Auslegung des Endlagers, der Einlagerungsbetrieb 50 Jahren (gemittelter Zeitraum) bis ca. 2100 dauert und für die Stilllegung weitere 20 Jahre zu veranschlagen sind, kann das Ende des Entsorgungsweges etwa um das Jahr 2120 erreicht werden.

Akzeptanz als Einflussfaktor für das Gelingen der Entsorgung wird im Forschungsprojekt WERA nicht im Detail diskutiert. Der Aspekt wurde aber bei der Entwicklung von Szenarien für die einzelnen Entsorgungsschritte berücksichtigt.

Neben den in WERA betrachteten hochradioaktiven Abfällen werden auch die schwach- und mittelradioaktiven, nicht Konrad-gängigen Abfälle kursorisch mit betrachtet. Es zeigte sich aber, dass die regulatorischen Anforderungen und die technische Umsetzung für alle betrachteten Entsorgungsschritte so sind, dass Auswirkungen auf die Entsorgungsschritte der hochradioaktiven Abfälle auszuschließen sind: Sie werden räumlich getrennt von den hochradioaktiven Abfällen gelagert, in anderen Anlagen konditioniert und sollen gegebenenfalls in einem separaten Endlager am gleichen Standort endgelagert werden, aber nur, sofern hieraus keine Rückwirkungen auf die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle entstehen. Welchen technischen Voraussetzungen das Endlager genügen muss, um diese Anforderung zu erfüllen, wurde hier nicht untersucht.

Zwischen den Entsorgungsschritten können unterschiedliche Notwendigkeiten für den Transport hochradioaktiver Abfälle bestehen. Transportnotwendigkeiten und deren Varianten werden im Zusammenhang mit den vier genannten Entsorgungsschritten jeweils diskutiert, aber nicht als zusätzliche eigene Entsorgungsschritte behandelt.

Die verwendeten Transport- und Lagerbehälter einschließlich Reparaturkonzept und mögliche Alterungsaspekte von Behälter und Inventar werden dargestellt. Außerdem wird auf die nationale und internationale Forschung bei der längerfristigen Zwischenlagerung eingegangen. Die existierenden Konzepte der Endlagerbehälter (ELB) für die unterschiedlichen Wirtsgesteine werden ebenso dargestellt.

In einem weiteren Arbeitsschritt wird der Entsorgungsweg zunächst in die grundsätzlichen Entsorgungsschritte "Zwischenlagerung", "Eingangslagerung", "Konditionierung" und "Endlagerung" unterteilt, siehe Kapitel 2. Aufgaben, mögliche Varianten und die notwendige technische Ausgestaltung der einzelnen Entsorgungsschritte werden in Form von Optionen für den Entsorgungsweg systematisch beschrieben und mit Blick auf technische, ökonomische und administrative Aspekte analysiert. Außerdem werden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten sowie Ungewissheiten herausgearbeitet.

Für den Entsorgungsschritt Zwischenlagerung werden nach Beschreibung des Ausgangszustands der bestehenden Zwischenlager und der Aufgaben der Zwischenlagerung drei Optionen dargestellt: verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten, Bau eines Zentralen Zwischenlagers und die Konzentration auf wenige (neu zu errichtende) regionale Zwischenlager. Der wesentliche Vorteil der verlängerten Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten ist, dass keine zusätzlichen Transporte über die ohnehin notwendigen hinaus (zum Endlagerstandort) stattfinden müssen. Dagegen stehen u. a. die höheren Betriebskosten, die 16 Standorte mit sich bringen, der Aufwand für mind. 16 Genehmigungsverfahren zur verlängerten Zwischenlagerung sowie ggf. notwendige Nachrüstungen an jeweils 16 Anlagen. Das "Plus" eines Zentralen Zwischenlagers ist die mögliche frühe Entlastung der bestehenden Zwischenlagerstandorte, Einsparungen von Betriebskosten gegenüber den 16 Standorten und die Möglichkeit, ggf. eine Heiße Zelle für notwendige Reparaturen bei längerfristiger Lagerzeit zu integrieren. Außerdem wäre die Abruflogistik zum Endlagerstandort wahrscheinlich einfacher als bei 16 Zwischenlagern. Gegebenenfalls könnte ein Zentrales Zwischenlager das Eingangslager am Endlagerstandort überflüssig machen. Als negativ sind der Aufwand für die Festlegung eines geeigneten Standortes, die Größe und die zusätzlich notwendigen Transporte der TLB zu sehen. Bei einer Konzentration der Zwischenlagerung auf wenige Standorte sind ebenfalls Entlastungen von Zwischenlagerstandorten, die Möglichkeit der Integration einer Heißen Zelle, der Ausgestaltung der Anlage nach aktuellem Stand von W&T sowie Einsparungen von Betriebskosten als Vorteile zu nennen. Als negativ sind auch hier vor allem die zusätzlich notwendigen Transporte der TLB und der Aufwand für die Neuerrichtung der Anlagen zu sehen.

Wichtig für alle drei Zwischenlageroptionen ist vor allem das Wissen über Alterungsaspekte von Inventar und TLB und über die voraussichtliche Dauer der Zwischenlagerung. Welche Option für eine längerfristige Zwischenlagerung am geeignetsten ist, wird neben gesellschaftlichen und politischen Aspekten hauptsächlich auf dieser Basis zu entscheiden sein.

Für das Eingangslager, das laut Nationalem Entsorgungsprogramm mit der ersten Teilgenehmigung des Endlagers genehmigt und am Endlagerstandort errichtet werden soll mit dem Ziel, die bestehenden Zwischenlagerstandorte zu entlasten, werden acht Optionen entwickelt. Diese unterscheiden sich zum einen hinsichtlich ihrer Lagerkapazität – Zentrales Eingangslager für alle vorhandenen ca. 1.900 TLB gegenüber einem kleineren Pufferlager. Zum anderen unterscheiden sich die Optionen hinsichtlich der im Eingangslager zu lagernden Behälter – TLB, ELB oder beides. Außerdem werden Optionen betrachtet, die auch das Lagern von rückgeholten ELB vorsehen. Die zu lagernden Behälter bestimmen u. a. die Anforderungen an das Eingangslager. So sind beispielsweise insbesondere bei der Lagerung von nichtabgeschirmten ELB höhere Anforderungen an die Abschirmung durch das Lagergebäude zu stellen, was mit höherem Aufwand bei Planung, Errichtung aber auch Überwachung verbunden ist. Materiell ist die Zwischenlagerung mit dem Transport der TLB ins Eingangslager nicht beendet. Je nach Zeitbedarf für die weiteren Entsorgungsschritte könnten die TLB auch dort bis zur Konditionierung gelagert werden. Bei dieser fortgesetzten Zwischenlagerung im Eingangslager wird davon ausgegangen, dass ggf. notwendige Reparaturmaßnahmen in der Konditionierungsanlage am Endlagerstandort durchgeführt werden können - ohne dass TLB über öffentliche Straßen transportiert werden müssen.

Das Eingangslager am Endlagerstandort kann den Betrieb der Konditionierungsanlage puffern und sicherstellen, dass zu jeder Zeit eine ausreichende Anzahl TLB zur Konditionierung vorrätig sind. Des Weiteren kann es, wenn ELB dort gelagert werden können, den Einlagerungsbetrieb puffern und gewährleisten, dass auch für den Fall einer Störung bei der Konditionierungsanlage ausreichend konditionierte ELB vorhanden sind, um den Einlagerungsbetrieb aufrecht zu halten.

Welche Option für das Eingangslager die "beste" ist, kann nur im Zusammenhang mit der Ausgestaltung der anderen Entsorgungsschritte entschieden werden. Diese Entscheidung wird voraussichtlich in der letzten Phase des StandAV zu treffen sein.



Für den Entsorgungsschritt der Konditionierung werden die Aufgaben und technischen Komponenten beschrieben. Es werden auch hier verschiedene Optionen entwickelt:

- Die Konditionierungsanlage und das Eingangslager sind eine zusammenhängende Anlage;
- Konditionierungsanlage und Eingangslager sind zwei getrennte Anlagen auf dem Endlagergelände:
- Die Konditionierungsanlage steht nicht auf dem Gelände des Endlagers, sondern auf einem nahgelegenen Standort;
- Es gibt an jedem Zwischenlagerstandort eine Konditionierungsanlage;
- Es gibt mehrere Konditionierungsanlagen für jeweils verschiedene Abfallarten an unterschiedlichen Standorten (für BE aus Leistungsreaktoren, für BE aus Forschungs- und Prototyp-Reaktoren, für WA-Abfälle), um die Prozesse in der jeweiligen Anlage zu vereinfachen.

Ob die Anlage als zusammenhängende Anlage mit dem Eingangslager bzw. als getrennte Anlagen auf dem Endlagergelände konzipiert wird, führt neben technischen Aspekten zu Unterschieden im Genehmigungsverfahren. Außerdem könnten bei getrennten Anlagen unterschiedliche Realisierungszeitpunkte in Erwägung gezogen werden, für die sich auch Vorteile ergeben können (z. B. kann, wenn das Eingangslager vor der Konditionierungsanlage betriebsbereit ist, die Leerung der Zwischenlager beginnen – auch wenn die Konditionierungsanlage noch nicht betriebsbereit ist). Die Entscheidung für eine Konditionierung an einem externen Standort könnte aus unterschiedlichen Gründen getroffen werden, z. B. weil Prozesse räumlich entzerrt werden sollen oder Platz am Endlagerstandort fehlt. Wesentlich ist dann, dass die konditionierten ELB zum Endlagerstandort transportiert werden müssen, was Auswirkungen auf das Behälterdesign und die Anzahl der Transporte hat. Die Option, dass es an jedem Zwischenlagerstandort eine Konditionierungsanlage gibt, wird als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, weil sie zwar technisch realisierbar erscheint, aber ökonomisch und organisatorisch deutliche Nachteile gegenüber einer Einzelanlage aufweist. Auch die Option mehrerer Konditionierungsanlagen für jeweils verschiedene Abfallarten an unterschiedlichen Standorten wird aus den gleichen Gründen als unrealistisch eingeschätzt.

Wesentlich für die technische Auslegung der Konditionierungsanlage ist die konkrete Form des ELB: erst mit der Standortentscheidung wird auch eine Entscheidung über das Wirtsgestein, das technische Endlagerkonzept und damit den Endlagerbehälter gefällt. Letzteres ist Voraussetzung, um die Konditionierungsanlage auszulegen. Diese Festlegung wird voraussichtlich in der letzten Phase des StandAV stattfinden.

Für den Entsorgungsschritt der Endlagerung werden die Aufgaben und Komponenten beschrieben. Bezüglich der entwickelten Optionen werden im Vorhaben WERA je zwei Einlagerungsvarianten pro Wirtsgestein, also 6 Endlagerkonzepte betrachtet, anhand derer beispielhaft Wechselwirkungen mit den anderen Entsorgungsschritten wie Eingangslager und Konditionierungsanlage veranschaulicht werden. Die verschiedenen Endlagerkonzepte haben unter anderem eine unterschiedliche Anzahl der benötigten ELB zur Folge - hier sind Größenordnungen von 7.000 bis 14.000 ELB denkbar. Aufgrund einer begrenzten Einlagerungsfrequenz kann die Dauer der Einlagerung von ca. 50 bis ca. 90 Jahre variieren. Die Dauer der Einlagerung ist aber auch abhängig davon, ob im Einschicht-, Zweischicht- oder Dreischichtbetrieb eingelagert wird und läge damit in einer Bandbreite von 20 bis 100 Jahren. Je nach Einlagerungsdauer verlängert sich die Zwischenlagerung bzw. müssen Eingangslager und Konditionierungsanlage entsprechend länger betrieben werden. Die daraus resultierenden möglichen Konsequenzen für diese Anlagen werden hauptsächlich in den mit Alterung einhergehenden Aspekten gesehen: bei der verlängerten Zwischenlagerung sind Schäden des Inventars nicht auszuschließen, die wiederum bei der Entladung in der Konditionierungsanlage zu einem erhöhten Aufwand bei der Handhabung (und damit ggf. auch zu Zeitverzögerung) führen können. Auch für die Anlagen selbst können bei sehr langen Betriebszeiten Ertüchtigungen erforderlich werden, ggf. kann auch ein Neubau notwendig werden. Auch geänderte Sicherheitsbewertungen (z. B. SEWD) können zu notwendigen baulichen Maßnahmen führen.

Im Zusammenhang mit der Endlagerung wird auch die Möglichkeit einer **Rückholung** betrachtet. Für die weitere Behandlung rückgeholter Endlagergebinde gibt es bislang keine Vorgaben bzw. Planungen. Dabei muss aus Gründen der Konservativität damit gerechnet werden, dass die Rückholung unmittelbar nach der Entscheidung zur Rückholung beginnen muss. Dafür ist es notwendig, neben technischen Einrichtungen beispielsweise zum Auslagern der ELB ein Konzept für die weitere Lagerung zu haben. Dieser Aspekt wird weiter unten in diesem Kapitel ausgeführt.

Auf Basis der im Forschungsprojekt entwickelten Optionen wird in einer **Szenarienentwicklung** eine Schar möglicher zukünftiger Verläufe des Entsorgungsweges entwickelt und dargestellt, siehe Kapitel 3. Ausgehend von einem definierten Referenzszenarium werden Abweichungen jeweils für die Ausgestaltung der einzelnen Entsorgungsschritte Zwischenlagerung, Eingangslager, Konditionierung und Endlagerung angenommen und beschrieben. Davon ausgehend werden die jeweiligen Konsequenzen für die jeweils anderen Schritte des Entsorgungsweges abgeleitet. Die dargestellten Szenarien werden schließlich einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Für das Referenzszenarium wird angenommen, dass die Zwischenlagerung weiterhin in den bestehenden Zwischenlagern erfolgen kann und neue Genehmigungen erteilt werden. Nach der Standortentscheidung wird ein Zentrales Eingangslager am Endlagerstandort geplant und errichtet. Die bestehenden Zwischenlager werden dann sukzessive geleert und rückgebaut. Darüber hinaus ist im Eingangslager auch die Lagerung von beladenen ELB möglich, um vor Beginn der Einlagerung erste ELB bereitzustellen, damit die Einlagerung unverzüglich beginnen kann und um gegebenenfalls Störungen der Konditionierungsanlage zu puffern. Auch im Fall einer Rückholung könnten ELB im Eingangslager gelagert werden. Eine Konditionierungsanlage wird am Endlagerstandort errichtet und betrieben. Die Standortauswahl gelingt im Referenzszenarium im vorgesehenen Zeitplan bis 2031. Auch Errichtung und Inbetriebnahme laufen nach Plan. Eine Rückholung bis zur Stilllegung des Endlagers wird nicht erforderlich.

Für den Entsorgungsschritt Zwischenlagerung werden in 7 Szenarien folgende Abweichungen vom Referenzszenarium diskutiert: "Reparatur von TLB inkl. Öffnung der TLB", "Umverpackung in alternative Behälter", "Neubau oder TLB Verlegung, weil Zwischenlagerung an einzelnen Standorten nicht fortgesetzt werden kann" und "Zwischenlagerung kann in allen 16 Zwischenlagern nicht fortgesetzt werden". Als Einflussfaktor wurde bei diesen Betrachtungen das mögliche Auftreten von Alterungseffekten angenommen. Sollten bei der längerfristigen Zwischenlagerung erhebliche Alterungseffekte auftreten, die Maßnahmen erfordern, die über die Möglichkeiten des bestehenden Behälterreparaturkonzepts hinausgehen, können Heiße Zellen bzw. eine Konditionierungsanlage zur Behebung der Alterungseffekte bzw. zur Wiederherstellung der Zwischenlageranforderungen notwendig werden. Die bestehenden Zwischenlagerstandorte müssten dann entsprechend nachgerüstet bzw. die betroffenen TLB müssten zu einer entsprechenden Anlage transportiert werden. Alternativ wird die Zwischenlagerung an einem zentralen Ort bzw. wenigen regionalen Standorten in einem/mehreren Zwischenlagern weitergeführt, die mit einer integrierten Heißen Zelle zu Reparaturoder Umverpackungszwecken errichtet wurden. Wird ein Umverpacken in reparierte TLB, ELB oder Standardbehälter notwendig, müssen diese den Lager- und Transportanforderungen genügen. Eingangslager und Konditionierungsanlage müssen dann annahmebereit für die entsprechenden z. B.



durch Reparatur veränderten Behälter sein. Im Fall des Umpackens in ELB hat dies konkreten Einfluss auf die Ausgestaltung des Eingangslagers.

Für den Entsorgungsschritt Eingangslager wird das Szenarium der Errichtung eines Eingangslagers abseits des Endlagerstandorts untersucht. Das Eingangslager würde dann die Aufgabe eines Zentralen Zwischenlagers übernehmen, z. B. auch wenn der Endlagerstandort noch nicht im Detail festgelegt ist. Die bestehenden Zwischenlager könnten dann früher geräumt werden. Es sind dann aber zusätzliche Transporte über öffentliche Straßen notwendig. Außerdem erfordert die kontinuierliche Anlieferung von TLB aus dem Eingangslager zu einer Konditionierungsanlage am Endlagerstandort ggf. einen höheren logistischen Aufwand gegenüber einem Eingangslager mit Konditionierungsanlage am Endlagerstandort. An der Konditionierungsanlage sind zudem zusätzliche Pufferlagerflächen erforderlich sowohl für angelieferte TLB als auch für konditionierte ELB.

Für den Entsorgungsschritt der Konditionierung werden Szenarien mit der Annahme, die Konditionierungsanlage befinde sich abseits des Endlagerstandorts, Szenarien zur nicht ausreichenden Verfügbarkeit von Endlagerbehältern und zu Schwierigkeiten bei der Entladung der TLB abgeleitet. Zwei Standorte können eine aufwändigere und störungsanfälligere Logistik bedingen. Die Konditionierungsanlage muss zum unterbrechungsfreien Betrieb immer mit TLB aus den Zwischenlagern versorgt sein. Um nicht von pünktlichen Transporten abhängig zu sein, ist dann ein TLB-Lager (Eingangslager oder zusätzliches Pufferlager) bei der Konditionierungsanlage notwendig. Anschließend müssen die ELB zum Endlagerstandort transportiert werden. Für einen unterbrechungsfreien Einlagerungsbetrieb würde dann ein zusätzliches ELB-Pufferlager am Endlagerstandort benötigt. Im Fall einer nicht ausreichenden Verfügbarkeit von Endlagerbehältern kann mindestens bei längerfristigen Verzögerungen der Einlagerungsbetrieb zum Erliegen kommen, was wiederum zu einer weiter verlängerten Zwischenlagerung mit den daraus ggf. resultierenden Folgen aufgrund von Alterungseffekten führen kann. Im Fall von Schwierigkeiten bei der Entladung der TLB beispielsweise aufgrund von durch Alterungseffekte geschädigtem Inventar können Verzögerungen bei der Konditionierung die Folge sein, was wiederum zu einer Verlängerung sowohl des Zwischenlagerbetriebs als auch des Einlagerungsbetriebs führen würde. Außerdem kann zusätzlicher Aufwand einschließlich Kosten entstehen, wenn Anpassungen, Umplanungen oder die Entwicklung individueller Lösungen zur endlagergerechten Verpackung in der Konditionierungsanlage erforderlich sein würden. Das Konzept der Konditionierungsanlage sollte flexible technische Anpassungen ermöglichen und entsprechende Redundanzen vorsehen.

Für den Entsorgungsschritt der Endlagerung werden Szenarien aufgrund von Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers, aufgrund technisch notwendiger Änderungen am Endlagerkonzept im laufenden Betrieb und ausgehend von einer Entscheidung zur Rückholung der eingelagerten Abfälle entwickelt. Bei Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers ist als Konsequenz mit längerer Zwischenlagerdauer (z. B. möglicherweise Notwendigkeit zur Ertüchtigung bestehender Lagergebäude oder dem Neubau von Zwischenlagern) zu rechnen. Zudem kann durch Alterungseffekte die Konditionierung erschwert werden (s. o.). Darüber hinaus könnten bereits erarbeitete Planungsstände für das Endlager aufgrund des Fortschritts von W+T infrage gestellt werden. Ggf. könnte dies Folgen für die Akzeptabilität des Standortauswahlverfahrens haben. Die ebenfalls betrachteten Szenarien von technisch notwendigen Änderungen im laufenden Einlagerungsbetrieb, die eine Anpassung des Behälterkonzepts bzw. die Notwendigkeit einer Anpassung des Endlagerkonzepts insgesamt (einschließlich Rückholung) erforderlich machen, werden im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung als unwahrscheinlich bewertet, da die methodischen Ansätze des Endlagerkonzepts und die Praktikabilität der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes vor der Entscheidung zur entsprechenden Planung, Errichtung und Betrieb des Endlagers umfangreich geprüft werden.

Bezüglich der Aspekte im Zusammenhang mit dem Endlagerbehälter ist zu klären, ob Alterungsschäden des radioaktiven Inventars einen Einfluss auf Volumen und Masse des jeweils pro ELB aufzunehmenden Abfalls haben und dadurch Folgen für das Endlagerkonzept zu erwarten sind (z. B., weil die Anzahl der benötigten Endlagerbehälter steigt). Für den Fall, dass konditionierte ELB gelagert bzw. transportiert werden müssen, werden hierdurch zusätzliche Anforderungen an den ELB gestellt. Es wäre dann zu prüfen, ob die zusätzlichen Lager- bzw. Transportanforderungen Folgen für das Endlagerkonzept haben können.

Bei den Szenarien ausgehend von der Entscheidung zur Rückholung der eingelagerten Abfälle wird die Rückholung eines Teils der bereits eingelagerten Abfälle, aller eingelagerten Abfälle während des Betriebes und aller eingelagerten Abfälle unmittelbar vor Beginn der Stilllegung betrachtet. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein Konzept für die Konditionierung bzw. Lagerung der rückgeholten Abfälle und eine technische Erprobung bereits zu Beginn der Einlagerung notwendig sein werden, um eine Rückholung unmittelbar umzusetzen. Das Konzept muss darlegen, wie rückgeholt wird, wie mit rückgeholten Behältern umgegangen wird und wie eine Lagerung der rückgeholten Abfälle umgesetzt werden kann (z. B. hinsichtlich der Abschirmung). Ggf. resultiert aus den Gründen für die Rückholung auch der Bedarf einer Anpassung des Rückholungskonzepts. Generell sollte geprüft werden, ob beispielsweise die Konditionierungsanlage dafür ausgelegt oder entsprechend umgerüstet werden kann, auch rückgeholte Endlagerbehälter zu entladen und ggf. in spezielle Lagerbehälter oder TLB zu verpacken. Diese müssten entsprechend verfügbar sein. Für die Lagerung käme ggf. das Eingangslager in Frage, falls es für die Lagerung rückgeholter ELB ausgelegt bzw. umgerüstet werden kann. Sollen die hochradioaktiven Abfälle nach der Rückholung z.B. in ein Lager entfernt vom Endlagerstandort transportiert werden, sind Transportbehälter bzw. transportgeeignete Umverpackungen notwendig. Darüber hinaus wird in einem solchen Fall zu analysieren und zu entscheiden sein, welche Schlüsse aus den Gründen der Rückholung gezogen werden müssen und wie das zukünftige Entsorgungskonzept ausgestaltet werden muss.

Abschließend werden in Kapitel 4 ausgewählte Szenarien vertieft analysiert und die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen, deren Voraussetzungen sowie mögliche sich ergebende Konsequenzen dargestellt. Hier wurden das Szenarium der Zeitverzögerung der Standortauswahl des Endlagers sowie das Szenarium der Verteilung der Oberflächenanlagen auf mehrere Standorte als besonders plausibel gewählt.

Im Szenarium der Zeitverzögerung der Standortauswahl des Endlagers werden zunächst die Voraussetzungen und mögliche Konsequenzen für die verlängerte Zwischenlagerung an den bestehenden 16 Standorten, der Bau eines zentralen Zwischenlagers und die Konzentration auf wenige regionale Zwischenlager betrachtet. Detaillierter betrachtet werden die Konsequenzen möglicher Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckelbarriere des TLB sowie die Konsequenzen der Schädigung des Abfallinventars.

Um abschätzen zu können, welche Zeiträume für die längerfristige Zwischenlagerung notwendig werden könnten und welche Option der längerfristigen Zwischenlagerung dementsprechend am geeignetsten für diese Zeiträume ist (z. B. aufgrund von Alterungsaspekten der TLB und des Inventars und den damit ggf. notwendigen Maßnahmen während der Zwischenlagerung), ist es notwendig, eine auf begründeten realistischen Annahmen basierende Analyse der voraussichtlichen Dauer der einzelnen Verfahrensschritte des StandAV durchzuführen. Da die längerfristige Zwischenlagerung faktisch erst endet, wenn die hochradioaktiven Abfälle in Endlagerbehälter verpackt sind bzw. ins Endlager eingelagert sind, ist darüber hinaus eine Analyse der voraussichtlichen Dauer der



folgenden Entsorgungsschritte (Planung, Genehmigung, Errichtung von Eingangslager, Konditionierung, Endlagerung inkl. der notwendigen Transporte) notwendig.

Im Fall der Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckeldichtung eines TLB bei der längerfristigen Zwischenlagerung wird im Zusammenhang mit der Neugenehmigung der einzelnen Zwischenlager eine Entscheidung zu treffen sein, wie mit diesem Risiko umzugehen ist. Eine Möglichkeit wäre, an ausgewählten Zwischenlagerstandorten oder einem einzigen Standort eine Heiße Zelle zu errichten. Dadurch würden aber zusätzliche Transporte hochradioaktiver Abfälle notwendig. Sollten an allen Standorten verlängerter Zwischenlagerung Heiße Zellen errichtet werden, könnten defekte Primärdeckeldichtungen ggf. direkt an jedem Standort ersetzt werden. Der Bau von Heißen Zellen ist ressourcenintensiv und hat nicht zuletzt auch Auswirkungen beim Rückbau dieser Anlagen. Der Rückbau eines Zwischenlagers mit Heißer Zelle wird wahrscheinlich zeitintensiver sein als der Rückbau eines Zwischenlagers ohne Heiße Zelle. Darüber hinaus fallen bei Rückbau der heißen Zelle radioaktive Abfälle an. Sollten sich durch die Reparatur Änderungen am Behälter ergeben, so wäre dies für die Annahmebedingungen des Eingangslagers zu berücksichtigen. Auch die Konditionierungsanlage müsste an Änderungen am Behälter angepasst sein. Das Szenarium der Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckeldichtung an einem TLB wird kurzfristig nicht als wahrscheinlich gesehen. Je länger aber die Zwischenlagerung dauert, desto weniger kann das Szenarium ausgeschlossen werden.

Eine große Rolle spielen auch die Forschungsergebnisse zur Alterung des Dichtsystems der TLB. Es ist aufgrund der laufenden nationalen wie internationalen Forschungen auf diesem Gebiet mit einem Wissenszuwachs in den nächsten 10 Jahren zu rechnen. Die Forschungsergebnisse sollten darüber hinaus in der Praxis, d. h. durch das Öffnen von TLB zu Forschungszwecken, verifiziert werden.

Schädigungen durch Degradation des Abfallinventars könnten ggf. dazu führen, dass die Schutzziele der Zwischenlagerung (und ggf. auch die des Eingangslagers) und/oder die Transportanforderungen nicht mehr eingehalten werden können. Zur Wiederherstellung ihrer Einhaltung könnten beispielsweise beschädigte Brennelemente in einer Heißen Zelle in Köcher verpackt werden und in einem dafür geeigneten TLB weiter zwischengelagert werden. Für die verlängerte Zwischenlagerung werden die Schutzziele der Zwischenlagerung im Rahmen der Neugenehmigungen nachzuweisen sein. Für die Planung der Konditionierungsanlage werden mögliche Schädigungen des Abfallinventars zu berücksichtigen sein. Möglicherweise muss die Konditionierungsanlage im Fall des Auftretens von gänzlich unerwarteter Degradation nach der Errichtung technisch angepasst werden. Dadurch könnte sich ggf. der Einlagerungsbetrieb verzögern. Sollte sich nach Inbetriebnahme der Konditionierungsanlage herausstellen, dass aufgrund einer systematischen progressiven Degradation eine beschleunigte oder vorgezogene Konditionierung eines Teils oder aller Abfälle notwendig wird, müsste zunächst bewertet werden, welche TLB mit welchem Abfallinventar am stärksten von Degradation betroffen sein können und in welcher Reihenfolge folglich konditioniert werden sollte. Hierdurch ergeben sich Auswirkungen auf die Transportlogistik von den Zwischenlagern zur Konditionierungsanlage. Darüber hinaus wären in diesem Fall Lagerungsmöglichkeiten für konditionierte Endlagerbehälter zu schaffen, da durch eine forcierte Konditionierung Endlagergebinde schneller als vorgesehen bereitgestellt würden und vor der Einlagerung zwischengelagert werden müssten. Sollten die TLB innen stark kontaminiert sein, muss ggf. für eine technisch aufwändigere Dekontaminierung entladener TLB ein höherer Zeitbedarf eingeplant werden. Im Zusammenhang mit dem Endlagerbehälter ist zu klären, ob Auswirkungen durch Schäden am Abfallinventar auf die Anzahl/das Design der Endlagerbehälter und somit auf das Endlagerkonzept möglich sind.

Im Szenarium der Verteilung der Oberflächenanlagen auf mehrere Standorte werden drei Handlungsoptionen vertieft diskutiert: das Eingangslager wird an einem eigenen Standort errichtet (nicht am Endlagerstandort), die Konditionierungsanlage wird an einem eigenen Standort errichtet und das Eingangslager zusammen mit der Konditionierungsanlage werden an einem eigenen Standort errichtet. Im Forschungsprojekt WERA konnten keine relevanten Vorteile für ein Eingangslager bzw. eine Konditionierungsanlage, die jeweils als separate Anlage außerhalb des Endlagerstandorts errichtet wird, identifiziert werden. Das Eingangslager als separate Anlage kann allerdings dann von Vorteil sein, wenn die Zwischenlagerung an den 16 Standorten so nicht fortgeführt werden kann und ein Endlagerstandort noch nicht festgelegt ist. Dann kann das Eingangslager die Funktion eines zentralen Zwischenlagers, das ggf. mit einer Heißen Zelle zu Reparatur- oder Umpackzwecken ausgestattet ist, übernehmen. Bezüglich der Rückholung wird es derzeit eher für unwahrscheinlich gehalten, dass rückgeholte ELB zu einem vom Endlagerstandort entfernten Lager gebracht werden, z. B. aus Gründen der fehlenden unmittelbaren Transportfähigkeit. Wenn Eingangslager und Konditionierungsanlage gemeinsam an einem anderen als dem Endlagerstandort verortet sind, müssen die konditionierten ELB transportiert werden. Neben den generellen Herausforderungen eines zusätzlichen Transports müssen die Endlagerbehälter beispielsweise über für den Transport qualifizierte Umverpackungen verfügen. Eine Entscheidung über die Verortung und möglichen Funktionen des Eingangslagers bzw. der Konditionierungsanlage wird aber erst in der letzten Phase des Stand-AVs zu treffen sein.

Insgesamt wird deutlich, dass zwischen den einzelnen Entsorgungsschritten komplexe Abhängigkeiten bestehen und das Zusammenspiel der Entsorgungsschritte für eine erfolgreiche Entsorgung relevant ist. So stellt beispielsweise die Festlegung des Endlagerstandorts per Bundesgesetz einen zentralen zeitlichen Meilenstein im Entsorgungsweg der hochradioaktiven Abfälle dar, von dem zahlreiche Entscheidungen abhängen. Es können erst mit der Festlegung des Endlagerstandorts die Standorte für ein Eingangslager und für die Konditionierungsanlage festgelegt werden (wenn diese nicht an einem anderen Standort verortet sein sollen) und Entscheidungen zu deren Ausgestaltung getroffen werden. Erst mit Betriebsbeginn des Eingangslagers können die Zwischenlager geräumt und die Zwischenlagergemeinden damit entlastet werden. Außerdem hat die Festlegung des Endlagerstandortes Auswirkungen auf Design und Anzahl der Endlagerbehälter. Die ELB wiederum beeinflussen die Ausgestaltung der Konditionierung - abschließende Entscheidungen der parallel zum Standortauswahlverfahren laufenden Entwicklungen in diesem Zusammenhang können erst mit Festlegung des Endlagerstandorts getroffen werden. Ebenso können Alterungseffekte der Brennelemente einen Anpassungsbedarf der Konditionierungsanlage nach sich ziehen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass durch Alterungseffekte der Brennelemente Sonderlösungen für Endlagerbehälter für defekte Brennstäbe notwendig werden. Durch diese Sonderlösungen sind auch Auswirkungen auf das Endlager (ggf. durch die Anzahl der ELB) nicht auszuschließen.

Um das Zusammenwirken und die Abhängigkeiten von Entwicklungen, Entscheidungen aber auch Abweichungen vom geplanten Vorgehen in den einzelnen Entsorgungsschritten für den gesamten Entsorgungsweg abbilden zu können, müssen die Schnittstellen zwischen den einzelnen Entsorgungsschritten systematisch adressiert werden. So müssen regulatorische, genehmigungsrechtliche, technische und organisatorische Beziehungen geprüft und Konsequenzen der Ausgestaltung von Entsorgungsschritten auf andere Entsorgungsschritte abgeleitet werden. Außerdem sollten Auswirkungen von möglichen Entwicklungen (z. B. Alterung), die in einem Entsorgungsschritt stattfinden, auf andere Entsorgungsschritte vorausschauend berücksichtigt werden. Diese Schnittstellenanalyse sollte regelmäßig aktualisiert und mit Fortschreiten der Planungen der einzelnen Entsorgungsschritte bzw. ihrer Umsetzung weiter detailliert werden.

1. Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland produzierte und zu entsorgende hochradioaktive Abfälle lagern derzeit in Transport- und Lagerbehältern (TLB) in drei zentralen sowie 12 Standortzwischenlagern und dem AVR Behälterlager². Die Laufzeit dieser trockenen Zwischenlager soll nach dem Atomgesetz (AtG §6 Abs 5) 40 Jahre ab Beginn der Einlagerung des jeweils ersten TLB nicht überschreiten; eine Verlängerung von darauf gründenden Genehmigungen "darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen".

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass bis zum Ende der letzten Genehmigungen 2047 kein betriebsbereites Endlager zur Verfügung stehen wird. Der Standortauswahlprozess für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle soll bis 2031 abgeschlossen sein, mit einer Inbetriebnahme wird Anfang 2050 gerechnet (BMUB 2015). Darüber hinaus wird der Prozess der Einlagerung der Abfälle weitere Jahrzehnte benötigen.

Zwischen der Zwischenlagerung und der Einlagerung in ein Endlager ist die endlagergerechte Konditionierung durchzuführen. Bei diesem Entsorgungsschritt sind alle Inventare in einen endlagergerechten Zustand zu überführen. Veränderungen in der Zwischenlagerung wirken sich ggf. auf den Konditionierungsprozess und Folgeschritte aus.

Mit der Suche nach dem Standort, der die bestmögliche Sicherheit für ein Endlager für eine Million Jahre bietet, wurde 2017 begonnen; Verzögerungen und Anpassungen des geplanten Prozesses sowie der Folgeschritte sind nicht nur möglich, sondern wahrscheinlich. Zukünftige Entwicklungen, sowohl bezüglich technischer als auch gesellschaftlicher und damit einhergehender regulatorischer Veränderungen, sind nicht vorhersehbar.

Um auf einen Zugewinn an Wissen, auf Neuerungen und Veränderungen adäquat reagieren zu können, müssen Handlungsoptionen und Entscheidungsmöglichkeiten frühzeitig eruiert werden. Vor diesem Hintergrund wurden im Forschungsvorhaben WERA Szenarien für das Wegemanagement bei der Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland entwickelt, analysiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen und Interdependenzen bewertet.

1.1. Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Projekt WERA verfolgt das Ziel, Handlungsoptionen und Handlungsbedarfe in Bezug auf die Entsorgung für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle aufzuzeigen.

Es will damit eine Basis schaffen, die Integration der verschiedenen Entsorgungsschritte (Zwischenlagerung, Eingangslager, Konditionierung, Transporte bis hin zur Endlagerung) aktiv zu gestalten. Außerdem sollen Aufgaben und Ziele für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen sichtbar gemacht und eine Grundlage für wirtschaftliche Betrachtungen im Zuge zukünftiger Konkretisierungen der Entsorgungswege geschaffen werden.

Dies soll durch die folgenden Teilziele erreicht werden:

 Zusammenstellung der zentralen Elemente möglicher Entsorgungswege für hochradioaktive Abfälle.

² Das AVR Behälterlager ist ein Zwischenlager für Brennelement-Kugeln aus dem früheren AVR-Versuchsreaktor. AVR steht für Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich, dabei handelt es sich um den ersten Hochtemperaturreaktor Deutschlands.

- 2. Entwicklung möglicher Entsorgungsszenarien von der Zwischenlagerung bis zur Endlagerung.
- 3. Analyse plausibler Szenarien und resultierender Konsequenzen.
- 4. Aufzeigen von Handlungsoptionen und Handlungsbedarfen entlang der Entsorgungswege zu verschiedenen Zeitpunkten.
- 5. Benennen von offenen Fragen und Hinweisen auf Entwicklungsbedarf für die aktive Gestaltung eines integrierten Entsorgungsmanagements.

Dafür werden zunächst die Entsorgungsschritte identifiziert, die notwendig sind, um vom derzeitigen Status Quo zum Ziel der erfolgreichen Endlagerung aller hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland zu gelangen. Für alle Entsorgungsschritte werden verschiedene Optionen zur Ausgestaltung entwickelt.

Durch Kombination der Optionen werden Szenarien entwickelt. Ausgehend von einem Referenzszenarium wird eine Reihe abweichender Szenarien formuliert und mit zugehörigen Abhängigkeiten skizziert. Aus dieser Bandbreite werden zwei plausible Szenarien gewählt und beschrieben. Technische Voraussetzungen, ökonomische Konsequenzen, administrative Erfordernisse werden dargestellt. Abhängigkeiten der Entsorgungsschritte eines Szenariums untereinander werden herausgearbeitet.

Die Betrachtung von Szenarien und deren Analyse dient der Formulierung von Handlungsoptionen und Handlungsbedarfen, abhängig von den jeweiligen Entsorgungsschritten. Dabei werden sowohl regulative als auch ökonomische und zeitliche Bedarfe festgehalten. Notwendige Ressourcen, Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie ungeklärte Fragen werden benannt, um ein aktives Entsorgungsmanagement zu unterstützen.

In einem Fachworkshop, der am 15.07.2021 aufgrund der Corona-Pandemie online durchgeführt wurde, wurden die Vorgehensweise und erste Ergebnisse mit ausgewählten Experten diskutiert. Der Workshop verfolgte die Ziele, die Vorgehensweise bei der Szenarienentwicklung zu reflektieren und die vorläufigen Ergebnisse zu diskutieren. Der Workshop stieß auf großes Interesse. Etwa 30 Teilnehmerinnen und Teilnehmer verschiedener Institutionen nahmen teil. Vertreterinnen und Vertreter aus folgenden Institutionen waren eingeladen:

- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)
- Gesellschaft f
 ür Zwischenlagerung mbH (BGZ)
- Karlsruher Institut für Technologie Institut für nukleare Entsorgung (KIT-INE)
- Institut f
 ür Biochemie und Molekularbiologie (IBMB) (Uni Bonn)
- Projektträger Karlsruhe (PTKA)
- Bundesanstalt f
 ür Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Landesamt f
 ür Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG)
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH TECHNOLOGY (BGE TECHNOLOGY)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)
- Institut f
 ür Werkstoffkunde Leibnitz Universit
 ät Hannover (IW LUH)

- Technische Universität Bergakademie Freiberg (TU Bergakademie Freiberg)
- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)
- Projektträger GRS (PT GRS)
- Bundesministerium f
 ür Wirtschaft und Energie (BMWi)
- Nationales Begleitgremium (NBG)
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (NMU)
- Institut f
 ür Endlagerforschung TU Clausthal (IELF)
- Bundesanstalt f

 ür Materialforschung und -pr

 üfung (BAM)

Während des Workshops wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 und 3 sowie die Methode und erste Zwischenergebnisse der Szenarioanalyse von den Bearbeitern vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert. Die Anregungen und Diskussionsbeiträge wurden protokolliert und im Anschluss an den Workshop ausgewertet. Viele der diskutierten Vorschläge wurden zur Ergänzung der dargestellten Optionen und Szenarien genutzt und fanden Eingang in diesen Forschungsbericht.

1.2. Grundlagen und Rahmenbedingungen

1.2.1. Grundlegende Annahmen und Definitionen³

Zur Durchführung wurden zu Projektbeginn einige grundlegende Konventionen vereinbart:

- Ausgangspunkt der Betrachtungen in WERA ist der Zustand⁴, dass die hochradioaktiven Abfälle in zentralen Zwischenlagern sowie in Standortzwischenlagern aufbewahrt werden; ausstehende Transporte von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Sellafield und La Hague zu den Zwischenlagerstandorten Philippsburg, Brokdorf, Isar; Brennelemente aus Forschungsreaktoren an deren jeweiligen Lagerorten.
- Die hier zugrunde gelegten Entsorgungsschritte sind die Zwischenlagerung, die Konditionierung, die Eingangslagerung und die Endlagerung. Diese Entsorgungsschritte werden im Wesentlichen über die Beschreibung der mit ihnen verbundenen Anlagen erfasst.
- Als Endpunkt der Betrachtung wird in WERA der Verschluss des Endlagers angenommen, d. h., auch eine Rückholung ist Teil der Betrachtung.
- Grundlage aller in WERA angestellten Überlegungen ist das aktuelle gesetzliche und untergesetzliche Regelwerk in der Bundesrepublik Deutschland.
- Optionen, die aufgrund der gegenwärtigen Gesetzeslage ausgeschlossen sind, wurden ungeachtet dessen ebenfalls betrachtet, aber ggf. im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung begründet

³ Vorbemerkung: In der Vorhabenbeschreibung zum Vorhaben WERA wurde der Begriff des Bausteins zentral verwendet. Dabei sind die Bedeutungsinhalte des Begriffs Baustein auf verschiedenen Ebenen des Wegemanagements angesiedelt. Ein Zwischenlagergebäude beispielsweise kann ebenso als Baustein betrachtet werden wie der Tragzapfen eines Transport- und Lagerbehälters (TLB). Das führt dazu, dass identifizierbare Bausteine zueinander weitgehend inkommensurabel sind. Es wurde daher entschieden, von der Metapher eines Baukastens mit Bausteinen Abstand zu nehmen und stattdessen Entsorgungsschritte auf dem Weg über Optionen zu deren Ausgestaltung zu erfassen; Optionen wiederum werden durch ein Schema von Angaben zu wesentlichen charakteristischen Eigenschaften beschrieben. Im vorliegenden Bericht wird daher auf den Begriff Bausteine verzichtet.

Vorausgesetzt wird dabei, dass alle Brennelemente in die trockene Zwischenlagerung überführt werden, dass die Zwischenlager Brunsbüttel und Jülich eine Genehmigung erhalten und dass das beantragte Zwischenlager ESTRAL in der beantragten Form errichtet wird.

ausgeschlossen. Dem zugrunde lag jeweils die Überlegung, ob auch in Zukunft vom Ausschluss einer Option auszugehen ist insbesondere vor dem Hintergrund der langen Zeiträume.

- Es wird angenommen, dass die TLB nicht direkt endgelagert werden. Der fehlende Nachweis zur Qualifizierung der TLB als Endlagerbehälter und die enorme Wärmeleistung der voll beladenen Behälter, die ein Einhalten der Auslegungsgrenztemperatur von 100°C derzeit unmöglich machen, sind die Begründung dafür.
- Nicht betrachtet wurden Entsorgungsoptionen, die eine Alternative zur Endlagerung darstellen sowie Verfahren zur Partitionierung und Transmutation. Vor Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes 2017 in Deutschland wurden alternative Entsorgungsoptionen intensiv diskutiert und sämtlich verworfen. Nach aktuellem Kenntnisstand ist für keine alternative Entsorgungsoption in absehbarer Zeit eine Realisierung zu erwarten.
- Nicht betrachtet wurden außerdem Szenarien, die aufgrund äußerer Umstände wie Krieg oder Terror die Handlungsmöglichkeiten einengen, weil beispielsweise Entsorgungsoptionen nicht (mehr) zur Verfügung stehen. Ein solches Szenario haben die Autorinnen und Autoren nicht für wahrscheinlich gehalten. Es ist durch den Krieg in der Ukraine leider zu einem denkbaren Szenario geworden und neu zu bewerten.

1.2.2. Zeitbedarf für den Entsorgungsweg

Für den Zeitbedarf für die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland gibt es regulatorische und strategische Vorgaben. Der tatsächliche Zeitbedarf für die Entsorgung und das dafür benötigte Wegemanagement sind aber zumindest unsicher. Ungewissheiten und Unsicherheiten hinsichtlich des Zeitbedarfs und des zeitlichen Ablaufs sind mit allen Entsorgungsschritten verbunden.

Der Entsorgungsweg hochradioaktiver Abfälle wird durch zwei Fixpunkte bestimmt: Den derzeitigen Status Quo des Abfallmanagements als Ausgangspunkt, und den Verschluss des Endlagerbergwerks als Endpunkt. Durch diese Beschreibung wird ein relativer Zeitraum eröffnet: ein Datum für sein Ende existiert nicht.

Zeitlich bestimmend für die Phase der Zwischenlagerung ist der Prozess der Standortauswahl, die bereits begonnen hat. Der Standortauswahlprozess wird im Forschungsvorhaben WERA nur insofern betrachtet, als der Zeitpunkt der Standortentscheidung Auswirkungen auf die einzelnen Entsorgungsschritte hat. Gemäß § 1 StandAG wird angestrebt, den Endlagerstandort 2031 festzulegen.

Vorhandene Informationen zum Zeitbedarf werden im Folgenden zusammengestellt und durch eigene Überlegungen ergänzt mit dem Ziel einer Annäherung an die mögliche Dauer des Entsorgungswegs: vom Zeitpunkt der erfolgreichen Stilllegung des Endlagerbergwerks hängen alle zeitlichen Überlegungen zu vorgelagerten Entsorgungsschritten ab.

Endlagerung

Für die Endlagerung werden die Phasen Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagerbergwerks unterschieden. Für die Errichtung eines Endlagers im Anschluss an die Standortauswahl wird im Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm – NaPro) ein Zeitbedarf von etwa 20 Jahren angenommen. Demnach soll das Endlager "um das Jahr 2050 in Betrieb gehen" (BMUB 2015). Auch die ESK hält fest, dass für Genehmigung, Errichtung und Inbetriebnahme eines



Endlagers "nach derzeitigen Erfahrungen mindestens etwa 20 Jahre (bis ca. 2050) zu veranschlagen sind" (ESK 2015a).

Der für den Einlagerungsbetrieb selbst benötigte Zeitraum ist im Wesentlichen "vom Endlagerkonzept abhängig" (BMUB 2015). Die Endlagerkommission nimmt in ihrem Abschlussbericht (Endlagerkommission 2016) an, dass "der Einlagerungsbetrieb mindestens 20 - 30 Jahre dauern" wird.

Die NAGRA (2011) geht von einem Einlagerungsfortschritt für das Endlager der Schweiz von 200 ELB mit hochradioaktiven Abfällen pro Jahr aus. Nach diesem Konzept soll darüber hinaus der Inhalt eines TLB in zehn ELB umgeladen werden. Übertragen auf die Menge der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland müssten voraussichtlich etwa 1.900 TLB angeliefert, in ELB verpackt und eingelagert werden. Es ergibt sich ein Zeitbedarf von etwa 95 Jahren, währenddessen Transporte mit hochradioaktiven Abfällen zum Endlagerstandort durchgeführt werden. Bei einer Einlagerung im Dreischichtbetrieb, d. h. die Einlagerung von 600 ELB pro Jahr, reduziert sich dieser Zeitbedarf auf knapp 32 Jahre.

In den generischen Studien des Forschungsvorhabens RESUS (Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle) (Mönig et al. 2020), wurden u. a. Endlagerkonzepte und dafür erforderliche ELB abhängig von den Wirtsgesteinen untersucht. Für die betrachteten neun Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallin wurde eine unterschiedliche Anzahl benötigter Endlagerbehälter (ELB) ermittelt. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen wie z. B. Teufe des Endlagers, Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und gewähltem Einlagerungskonzept variiert die Anzahl der benötigten ELB zwischen 6.687 (Bertrams et al. 2020b) und 19.624 Behältern (Alfarra et al. 2020a). Damit liegt die Einlagerungsdauer unter Annahme eines Einlagerungsfortschritts von 200 ELB jährlich analog zum Schweizer Konzept etwa zwischen 33 und 98 Jahren. Die geringste Anzahl an ELB wird dabei allerdings unter Zugrundelegung einer Temperatur an der Behälteraußenseite von 150°C erreicht, was dem derzeit gültigen Regelwerk widerspricht. Die im StandAG festgelegte Grenztemperatur von 100°C wird mit Vorsorgegründen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten begründet. Die Verantwortung für eine Entscheidung über deren Wegfall oder Anpassung unterliegt entsprechend der Einschätzungsprärogative des Gesetzgebers. Im Forschungsvorhaben WERA wird daher die gesetzliche Grenztemperatur zugrunde gelegt. Davon ausgehen werden mindestens 9.669 ELB (Alfarra et al. 2020c) benötigt; die Einlagerungsdauer beträgt danach zwischen 48 und 98 Jahren.

Diese Kalkulationen zur Einlagerungsdauer gehen von einem Einschicht-Betrieb im Endlager aus. Angesichts der zeitlichen Dringlichkeit zur Entsorgung der Abfälle einerseits und der zur Verfügung stehenden Vorbereitungszeit bis zum Beginn des Einlagerungsbetriebes andererseits erscheint es plausibel, dass auch ein Betrieb in drei Schichten möglich ist. In diesem Fall liegt auf Grundlage der oben genannten Zahlen an Endlagerbehältern die Einlagerungsdauer zwischen etwa 16 und 33 Jahren. Für die Arbeiten in WERA wird ein gemittelter Zeitraum von 50 Jahren Einlagerungsdauer zugrunde gelegt.

Der Zeitbedarf für die Stilllegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist bisher nicht bekannt. Für das Vorhaben WERA wird davon ausgegangen, dass die qualifizierte Stilllegung, d. h. der Verschluss aller Kammern, Strecken und Schächte mit geotechnischen Barrieren, die den sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren gewährleisten, wenigstens den gleichen zeitlichen Aufwand erfordert wie die WERA "Öko-Institut e.V.

Errichtung des Bergwerks. Auch für die Stilllegung wird daher von einem Zeitbedarf von 20 Jahren ausgegangen.

Konditionierung

Die Konditionierung hochradioaktiver Abfälle zu Endlagergebinden wird zeitlich parallel zu den Entsorgungsschritten Eingangslagerung und Endlagerung stattfinden, je nach Ausgestaltung des Entsorgungswegs auch parallel zur Zwischenlagerung. Dieser Entsorgungsschritt kann zwar zu Verzögerungen im Ablauf führen; es entsteht aber grundsätzlich durch die Konditionierung kein zusätzlicher Zeitbedarf im Entsorgungsweg.

Eingangslagerung

Gemäß dem Nationalen Entsorgungsprogramm (BMU 2015) soll mit der ersten Teilgenehmigung für das Endlager an dessen Standort auch ein Eingangslager für alle bestrahlten Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung genehmigt und damit die Voraussetzung für den Beginn der Räumung der bestehenden Zwischenlager geschaffen werden. In Kapitel 2.3.3 wird alternativ auch die Möglichkeit betrachtet, ein Eingangslager als Pufferlager kleinerer Kapazität auszulegen.

Soll das Eingangslager auch zur Aufnahme möglicherweise rückgeholter Endlagergebinde dienen, muss es "bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers" (EndlSiAnfV 2020) in Betrieb bleiben. Im NaPro (BMUB 2015) wird dargestellt, dass "eine vollständige Räumung" der Zwischenlager innerhalb der derzeitigen Genehmigungsdauer von 40 Jahren "nach heutigen Erkenntnissen [...] nicht gewährleistet werden" kann. Unabhängig von der anlagentechnischen Ausgestaltung der Phase zwischen Ende der Zwischenlagergenehmigungen und Beginn der Konditionierung wird der Abfall nach wie vor zwischengelagert. Auch beim nachfolgenden Entsorgungsschritt Eingangslager handelt es sich demnach um eine Anlage zur verlängerten trockenen Zwischenlagerung. Deren Betriebsende ist abhängig vom Abschluss der Konditionierung bzw. der Einlagerung in ein Endlagerbergwerk. Soll das Eingangslager auch zur Aufnahme möglicherweise rückgeholter Endlagergebinde dienen, muss es "bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers" (EndlSiAnfV 2020) in Betrieb bleiben. In jedem Fall werden mit Beginn der Eingangslagerung sowie später der Endlagerung zeitlich parallele Zwischenlagerung sowie später zusätzlich parallele Konditionierung und Endlagerbetrieb stattfinden. Es entsteht aus diesem Entsorgungsschritt kein zusätzlicher Zeitbedarf auf dem Entsorgungsweg.

Zwischenlagerung

Die aktuellen Genehmigungen zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen enden für die zentralen Lager in Gorleben, Ahaus und Rubenow sowie die Standortzwischenlager zwischen 2034 und 2047 (detaillierte Darstellung in Kapitel 2.2.1). Auch die Genehmigung der TLB ist jeweils auf 40 Jahre befristet, so dass für einige Behälter, die beispielsweise zunächst in Interimslagern gelagert wurden, die Genehmigung bereits vor der des Zwischenlagers abläuft.

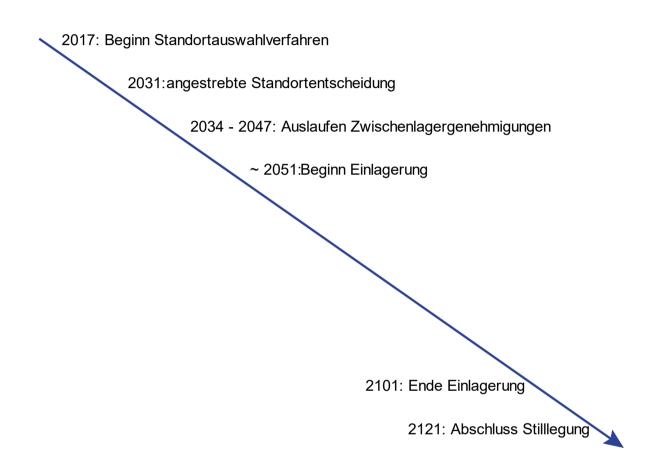
Wie oben ausgeführt, wird nach 2047 die Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle fortgesetzt werden müssen, in WERA wird dies als verlängerte Zwischenlagerung bezeichnet. Denkbar sind verschiedene Optionen in Zwischenlagern oder einem Eingangslager (s. dazu Kapitel 2.2.3). Statt der bisher genehmigten Aufbewahrungsdauer von 40 Jahren muss von Zwischenlagerzeiträumen von etwa 65 bis 100 Jahren für einen nennenswerten Teil der TLB ausgegangen werden (ESK 2015a). Statt der bisher genehmigten Aufbewahrungsdauer von 40 Jahren muss von Zwischenlagerzeiträumen von etwa 65 bis 100 Jahren für einen nennenswerten Teil der TLB ausgegangen werden (ESK 2015a).



Zeitbedarf für den Entsorgungsweg

Unter den Voraussetzungen, dass 2031 eine Standortentscheidung getroffen wird, die Errichtung des Endlagers in etwa 20 Jahren abgeschlossen werden kann und auch für die Stilllegung weitere 20 Jahre zu veranschlagen sind, kann das Ende des Entsorgungsweges, abhängig von Sicherheitskonzept und Auslegung des Endlagers sowie 50 Jahren Einlagerungsbetrieb etwa um das Jahr 2121 erreicht werden.

Abbildung 1-1: Zeitbedarf/ zeitlicher Ablauf der Entsorgung



Quelle: Eigene Darstellung. Die Daten für den Beginn des Standortauswahlverfahrens und das Ende der Genehmigungszeiträume der Zwischenlager stehen fest. Termine für die Standortentscheidung, den Beginn und die Dauer von Einlagerungsbetrieb und Stilllegung sind abhängig von verschiedenen Faktoren.

Die oben zusammengestellten Informationen zum Zeitbedarf bilden die Ausgangsbasis für die Abschätzung des Zeitbedarfs im Rahmen der Szenarienentwicklung. Durch die Entwicklung von Szenarien und deren Analyse werden mögliche Einflussfaktoren auf den zeitlichen Verlauf identifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen beschrieben.

1.2.3. Akzeptanz als Einflussfaktor für das Gelingen des Entsorgungswegs

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist nicht nur von technischen, rechtlichen, administrativen und organisatorischen Aspekten abhängig. Röhlig et al. (2019) stellen dar, dass die Aufgabe "konfliktträchtig und unweigerlich mit vielfältigen Werturteilen, Risikoeinschätzungen, Narrativen,

rechtlichen Regelwerken und moralischen Grundsätzen verwoben" sei, "sodass es keine rein "sachlich begründete" Lösung geben" könne.

Eine wesentliche Rolle spielt die Akzeptanz der Bevölkerung, insbesondere in der Umgebung eines späteren Endlagerstandorts. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Unterscheidung zwischen Akzeptanz und Akzeptabilität. Nach Röhlig et al. (2014) bezieht sich der Begriff Akzeptanz "auf die Frage, ob etwas faktisch Zustimmung findet oder nicht, während sich der Begriff der Akzeptabilität auf die Frage bezieht, ob etwas im Lichte aller diskutierten Gründe Zustimmung verdient oder nicht". Nach (Brohmann et al. 2018) wird in der Beteiligungsforschung der Begriff der Verfahrens-Akzeptabilität vorgezogen. Demnach wird als Akzeptabilität die Zustimmungschance zu einem Prozess beschrieben. Es wird deutlich, dass Akzeptanz nur schwer zur erreichen ist, wenn der zu akzeptierende Gegenstand für die Betroffenen nicht akzeptabel erscheint.

In der Vergangenheit wie auch in der Gegenwart sind Bauvorhaben kerntechnischer Anlagen in Deutschland auf Proteste und zivilgesellschaftlichen Widerstand gestoßen. Es zeigt sich, dass es ohne Berücksichtigung der jeweiligen lokalen und regionalen Bedingungen zu schwer lösbaren Konflikten kommen kann.

Aus diesem Grund "wird Instrumenten der Bürgerbeteiligung in öffentlichen Planungsverfahren zunehmend mehr Raum gegeben" (Kallenbach-Herbert et al. 2016). Als Hintergründe und Motivationen derer, die sich am Protest beteiligen bzw. diesen aktiv vorantreiben, können kursorisch folgende Punkte genannt werden (Kallenbach-Herbert et al. 2016):

Ungleichverteilung von Risiken und Nutzen:

"Bei den meisten Vorhaben trägt ein vergleichsweise kleiner Bevölkerungsteil die Risiken bzw. die sozialen und ökologischen Kosten" (Kallenbach-Herbert et al. 2016). Dies kann bei den Betroffenen zum Erleben von Ungerechtigkeit/verletzter Fairness führen. Der Aspekt der Verteilungsgerechtigkeit kommt dabei in besonderer Weise zum Tragen. Im Fall der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle "betrifft die Verteilung ein negatives Gut, nämlich eine hoch toxische langlebige Altlast, von der niemand mehr profitieren kann. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Verteilung negativer Güter immer dann, wenn das Kriterium "Verursachung" nicht greift, als "ungerecht" empfunden werden kann" (Röhlig et al. 2019).

Unklarer Nutzen:

Die Notwendigkeit von Vorhaben bzw. bestimmter Teilelemente ist teilweise auch unter Fachleuten umstritten. Fachwissen wird oft nur "von den Verfahrensträgern oder deren Gegnern zur Verfügung gestellt" (Kallenbach-Herbert et al. 2016), dadurch steht der Vorwurf der Abhängigkeit im Raum. "Dies führt letztendlich dazu, dass sich Betroffene immer weniger auf Expertenmeinungen verlassen" (Kallenbach-Herbert et al. 2016). Darüber hinaus ist detailliertes Wissen notwendig, um die Ziele eines Planungsverfahrens nachvollziehen zu können. Für Laien ist es schwierig (bzw. sehr aufwändig), Zugang zu allen notwendigen Informationen zu erhalten und entsprechendes Fachwissen zu erlangen.

Der Wunsch nach mehr Teilhabe und Mitspracherecht

Aus dem Protest gegen die Art und Weise, wie Beschlüsse getroffen werden, entwickelt sich dieser Wunsch insbesondere mit zunehmendem ökonomischem Wohlstand und Bildungsstand. Der Prozess der Entscheidungsfindung ist mindestens genauso wichtig wie das Ergebnis der Entscheidung (Kallenbach-Herbert et al. 2016).



Diese Punkte verdeutlichen, dass Wissen und Transparenz zentrale Elemente partizipativ gestalteter Entscheidungsprozesse sind. In der Praxis zeigt sich immer wieder, dass es einer intensiven Auseinandersetzung mit den Befürchtungen und Reaktionen der Bürger bedarf, um akzeptable Lösungen zu finden (Kallenbach-Herbert et al. 2016). Eine übergreifende Partizipationsstrategie, die die Ansprüche und das Wertesystem der Bevölkerung erfasst und präzisiert, ist wesentlich. Zu deren Gestaltung steht eine Reihe von formellen und informellen Formaten zur Beteiligung zur Verfügung. Wichtige Kriterien gelingender Beteiligung sind u.a.:

- Frühes Einbeziehen alle Akteursgruppen,
- Erstellen klarer Regeln der Beteiligung sowie Aufzeigen der Rollen und Handlungsspielräume (Rechte und Pflichten) aller Beteiligten,
- Transparente Kommunikation (offen, glaubwürdig, fair),
- Erlangung von Vertrauen,
- Zugänglichkeit von Information und Wissen für alle Akteursgruppen zur Vermeidung von Wissensdefiziten,
- Kommunikation von bestehenden Wissenslücken, Unsicherheit und negativ besetzte Themen.

Im Standortauswahlverfahren nach dem StandAG sind, von der Fachkonferenz Teilgebiete über Regionalkonferenzen und die Fachkonferenz Rat der Regionen bis zur formalen Beteiligung im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen, verschiedene Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung vorgesehen. Dabei werden neue und weitergehende Möglichkeiten der Partizipation eröffnet, als bisher im Zusammenhang mit der Umsetzung großer Infrastrukturprojekte praktiziert. Im Sinne eines lernenden Verfahrens haben sich darüber hinaus weitere Formate wie das Forum Endlagersuche und der sich derzeit gründende Rat der jungen Generation entwickelt. Mit der Standortentscheidung wird das Verfahren nach dem Standortauswahlgesetz enden. Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers sowie die Beteiligung an den jeweiligen Genehmigungsprozessen werden nach heutigem Stand durch das AtG geregelt werden. Es ist aber anzunehmen, dass einzelne angepasste Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung fortgesetzt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts WERA kann nicht für jeden Entsorgungsschritt auf die Details zum Aufbau und zur Unterstützung von sozio-politischer und lokaler Akzeptanz und Maßnahmen zur Beteiligung eingegangen werden. Für die Arbeiten im Forschungsvorhaben WERA ist wichtig, welche Auswirkungen die Zustimmung oder Ablehnung geplanter Maßnahmen, die mit einzelnen Entsorgungsschritten und den jeweils dazugehörigen Anlagen, Genehmigungsverfahren, dem Bau und Betrieb der Anlagen verbunden sind, haben. Ablehnung und Widerstand können die Umsetzung der einzelnen Entsorgungsschritte zeitlich stark verzögern oder zur Aufgabe oder Anpassung von Planungen führen.

Im Forschungsvorhaben WERA werden Themen der Akzeptanz nicht behandelt; dieser Aspekt findet bei der Entwicklung von Szenarien insofern Berücksichtigung, als dass auf die zeitlichen Verschiebungen, die sich aus der Ablehnung von Maßnahmen des Entsorgungswegs durch die Bevölkerung ergeben können, eingegangen wird.

1.2.4. Radioaktive Abfälle

Die Darstellung des zu berücksichtigenden Abfallinventars ist grundlegend für alle Arbeiten im Rahmen von WERA. Radioaktive Abfälle werden von der IAEA in sechs verschiedene Abfallklassen eingeteilt (IAEA 2009). Dabei ist ausdrücklich die Möglichkeit vorgesehen, die Grenzen zwischen den Klassen an die Erfordernisse des jeweiligen nationalen Abfallmanagements der Mitgliedsstaaten anzupassen.

Deutschland hat in der Vergangenheit einen darüber hinausgehenden eigenen Weg der Abfallklassifizierung beschritten und in den Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums (BMU 2010) eine Unterscheidung in wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle einerseits und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung andererseits vorgenommen. Diese Unterscheidung wird im nationalen Regelwerk allerdings nicht konsistent angewendet.

Während im Nationalen Entsorgungsprogramm (BMUB 2015) nach bestrahlten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung einerseits und Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung andererseits differenziert wird, findet die Nomenklatur der Sicherheitsanforderungen in den gesetzlichen Regelwerken keinen Niederschlag. Das Atomgesetz (AtG 2021) enthält die Formulierung "verfestigte hochradioaktive Spaltproduktlösungen aus der Aufarbeitung von Kernbrennstoffen" und regelt darüber hinaus nur den Umgang mit "radioaktiven Abfällen", im Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) wird nach hochradioaktiven Abfällen und schwach- und mittelradioaktiven Abfällen unterschieden.

Im Forschungsvorhaben WERA stehen abgebrannte Brennelemente sowie Wiederaufarbeitungsabfälle, die Stoffe also, für die durch den im Standortauswahlgesetz festgelegten Prozess ein Endlagerstandort gefunden werden soll, im Fokus. Da eine nationale Definition für hochradioaktive Abfälle nicht publiziert ist und sich die Definitionen der IAEA für hochradioaktive Abfälle (High active waste – HAW) und die der Sicherheitsanforderungen des BMU für wärmeentwickelnde Abfälle in wesentlichen Punkten decken – hohe Aktivität, dadurch Wärmeentwicklung und davon abgeleitet besondere Anforderungen an die Endlagerung – können die Begriffe als weitgehend synonym betrachtet werden. Im Folgenden werden hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente zusammenfassend als hochradioaktive Abfälle bezeichnet.

Gemäß dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle mit Stand 2019 (BMU 2021) befinden sich 31.955 Brennelemente in der Zwischenlagerung (Kernkraftwerk-Lagerbecken und trockene Zwischenlagerung). Das entspricht 9.104 Mg Schwermetall (SM). Gemäß dem Abfallverzeichnis (BMU 2021) wird die Gesamtmenge an abgebrannten Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren mit 10.100 Mg SM in 1.100 Behältern prognostiziert. Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im In- und Ausland umfassen 3.164 Kokillen in 113 Behältern, die im Zwischenlager Gorleben und im Zwischenlager Nord gelagert sind. Die Rücklieferung von drei bis fünf Castor-Behältern mit verglasten hochradioaktiven Abfällen an den Standort Philippsburg steht noch aus (BMUV 2021). Aus den deutschen Versuchs- und Prototypreaktoren lagen zum Stichtag 461 Behälter mit abgebrannten Brennelementen vor. Weitere 18 Behälter beinhalten Brennelemente aus Forschungsreaktoren. Auch hier ist ein weiterer Zuwachs zu erwarten.

Anhand der Angaben aus (BMU 2021) ergeben sich derzeit 1.717 Behälter mit hochradioaktiven Abfällen zuzüglich der noch nicht verpackten Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die in ein Endlager gemäß Standortauswahlgesetz zu entsorgen sind. Die Bestände und Prognosen werden durch das Bundesumweltministerium regelmäßig aktualisiert. In diesem Vorhaben wird eine Größenordnung von 1.900 Behälter angenommen.

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sind vorläufige Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG durchzuführen. Bestandteil der Untersuchung ist unter anderem eine Beurteilung, "inwiefern in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten ist, dass eine zusätzliche Endlagerung größerer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle möglich ist"



(StandAG 2017). Im Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB 2015) werden die "radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ggf. nicht im Endlager Konrad für schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden können", beschrieben. Dies sind Abfälle aus der Urananreicherung, rückzuholende Abfälle aus der Schachtanlage Asse II und sonstige Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können.

Für das Wegemanagement der hochradioaktiven Abfälle müssen sie entsprechend mitbetrachtet werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird daher jeweils kursorisch dargestellt, bei welchen Entsorgungsschritten und auf welche Weise diese Abfälle einen Einfluss auf die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle haben bzw. welche Wechselwirkungen potenziell auftreten können.

1.2.5. Transporte hochradioaktiver Abfälle

Die hochradioaktiven Stoffe werden in Deutschland hauptsächlich in Transport- und Lagerbehältern der CASTOR-Behälterfamilie gelagert, es werden aber auch von der französischen Firma Transnucléaire (heute Orano-Gruppe) entwickelte Behälter (TN) eingesetzt. Die Sicherheit beim Transport hochradioaktiver Stoffe wird hauptsächlich durch den Behälter gewährleistet, der eine entsprechende verkehrsrechtliche Zulassung aufweisen muss.

Auch jeder Transport benötigt eine Genehmigung nach § 4 AtG. Ihr liegen Vorschriften des Atomrechts und des Gefahrgutrechts zugrunde, die wiederum internationale Vorgaben einhalten. Die Beförderungsbedingungen sind zudem spezifisch für das jeweilige Verkehrsmittel.

Zu transportierende Behälter mit hochradioaktiven Abfällen müssen den Auswirkungen auch schwerer Unfälle standhalten können und dabei ihre Sicherheitsfunktion hinsichtlich der Dichtheit, der Abschirmung, der Wärmeableitung und der Kritikalitätssicherheit beibehalten (BASE 2020d). Grundsätzlich sind Transporte über die Straße, die Eisenbahn, per Seeschiff oder per Binnenschiff möglich. Je nach Verkehrsträger werden verschiedene Infrastrukturelemente benötigt wie beispielsweise ein Gleisanschluss der Ausgangs- und Zielorte eines Transports bzw. eine nahegelegene Verladeanlage beim Transport per Eisenbahn, ein Hafen oder Anleger für den Transport per Binnenschiff oder per Seeschiff. Gegebenenfalls sind Umladestellen erforderlich. Zu transportierende Behälter mit hochradioaktiven Abfällen müssen den Auswirkungen auch schwerer Unfälle standhalten können und dabei ihre Sicherheitsfunktion hinsichtlich der Dichtheit, der Abschirmung, der Wärmeableitung und der Kritikalitätssicherheit beibehalten (BASE 2020d).

Ein Transport kann einen oder mehrere Behälter umfassen. So wurden beim Rücktransport von Wiederaufbereitungsabfällen von Frankreich nach Gorleben bis zu 12 Behälter im Rahmen eines Transports befördert (GNS 2006)(wikipedia 2020). Würde es bei dieser Transportkapazität bleiben, wären rund 158 Transporte erforderlich. Bezüglich der Auswirkungen auf die Abfälle im Behälter spielt es eine Rolle, wie häufig ein einzelner Behälter transportiert wird, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Abfälle beim Transport mechanisch beansprucht werden.

In der Atomgesetznovelle von 2002 wurde u. a. bestimmt, dass ab Mitte 2005 keine Transporte mehr zur Wiederaufarbeitung im Ausland zulässig sind. Parallel wurde der Bau von Zwischenlagern an den Kernkraftwerksstandorten angestoßen, die 2006/2007 in Betrieb gegangen sind. Dadurch wurde die Zahl von Transporten hochradioaktiver Abfälle in Deutschland deutlich verringert.

Der Rücktransport der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in die deutschen Zwischenlager ist aber noch nicht abgeschlossen. Diese sollen bis 2024 abgeschlossen sein (BMUV 2021). Auch die innerbetrieblichen Transporte und damit verbundenen Handhabungen zur Überführung der noch in den Nasslagern der Kernkraftwerke befindlichen Brennelemente in die trockene Zwischenlagerung, die im Vergleich zu den Transporten auf öffentlichen Verkehrswegen mit weniger Ressourcen und Kapazitäten durchgeführt werden können, werden voraussichtlich bis 2027 abgeschlossen sein (BMU 2020). Transporte müssen erst dann wieder durchgeführt werden, wenn das Eingangslager seinen Betrieb aufnimmt. Gemäß dem Nationalen Entsorgungsprogramm (BMUB 2015) soll mit der ersten Teilgenehmigung für das Endlager an dessen Standort auch ein Eingangslager genehmigt werden. Nach StandAG soll die Standortentscheidung für das Endlager 2031 getroffen werden. Im Idealfall sind dann die Genehmigungsverfahren für die erste Teilgenehmigung für das Endlager sowie für das Eingangslager sehr gut vorbereitet und können zügig durchgeführt werden. Nach der erteilten Genehmigung muss die Errichtung des Eingangslagers erfolgen. Selbst bei zeitlich idealem Ablauf dieser Schritte werden mindestens 20 Jahre zwischen den letzten Transporten zur Rückführung der Wiederaufarbeitungsabfälle aus Frankreich auf öffentlichen Verkehrswegen und den dann notwendigen Transporten der TLB aus den Zwischenlagern zum Eingangslager liegen.

Für das Projekt WERA werden ausschließlich Transporte zwischen den einzelnen Entsorgungsschritten betrachtet. Hierbei werden vor allem die möglichen Einflüsse des Transports auf das Abfallinventar, aber auch Kapazitäten, Ressourcen und Risiken beleuchtet.

1.2.6. Behälter und Inventar

1.2.6.1. Transport- und Lagerbehälter (TLB)

Für abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken, Brennelemente aus Forschungsreaktoren und verglaste hochradioaktive Abfälle gibt es in Deutschland ca. 10 verschiedene Transport- und Lagerbehälter aus der Castor-Behälterfamilie. Sie unterscheiden sich in Abmessungen, Leermasse, Beladungsumfang, Tragkorb-Einbauten usw. Darüber hinaus stehen in einigen Zwischenlagern TLB der französischen Firma Transnucléaire (TN). Im Genehmigungsverfahren wurde nachgewiesen und bestätigt, dass die TLB für eine Lagerdauer von mindestens 40 Jahren geeignet sind.

Für den sicheren Einschluss im Behälter sind neben dem Behälterkörper selbst das Doppeldeckeldichtsystem mit Primär- und Sekundärdeckel von zentraler Bedeutung. Zur kontinuierlichen Dichtheitsüberwachung der Deckel und der zugehörigen Dichtungen wird der Druck im Innenraum zwischen Primär- und Sekundärdeckel durch einen Druckschalter überwacht. Sollte einer der Deckel
undicht werden, ändert sich der Druck und der Schalter wird ausgelöst. Auch ein Defekt des Druckschalters führt zu einer Meldung. Reparaturen am Druckschalter oder dem Behälterüberwachungssystem können im Zwischenlager behoben werden (z. B. Austausch von Bauteilen). Sollte die spezifikationsgerechte Dichtheit⁵ der Sekundärdeckeldichtung nicht mehr gegeben sein, kann auch
diese in den Zwischenlagern ausgetauscht werden.

Erfüllt die Primärdeckelbarriere nicht mehr die spezifikationsgerechte Dichtheit, kann diese bei Standortzwischenlagern in den Einrichtungen des benachbarten Kernkraftwerks ausgetauscht werden, solange diese noch nicht zurückgebaut wurden. Da für den Austausch der Primärdeckeldichtung der TLB geöffnet werden muss, ist eine Einrichtung wie beispielsweise eine Heiße Zelle zur abgeschirmten, fernhantierten Durchführung dieser Arbeiten erforderlich. Diese stehen in den Zwischenlagern nicht zur Verfügung.

_

⁵ Die Primär- und Sekundärdichtungen haben eine spezifizierte und verifizierte Standard-Helium-Leckrate und werden als "technisch dicht" angesehen.



Ein alternatives Reparaturkonzept, das ebenfalls in den Zwischenlagern durchgeführt werden kann, besteht in dem Aufschweißen eines Fügedeckels. Er besteht aus einer Stahlplatte, die mit dem Behälterkörper verschweißt wird. So entsteht eine zweite technisch dichte Barriere und das Doppeldeckel-Dichtsystem ist wiederhergestellt. Das Fügedeckelkonzept als Reparaturmaßnahme ist für den Zwischenlagerbetrieb vorgesehen. Der Transport von TLB ist allerdings mit nur einem spezifikationsgerechten Deckel zugelassen. Beispielsweise ist der Transport von Behältern der Bauart CAS-TOR®HAW28M derzeit nur mit intaktem Primärdeckel zugelassen (ohne Sekundärdeckel und ohne Fügedeckel) (ESK 2014). Im April 2020 wurde beim BASE durch den Hersteller ein Antrag gestellt, die verkehrsrechtliche Zulassung auf den Sekundärdeckel als dichte Umschließung zu erweitern (BGZ o.D.a).

Mit zunehmender Lagerdauer ist mit Veränderungen des Behälters, der Behälterbauteile oder des Inventars zu rechnen, die sich möglicherweise auch auf die Sicherheit der Lagerung oder nachfolgender Entsorgungsschritte auswirken können. Für den TLB gilt, dass aufgrund der hohen Wandstärke und des geringen verfügbaren Abfallinventars an Sauerstoff bzw. Wasser eine Gefährdung der Integrität des TLB auch bei Lagerzeiten jenseits der 40 Jahre durch Temperatur, Strahlung, Druck- und Zugbeanspruchung sowie Korrosion wenig wahrscheinlich ist. Mögliche Alterungsvorgänge an der inneren Behälterwandung, am Behälterboden und den Tragkörben können aber nicht per se ausgeschlossen werden, da das Behälterinnere für entsprechende Inspektionen nur zugänglich ist, wenn ein TLB geöffnet und sein Inhalt entladen wird (Ellinger et al. 2010).

Bezüglich der abgebrannten Brennelemente gibt es Einflussfaktoren, die bei längerer Lagerung prinzipiell zu Schäden der Hüllrohre führen könnten. Es könnte dann zu einer Freisetzung von gasförmigen Stoffen in die Behälteratmosphäre kommen, die den Behälterinnendruck und die Wärmeabfuhrbedingungen beeinträchtigen können. Außerdem könnte es zu Verlagerungen des Abfallinventars kommen, bei der darüber hinaus auch die lokale Dosisleistung an der Behälteroberfläche und die Kritikalitätsbetrachtungen betroffen sein können. Diese Parameter spielen insbesondere für die Transportfähigkeit der TLB eine große Rolle (Hummelsheim et al. 2018).

Bei den Kokillen mit verglasten Abfällen ist bei einem Verlust der Dichtheit der Kokille aufgrund des gebundenen Charakters der Abfälle keine größere Freisetzung von gasförmigen Stoffen in die Behälteratmosphäre oder eine Verlagerung der Abfälle während der Zwischenlagerung im Normalbetrieb zu unterstellen. Nichtsdestotrotz sind insbesondere für eine erheblich verlängerte Zwischenlagerung mögliche Degradationsmechanismen, wie z. B. ein möglicher Druckaufbau durch Freisetzung von Gasen, nicht auszuschließen (Hummelsheim et al. 2018).

Bezüglich der Behälterfunktion gibt es nach (ESK 2015a) aufgrund der bisher vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen auch bei einer verlängerten Zwischenlagerung keine grundsätzlichen Zweifel am Erhalt des bestehenden Sicherheitsniveaus der Behälter. Dennoch sind sowohl für eine verlängerte Lagerung als auch für die Transportfähigkeit im Anschluss an die verlängerte Zwischenlagerung Nachweise zu erbringen, dass sicherheitsrelevante Parameter wie Behälterinnendruck, Wärmeabfuhrbedingungen, Oberflächendosisleistung und Einhaltung der Unterkritikalität innerhalb definierter Werte bleiben. Dies ist durch belastbare Daten zu belegen. Diese Nachweise sind keinesfalls trivial und das Verfahren für die Nachweise ist noch offen.

1.2.6.2. Endlagerbehälter (ELB)

Endlagerbehälter sind ein Teil des Endlagerkonzepts, das einen dauerhaften Schutz des Menschen und der Umwelt vor den hochradioaktiven Abfällen sicherstellen muss. Zusätzlich müssen Endlagerbehälter während des Betriebes des Endlagers rückholbar und für 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers bergbar sein (StandAG 2017). Nach jetzigem Stand ist für sie eine Grenztemperatur an der Oberfläche des Endlagergebindes von 100 C zu berücksichtigen (StandAG 2017). Für das Wirtsgestein Kristallin sind deutlich höhere Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters zu stellen, da das Wirtsgestein hier im Gegensatz zu Ton und Salz den sicheren Einschluss nicht übernimmt. Im Standortauswahlverfahren muss nachgewiesen werden, dass Herstellung und Errichtung der Barrieren möglich sind. Zum Nachweis gehört auch eine Erprobung.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) hat grundsätzliche Anforderungen an den Endlagerbehälter definiert (BGE 2021a), die parallel zum Standortauswahlverfahren weiter zu konkretisieren sind. Dies sind Produktanforderungen, Rahmenbedingungen zur Entwicklung und Herstellung sowie Anforderungen an Rückholbarkeit und Bergbarkeit. Vorgesehen ist eine wirtsgesteinsspezifische Behälterentwicklung. Diesbezüglich hat die BGE 2021 zunächst die Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für das Wirtsgestein Kristallin ausgeschrieben. Entsprechende Behälterkonzeptentwicklungen für die beiden anderen Gesteinsarten sollen folgen.

Bereits in der Vergangenheit wurden verschiedene Endlagerbehältermodelle für die unterschiedlichen Wirtsgesteine entwickelt. Da diese in den Diskussionen häufig beispielsweise für rechnerische Abschätzungen herangezogen werden, werden sie nachfolgend kurz vorgestellt (Hassel; Köhler; Kurt 2019):

- Der POLLUX®-Behälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit ist ein abgeschirmter Lagerbehälter zur direkten Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Für abgebrannte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gibt es unterschiedliche Modelle des Pollux. Er wurde für die Streckenlagerung von wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen in Salzstein entwickelt. Die den Lagerbehälter umgebenden Bereiche werden nach der Einlagerung mit trockenem Salzgrus verfüllt. Der Behälter kann aufgrund der Selbstabschirmung ohne zusätzliche Overpacks transportiert werden. Auch für Tonstein wurde ein Modell entwickelt.
- Behälter aus der CASTOR® Familie, die alle ursprünglich als abgeschirmte Transport- und Lagerbehälter entwickelt wurden, wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur Einlagerung in tiefen geologischen Formationen in kurzen, horizontalen Bohrlöchern im Salz untersucht (Graf, R., Dr. Brammer, K.-J., Filbert, W. 2015). Für die jeweiligen Behälter sind auch Modifikationen denkbar, die sich dann für andere Brennelementtypen oder verglaste Abfälle eignen. Betrachtet wurden:
 - CASTOR® THTR/AVR für abgebrannte kugelförmige Brennelemente,
 - CASTOR® V/19 für abgebrannte Brennelemente aus Druckwasser-Reaktoren,
 - CASTOR® V/52 für abgebrannte Brennelemente aus Siedewasser-Reaktoren,
 - CASTOR® 440/84 für abgebrannte Brennelemente der Druckwasser-Reaktoren des Typs WWER 70 oder WWER 440,
 - CASTOR® HAW 28 für verglaste hochradioaktive Abfälle.
- Die Brennstabkokille (BSK) ist ein nicht abgeschirmter Lagerbehälter zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente in bis zu 300 m langen, vertikalen Bohrlöchern in Steinsalz. Sie dient der Aufnahme von Brennstäben von Druckwasser-Reaktoren und stellt den Musterbehälter einer ganzen Lagerbehälterfamilie dar. Weitere Modifikationen dieses Behältertyps sollen zur Lagerung von Brennelementen aus anderen Reaktortypen sowie von verglasten Wiederaufbereitungsabfällen zum Einsatz kommen. Aufgrund der geringen Abschirmung und der geringen Wandstärken (eingeschränkte Sicherheit gegen Transportbeschädigung) ist zum Transport der Behälter ein Overpack/Transportbehälter erforderlich.



 Das C-Overpack aus unlegiertem Stahl stellt den Referenzbehälter des französischen Endlagerkonzeptes zur Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen dar. Das Konzept sieht eine Einlagerung der Behälter in verrohrten, horizontalen Bohrlöchern in etwa 500 m Tiefe im Tonstein vor. Es sind verschiedene Varianten vorgesehen.

- Der CU1-Behälter aus einem Mantel aus unlegiertem Stahl und einer Innenstruktur aus Gusseisen mit Einsätzen aus rostfreiem Stahl ist in Frankreich zur Einlagerung von Uranoxid-Brennelementen (UOX-BE) in verrohrten, horizontalen Bohrlöchern in etwa 500 m Tiefe im Tonstein vorgesehen, falls keine vollständige Wiederaufarbeitung der Brennelemente erfolgt. Von ihm werden weitere Modelle für Mischoxid-Brennelemente (MOX-BE) und BE aus Versuchsreaktoren abgeleitet. Der Behälter soll den sicheren Einschluss der Abfälle während der thermischen Periode von etwa 10.000 Jahren sowie eine sichere Handhabbarkeit der Abfälle gewährleisten. Für den Transport sind abgeschirmte Transportbehälter vorgesehen.
- Der KBS-3V-Behälter ist ein nicht abgeschirmter Lagerbehälter zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente in kurzen, vertikalen Bohrlöchern im kristallinen Gestein. Für den Transport sind abgeschirmte Transportbehälter erforderlich.
- Beim Schweizer Konzeptbehälter zur Brennelement Einlagerung (BE-ELB) in Einlagerungsstrecken handelt es sich um einen nicht abgeschirmten Lagerbehälter zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Opalinuston. Da der Behälter nicht abgeschirmt ist, ist ein Transportbehälter notwendig.

1.2.7. Nationale und internationale Forschung

Nach Zeiger et al. (2017) liegen "nur in eingeschränktem Umfang Erkenntnisse über das Verhalten des Abfallinventars bei einer Aufbewahrung von mehr als 40 Jahren vor". Die Forschung zur möglichen Schädigung abgebrannter Brennelemente durch Alterung während der Zwischenlagerung wurde national und auch international in der letzten Dekade intensiviert. Forschung zur Degradation abgebrannter Brennelemente während der Zwischenlagerung erfordert einen hohen experimentellen Aufwand, insbesondere hinsichtlich technischer Sicherheit und des Strahlenschutzes. Die Mehrheit solcher Experimente wird zunächst im Labormaßstab durchgeführt, die Effekte der Matrixalterung müssen aber in weiteren Schritten im größeren, realistischen Maßstab ermittelt werden. Diese Untersuchungen sind auch deshalb aufwändig, weil Langzeitbeobachtung über mehrere Jahre eine zentrale Rolle spielt.

Angesichts der absehbaren Überschreitung der vorgesehenen Lagerzeiten in den bestehenden deutschen Zwischenlagern ergibt sich verstärkter Forschungsbedarf auch im Hinblick auf Transporte nach Beendigung der Zwischenlagerung sowie die langfristige Handhabbarkeit zwischengelagerter Brennelemente, bspw. für eine endlagergerechte Konditionierung. Nach Köhler (2017) steht "der Nachweis, dass die eingelagerten Reststoffe die für die Lagerung, den Transport und die Umkonditionierung erforderliche Stabilität aufweisen, [...] jedoch noch aus und muss im Rahmen der Verlängerung der Zwischenlagerung erbracht werden".

In Deutschland ist es Aufgabe der Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) die Einhaltung der Schutzziele auch für die Phase einer verlängerten Zwischenlagerung zu gewährleisten. In ihrem Forschungsprogramm (BGZ 2022) stellt sie den notwendigen Forschungsbedarf vor, der sich vor allem auf Behälter, Inventare und technische Infrastruktur des Zwischenlagers fokussiert. Daneben ist die BGZ auch an internationalen Vorhaben beteiligt. Schnittstellen zu anderen Entsorgungsschritten werden in diesem ersten Forschungsprogramm nur indirekt adressiert.

Im Folgenden werden nationale und internationale Diskurse und Arbeiten aus den letzten Jahren aber auch Planungen aufgeführt, die die zu untersuchenden Prozesse benennen, deren Wichtigkeit einstufen und/oder in der Forschung umsetzen.

Mit wesentlichen Aspekten des Langzeitverhaltens von Brennelementen befasst sich das Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaster Abfälle bei der Zwischenlagerung über mehrere hundert Jahre (TÜV Nord EnSys und Öko-Institut 2015), das auf Alterungsprozesse im Zusammenspiel von Uranpellets und Brennstabhüllrohren hinweist. Dabei werden folgende wesentliche sicherheitsrelevante Prozesse genannt: Gasfreisetzung aus dem Brennstoff, z. B. durch Diffusion von gasförmigen Spaltprodukten; chemische oder physikalische Veränderungen und chemische Reaktionen, die von Volumenänderungen begleitet werden. Grundsätzlich können Gasfreisetzungen aus dem Brennstoff zur Schädigung der Hüllrohre beitragen. Gelangen Gase aus dem Brennstoff durch die Hüllrohre in den Behälterinnenraum, kann sich der Druck im Behälter erhöhen und es kann zu Undichtigkeiten kommen.

Die Studien für das Bundesumweltministerium zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und verglaster hochradioaktiver Abfälle (Geupel et al. 2015; Hummelsheim et al. 2018) behandelt die Prozesse bei Brennelementen mit Abbrand größer als 50 GWd/MgSM für UO₂und MOX-Brennstoffe, bei welchen insbesondere Mechanismen wie Korrosion und Hydrideinlagerungen vergleichsweise höher ausgeprägt sind. Das Zusammenspiel von Brennstoffmaterial und Hüllrohr wird als möglicherweise sicherheitsrelevant bei der verlängerten Zwischenlagerung eingestuft. Es wird insbesondere auf eine vermehrte Spaltgasfreisetzung bei Brennstäben mit höheren Abbränden hingewiesen, welche zu höheren Innendrücken und Umfangsspannungen führt sowie dem Druckaufbau von Helium, und folglich einer höheren Belastung des Hüllrohrs. Die Studie "Sicherheitstechnische Fragen der verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und verglaster hochradioaktiver Abfälle" (Geupel et al. 2015) behandelt die Prozesse bei Brennelementen mit Abbrand größer als 50 GWd/MgSM für UO2- und MOX-Brennstoffe, bei welchen insbesondere Mechanismen wie Korrosion und Hydrideinlagerungen vergleichsweise höher ausgeprägt sind. Das Zusammenspiel von Brennstoffmaterial und Hüllrohr wird als möglicherweise sicherheitsrelevant bei der verlängerten Zwischenlagerung eingestuft. Es wird insbesondere auf eine vermehrte Spaltgasfreisetzung bei Brennstäben mit höheren Abbränden hingewiesen, welche zu höheren Innendrücken und Umfangsspannungen führt sowie dem Druckaufbau von Helium und folglich einer höheren Belastung des Hüllrohrs.

Die Forschungsaktivitäten der BGZ als Betreiber der meisten Zwischenlager werden aktuell deutlich verstärkt. So soll in einem Vorhaben das Langzeitverhalten der in Transport- und Lagerbehältern verwahrten abgebrannten Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren untersucht werden. Gemäß den Darstellungen in (Stuke 2021) werden im Jahr 2050 23 % der Brennelemente 40 bis 50 Jahre zwischengelagert sein, 2 % der Brennelemente sogar über 50 Jahre. Zur Bewertung des Hüllrohrverhaltens nach dieser langen Lagerzeit wurde von der BGZ das Vorhaben Longterm Experimental Dry Storage Analysis (LEDA) gestartet. Ziel ist, experimentelle Daten unter für Deutschland prototypischen Randbedingungen zu erzielen, die für spätere Modelle zur Prognose des Hüllrohrverhaltens herangezogen werden können. Das Vorhaben wird bis 2028 laufen.

Auf die Behälterdichtungen zielt das Vorhaben MSTOR, das über mindestens zehn Jahre (bis 2031) das Langzeitverhalten von Metalldichtungen untersucht. Hier werden Daten zum temperaturabhängigen Alterungsverhalten erhoben mit dem Ziel, ein Prognosemodell zu entwickeln. Durchgeführt wird das Vorhaben von der BGZ unter Beteiligung von Behälter- und den Dichtungsherstellern.

Weitere nationale Forschungsvorhaben befassen sich mit anderen Brennelementtypen und der zerstörungsfreien Inventarüberwachung.

International ist unter anderem das Extended Storage Collaboration Program (ESCP) des Electric Power Research Institute (EPRI) in der USA zu nennen, das im Zeitraum 2010 / 2011 mittels "gap analyses" den unmittelbaren Forschungsbedarf ableitete. Die weitere Forschung konzentrierte sich u. a. auf die Langzeitdegradation bei Hüllrohren hochabgebrannter Brennelemente. Beispielsweise wurde ein mit bestrahlten Brennelementen beladener Behälter mit zusätzlichen Messinstrumenten im Inneren versehen, hier ist eine langfristige Beobachtung geplant.

Der internationale Diskurs thematisiert die Risiken der Alterung des Abfallinventars in verschiedenen Gremien. Die OECD NEA leitet den Bedarf an F&E aus den Erfahrungen verschiedener Länder zur verlängerten Zwischenlagerung ab. So ist nach (OECD NEA 2017) das Hauptproblem der Nachweis der langfristigen Integrität von abgebrannten Brennelementen. Neben anderen Faktoren kann die Integrität der Brennelement-Hüllrohre durch Wasserstoffeinflüsse, durch Auswirkungen der Brennstofftrocknung und durch die Ausfällung und Neuausrichtung von Hydriden beeinträchtigt werden. Auch der Transport nach der Lagerung könnte nach (OECD NEA 2017) ein Problem darstellen, insbesondere bei hochabgebrannten Brennelementen.

Das unter dem Schirm der Nuclear Energy Agency NEA laufende Forschungsprojekt SCIP IV, das auf vorangegangene Vorhaben aufsetzt, umgesetzt vom schwedischen Unternehmen im kerntechnischen Bereich STUDSVIK AB (Zwicky 2018), definiert für die kommenden Jahre verschiedene Teilaufgaben der Forschung zur verlängerten Zwischenlagerung, welche sich mit dem Langzeitverhalten von Brennstoff und Hüllrohr im Zusammenspiel befassen sollen. Im Einzelnen wird beispielsweise das Kriechverhalten und die Wasserstoffversprödung des Hüllrohrmaterials oder die Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hüllrohr untersucht (BGZ 2022).

Im Bericht "Demonstrating performance of spent fuel and related storage system components during very long term storage" (IAEA 2019) werden Erfahrungen aus verschiedenen Staaten zur verlängerten Zwischenlagerung zusammengefasst. Es wird dort u. a. die Wichtigkeit von Untersuchungen unter realistischen Bedingungen betont. Die United States Nuclear Regulatory Commission weist in (U.S. NRC 2014) auf die Forschung zum Aufquellen von Brennstoffpellets durch Helium-Eintrag (Helium in-grow) und Druckbeaufschlagung der Brennstäbe durch zusätzliche Brennstofffragmentierung, Heliumfreisetzung und Spaltgasfreisetzung insbesondere bei Unfällen hin. Das Oak Ridge National Laboratory (2015) nennt als wichtige F&E-Bereiche die Forschung zur Integrität von abgebranntem Kernbrennstoff bei der Zwischenlagerung, die Untersuchung von Zersplitterung, Aufschwellung und Oxidation von Pellets im Zusammenspiel mit der Brennelement- Hülle.

Die zunehmende Aufmerksamkeit im Hinblick auf langfristige Abfallinventarveränderungen während der verlängerten Zwischenlagerung spiegelt auch das unter Euratom laufende European Joint Programme on Radioactive Waste Manangement EURAD wieder, welches im Arbeitspaket "Spent Fuel Characterisation and Evolution Until Disposal⁴⁶ auf die Quantifizierung der Eigenschaften und chemischen Prozesse in abgebrannten Kernbrennstoffen für die Zeitspanne von der Entladung über die Zwischenlagerung bis hin zu Maßnahmen der Endlagerung sowie Transport fokussiert. Die physikalisch-chemische Entwicklung des Zusammenspiels zwischen Pellets und Hüllrohren soll unter realistischen Unfallszenarien beschrieben und quantifiziert werden.

⁶ https://www.ejp-eurad.eu/implementation/spent-fuel-characterisation-and-evolution-until-disposal-sfc

2. Systematisierung und Analyse der einzelnen Entsorgungsschritte

2.1. Methodischer Ansatz

Im Vorhaben wird unterschieden in die Entsorgungsschritte Zwischenlagerung, Eingangslagerung, Konditionierung und Endlagerung. Aufgaben, mögliche Konzepte und die notwendige technische Ausgestaltung der einzelnen Entsorgungsschritte werden anhand von Literaturdaten systematisch beschrieben und analysiert. Die Rückholung wird zwar nicht als eigener Entsorgungsschritt betrachtet, mögliche Abläufe nach einer Entscheidung zur Rückholung werden hier dennoch kurz aufgezeigt.

Für die vier Entsorgungsschritte werden jeweils verschiedene Optionen zur Ausgestaltung erarbeitet und technische, ökonomische und administrative Aspekte dargestellt. Außerdem werden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten sowie Ungewissheiten herausgearbeitet. Des Weiteren wird die Plausibilität einer Umsetzung kurz diskutiert. Jede Option trägt neben ihrer Bezeichnung ein Kürzel, welches den Verweis auf die jeweilige Option im Gesamtbericht erleichtern soll.

2.2. Zwischenlagerung

Der überwiegende Anteil der hochradioaktiven Abfälle wird aktuell in Zwischenlagern aufbewahrt, die noch in den Nasslagern der Kernkraftwerke befindlichen Brennelemente sollen bis 2027 in die trockene Zwischenlagerung überführt werden (BMU 2020), d. h. sie werden in Transport- und Lagerbehälter (TLB) eingestellt und in das Zwischenlagergebäude eingelagert. In diesem Kapitel werden zunächst kurz die in Deutschland bestehenden Zwischenlager, ihre Aufgaben und Komponenten dargestellt. Anschließend werden mögliche Optionen zur Umsetzung verlängerter Zwischenlagerung beschrieben.

2.2.1. Anlagen zur Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen in Deutschland

In Deutschland werden drei zentrale Zwischenlager in Gorleben, Ahaus und Rubenow, 12 Zwischenlager an den Kernkraftwerksstandorten sowie das AVR Behälterlager in Jülich betrieben. Alle Zwischenlager sind als Trockenlager ausgelegt. Die Dauer der Genehmigung eines Zwischenlagers ist derzeit nach § 6 AtG auf 40 Jahre ab der Einlagerung des ersten Behälters begrenzt (AtG 2021). Eine Verlängerung dieser Genehmigungen darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen (AtG 2021). Die zentralen Zwischenlager und das AVR-Lager nahmen ihren Betrieb zwischen 1995 und 1999 auf, die Standortzwischenlager zwischen 2003 und 2007.

Die zentralen Zwischenlager in Gorleben und Ahaus sowie die Zwischenlager an den Kernkraftwerksstandorten werden von der BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) betrieben. Lediglich das Zwischenlager am Standort Brunsbüttel wird erst an die BGZ übertragen, wenn das Genehmigungsverfahren zur Neuerteilung der Aufbewahrungsgenehmigung abgeschlossen ist. Die Aufbewahrungsgenehmigung für das Zwischenlager Brunsbüttel wurde infolge eines Beschlusses des Bundesverwaltungsgerichts von Januar 2015 unwirksam. Im November 2015 wurde vom Betreiber ein Antrag auf eine neue Genehmigung gestellt (BMU 2020). Rechtsgrundlage für die aktuelle

Aufbewahrung der dort gelagerten bestrahlten Brennelemente ist eine unbefristete aufsichtliche Anordnung der Aufsichtsbehörde⁷.

Das AVR-Behälterlager und das zentrale Zwischenlager Nord in Rubenow werden von der EWN-Gruppe (EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH, Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH, Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH) betrieben. Die ursprüngliche Aufbewahrungsgenehmigung des AVR-Behälterlagers von 1993 war auf 20 Jahre begrenzt worden. Der Betreiber hatte die weitere Aufbewahrung von AVR-Brennelementen im Zwischenlager Jülich beantragt - das Genehmigungsverfahren ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

Am Standort in Rubenow ist geplant, neben dem bestehenden Zwischenlager Nord ein neues Lagergebäude zu errichten. Hintergrund sind die seit 2011 erhöhten Sicherungsanforderungen für die Lagerung von TLB (EWN o.D.): Aufgrund einer geänderten Gefährdungsbewertung bzw. neuer Erkenntnisse zu den Auswirkungen durch mögliche gewaltsame Einwirkungen auf ein Zwischenlager wurde bereits 2010 diskutiert, die Sicherungsmaßnahmen für Zwischenlager durch bauliche Maßnahmen zu optimieren (BMUB 2017). Im Jahr 2013 trat dann die Neufassung der Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD-Richtlinie) in Kraft (BMU 2013). Alle Details unterliegen der Geheimhaltung. Die Änderungsgenehmigungen für die erforderlichen Maßnahmen an den anderen Zwischenlagern sind bereits erteilt und werden umgesetzt (BMUB 2017).

Da die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente lange als Entsorgungsnachweis anerkannt wurde, trotz der erforderlichen Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Deutschland, wurden bis 2005 ausgediente Brennelemente zur Wiederaufarbeitung nach La Hague (Frankreich) oder Sellafield (Großbritannien) transportiert. Die Atomgesetznovelle von 2002 sah ab Juli 2005 ein Transportverbot zu Wiederaufarbeitungsanlagen vor und legte damit die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente als zukünftig einzige Entsorgungsoption fest. Die Rückführung der Wiederaufarbeitungsabfälle ist noch nicht beendet. Sie soll bis 2024 abgeschlossen sein (BMUV 2021). Bis dahin sollen drei bis fünf Castor-Behälter mit verglasten hochradioaktiven Abfällen an den Standort Philippsburg gebracht und aufbewahrt werden (BMUV 2021).

Die Betriebsbedingungen der Standortzwischenlagerung werden sich in den nächsten Jahren verändern. Die benachbarten Kernkraftwerke werden stillgelegt und abgebaut und damit deren Handhabungseinrichtungen und Dienstleistungen nicht mehr für die Zwischenlagerung nutzbar sein. Nach Einlagerung der letzten Behälter aus den Kernkraftwerken etwa im Zeitraum 2025 bis 2027 werden bis zum Abtransport in ein Endlager planmäßig keine praktischen Handhabungen (Einlagerungsvorgänge, Behälterbewegungen) der TLB in den Zwischenlagern stattfinden. Auch das Kernkraftwerkspersonal wird zunehmend reduziert und die organisatorische Verflechtung der Standortzwischenlager mit den Kernkraftwerken aufgehoben werden. Hieraus ergeben sich vielschichtige Herausforderungen (Endlagerkommission 2016). Die Endlagerkommission weist darauf hin, dass die Akzeptanz für die Standortzwischenlager sinken könne, wenn sie als "letzte Überbleibsel" (Endlagerkommission 2016) der Kernenergienutzung die vollständige Entlassung der Standorte aus dem Atomrecht und somit eine konventionelle Nachnutzung verhindern (Endlagerkommission 2016).

⁷ siehe dazu https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/kkb.html

2.2.2. Aufgaben und Komponenten der Zwischenlager

In der Leitlinie der ESK zur trockenen Zwischenlagerung (ESK 2013) sind grundlegende Schutzziele für die Zwischenlagerung formuliert. Diese sind

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

Daraus werden folgende Anforderungen abgeleitet (ESK 2013):

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

Die Anforderungen werden durch technische und organisatorische Maßnahmen gewährleistet. So wird z. B. der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle "durch den Behälter und ggf. weitere Barrieren" (ESK 2013) gewährleistet. Ein Beitrag des Zwischenlagergebäudes zum sicheren Einschluss der hochradioaktiven Stoffe ist nicht vorgesehen. Der Beitrag der Zwischenlagergebäude besteht vor allem im Schutz gegen Umwelteinflüsse und gegen den unberechtigten Zugriff Dritter auf die Abfallstoffe.

Die Zwischenlager in Deutschland wurden hauptsächlich nach zwei Konstruktionskonzepten erbaut: dem sog. WTI- und dem STEAG-Konzept. Lediglich das Zwischenlager in Neckarwestheim wurde aufgrund besonderer lokaler Gegebenheiten als Tunnel errichtet. Das STEAG-Konzept zeichnet sich durch mächtige Betonstrukturen, Wandstärken von ca. 120 cm, einer Deckenstärke von ca. 130 cm und ein einschiffiges Gebäude aus. Das WTI-Konzept ist zweischiffig mit einer Gebäudemittenwand gestaltet. Die Wandstärken sind weniger mächtig und betragen ca. 70 cm bzw. ca. 85 cm, die Deckenstärke beträgt ca. 55 cm (BASE 2020a). Ein Zwischenlagergebäude besteht hauptsächlich aus Stahlbeton.

Für den Betrieb ist das Zwischenlager mit verschiedenen notwendigen technischen Komponenten wie z. B. einer Krananlage und Lager- und Handhabungseinrichtungen ausgerüstet, deren Verfügbarkeit und Funktionsbereitschaft über den gesamten Betriebszeitraum des Lagers gewährleistet sein muss. Eine weitere wichtige Infrastruktur ist die Behälterüberwachung. Sie dient der Dichtheits- überwachung des Doppeldeckeldichtsystems der Transport- und Lagerbehälter, d. h. der ständigen Überwachung des Druckschalters, der Überwachung auf Drahtbruch oder Kurzschluss und der Anzeige und Archivierung von Meldungen (Hummelsheim et al. 2018). Weitere Informationen zur Behälterüberwachung finden sich in Kapitel 1.2.6.1.

Der Sicherheitsstatus der Zwischenlager ist vom Betreiber gemäß §19a AtG alle 10 Jahre im Rahmen einer Periodischen Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) zu überprüfen und zu bewerten. Die Anforderungen an diese Überprüfung sind in einer ESK-Leitlinie geregelt (ESK 2022). Die Überprüfung



dient der Bestätigung des Sicherheitsstatus des Zwischenlagers unter Berücksichtigung aller während der Betriebszeit eintretender Veränderungen.

In der ESK-Leitlinie ist auch das technische Alterungsmanagement definiert (ESK 2022). Demnach sind die Überwachung sicherheitsrelevanter Schädigungsmechanismen sicherzustellen und ggf. Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Mögliche technische Alterungseffekte sind Komponentenversagen. Korrosion oder Materialveränderungen am Behälter oder Inventar (siehe auch Kapitel 1.2.7). Die Art und der Umfang potenzieller Schäden sind abhängig von der Zwischenlagerdauer, von Materialeigenschaften, Strukturen und Umweltbedingungen (Köhnke et al. 2017). Nach (BGZ 2022) sind für Zwischenlagergebäude keine vom konventionellen Hochbau abweichenden Alterungsmechanismen zu berücksichtigen.

2.2.3. Beschreibung möglicher Optionen für die Umsetzung verlängerter Zwischenlage-

Die Bundesregierung hält in ihrem Bericht für die siebte Überprüfungskonferenz im Mai 2021 zur Erfüllung des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (BMU 2020) fest, dass "nach heutigen Erkenntnissen [...] innerhalb der genehmigten 40 Jahre eine vollständige Räumung der Zwischenlager nicht gewährleistet werden" kann. Die in den Zwischenlagern befindlichen TLB werden voraussichtlich über einen längeren Zeitraum als ursprünglich geplant zwischengelagert werden müssen. Dies setzt eine neue Genehmigung für die Zwischenlager voraus.

Im Hinblick auf eine verlängerte Zwischenlagerung gibt es national wie international zahlreiche Forschungsansätze. Im Fokus stehen dabei mögliche technische Alterungseffekte am Inventar, an den Behältern und an der Anlage. Die Forschungsansätze zu möglichen Veränderungen der Abfallinventare werden in Kapitel 1.2.7 dargestellt. Es kann erwartet werden, dass die Forschungen auf diesem Gebiet in den kommenden 10 Jahren vertiefte Erkenntnisse bringen werden. Unsicherheiten hinsichtlich der möglichen Konsequenzen einer verlängerten Zwischenlagerung bestehen insbesondere aufgrund der noch unklaren Dauer der Zwischenlagerung. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor für die verlängerte Zwischenlagerung ist aber auch die mögliche Notwendigkeit der Änderung von Risikobewertungen oder sich ändernde regulatorische Vorgaben.

In einem Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung hält die ESK fest, dass "aufgrund der bisher vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen keine grundsätzlichen Zweifel am Erhalt des bestehenden Sicherheitsniveaus der Behälter auch bei einer verlängerten Zwischenlagerung bestehen" (ESK 2015a). Daher gehen die hier dargestellten Optionen zur Umsetzung verlängerter Zwischenlagerung nicht von einem Austausch der TLB, sondern vom Bedarf zur Anpassung der gesamten Anlagen, d. h. der Gebäude und der zugehörigen Einrichtungen zur Handhabung, Überwachung etc., an die Anforderungen verlängerter Zwischenlagerung aus. In (ESK 2015a) werden als realistische Optionen für die verlängerte Zwischenlagerung genannt:

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

Diese Optionen werden für das Forschungsprojekt WERA übernommen. Zusätzlich wird die Nasslagerung als Option kursorisch betrachtet, da dieses Lagerkonzept beispielsweise im CLAB in Schweden sowie in anderen Staaten für bestrahlte Brennelemente erfolgreich umgesetzt wird.

Im Folgenden werden verschiedene Optionen dargelegt und, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, weiter differenziert. Für die beschriebenen Optionen wird von Zwischenlagerzeiträumen von etwa 65 bis 100 Jahren (Herleitung der Zeit siehe Kapitel 1.2.2) ausgegangen

Generelle Herausforderungen einer verlängerten Zwischenlagerung sind:

- Behälter und Inventar: Im Rahmen einer Neugenehmigung zur verlängerten Zwischenlagerung sowie der zu verlängernden oder neu zu genehmigenden Behälterzulassungen müssen geeignete Nachweise für den noch zu bestimmenden Nachweiszeitraum zu erbringen sein.
- Infrastruktur (Gebäude, technische Ausstattung): Erhalt/Instandhaltung bestehender Infrastruktur, auch bei sich ändernden Anforderungen; ggf. Neubau/Erneuerung, dafür müssen entsprechende Ersatzteile verfügbar sein (Verfügbarkeit aller technischen Komponenten, Ersatzteile sowie Hardund Software-Tools in auslegungskonformer Weise für den gesamten Zwischenlagerzeitraum). Ersatzteile für ein Bauteil werden vom Hersteller meist nur über einen begrenzten Zeitraum angeboten. Bei Zwischenlagerung von mehreren Jahrzehnten ist es wahrscheinlich, dass Bauteile oder Ersatzteile nicht mehr in gleicher Weise angeboten werden. In (ESK 2015a) wird die Verfügbarkeit aller austauschbaren Behälterkomponenten (z. B. Druckschalter, Metalldichtungen, Tragzapfen, Schrauben) für den gesamten Zwischenlagerzeitraum gefordert.
- Transporte: in jedem Fall werden die Transport- und Lagerbehälter einmalig von ihrem derzeitigen Standort zum Endlagerstandort transportiert werden müssen. Je nach Option sind darüber hinaus weitere Transporte notwendig, die einen zusätzlichen Aufwand bedeuten.
- Personal- und Betrieb: Je mehr Zwischenlager bestehen, desto größer sind die Aufwendungen für Personal und Betrieb; der Aufwand steigt auch mit der Dauer der Zwischenlagerung. Dazu müssen u. a. ausreichende Redundanzen für das Ausscheiden aufgrund der Altersstruktur wie auch unplanmäßiger Ausfälle vorhanden sein, Verteilung von Fähigkeits-, Wissens- und Erfahrungsprofilen sowie Bedarf z. B. an Zeit zur Qualifizierung neuer Mitarbeiter berücksichtigt werden und es müssen Mechanismen zur Anpassung an sich ändernde Randbedingungen (z. B. bundesweit weniger Bedarf an Fachpersonal durch Ausstieg aus der Kernenergie, Rückbau der Kernkraftwerke) etabliert sein (Geupel et al. 2015).
- Wissensmanagement: Wissenserhalt benötigt einen breiten Ansatz. So schlägt sich das spezifische Wissen zu einer Anlage zu einem Teil als kodiertes Wissen in Aufzeichnungen wie Regelwerk, Prüfanweisungen, Betriebshandbüchern usw. nieder. Wissen ist aber auch Erfahrung z. B. aus Vorgängen und Handlungen (Erfahrungswissen), die nur zum Teil über schulungsartige Vermittlung beispielsweise von einer Mitarbeitergeneration zur nächsten weitergegeben werden kann (Geupel et al. 2015). Für den Erhalt dieser Art von Wissen müssen geeignete Methoden eingeführt sein. Diese müssen sowohl betreiber- als auch behördenseitig geeignet sein, Wissen auch über einen längeren Zeitraum, in dem beispielsweise keine Ein- oder Auslagerung von TLB mehr stattfindet, zu bewahren.
- Genehmigungsverfahren: Genehmigungsverfahren sind zeitintensiv und bedeuten Aufwand auf Betreiber- und Behördenseite. Sie binden Ressourcen und Personalkapazitäten. Eine sorgfältige Durchführung ist zwingend für die Gewährleistung der Sicherheit, sie dienen insbesondere auch der Beteiligung der Öffentlichkeit.
- Dokumentation: Hier sind die Aufbewahrung und Verfügbarkeit der Dokumentation über die Laufzeit einer Anlage betreiber- als auch behördenseitig sicherzustellen. Zudem muss die Vollständigkeit, die Aktualität, die physische Verfügbarkeit wie auch bspw. die Lesbarkeit von Dateien und deren Auffindbarkeit gesichert sein. Aber auch inhaltlich sind die Dokumente vollständig und auf dem neuesten Stand zu halten. Ein weiteres Kriterium bei der Dokumentation betrifft deren



Verständlichkeit im Gesamtzusammenhang. Hierfür müssen geeignete Methoden für die voraussichtlich sehr lange Zwischenlagerung etabliert werden. Die langfristige Dokumentation soll nach § 38 StandAG in einer Verordnung geregelt werden.

Die Aufsichtsbehörden sind derzeit in den Bundesländern angesiedelt. Nach dem Rückbau der Kernkraftwerke wird nach (Alt et al. 2018) das Aufgabengebiet dieser Behörden deutlich kleiner. Es könnte dann eine Herausforderung werden, ausreichend Personal mit entsprechender Kompetenz vorzuhalten. Zudem wird es schwierig sein, das System von "checks and balances" aufrecht zu erhalten, wenn den ausgedünnten Behörden die nun vorliegende Konzentration der Zwischenlagerbetreiber gegenübersteht.

Darüber hinaus muss dafür Sorge getragen werden, dass die für die Entsorgung zuständigen Behörden sowie die Betreiberorganisationen der Zwischenlager auch in mehreren Jahrzehnten noch stabile Organisationen darstellen. Hierzu gehört nicht nur, dass sie über ausreichend gualifizierte Mitarbeiter verfügen können, dass sowohl das fachliche Wissen wie auch das organisationale Wissen erhalten bleiben und die Organisationskultur immer wieder neu darauf ausgerichtet wird, die nötige Vorsorge zu treffen.

Diese Herausforderungen werden nachfolgend auch ökonomisch bewertet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung von Kosten aufgrund der großen Unsicherheiten jeweils nur relativ erfolgt; d. h.: es wird lediglich untersucht, welche der betrachteten einzelnen Optionen zueinander wahrscheinlich mehr oder weniger Kosten verursachen wird. Es werden keine expliziten Beträge herausgearbeitet. Die Tatsache, dass, je weiter sich die Zwischenlagerung in die Zukunft verlagert, die zu erwartenden ökonomischen Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden Kosten höher werden bzw. die Verfügbarkeit finanzieller Mittel unsicherer, wird für das Forschungsvorhaben nicht weiter diskutiert.

Eine gemeinsame Zwischenlagerung von hochradioaktiven und schwach- und mittelradioaktiven Abfällen wird derzeit ausschließlich im zentralen Zwischenlager in Ahaus in zwei voneinander getrennten Lagerbereichen durchgeführt. Die Handhabung der Abfälle findet getrennt voneinander statt. Beide Lagerbereiche verfügen über eine eigene Genehmigung. Für die verlängerte Zwischenlagerung ist nicht zu erwarten, dass sich eine gemeinsame Lagerung von hoch- und schwachaktiven Abfällen beispielsweise in der gleichen Lagerhalle etablieren wird. Entsprechend wird diese Option mit ggf. wechselseitigen Auswirkungen für den Entsorgungsschritt der Zwischenlagerung im Forschungsprojekt WERA nicht weiter betrachtet.

2.2.3.1. Verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten (Option ZL1)

Definition/Kurzbeschreibung

Zwischenlagerung erfolgt an den derzeitigen (16) Standorten, in den bestehenden Anlagen. Kernkraftwerke werden im Verlauf der Zwischenlagerdauer rückgebaut. Zwischenlagerstandorte müssen im Zuge des KKW-Rückbaus autark werden (Aufhebung der organisatorischen Verflechtung sowie gemeinsamer Infrastruktur der Standortzwischenlager mit den Kernkraftwerken). Die Zwischenlagerung wird über die genehmigten 40 Jahre hinaus verlängert werden. Mit der Verfügbarkeit eines annahmebereiten Eingangslagers endet die Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten. Endgültig endet die Zwischenlagerung, wenn die TLB in eine Konditionierungsanlage transportiert und dort konditioniert werden.

Technische Aspekte

Technische Infrastruktur: Es muss damit gerechnet werden, dass Regelwerksänderungen bzw. geänderte Risikobewertungen höhere Anforderungen an die Sicherheit und Sicherung stellen und
Nachrüstungen notwendig werden. Auch Anforderungen im Hinblick auf die Lebensdauer technischer Einrichtungen zur Handhabung von TLB oder die Lebensdauer der Anlage selbst sind denkbar. Lassen sich höhere Anforderungen an den längerfristigen Betrieb nicht durch Adaption der bestehenden Anlage umsetzen, kann auch die Errichtung eines neuen Zwischenlagers am bestehenden Standort notwendig werden.

Transporte: Neben der Anlieferung zum Endlager sind keine zusätzlichen Transporte notwendig. Die verkehrsrechtliche Zulassung der TLB muss aufrechterhalten werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Anforderung bestehen bleibt. Aufgrund fortschreitender Alterung ist nicht auszuschließen, dass Reparaturen zur Erhaltung der Transportfähigkeit notwendig werden.

Behälter und Abfallinventar: In den Zwischenlagern müssen die Behälter und die Behälterinventare den Anforderungen der Zwischenlagerung und des Transports über die gesamte Lagerzeit entsprechen. Alterungseffekte können bei längerer Lagerung prinzipiell zu Schäden führen. Schäden an den Hüllrohren könnten beispielsweise den Behälterinnendruck, die Wärmeabfuhrbedingungen, die lokale Dosisleistung an der Behälteroberfläche und die Kritikalitätsbetrachtungen beeinträchtigen und auch beim Transport der Behälter relevant werden.

Ökonomische Aspekte

Bei dieser Option entstehen Kosten für die Instandhaltung der Anlagen an allen (16) Standorten, ggf. weitere Kosten für Ertüchtigungen aufgrund steigender Anforderungen. Kosten für zusätzliche Transporte entstehen dagegen nicht. Bezüglich der Personal- und Betriebskosten wird davon ausgegangen, dass die 16 Standorte höhere Kosten verursachen als eine geringere Anzahl an Standorten (siehe Option ZL2 und ZL3). Hinsichtlich der Kosten für Genehmigungsverfahren ist anzunehmen, dass für 16 Zwischenlager deutlich mehr Genehmigungsverfahren, beispielsweise für Neugenehmigungen nach Ablauf der genehmigten Zwischenlagerzeit, aber auch für Nachrüstungen anfallen als für eine geringere Anzahl an Zwischenlagern. Daher ist hier mit höheren Kosten zu rechnen als für Optionen mit geringerer Anzahl an Zwischenlagern.

Administrative Aspekte

Die Anzahl der verschiedenen Standorte erfordert hohe administrative Prozesse und Aufwände beim Betreiber und den Aufsichtsbehörden. Hierzu zählen z. B. die Abwicklung der einzelnen Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahren. Zudem könnte hier das größte Risiko eines unausgewogenen Systems an "checks and balances" entstehen, da viele Aufsichtsbehörden mit kleinem Aufgabenbereich zwei Zwischenlagerbetreibern gegenüberstehen.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Eingangslager: Die Abruf-Logistik von den 16 Zwischenlagerstandorten zum Eingangslager ist voraussichtlich aufwändiger, als wenn nur von einer oder wenigen Anlagen TLB abgerufen werden müssen.

Konditionierung: Es muss geklärt werden, ob bzw. welche Auswirkungen potenzielle Brennelementschäden nach langer Lagerung und anschließendem Transport möglich sind. Die



Konditionierungsanlage muss entsprechend konzipiert werden bzw. Einschränkungen hinsichtlich der Konditionierbarkeit müssen frühzeitig bekannt sein.

Endlager: Sollten Sonderlösungen der ELB für beschädigte Brennelemente notwendig werden, muss dies für den Einlagerungsbetrieb berücksichtigt werden.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Ungewiss ist, welchen Einfluss Regelwerksänderungen, geänderte Risikobewertungen und höhere Anforderungen auf Nachrüstungen haben werden und welcher Aufwand nötig sein wird, diese umzusetzen. Offen sind außerdem Fragen zum Brennelementverhalten bei langen Lagerzeiten, zum Verhalten der Brennelemente beim Transport nach langer Lagerung, und zu den Auswirkungen potenziell möglicher Brennelement-Schäden auf die Konditionierung.

Plausibilität der realen Umsetzung

Trotz der beschriebenen Ungewissheiten ist aus heutiger Sicht anzunehmen, dass die Umsetzung der verlängerten Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten technisch realisierbar ist.

2.2.3.2. Bau eines Zentralen Zwischenlagers (Option ZL2)

Definition/Kurzbeschreibung

Die bisherigen Zwischenlager werden rechtzeitig vor dem Erlöschen ihrer derzeit gültigen Genehmigung geräumt und alle Behälter werden in ein Zentrales Zwischenlager gebracht. Die neue Anlage benötigt eine Zwischenlagergenehmigung gemäß § 6 AtG soweit sie weiterhin von einem privaten Betreiber wie der BGZ betrieben wird. Aus regulatorischer Sicht ist ein Auswahlverfahren für die Wahl eines einzelnen zentralen Zwischenlagerstandortes nicht erforderlich. Aus Gründen der Akzeptabilität ist aber ein solcher Prozess nach definierten Kriterien empfehlenswert. In seiner Komplexität wäre ein solcher Prozess aber deutlich weniger aufwendig als z B. das Standortauswahlverfahren für ein Endlager. Für den Standort gibt es 3 Möglichkeiten:

- a) einer der derzeitigen Zwischenlager-Standorte wird in einem Auswahlprozess nach definierten Kriterien ausgewählt. Die Anlage wird dort neu errichtet.
- b) ein neuer Zwischenlager-Standort auf der "grünen Wiese" wird in einem Auswahlprozess nach definierten Kriterien ausgewählt, unabhängig von den bisherigen Zwischenlagerstandorten und dem zukünftigen Endlagerstandort. Dort wird eine neue Anlage errichtet.
- c) der 2031 benannte Endlagerstandort wird gewählt, dort wird kurzfristig eine neue Anlage errichtet, welche die Funktion des Zentralen Zwischenlagers haben sollte (gemäß NaPro (BMUB 2015) wird ein zentrales Zwischenlager am Endlagerstandort als Eingangslager bezeichnet).

Die Zwischenlagerung endet, wenn die TLB in eine Konditionierungsanlage transportiert und dort konditioniert werden. Der Transport erfolgt von den Zwischenlagern zunächst zum zentralen Zwischenlager und anschließend zum Endlagerstandort (außer bei Möglichkeit c).

Technische Aspekte

Technische Infrastruktur: Ein Zwischenlager, das alle ca. 1.900 TLB aufnehmen kann, ist eine im Vergleich zu den bestehenden Standortzwischenlagern sehr viel größere Anlage, die einen hohen Flächenbedarf hat und ggf. in mehreren Einzelgebäuden zu verwirklichen ist. Die beiden größten Zwischenlager Ahaus und Gorleben haben je 420 genehmigte Stellplätze für Behälter, dafür stehen jeweils 5.000 m² Lagerfläche zur Verfügung. Durch einfache Skalierung, ohne Berücksichtigung von Gesichtspunkten wie Gebäudestatik u. a., müsste für ein zentrales Zwischenlager eine Fläche von ca. 22.600 m² angenommen werden. In ihrem Vortrag "Miteinander verzahnt - Prozessschritte, Haltepunkte und Steuermöglichkeiten auf dem Entsorgungspfad vom Zwischen- zum Tiefenlager" schätzten Hassel et. al im März 2021 die Bruttogrundfläche eines Eingangslagers, das als zentrales Zwischenlager ausgelegt ist, mit etwa 40.000 m² ab (Hassel et al. 2021). Dem gegenüber stehen etwa 51.000 m² Gesamt-Gebäudefläche aller derzeit bestehenden Zwischenlager gegenüber, die erhalten und ggf. instandgesetzt werden müssten.

Ein Neubau wird für jede der oben beschriebenen Möglichkeiten notwendig werden. Die Anlage könnte bestmöglich auf eine lange Lagerzeit ausgelegt werden. Auch die Integration einer Heißen Zelle wäre denkbar. Die Anlage am Endlagerstandort (Möglichkeit c) würde die Funktion des Eingangslagers übernehmen (siehe hierzu Kapitel 2.3).

Transporte: Je nach Auswahl des Standortes sind verschiedene Notwendigkeiten gegeben. Für Möglichkeit a) und b) sind zusätzliche Transporte nötig. Für Möglichkeit c) sind keine zusätzlichen Transporte nötig, da die TLB mit Abfällen in jedem Fall zum Endlagerstandort transportiert werden müssen. Vielmehr wäre der notwendige Transport in diesem Fall ggf. vorweggenommen. In jedem Fall muss für die notwendigen Transporte von bis zu 1.900 TLB ausreichend Zeit und Ressourcen eingeplant werden.

Sollte der Fall eintreten, dass ein Endlager am ausgewählten Standort keine Betriebsgenehmigung erhält und die TLB bereits in einem Zentralen Zwischenlager am Standort aufbewahrt werden, ergäbe sich die Notwendigkeit weiterer Transporte zu einem dann später genehmigten und errichteten Endlager. Diesen Transporten ginge dann eine weitere, möglicherweise jahrzehntelange Zwischenlagerung voraus.

Behälter und Abfallinventar: Wie bereits bei ZL1 dargestellt, können lange Lagerzeiten zu Schädigungen führen, die in den nachfolgenden Entsorgungsschritten berücksichtigt werden müssen. Zusätzliche Transporte können das Abfallinventar der Behälter zusätzlich schädigen.

Ökonomische Aspekte

Für Möglichkeit a) und b) entstehen Kosten für zusätzliche Transporte⁸, Kosten für die Standorterschließung sowie Kosten für den Neubau einer Anlage⁹.

Wenn wie bei Möglichkeit c) das Eingangslager am Endlagerstandort die Funktion des Zwischenlagers übernimmt, entstehen keine zusätzlichen Kosten für den Transport. Die Kosten für einen Neubau fallen zwar an, da aber am Endlagerstandort ohnehin mindestens ein Pufferlager errichtet werden muss, würden hier nur die Kosten ins Gewicht fallen, die durch das Delta Pufferlager / großes Eingangslager entstünden.

-

⁸ Nach EnBW (2019) lagen die Kosten für die Planung und Umsetzung der Transporte von Obrigheim nach Neckarwestheim (15 Behälter) im Jahr 2018 im niedrigen zweistelligen Millionen-Euro-Bereich.

⁹ Nach wikipedia (2020) würde -zum Vergleich- der Bau eines neuen Zwischenlagers in Jülich Investitionen von mindestens 40 Millionen Euro erfordern. Die Kosten für Betrieb und Personal würden für einen notwendigen Lagerzeitraum von mehreren Jahrzehnten etwa 180 Millionen Euro betragen. Nach EnBW (2019) hätten die Kosten für den Bau eines Zwischenlagers in Obrigheim im niedrigen zweistelligen Millionen-Euro-Bereich gelegen.



Es ist anzunehmen, dass die Personal- und Betriebskosten für ein Zwischenlager niedriger sind als für mehrere Zwischenlager. Die Kosten für Genehmigungsverfahren für ein Zwischenlager dürften insgesamt auch geringer sein als für mehrere Zwischenlager.

Administrative Aspekte

Besteht nur ein Zwischenlager bundesweit, ist behördenseitig deutlich weniger Personal notwendig. Nachteilig hierbei könnte sein, dass somit auch eine deutlich geringere Personal-Redundanz bundesweit verfügbar sein wird. Das Know-How der Behörden, die für die ehemaligen Zwischenlagerstandorte zuständig waren, müsste an die dann zuständige Aufsichts- und Genehmigungsbehörde weitergegeben werden. Ggf. Kommt es zu Wissensverlust. Für den Betreiber des Endlagers ist wahrscheinlich die spätere Abruflogistik der TLB zum Endlagerstandort einfacher, als TLB aus 16 Zwischenlagern abrufen zu müssen. Letztlich hängt die Abruflogistik auch von der Zugänglichkeit der Behälter ab. Diese könnte aber bei der Planung eines zentralen Zwischenlagers berücksichtigt werden

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Eingangslager: Ein zentrales Zwischenlager, das nicht am Endlagerstandort verortet ist (Möglichkeiten a und b), macht ein zentrales Eingangslager am Endlagerstandort überflüssig. Es würde genügen, dort ein Pufferlager zur Verstetigung der Konditionierungsanlage zu errichten. Ein Zentrales Zwischenlager am Endlagerstandort (Möglichkeit c) würde auch als das Eingangslager dienen. Planung, Genehmigung und Bau könnten erst nach Festlegung des Endlagerstandorts starten.

Konditionierung: Hinsichtlich des Umgangs mit lange gelagerten Abfallinventaren gelten die gleichen Aussagen wie bei ZL1. Durch die zusätzlichen Transporte bei den Möglichkeiten a) und b) wird das Abfallinventar zusätzlichen Belastungen ausgesetzt, die ggf. zu Schäden führen könnten. In der Folge könnte es zu Problemen bei der weiteren Zwischenlagerung bzw. bei der Konditionierung kommen.

Endlager: Wird noch vor der Errichtungsgenehmigung eines Endlagers ein Zentrales Zwischenlager am Standort genehmigt, könnte dies dazu führen, dass der Eindruck einer Vorentscheidung für den Endlagerstandort erweckt wird. Dies kann zu Akzeptanzproblemen für das Zentrale Zwischenlager führen. Weitere Wechselwirkungen siehe Option ZL1.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Für die Errichtung einer neuen Anlage an einem der derzeitigen Zwischenlagerstandorte müsste geklärt werden, ob und ggf. an welchen Standorten der notwendige Flächenbedarf für eine entsprechend große Anlage gegeben wäre. Weiter gelten auch die für die Option ZL1 formulierten Ungewissheiten.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die dargestellten Standort-Möglichkeiten sind technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Zwischenlager erfüllen muss, sind vergleichbar zu den derzeit geltenden Anforderungen. Ein zentrales Zwischenlager könnte politisch wie auch gesellschaftlich auf Widerstände stoßen. Beispielsweise wird von der Atommüllkonferenz, einem "fachlich-politischen, parteiunabhängigen Forum für Betroffene und Akteure von den Standorten, an denen Atommüll liegt oder an denen die Lagerung vorgesehen ist" (Arbeitsgemeinschaft Schacht KONRAD e.V.), "ein einziges zentrales Zwischenlager" (Atommüllkonferenz 2018) abgelehnt. Die Atommüllkonferenz fordert, dass kein großes zentrales Eingangslager über ein Pufferlager hinaus errichtet wird. Insbesondere soll es nicht vor der Genehmigung des Endlagers, wie es das Nationale Entsorgungsprogramm vorsieht, errichtet werden, da hierdurch dieser Standort vorzeitig "zementiert" würde bzw. bei einem Scheitern des Projektes zahlreiche unnötige Transporte an einen anderen Standort notwendig wären (Atommüllkonferenz 2018).

Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass sich eine Endlager-Standortgemeinde gegen eine zusätzliche, möglicherweise jahrzehntelange Zwischenlagerung stellen wird – nicht zuletzt wegen der ohnehin schon großen Last (siehe auch Kapitel 1.2.3), die sie mit dem Endlager und den dazugehörigen obertägigen Anlagen übernimmt. Wenn ein zentrales Zwischenlager, das auch die Funktion eines Eingangslagers hat, errichtet wird, könnte dies in der Diskussion vor Ort zudem als die größere Belastung im Vergleich zum Endlager wahrgenommen werden (Endlagerkommission 2016).

2.2.3.3. Konzentration auf wenige regionale Zwischenlager (Option ZL3)

Definition/Kurzbeschreibung

Die Behälter der bisherigen Zwischenlager werden rechtzeitig vor dem Erlöschen ihrer derzeit gültigen Genehmigung geräumt und alle Behälter werden auf drei regionale Zwischenlager verteilt. Aus regulatorischer Sicht ist, wie bei der Option ZL2, ein Auswahlverfahren für die Zwischenlagerstandorte nicht erforderlich. Aus Gründen der Akzeptabilität ist aber ein solcher Prozess nach definierten Kriterien empfehlenswert. In seiner Komplexität wäre ein solcher Prozess aber deutlich weniger aufwendig als z B. das Standortauswahlverfahren für ein Endlager. Für die Standorte der Zwischenlager gibt es 3 Möglichkeiten:

- a) es werden drei der derzeitigen Zwischenlager-Standorte ausgewählt; es werden neue Anlagen am Standort errichtet,
- b) es werden neue Zwischenlager-Standorte auf der "grünen Wiese" ausgewählt, dort werden neue Zwischenlager errichtet. Es könnte auch der potenzielle Endlagerstandort für eines der regionalen Lager gewählt werden,
- c) es werden sowohl derzeitige als auch neue Zwischenlager-Standorte gewählt; es werden neue Anlagen errichtet. Es könnte auch der potenzielle Endlagerstandort für eines der regionalen Lager gewählt werden.

Die Zwischenlagerung endet, wenn die TLB in eine Konditionierungsanlage transportiert und dort konditioniert werden. Der Transport erfolgt von den standortnahen Zwischenlagern zunächst zu den regionalen Zwischenlagern und dann zum Endlagerstandort (außer bei Anlagen, die am Endlagerstandort liegen, siehe Möglichkeit b und c).

Technische Aspekte

Technische Infrastruktur: Ein Neubau wird für jede der oben beschriebenen Möglichkeiten notwendig werden. Die Dimensionierung der zu errichtenden Anlagen entspricht jeweils etwa einem Drittel der in Option ZL2 beschriebenen zentralen Zwischenlager. Die Anlage könnte bestmöglich auf eine lange Lagerzeit ausgelegt werden. Auch die Integration einer Heißen Zelle wäre denkbar. Die Anlage am Endlagerstandort (Möglichkeit c) würde die Funktion des Eingangslagers als Pufferlager übernehmen (siehe hierzu Kapitel 2.3).



Transporte: Für jede oben beschriebene Möglichkeit a) - c) sind - im Vergleich zu Option ZL1 zusätzliche Transporte nötig. Wird auch am potenziellen Endlagerstandort ein regionales Lager errichtet, sind dorthin keine zusätzlichen Transporte nötig, da die Behälter bei Betriebsbeginn des Endlagers ohnehin zum Endlagerstandort transportiert werden müssen. Vielmehr wäre der sowieso notwendige Transport hier vorweggenommen.

Behälter und Abfallinventar: Wie bereits bei Option ZL1 dargestellt, können lange Lagerzeiten zu Schädigungen führen, die in den nachfolgenden Entsorgungsschritten berücksichtigt werden müssen. Zusätzliche Transporte können das Abfallinventar der Behälter zusätzlich schädigen.

Ökonomische Aspekte

Für alle drei Möglichkeiten a) – c) sind Kosten für zusätzliche Transporte sowie Kosten für den Neubau der Anlagen zu erwarten. Für Möglichkeit c reduzieren sich die Transportkosten, da ein Zwischenlager am Endlagerstandort errichtet wird. Die Personal- und Betriebskosten wären aufgrund der Anzahl der Anlagen voraussichtlich niedriger als bei Option ZL1 und höher als bei ZL2. Die Kosten für Genehmigungsverfahren könnten aufgrund der Anzahl der Anlagen zwischen denen für die Optionen ZL1 und ZL2 liegen.

Administrative Aspekte

Die Aufsicht wäre auf mehrere Länder verteilt, d. h. das entsprechende Personal mit jeweils fachlichem Know-How muss in jeder dieser Behörden über viele Jahrzehnte vorhanden sein. Für die spätere Transport-Logistik zum Endlagerstandort, für die der Betreiber zuständig ist, wäre es wohl einfacher, wenn die TLB nur von wenigen Zwischenlagern abgerufen werden müssen.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Eingangslager: Die Entscheidung der verlängerten Zwischenlagerung an wenigen Standorten macht, wie bei Option ZL1, ein Eingangslager, das für die Aufnahme aller 1.900 TLB ausgelegt ist, ggf. obsolet. Es reicht dann aus, das Eingangslager als Pufferlager zu konzipieren.

Konditionierung: Hinsichtlich des Umgangs mit lange gelagerten Abfallinventaren gelten die gleichen Aussagen wie bei ZL1. Durch die zusätzlichen Transporte wird das Abfallinventar zusätzlichen Belastungen ausgesetzt, die ggf. zu Schäden führen könnten. In der Folge könnte es zu Problemen bei der weiteren Zwischenlagerung bzw. bei der Konditionierung kommen.

Endlager: Wird noch vor der Errichtungsgenehmigung eines Endlagers ein Zwischenlager am Standort genehmigt, könnte dies dazu führen, dass der Eindruck einer Vorentscheidung für den Endlagerstandort erweckt wird. Dies kann zu Akzeptanzproblemen führen. Weitere Wechselwirkungen siehe Option ZL1.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Für die Errichtung einer neuen Anlage an derzeitigen Zwischenlagerstandorten müsste geklärt werden, ob und ggf. an welchen Standorten überhaupt der notwendige Flächenbedarf für eine entsprechend große Anlage gegeben wäre. Weiter gelten auch die für die Option ZL1 formulierten Ungewissheiten.

Plausibilität der realen Umsetzung

Technisch wäre diese Option umsetzbar. Allerdings wären zusätzliche Transporte mit dieser Option verbunden. Wie diese Option gesellschaftlich bewertet würde, lässt sich schwer abschätzen: einige Zwischenlagerstandorte könnten geräumt und rückgebaut werden, andere würden zusätzliche TLB aufnehmen müssen bzw. erstmals ein Zwischenlager erhalten. Insgesamt wird diese Option als plausibel angenommen.

2.2.3.4. Nasslager als Option für das Zwischenlagerkonzept (Option ZL4)

Prinzipiell wäre in Deutschland auch eine grundlegende Änderung des Zwischenlagerkonzepts möglich. So besteht ein Lagerkonzept in der sog. Nasslagerung der Brennelemente in Nasslagerbecken (z. B. zentrales SKB Nasslager "CLAB" in Schweden (Government Offices of Sweden, Ministry of the Environment 2020)). Die wassergefüllten Becken ermöglichen eine aktive Kühlung der anfangs sehr heißen Brennelemente. In einem Nasslager wird die radioaktive Strahlung durch das Wasser im Lagerbecken abgeschirmt. Der Schutz gegen äußere, natürliche oder menschliche, Einflüsse wird durch die Konstruktion des Lagergebäudes sichergestellt, im Fall des CLAB beispielsweise durch dessen unterirdische Lage (Government Offices of Sweden, Ministry of the Environment 2020). Im Gegensatz zur trockenen Zwischenlagerung ist ein Nasslager auf eine kontinuierliche Energieversorgung angewiesen. Das Wasser in den Lagerbecken muss umgewälzt und frisches Wasser zugeführt werden, dafür müssen Pumpen betrieben werden. Es bestehen kontinuierlich höhere betriebliche Aufwendungen für den Lagerbetrieb einschließlich Personal und Wartung (Geupel et al. 2015). Während die in Deutschland bisher praktizierte trockene Zwischenlagerung passiv sicher ist, ist ein Nasslager auf aktiven Betrieb angewiesen.

Ein anderes Konzept wurde für das Nasslager im Kernkraftwerk Gösgen in der Schweiz gewählt (Framatome ANP GmbH o.D.). Das Nasslager ist für 1.008 abgebrannte Brennelemente ausgelegt und in einem separaten Gebäude untergebracht, das gegen Flugzeugabsturz und Erdbeben ausgelegt ist. Die Kühlung kann hier insbesondere im Fall eines Störfalls auch passiv mittels Naturumlauf und Wärmetauscher erfolgen. Somit sind entsprechende Sicherheitssysteme entbehrlich (Ornot 2013). Das Nasslager ist seit 2008 in Betrieb.

Der wohl relevanteste Vorteil der Nasslagerung gegenüber der Trockenen Lagerung ist, dass die Brennelemente hier einer visuellen Kontrolle vergleichsweise leicht zugänglich sind.

Die Option einer Nasslagerung zur verlängerten Zwischenlagerung stellt eine deutliche Änderung des Sicherheitskonzepts gegenüber der bisher in Deutschland praktizierten trockenen Zwischenlagerung in TLB dar. Bei der trockenen Zwischenlagerung werden der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle und die Abschirmung der von ihnen ausgehenden Strahlung im Wesentlichen durch die Konstruktion der TLB gewährleistet. Die Wärme, die von den Abfällen in den TLB abgegeben wird, wird durch den Luftzug, der die Zwischenlager konstruktionsbedingt durchströmt, abgeführt.

Ein vollständiger Wechsel des Zwischenlagerkonzepts in Deutschland erscheint aus heutiger Sicht nur vorstellbar, wenn die trockene Zwischenlagerung in den aktuell genutzten TLB nicht fortgesetzt werden kann. Als Grund kommt nur ein systematisches Versagen von Sicherheitsfunktionen der TLB in Frage, das durch Reparaturen nicht zu beheben ist. In einem solchen Fall müssten sämtliche Abfälle in neue TLB umgeladen werden. Angesichts des zu erwartenden zeitlichen und finanziellen Aufwands für die Herstellung von 1.900 TLB kann ein Nasslager eine attraktive Option sein.



Vor einem solchen Wechsel des Zwischenlagerkonzepts sind jedoch eine Reihe weiterer Argumente zu berücksichtigen. So böte zwar die Nasslagerung die kontinuierliche Zugänglichkeit abgebrannter Brennelemente und damit deutlich bessere Möglichkeiten zur Überwachung alterungsbedingter Veränderungen. Auf der anderen Seite besteht das Risiko, dass die Umladung abgebrannter Brennelemente in ein Wasserbecken nach jahrelanger trockener Zwischenlagerung zur Schädigung von Hüllrohren und Strukturteilen führt.

Nach heutigem Kenntnisstand sind in Zukunft keine Ereignisse oder Veränderungen zu erwarten, die für einen vollständigen Wechsel des Zwischenlagerkonzepts sprechen. Daher wird die Möglichkeit der Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland in einem Nasslager nicht weiter im Detail ausgeführt. Im Rahmen von WERA wird diese Option der verlängerten Zwischenlagerung im Folgenden nicht weiterverfolgt.

2.3. Eingangslager

Der Bau und Betrieb eines Eingangslagers, wie es in der Bundesrepublik Deutschland vorgesehen ist, stellt im internationalen Vergleich eine Besonderheit dar. Im Folgenden werden die Gründe für die Notwendigkeit dieses Entsorgungsschrittes, ausgehend vom nationalen Regelwerk, aufgeführt und die Funktion des Eingangslagers beschrieben.

2.3.1. Nationales Regelwerk und Empfehlungen

Weil mit der Aufnahme des Endlagerbetriebs frühestens 2050 zu rechnen ist und die bisherigen Genehmigungsdauern der Zwischenlager diesen Zeitraum nicht abdecken (vgl. Kapitel 1.2.2), kann dem Entsorgungsschritt Eingangslager eine wesentliche Brückenfunktion zukommen. Das Nationale Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB 2015) sieht vor, am Endlagerstandort zusammen mit der ersten Teilgenehmigung zur Errichtung des Endlagers auch ein Eingangslager mit entsprechender Konditionierungsanlage für alle bestrahlten Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung zu genehmigen. Dadurch soll die Räumung der bestehenden Zwischenlager ermöglicht werden (vgl. Kapitel 1.2.2). Das NaPro enthält jedoch keine darüberhinausgehenden Angaben zum Konzept des Eingangslagers.

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich auf Basis der Richtlinie 2011/70/Euratom verpflichtet, regelmäßig ein Nationales Entsorgungsprogramm zu erstellen und dies auch in nationales Recht umgesetzt (§ 2c AtG). Der NaPro entfaltet keine Rechtsnormqualität, muss aber bei allen Entsorgungsplanungen und Verwaltungsverfahren berücksichtigt werden (BASE 2020b).

Hinsichtlich der Festlegung der Kapazität des Eingangslagers unterscheiden sich die Angaben im NaPro (BMUB 2015) selbst von der Darstellung im Umweltbericht für die Öffentlichkeitsbeteiligung (Steinhoff et al. 2015) an der Strategischen Umweltprüfung zum NaPro. Abweichend vom nationalen Entsorgungsprogramm "ging der Umweltbericht für die Öffentlichkeitsbeteiligung an der Strategischen Umweltprüfung des Programms von einem Eingangslager mit 500 Stellplätzen für Abfallbehälter aus" (Endlagerkommission 2016). Im Abschlussbericht der Endlagerkommission wird dazu weiter ausgeführt: "Da die Zeit, die zwischen dem Erlöschen der Zwischenlagergenehmigungen und der Eröffnung des Endlagers liegen wird, bislang nicht feststeht, musste das Programm offenlassen, ob alle bestrahlten Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gleichzeitig oder nacheinander, also durchlaufend in dem Eingangslager aufbewahrt werden sollen". Darüber hinaus werden im Abschlussbericht der Endlagerkommission (2016) bereits heute absehbare Konflikte im Zusammenhang mit dem Eingangslager benannt:

- Wenn das Eingangslager errichtet wird, bevor das Endlager eine rechtskräftige Genehmigung hat, kann dies den Eindruck einer Vorentscheidung für den Endlagerstandort erwecken.
- Ein großes Eingangslager, das zunächst als Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle dient, könnte vor Ort als größere Belastung im Vergleich zum Endlager gesehen werden. Zudem wird auf die schwer vorhersehbaren Entwicklungen der letzten Jahre hinsichtlich des Schutzes vor Einwirkungen Dritter hingewiesen.
- Die Kriterien, nach denen der Endlagerstandort auszuwählen ist, sind auf eine Endlagerung mit bestmöglicher Sicherheit ausgerichtet. Sie orientieren sich nicht an der Zwischenlagerung. Bei einem großen, über einen längeren Zeitraum betriebenen Eingangslager könnten aber die Sicherheitskriterien des Zwischenlagers zunächst im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses stehen.

Die ESK weist das Eingangslager als eine der Tagesanlagen des Endlagers aus, die insbesondere der Verstetigung des Einlagerungsbetriebs dient. Für diese "gelten die sicherheitstechnischen Auslegungsanforderungen gemäß den ESK-Empfehlungen zur Zwischenlagerung" (ESK 2015b).

Die ersten konzeptionellen und zeitlichen Vorstellungen zum Eingangslager hat die BGE (Tietze 2020) auf einer Informationsveranstaltung öffentlich diskutiert. Demnach ist vorgesehen, dass das Eingangslager ca. 2-3 Jahre vor der Inbetriebnahme der Konditionierungsanlage und ca. 5 Jahre vor der Inbetriebnahme des Endlagers in Betrieb gehen soll. 2021 erschien ein Bericht der BGE mit der Beschreibung der Tagesanlagen und Abschätzung des Flächenbedarfs (BGE 2021b). Hier ist ein Eingangslager als Pufferlager vorgesehen.

Im Hinblick auf die Möglichkeit einer Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am gleichen Standort sind nach § 21 der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) die übertägige Handhabung und Behandlung der hochradioaktiven Abfälle und der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle voneinander zu trennen.

Im Moment gibt es weder auf der regulatorischen noch auf der technischen Ebene Argumente für eine gemeinsame Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle und schwach- und mittelradioaktiver Abfälle. Im Folgenden wird daher auf Einflüsse schwach- und mittelradioaktiver Abfälle eines möglicherweise am gleichen Standort zu errichtenden Endlagers auf das Eingangslager nur kursorisch eingegangen.

2.3.2. Mögliche Funktionen eines Eingangslagers

Wie oben ausgeführt ist der Entsorgungsschritt Eingangslager in der gemäß NaPro vorgesehenen Größe ein deutsches Spezifikum. In den Entsorgungskonzepten anderer Staaten werden die möglichen Funktionen eines Eingangslagers jeweils von anderen Entsorgungsschritten übernommen. Das Eingangslager soll nach dem NaPro am Endlagerstandort errichtet werden. Dadurch existieren weniger Freiheitsgrade bei der Entwicklung von Optionen zur Ausgestaltung dieses Entsorgungsschrittes als beispielsweise bei Zwischenlager oder Konditionierungsanlage. Aus diesen Gründen werden im Folgenden Optionen für die Gestaltung eines Eingangslagers ausgehend von Wechselwirkungen mit den anderen Entsorgungsschritten und über Variation der zu übernehmenden Funktionen entwickelt. Zur Veranschaulichung wird an drei Beispielen aus europäischen Staaten erläutert, wie diese Funktionen jeweils abgedeckt werden.

Die Möglichkeit, das Eingangslager entfernt vom Endlagerstandort zu errichten, wird im Rahmen der Szenarienentwicklung (siehe Kapitel 3) diskutiert, da dies weniger die Funktion des Eingangslagers, sondern mehr dessen Stellung im gesamten Wegemanagement tangiert.



₩ Öko-Institut e.V. **WERA**

2.3.2.1. Konzepte und Optionen für ein Eingangslager

Zwei grundsätzliche Konzepte eines Eingangslagers können unterschieden werden:

Zum einen kann ein Eingangslager als Pufferlager konzipiert werden, um die jeweils anschließenden Entsorgungsschritte Konditionierung oder Endlagerung zu verstetigen. Dieses Konzept entspräche der von der ESK (2015b) skizzierten Funktion eines Eingangslagers.

Zum anderen kann ein Eingangslager als zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle genutzt werden und damit zugleich die Zwischenlager entlasten und schließlich obsolet machen. Dieses Konzept stimmt mit der im NaPro (BMUB 2015) skizzierten Funktion des Eingangslagers überein. Ein Eingangslager könnte als Anlage konzipiert werden, die, anders als die bestehenden Zwischenlager, spezifisch für den Zweck einer deutlich längeren Zwischenlagerung ausgelegt ist.

Beide Konzepte können weiter unterschieden werden nach der Art der einzulagernden Behälter. Abhängig von den jeweils vorhergehenden und anschließenden Entsorgungsschritten müssen Transport- und Lagerbehälter (TLB), konditionierte Endlagerbehälter (ELB) (Konditionierung siehe Kapitel 3.4) oder sowohl TLB als auch ELB im Eingangslager aufbewahrt werden können. Wenn das Eingangslager beispielsweise als zentrales Zwischenlager dienen soll, das zur Entlastung der bestehenden Zwischenlager die dort gelagerten TLB aufnimmt, müsste es Raum für ca. 1.900 TLB bieten (BASE 2020c). Die Abfälle wären bereits vollständig am Endlagerstandort konzentriert, wenn das Endlager den Betrieb aufnimmt, und könnten kontinuierlich konditioniert und eingelagert werden (zur Größe der Anlage siehe auch Kapitel 2.2.3.2). Beide Konzepte können weiter unterschieden werden nach der Art der einzulagernden Behälter. Abhängig von den jeweils vorhergehenden und anschließenden Entsorgungsschritten müssen Transport- und Lagerbehälter (TLB), konditionierte Endlagerbehälter (ELB) (Konditionierung siehe Kapitel 3.4) oder sowohl TLB als auch ELB im Eingangslager aufbewahrt werden können. Wenn das Eingangslager beispielsweise als zentrales Zwischenlager dienen soll, das zur Entlastung der bestehenden Zwischenlager die dort gelagerten TLB aufnimmt, müsste es Raum für ca. 1.900 TLB bieten (BASE 2020c). Die Abfälle wären bereits vollständig am Endlagerstandort konzentriert, wenn das Endlager den Betrieb aufnimmt, und könnten kontinuierlich konditioniert und eingelagert werden (zur Größe der Anlage siehe auch Kapitel 2.2.3.2).

Bei einer Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager steht der kontinuierliche Betrieb der vorausgehenden und folgenden Entsorgungsschritte im Vordergrund. Daraus resultiert grundsätzlich ein erheblich geringerer Platzbedarf. Pufferlagerflächen werden nicht nur bei der Annahme der TLB sondern auch vor der Konditionierung und vor der Einlagerung erforderlich sein. Entsprechend müssen TLB oder zur Endlagerung konditionierte ELB angenommen und für den nächsten Entsorgungsschritt, Konditionierung oder Endlagerung, bereitgestellt werden. Abhängig von der Kapazität der Konditionierungsanlage bzw. dem planmäßigen Einlagerungsfortschritt im Endlager muss das Eingangslager nur Raum für eine niedrige zweistellige Zahl von Behältern bieten. Es besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, dass ein Eingangslager beide dargestellten Pufferfunktionen übernimmt.

Zur Gewährleistung der Rückholbarkeit eingelagerter hochradioaktiver Abfälle für die Dauer der Betriebsphase entsprechend §1 Abs.4 StandAG kann das Eingangslager am Endlagerstandort darüber hinaus dazu dienen, zurückgeholte Endlagergebinde für einen begrenzten Zeitraum aufzunehmen, d.h. die Rückholung zu puffern. Diese Erweiterung der beiden grundsätzlichen Konzepte wäre beispielsweise aus § 13 Abs. 2 der EndlSiAnfV (2020) abzuleiten.

Ausgehend von den oben ausgeführten Konzepten werden die folgenden Optionen zur Ausgestaltung eines Eingangslagers unterschieden:

1. Pufferlager

- a) Pufferlager für TLB: TLB werden angeliefert und gelagert, es werden Eingangskontrollen durchgeführt; das Eingangslager dient der Verstetigung der Konditionierung.
- b) Pufferlager für ELB: Konditionierte Abfälle in ELB werden angeliefert und gelagert, das Eingangslager dient der Verstetigung der Einlagerung.
- c) Pufferlager für TLB und ELB: TLB werden angeliefert und Eingangskontrollen durchgeführt, das Eingangslager dient primär der Verstetigung der Konditionierung; darüber hinaus werden konditionierte Abfälle in ELB bis zur Endlagerung aufbewahrt, um die Einlagerung zu puffern.
- d) Pufferung der Rückholung: Die oben beschriebenen Optionen werden um die Funktion erweitert, im Fall einer Rückholung rückgeholte ELB bis zu deren Weitertransport- oder Behandlung aufzunehmen und so die Rückholung zu verstetigen; Durchführung von Maßnahmen zur Reparatur/Wartung und Dokumentation der Behälter sind denkbar.

2. Zentrales Zwischenlager

- a) Zentrales Zwischenlager für TLB: Eingangskontrollen, Übernahme der verlängerten Zwischenlagerung in TLB bis zum Beginn der Konditionierung und anschließenden Endlagerung, Entlastung der bestehenden Zwischenlager¹⁰.
- b) Zentrales Zwischenlager für ELB: Konditionierte Abfälle in ELB werden bis zum Beginn der Einlagerung gelagert.
- c) Zentrales Zwischenlager für TLB und Pufferung von ELB: Eingangskontrollen, Übernahme der verlängerten Zwischenlagerung in TLB bis zum Beginn der Konditionierung und anschließenden Endlagerung, Entlastung der bestehenden Zwischenlager, darüber hinaus werden konditionierte Abfälle in ELB bis zur Endlagerung aufbewahrt, um diese zu puffern.
- d) Zentrales Zwischen- und Rückholungslager: Das zentrale Zwischenlager für TLB und/oder ELB wird um die Funktion erweitert, im Fall einer Rückholung rückgeholte ELB bis zu deren Weitertransport- oder Behandlung aufzunehmen und so die Rückholung zu verstetigen. Durchführung von Maßnahmen zur Reparatur/Wartung und Dokumentation der Behälter sind denkbar.

Zur Umsetzung der Konzepte und Optionen werden neben den dargestellten grundsätzlichen Anforderungen die folgenden möglichen Funktionen eines Eingangslagers benötigt:

- Annahme und Eingangskontrolle angelieferter Behälter mit hochradioaktiven Abfällen,
- Längerfristige Lagerung aller hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland,
- Lagerung konditionierter hochradioaktiver Abfälle in Endlagerbehältern bis zur Einlagerung in das Endlager (=Pufferlagerung),
- Überwachung eingelagerter Behälter (TLB oder ELB), u. U. auch der Abfälle in den Behältern,
- Möglichkeit zur Reparatur beschädigter TLB oder ELB,

"Mit der ersten Teilgenehmigung für das Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde Abfälle soll am Standort auch ein Eingangslager für alle bestrahlten Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung genehmigt und damit die Voraussetzung für den Beginn der Räumung der bestehenden Zwischenlager geschaffen werden." Nationales Entsorgungsprogramm, BMUB (2015).



 Aufbewahrung entladener TLB bis zur weiteren Behandlung (Dekontamination und anschließende Verarbeitung zu Abfall und Wertstoff),

- Eingangskontrolle und anschließende Lagerung rückgeholter Behälter (siehe auch Kapitel 2.6.2),
- Sicherung der hochradioaktiven Abfälle gegen Proliferation und Angriffe Dritter.

Auch leere ELB bedürfen einer Pufferlagerung, um eine kontinuierliche Konditionierung sicher zu stellen. Da diese nicht den Überwachungsmaßnahmen wie radioaktive Abfälle unterliegen, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

Unter der o. g. Prämisse, dass das Eingangslager als Tagesanlage des Endlagers an dessen Standort errichtet wird, kann davon ausgegangen werden, dass bestimmte Funktionen wie bspw. Sicherung, Möglichkeiten zur Reparatur etc. durch zentrale Einrichtungen für den gesamten Standort übernommen werden.

2.3.2.2. Funktionen eines Eingangslagers in den Entsorgungskonzepten Schwedens, Finnlands und der Schweiz

Ein Eingangslager, wie es in Deutschland gemäß NaPro vorgesehen ist, gibt es in den nationalen Entsorgungskonzepten anderer Staaten nicht bzw. nur teilweise. Die dargestellten möglichen Funktionen werden jeweils im Rahmen anderer Entsorgungsschritte abgedeckt. Das soll im Folgenden an den Beispielen Schweden, Finnland und Schweiz, verdeutlicht werden.

In Schweden werden ausgediente Brennelemente in einem zentralen nassen Zwischenlager, dem CLAB, aufbewahrt. Nach dem Endlagerkonzept KBS-3 soll eine Konditionierungsanlage unmittelbar neben dem CLAB errichtet werden. In der Konditionierungsanlage sollen die Brennelemente in die Endlagerbehälter umgeladen und die Behälter verschweißt werden; anschließend werden diese in Transportbehältern verladen auf dem Seeweg zum Endlager transportiert. Die Funktionen Annahme und Eingangskontrolle werden in Schweden vom zentralen Zwischenlager übernommen, eine Pufferung für die Konditionierungsanlage ist wegen der Nachbarschaft dieser zum CLAB unnötig.

Das finnische Endlagerkonzept im Kristallin orientiert sich am schwedischen KBS-3 System und sieht vor, die in den Zwischenlagern in Loviisa und Olkiluoto nass gelagerten Brennelemente in Transportbehälter umzulagern und zur Konditionierungsanlage zu transportieren. Ein Bestandteil der Konditionierungsanlage ist ein Pufferlager, in dem beladene und verschweißte Endlagerbehälter auf den Transport nach Untertage warten (Kukkola 2012, S. 4). Hier übernimmt also die Konditionierungsanlage die Pufferfunktion für endlagerbereit konditionierte Abfälle.

In der Schweiz existieren mit dem Zwilag und dem Zwibez zentrale Zwischenlager, von denen aus die hochradioaktiven Abfälle zum Endlager transportiert werden sollen. Dort werden sie in die so genannte Oberflächenanlage des Endlagers abgegeben (entspricht im Deutschen den Tagesanlagen). Die Funktionen Annahme und Pufferung werden von diesen übernommen. Zentral ist die Brennelementverpackungsanlage, die die Konditionierungsaufgaben übernimmt. Nach der Annahme werden die Abfälle in einer Umladezelle in nicht abschirmende Endlagerbehälter verpackt, diese werden verschraubt und verschweißt, und vor dem Transport nach Untertage in ein temporäres Lager angeliefert (NAGRA 2011). Neben der Möglichkeit Annahme, Konditionierung und Pufferung am Endlagerstandort durchzuführen, wird in der Schweiz auch die Möglichkeit diskutiert, am größeren der beiden Zwischenlager und nicht am Endlagerstandort die Konditionierungsanlage zu errichten (NAGRA 2020). Eine Entscheidung ist noch nicht gefallen. Die zentralen Zwischenlager bestehen unabhängig davon.

2.3.2.3. Grundsätzliche Auslegung und technische Gestaltung

Das Eingangslager muss abhängig von der Aufgabenstellung, Kapazität und räumlichen Verortung ähnliche sicherheitstechnische Funktionen wie ein Zwischenlager erfüllen. Weitere Anforderungen ergeben sich aus Wechselwirkungen mit den jeweils vorhergehenden und folgenden Entsorgungsschritten, den Typen der einzulagernden Behälter und damit verbundenen technischen Rahmenbedingungen sowie der Menge der Behälter.

Das Eingangslager muss langfristig, über mehrere Jahrzehnte, in seiner Funktion erhalten bleiben. Entsprechende Anforderungen müssen an die Dauerhaftigkeit der Konstruktion und Infrastruktur gestellt werden. Darüber hinaus muss die Anlage die Möglichkeit zur Wartung, funktionellen Erweiterung und Ertüchtigung zur Anpassung an zukünftige Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie die Fortschreibung des geltenden Regelwerks bieten. Zu diesem Zweck sollten, wie bei den bestehenden Zwischenlagern auch, die Sicherheitsfunktionen in regelmäßigen Abständen geprüft und erforderlichenfalls Nachrüstungen vorgenommen werden.

Neben dem Schutz gegen Witterungs- und weitere natürliche Einflüsse wie bspw. Erdbeben ist, angepasst an die Art der hochradioaktiven Abfälle und deren Behälter, die Abschirmung der Umwelt gegen ionisierende Strahlung von wesentlicher Bedeutung. Diese Schutzfunktion übernimmt das Gebäude gemeinsam mit den Behältern. Im Inneren muss das Eingangslager über hinreichend große Lagerflächen verfügen, die eine an das eingelagerte Abfallinventar angepasste Belegung mit Blick auf Radioaktivität und Wärmeleistung der Behälter erlauben. Das Gebäude muss über Funktionsbereiche und Einrichtungen zur Handhabung in einer geeigneten räumlichen Anordnung verfügen. Darüber hinaus muss das Gebäude robust gegen Störfälle ausgelegt sein. Ob zusätzliche bzw. veränderte Störfallbetrachtungen gegenüber denen, die bisher für Zwischenlager durchzuführen sind, umzusetzen wären, ist derzeit noch ungewiss. Des Weiteren müssen technische und personelle Maßnahmen zur Sicherung, also zum Schutz vor Proliferation und möglichen Angriffen Dritter, vorgesehen werden. Alle diese Anforderungen entsprechen im Wesentlichen den Anforderungen an Zwischenlager (siehe auch Kapitel 2.2.2).

Der Aspekt der Rückholbarkeit eingelagerter Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers kann für die Dimensionierung und erforderliche Betriebszeit, d. h. die Lebensdauer des Eingangslagers, eine entscheidende Rolle spielen. Im Fall einer Entscheidung zur Rückholung müssten die bestehenden Gebäude des Eingangslagers und einer möglichen Konditionierungsanlage am Endlagerstandort für eine erneute Lagerung, evtl. notwendige Behandlung der Abfälle oder Verwertung zurückgeholter Endlagerbehälter genutzt werden, bevor eine notwendige neue Anlage errichtet und in Betrieb genommen werden kann. (vgl. Kapitel 2.3.2.1). Zu diesem Zweck ist es hilfreich, dies bei der Planung zu berücksichtigen.

2.3.3. Beschreibung möglicher Optionen für das Eingangslagerkonzept

Im Folgenden werden Optionen zur Ausgestaltung des Eingangslagers beschrieben. Dabei wird, wie oben ausgeführt, nach den beiden grundlegenden Konzepten Pufferlager und zentrales Zwischenlager unterschieden.



2.3.3.1. Pufferlager für TLB (Option EG 1 a)

Definition/Kurzbeschreibung

Hochradioaktive Abfälle in TLB werden in das Eingangslager angeliefert. Dort werden sie anschließend einer Eingangskontrolle unterzogen. Die Konditionierungsanlage befindet sich auf dem Gelände des Endlagers in unmittelbarer Nachbarschaft zum Eingangslager oder auch im gleichen Gebäudekomplex. Die kontrollierten TLB werden aus dem Eingangslager sukzessive an die Konditionierungsanlage weitergeleitet. Das Eingangslager dient der Verstetigung der Konditionierung. Für den Fall von Störungen bei der Abfallanlieferung werden im Eingangslager so viele beladene TLB vorgehalten, dass der Betrieb der Konditionierungsanlage für einen vorher definierten Zeitraum unabhängig von der Anlieferung von TLB aufrechterhalten werden kann.

Wie in Kapitel 1.2.2 dargestellt, hängt der tatsächliche Zeitbedarf jedoch in jedem Fall von einer Vielzahl zu berücksichtigender Faktoren ab, beispielsweise vom Endlagerkonzept und der Einlagerung im Einschicht- oder sogar Dreischichtbetrieb. Im Folgenden wird von einer Betriebsdauer des Eingangslagers von etwa 70 Jahren ausgegangen.

Technische Aspekte

Transporte: Über die Betriebszeit des Eingangslagers werden voraussichtlich etwa 1.900 TLB angeliefert werden. Im Idealfall beginnt die Anlieferung schon vor dem Beginn der Konditionierung (um die Pufferung zu gewährleisten) und erfolgt dann mit der gleichen Frequenz, mit der die Abfälle anschließend in der Konditionierungsanlage in ELB verpackt werden. Transporte zur Konditionierungsanlage können aufgrund der direkten Nachbarschaft zu dieser Anlage vernachlässigt werden (kein Transport über öffentliche Straßen).

Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung verschlossener TLB verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten Behälter an ihren Stellplätzen möglich sein. Dazu gehören die Überwachung der Behälterdichtungen mittels Druckschalter sowie die radiologische Überwachung der Umgebungsluft im Eingangslager, der Abluft und der Umgebung am Anlagenzaun des Eingangslagers bzw. des Endlagergeländes, so wie es heute Stand der Technik bei bestehenden Anlagen ist. Auf die Einrichtung einer Fläche oder einer Heißen Zelle für die Reparatur beschädigter TLB kann verzichtet werden, da diese Funktion von der benachbarten Konditionierungsanlage übernommen werden kann.

Die Lebensdauer der Anlage muss etwa 70 Jahre betragen (s.o.). Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene Anforderungen ein.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal anderer Einrichtungen wie der Konditionierungsanlage oder dem Endlagerbergwerk genutzt werden. Auch die Sicherung der Anlage gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich für den ganzen Endlagerstandort zentral koordiniert organisiert werden.

Kapazität: Die benötigte Lagerfläche zur Erfüllung der Pufferfunktion ist im besten Fall klein im Vergleich zu allen anderen betrachteten Optionen zur Auslegung des Eingangslagers. Im Folgenden wird angenommen, dass das Pufferlager über eine Kapazität verfügen muss, die die Aufrechterhaltung des Einlagerungsbetriebs für ein Jahr ermöglicht.

WERA "Oko-Institut e.V.

Wie in Kapitel 1.2.2 dargestellt, wird für das Endlagerkonzept der Schweiz die Einlagerung von 200 ELB pro Jahr angenommen. Die im Forschungsvorhaben RESUS ermittelten Anzahlen von ELB variieren für die unterschiedlichen Endlagerkonzepte zwischen 9.669 und 19.624 (siehe Kapitel 1.2.2). Die hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland werden nach Stilllegung der letzten Kernkraftwerke Ende 2022 und Leerung aller Abklingbecken in etwa 1.900 TLB aufbewahrt werden (BASE 2020c, S. 15)(BASE 2020b, S. 15). Überschlägig wird demnach während der Konditionierung der Inhalt eines TLB in fünf bis zehn ELB umgeladen. Daraus ergibt sich für das Pufferlager eine benötigte Kapazität von 20 bis 40 TLB.

Ein so geringer Platzbedarf rechtfertigt allerdings kaum den Bau eines separaten Eingangslagers; wahrscheinlicher ist, dass unter diesen Umständen das Eingangslager als Teil der Konditionierungsanlage realisiert werden würde. Unter anderen Voraussetzungen wie einer Einlagerung im Dreischichtbetrieb und einem höheren Verhältnis von TLB zu ELB sowie möglicherweise einem höheren Zeitbedarf zur Pufferung ergibt sich ein deutlich höherer Platzbedarf. Im Sinne einer Maximalbetrachtung wird hier daher von einem ungünstigen Fall und einem Platzbedarf von bis zu 200 TLB ausgegangen. Mit einem Eingangslager dieser Größe ließe sich der Einlagerungsbetrieb bis zu ein Jahr lang aufrechterhalten.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Die übertägige Handhabung und Behandlung der Abfälle im Fall einer Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle ist in einem separaten Endlager am gleichen Standort voneinander zu trennen. Sollte das Eingangslager dennoch für die Aufnahme von Abfällen für beide Endlager ausgelegt werden, müssten Wechselwirkungen im Betrieb oder bei Störfällen berücksichtigt werden. Bei der Auslegung müsste eine entsprechende bauliche und technische Trennung umgesetzt werden. Das kann beispielsweise durch hermetisch voneinander abgeschottete Lagerbereiche, separate Zu- und Abluftsysteme inkl. Filteranlagen, jeweils eigenes Betriebspersonal, separate Schleusen für Annahme und Auslieferung für die beiden Lagerbereiche etc. umgesetzt werden. Angesichts der notwendigen Maßnahmen zur Trennung aller Arbeiten zwischen hochradioaktiven Abfällen einerseits und schwach- und mittelradioaktiven Abfällen andererseits sind kaum Synergien, Zeit- oder Kostenersparnisse zu erwarten, die ein gemeinsames Eingangslager rechtfertigen.

Für eine gemeinsame Nutzung müsste das Eingangslager der Option EG 1 a) entsprechend vergrößert werden. Sollte dem Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle die Aufgabe der zentralen Zwischenlagerung für diese Abfälle bis zu ihrer Endlagerung zukommen, stellte das Pufferlager für TLB eine - bezogen auf die benötigte Lagerfläche Erweiterung dieses Eingangslagers dar.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement muss so ausgelegt werden, dass nie mehr als 200 TLB gleichzeitig im Eingangslager aufbewahrt werden müssen. Die Anlieferung von TLB ans Eingangslager muss sich an der Abgabe von Behältern an die Konditionierungsanlage zur Entladung orientieren. Aufgrund der Größe des Pufferlagers stünde dafür ausreichend Zeit zur Verfügung. Wesentliche Managementvoraussetzungen sind in jedem Fall ein bedarfsgerechtes Verfahren zum Abruf von TLB aus den Zwischenlagern auf Basis ihrer jeweiligen Charakterisierung, zur Erteilung von Transportgenehmigungen, ein kontinuierliches Management der Arbeiten zur Transportvorbereitung in den Zwischenlagern und eine langfristige Auslastungsplanung der Konditionierungsanlage insbesondere

im Hinblick auf das zur Einlagerung gemäß dem Endlagerkonzept erforderliche Mischungsverhältnis verschiedener Brennelemente¹¹ in den ELB.

Ökonomische Aspekte

Die Errichtung und der Betrieb eines kleineren Eingangslagers sind kostengünstiger gegenüber der Errichtung eines zentralen Eingangslagers (Optionen 2. a) bis d)), aber auch gegenüber den Optionen 1. c) und 1. d). Allerdings setzt das kleinere Eingangslager voraus, dass die Zwischenlager länger betrieben werden müssen und hier Kosten entstehen.

Administrative Aspekte

Ein Pufferlager am Endlagerstandort muss den Betrieb erst mit Beginn der Einlagerung aufnehmen. Es kann davon ausgegangen werden, dass es als Teil der Tagesanlagen des Endlagers keine eigenständige kerntechnische Anlage darstellt. Eine eigene oder vorgezogene Genehmigung für Errichtung und Betrieb des Eingangslagers wäre in diesem Fall nicht erforderlich, vielmehr würde es als Tagesanlage des Endlagers genehmigt. Die Aufsicht über das Eingangslager kann gemeinsam mit der Aufsicht über das Endlager ausgeübt werden.

Grundsätzlich beziehen sich Transportgenehmigungen auf den Gesamttransport und sind dann zahlenmäßig die wenigsten, wenn immer Voll-Züge bzw. große Kampagnen transportiert werden. Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist hier gegenüber einem Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager betrieben wird, höher. Zwar müssen in jedem Fall alle TLB zum Eingangslager transportiert werden, aber da der Lagerraum im Pufferlager begrenzt ist, kann pro Transport jeweils nur eine geringe Anzahl von TLB angeliefert werden. Dazu kommt, dass zur Gewährleistung von Unterkritikalität und zur Einhaltung der Grenztemperatur an der Außenwand der ELB bei deren Beladung in der Konditionierungsanlage voraussichtlich Brennelemente aus verschiedenen Quellen gemischt werden müssen. Wenn die Anlieferung der Abfälle nicht aus einem zentralen Zwischenlager erfolgt, sondern aus Zwischenlagern an verschiedenen Standorten, müssen Anlieferungskampagnen so geplant werden, dass im Pufferlager ein Abfallinventar passend zur beabsichtigten Beladung der ELB vorgehalten wird. Entsprechend müssen die Transportgenehmigungen für die Anlieferung aus verschiedenen Zwischenlagern erteilt werden. Je kleiner das Eingangslager, umso mehr Einzeltransporte sind durchzuführen und entsprechend steigt der Aufwand.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Die Entscheidung, das Eingangslager als Pufferlager statt als zentrales Zwischenlager auszulegen, zwingt dazu, die Zwischenlagerung an den bestehenden Standorten zu verlängern oder eine andere Übergangslösung bis zur Inbetriebnahme des Endlagers umzusetzen. Darüber hinaus ist die Anzahl der benötigten Transporte zur Anlieferung abhängig von der Art des Zwischenlagers. Wenn TLB bis zur Anlieferung in einem zentralen Zwischenlager (siehe Kapitel 2.2.3.2) aufbewahrt werden, können sie dort für einen Transport so zusammengestellt werden, dass jede Lieferung eine anschließende optimale Beladung der ELB ermöglicht und pro Anlieferungskampagne nur ein Transport notwendig ist. Bei Zwischenlagerung an mehreren zentralen Standorten (siehe Kapitel 2.2.3.3) steigt u. U. die Anzahl der benötigten Transporte. Im Fall einer dezentralen Zwischenlagerung, bspw. in den bestehenden Standortzwischenlagern (siehe Kapitel 2.2.3.1), sind für die Anlieferung entsprechend mehr Transporte zu erwarten.

¹¹ Zum Mischungsverhältnis von BE/Brennstäben unterschiedliche Zusammensetzung siehe bspw. Becker et al. ((2020a)), Bollingerfehr et al. ((2011))

WERA "Öko-Institut e.V.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager hat insofern Einfluss auf den Betrieb des Endlagers, als die Abhängigkeit von einer rechtzeitigen Anlieferung und Konditionierung der einzulagernden Abfälle zwar verringert, aber nicht vollständig aufgehoben wird. Eine längerfristige Störung bei der Anlieferung wird auch den Betrieb von Konditionierungsanlage und Endlager irgendwann zum Erliegen bringen. Das Endlager wirkt wiederum insofern auf den Betrieb des Eingangslagers zurück, als aus der Geschwindigkeit der Einlagerung und der vorherigen Konditionierung Anforderungen an das Anlieferungsmanagement des Eingangslagers entstehen.

Konditionierungsanlage: Wechselwirkungen zwischen Eingangslager und Konditionierungsanlage bestehen insofern, als Verzögerungen bei der Konditionierung oder bei der Anlieferung von TLB vom Eingangslager gepuffert werden müssen.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die benötigte Kapazität des Pufferlagers hängt von verschiedenen Faktoren wie dem Arbeitsfortschritt der Konditionierungsanlage und deren Kapazität, dem Konzept des gewählten ELB und der Einlagerung, dem zeitlichen Genehmigungsaufwand für Transporte zur Anlieferung, dem Managementaufwand zum Abruf der jeweils anzuliefernden TLB etc. ab. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers im Detail beantwortet werden.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung eines Pufferlagers am Endlagerstandort ist technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Eingangslager erfüllen muss, sind bekannt und können im Wesentlichen aus der Erfahrung mit der trockenen Zwischenlagerung abgeleitet werden. Allerdings steht eine Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager im Widerspruch zur im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen.

Sollte das Eingangslager mit der oben diskutierten geringen Kapazität von nur acht TLB realisiert werden, ist dies alternativ durch eine Schaffung von Lagerplätzen in der Konditionierungsanlage am Endlagerstandort vorstellbar, da hier in jedem Fall Bereiche zur Einschleusung mehrerer TLB vorgesehen werden müssen. Durch den Entfall eines separaten Eingangslagers wäre diese Art der Umsetzung voraussichtlich wirtschaftlicher als der Bau einer eigenen Anlage. Die Umsetzung eines separaten Eingangslagers für TLB als Pufferlager wird also wesentlich von der benötigten Kapazität und damit der Wirtschaftlichkeit abhängen.

Einflussfaktoren

Zeit: Ein Eingangslager, das am Standort des Endlagers als Pufferlager errichtet wird, muss rechtzeitig vor Beginn der Einlagerung den Betrieb aufnehmen.

Politik/Gesellschaft: Die Errichtung einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel mit Widerstand der betroffenen Standortbevölkerung verbunden. Für ein im Vergleich zu einem zentralen Zwischenlager deutlich kleineres Pufferlager, das nur ein Teil der größeren Anlage Endlager ist, kann erwartet werden, dass es in der Öffentlichkeit kaum als eigenständige Anlage wahrgenommen wird.



2.3.3.2. Pufferlager für ELB (Option EG 1 b)

Definition/Kurzbeschreibung

Konditionierte Abfälle in ELB werden in das Eingangslager angeliefert. Dort werden die Endlagergebinde einer Eingangskontrolle unterzogen. Die Konditionierung erfolgt nicht auf dem Gelände des Endlagers, sondern eine oder mehrere Konditionierungsanlagen werden unabhängig vom Endlagerstandort errichtet (siehe hierzu Kapitel 2.4). Die Konditionierung erfolgt direkt vor dem Transport zum Eingangslager.

Die kontrollierten Gebinde werden aus dem Eingangslager sukzessive zur Einlagerung an den Einlagerungsschacht oder die Rampeneinfahrt weitergeleitet. Das Eingangslager dient der Verstetigung der Einlagerung. Für den Fall von Störungen bei der Abfallanlieferung werden im Eingangslager so viele konditionierte ELB vorgehalten, dass der Einlagerungsbetrieb des Endlagers für einen vorher definierten Zeitraum unabhängig von der Anlieferung von ELB aufrechterhalten werden kann. Es wird, analog zu Kapitel 2.3.3.1, von einer Betriebsdauer des Eingangslagers von etwa 70 Jahren ausgegangen.

Für den Fall, dass das Sicherheitskonzept des Endlagers die Einlagerung von nicht abschirmenden ELB vorsieht, wird die dargestellte Option nicht betrachtet. Es müssten in diesem Fall für den Transport von Zwischenlager oder Konditionierungsanlage zum Eingangslager sowie für den Transport auf dem Gelände des Endlagerstandorts und nach Untertage bis zum Lagerort Transporteinrichtungen, Transferbehälter o. ä. verwendet werden, die die ionisierende Strahlung an der Außenseite des ELB abschirmen.

Technische Aspekte

Transporte: Die Anlieferung der ELB ins Eingangslager erfolgt im Idealfall in Chargen, die sich hinsichtlich des Umfangs und der Frequenz an der Geschwindigkeit der Einlagerung ins Endlager orientieren. Bei einer Einlagerung von vier ELB pro Woche könnten beispielsweise alle fünf Wochen 20 neue ELB angeliefert werden. Die Dauer des Einlagerungsbetriebs hängt jedoch, wie in Kapitel 1.2.2 dargestellt, von einer Vielzahl von Faktoren ab.

Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung konditionierter hochradioaktiver Abfälle in ELB verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten ELB an ihren Stellplätzen möglich sein. Technische Möglichkeiten zur Überwachung von ELB und Abfallinventar sind bisher nicht entwickelt.

Im Eingangslager muss eine Heiße Zelle für die Reparatur beschädigter ELB vorgesehen werden, da für den Fall, dass ein ELB bei der Eingangskontrolle als beschädigt erkannt wird, ein Transport zu einer Konditionierungsanlage u. U. nicht genehmigungsfähig sein wird. Der Behälter bzw. das Endlagergebinde müssen demnach vor Ort zu reparieren oder nachzugualifizieren sein. Auch ein Umladen des Behälterinventars in einen neuen ELB und dessen qualifizierter Verschluss müssen vorgesehen werden. Alternativ ist die Entwicklung einer hermetisch schließenden und abschirmenden Transportvorrichtung denkbar, die den Transport beschädigter ELB zu einer Konditionierungsanlage ermöglicht.

Die Lebensdauer der Anlage muss entsprechend der Einlagerungsdauer etwa 70 Jahre betragen. Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene, Anforderungen ein.

WERA "Oko-Institut e.V.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal, können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal des Endlagerbergwerks genutzt werden. Auch die Sicherung einer zentralen Anlage gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich für den ganzen Endlagerstandort koordiniert organisiert werden.

Kapazität: Die benötigte Lagerfläche zur Erfüllung der Pufferfunktion ist abhängig von der Einlagerungsgeschwindigkeit in das Endlager und vom Zeitbedarf zur Erteilung von Transportgenehmigungen für ELB. Analog zur Option EG 1 a) soll durch die Pufferung der Einlagerungsbetrieb für einen Zeitraum von einem Jahr für den Fall einer Verzögerung bei der Anlieferung sichergestellt werden. Dazu muss das Eingangslager Raum für 200 ELB bieten (siehe auch Kapitel 1.2.2). Das entspricht 10 Anlieferungskampagnen á 20 ELB (s. o.). Für den Fall, dass ein Jahr Einlagerung im Dreischichtbetrieb gepuffert werden soll, muss das Eingangslager eine ausreichende Kapazität für bis zu 600 ELB besitzen.

Anforderungen an die ELB: Diese Option stellt besondere Anforderungen an die Konstruktion der ELB. Deren Auslegung wird hauptsächlich durch das Sicherheitskonzept des Endlagers bestimmt. Bei einer Konditionierung vor dem Transport zum Endlagerstandort und anschließender Pufferlagerung müssen die ELB zusätzlich als Transportbehälter qualifiziert sein. Eine Transportzulassung setzt u. a. voraus, dass die Behälter abschirmend sind. Die Anforderungen an Transport und Lagerung führen also u. U. zu einer deutlich massiveren Konstruktion der Behälter, als sie sich aus den Anforderungen des Sicherheitskonzepts für das Endlager allein ergibt, sowie zu zusätzlichen Merkmalen wie bspw. der Möglichkeit, Stoßdämpfer aufzunehmen, oder während des Transports oder der Lagerung das Behälterinnere sensorisch überwachen zu können. Da alle diese Maßnahmen entweder zu einer Erhöhung der Abmessungen und Masse der ELB gegenüber Behältern führen, die ausschließlich der Endlagerung dienen, oder zu einer geringeren Beladung der einzelnen ELB, um Abmessungen und Masse gering zu halten, werden dadurch in jedem Fall neue Anforderungen an die Endlagerung erzeugt: durch schwerer handhabbare oder eine höhere Anzahl von ELB.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Für eine gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle gelten die Ausführungen aus Kapitel 2.3.3.1 analog.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement muss so ausgelegt werden, dass die Kapazität des Eingangslagers nicht überschritten wird. Die Frequenz der Anlieferungskampagnen richtet sich nach dem Fortschritt der Einlagerung und dem Umfang eines Transports. Voraussetzungen sind in jedem Fall ein bedarfsgerechtes Verfahren zur Erteilung von Transportgenehmigungen und ein kontinuierliches Management der Arbeiten zur Transportvorbereitung in den Zwischenlagern bzw. Konditionierungsanlagen.

Ökonomische Aspekte

Die Errichtung und der Betrieb eines Pufferlagers für ELB sind kostengünstiger gegenüber der Errichtung eines zentralen Zwischenlagers (Optionen 2 a) bis d)), aber auch gegenüber den Optionen 1 c) und 1 d). Die Kosten für Personal, Infrastruktur und Betrieb werden sich von einem zentralen Zwischenlager kaum unterscheiden.



Administrative Aspekte

Ein Pufferlager am Endlagerstandort muss seinen Betrieb vor Beginn der Einlagerung ins Endlager beginnen, um seiner Funktion gerecht zu werden. Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist gegenüber einem Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager betrieben wird oder einem Pufferlager für TLB voraussichtlich höher. Im schlechtesten angenommen Fall, einem Verhältnis von zehn ELB, um den Inhalt eines TLB aufzunehmen, verzehnfacht sich auch die Anzahl der zu transportierenden Behälter. Gleichzeitig entfällt gegenüber der Option EG 1 a) voraussichtlich die Notwendigkeit, innerhalb einer Anlieferungskampagne u. U. Transporte von verschiedenen Zwischenlager- oder Konditionierungsanlagenstandorten zu veranlassen.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Die Entscheidung, das Eingangslager als Pufferlager statt als zentrales Zwischenlager auszulegen, zwingt dazu, die Zwischenlagerung an den bestehenden Standorten zu verlängern oder eine andere Übergangslösung bis zur Inbetriebnahme des Endlagers umzusetzen.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager hat insofern Einfluss auf den Betrieb des Endlagers, als die Abhängigkeit von einer rechtzeitigen Anlieferung der einzulagernden Endlagergebinde zwar verringert, aber nicht vollständig aufgehoben wird. Eine längerfristige Störung bei der Anlieferung wird auch den Betrieb des Endlagers irgendwann zum Erliegen bringen. Wesentlich schwerer wiegt die Tatsache, dass durch die zusätzlichen Anforderungen an die ELB, die durch eine Transport- und u. U. Lagerzulassung entstehen, mehr Lagerfläche im Endlager benötigt wird als für eine Einlagerung nicht abschirmender Behälter. Das Endlager wirkt wiederum auf den Betrieb des Eingangslagers zurück, da aus der Geschwindigkeit der Einlagerung Anforderungen an das Anlieferungsmanagement des Eingangslagers entstehen.

Konditionierungsanlage: Wechselwirkungen zwischen Eingangslager und Konditionierungsanlage bestehen insofern, als Verzögerungen bei der Konditionierung auf die Anlieferung der Endlagergebinde an das Eingangslager fortwirken können. Sollen die ELB chargenweise transportiert werden, muss die Konditionierungsanlage darüber hinaus Lagermöglichkeiten für beladene ELB vorhalten. Dies beinhaltet die Erfüllung aller mit der Lagerung von ELB verbundenen Anforderungen.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die benötigte Kapazität des Pufferlagers hängt im Wesentlichen vom Einlagerungsfortschritt des Endlagers, dem zeitlichen Genehmigungsaufwand für Transporte zur Anlieferung, der Entfernung des oder der Zwischenlager oder Konditionierungsanlagen vom Endlagerstandort etc. ab. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers sowie abhängig von Entscheidungen über die Umsetzung der notwendigen verlängerten Zwischenlagerung im Detail beantwortet werden.

Technische Möglichkeiten zur Überwachung von ELB und Abfallinventar sind bisher nicht entwickelt. Sie sind abhängig von der Entscheidung über das Sicherheitskonzept für ein Endlager und darauf aufbauend der Entwicklung eines Endlagerbehälters. Ausgehend von der Annahme, dass aus Gründen der Langzeitsicherheit, der Handhabbarkeit über und unter Tage und des betrieblichen Strahlenschutzes die ELB nach der Beladung dauerhaft verschlossen werden, kann von einer Möglichkeit zur Überwachung des Behälterinneren nach heutigem Wissensstand nicht ausgegangen werden. Möglich sind in jedem Fall die Überwachung der Temperatur an der Behälteroberfläche mit WERA

WERA

Temperatursensoren und die radiologische Überwachung am Behälter, der Umgebungsluft im Eingangslager, der Abluft und der Umgebung am Anlagenzaun des Eingangslagers bzw. des Endlagergeländes.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung eines Pufferlagers für ELB am Endlagerstandort ist technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Eingangslager erfüllen muss, können im Wesentlichen aus der Erfahrung mit der trockenen Zwischenlagerung abgeleitet werden. Allerdings steht eine Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager im Widerspruch zur im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen.

Einflussfaktoren

Zeit: Für ein Eingangslager, das am Standort des Endlagers als Pufferlager errichtet wird und erst kurz vor Beginn der Einlagerung den Betrieb aufnehmen muss, steht ausreichend Zeit zur Planung und Errichtung zur Verfügung. Es besteht allerdings eine zeitliche Abhängigkeit vom Fortschritt bei der Errichtung des Endlagers: Ein Pufferlager sollte so kurzfristig wie möglich vor Beginn des Einlagerungsbetriebs errichtet werden, um in jedem Fall bei Aufnahme des Betriebs dem Stand von Wissenschaft und Technik zu entsprechen.

Politik/Gesellschaft: Die Errichtung einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel mit Widerstand der betroffenen Standortbevölkerung verbunden. Für ein im Vergleich zu einem zentralen Zwischenlager deutlich kleineres Pufferlager kann mit einem höheren Grad an Akzeptanz gerechnet werden. Da das Pufferlager jedoch nur ein Teil der größeren Anlage Endlager ist, kann erwartet werden, dass es in der Öffentlichkeit kaum als eigenständige Anlage wahrgenommen wird.

2.3.3.3. Pufferlager für TLB und ELB (Option EG 1 c)

Definition/Kurzbeschreibung

Abfälle in TLB werden in das Eingangslager angeliefert. Dort werden sie anschließend einer Eingangskontrolle unterzogen. Die Konditionierungsanlage befindet sich auf dem Gelände des Endlagers in unmittelbarer Nachbarschaft zum Eingangslager oder auch im gleichen Gebäudekomplex. Die kontrollierten Behälter werden aus dem Eingangslager sukzessive an die Konditionierungsanlage weitergeleitet. Darüber hinaus werden im Eingangslager konditionierte hochradioaktive Abfälle in ELB bis zur Endlagerung aufbewahrt. Das Eingangslager dient primär der Verstetigung der Konditionierung, daneben auch der Pufferung der Einlagerung. Für den Fall von Störungen bei der Abfallanlieferung werden im Eingangslager so viele beladene TLB vorgehalten, dass der Betrieb der Konditionierungsanlage für einen vorher definierten Zeitraum unabhängig von der Anlieferung von TLB aufrechterhalten werden kann. Um Verzögerungen bei der Konditionierung zu puffern und den Einlagerungsbetrieb reibungslos aufrechterhalten zu können, werden auch konditionierte Endlagergebinde im Pufferlager aufbewahrt.

Technische Aspekte

Transporte: Über die Lebensdauer des Eingangslagers werden voraussichtlich etwa 1.900 TLB angeliefert werden. Im Idealfall erfolgt die Anlieferung mit der gleichen Frequenz, mit der die Abfälle anschließend in der Konditionierungsanlage in ELB verpackt werden. Diese Arbeiten orientieren sich wiederum an der Geschwindigkeit der Einlagerung ins Endlager (siehe auch Kapitel 1.2.2.).



Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung verschlossener TLB sowie konditionierter hochradioaktiver Abfälle in ELB verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten Behälter an ihren Stellplätzen möglich sein (zur Überwachung von TLB siehe Kapitel 1.2.6.1., von ELB Kapitel 2.3.3.2.). Auf die Einrichtung einer Fläche oder einer Heißen Zelle für die Reparatur beschädigter TLB kann verzichtet werden, da diese Funktion von der benachbarten Konditionierungsanlage übernommen werden kann.

Die Lebensdauer der Anlage muss, wie in den Kapiteln 2.3.3.1 und 2.3.3.2 dargestellt, etwa 70 Jahre betragen. Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene, Anforderungen ein.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal anderer Einrichtungen wie der Konditionierungsanlage oder dem Endlagerbergwerk genutzt werden. Auch die Sicherung einer zentralen Anlage gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich koordiniert für den ganzen Endlagerstandort organisiert werden.

Kapazität: Es wird von den in den Kapiteln 2.3.3.1 und 2.3.3.2 dargestellten Bedingungen ausgegangen.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Für den Fall einer Nutzung des Eingangslagers für die zusätzliche Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gelten analog die in Kapitel 2.3.3.2 dargestellten Hinweise.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement muss so ausgelegt werden, dass im günstigsten Fall nie mehr als die Anzahl der erforderlichen TLB gleichzeitig im Eingangslager aufbewahrt werden müssen. Darüber hinaus müssen die Arbeiten von Konditionierungsanlage und Einlagerungsbetrieb so aufeinander abgestimmt werden, dass der Bedarf an Kapazität zur Pufferung konditionierter ELB nicht den im Eingangslager zur Verfügung stehenden Platz überschreitet.

Ökonomische Aspekte

Die Errichtung und der Betrieb eines Pufferlagers sind, bezogen auf das Eingangslager selbst, kostengünstiger gegenüber der Errichtung eines zentralen Zwischenlagers (Optionen 2. a) bis d)). Die Kosten für Personal, Infrastruktur und Betrieb werden sich von einem zentralen Zwischenlager hingegen kaum unterscheiden.

Administrative Aspekte

Ein Pufferlager am Endlagerstandort muss seinen Betrieb vor Beginn der Konditionierung bzw. der Einlagerung ins Endlager beginnen, um seiner Funktion gerecht zu werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es als Teil der Tagesanlagen des Endlagers keine eigenständige kerntechnische Anlage darstellt. Eine eigene Genehmigung für Errichtung und Betrieb des Eingangslagers wäre in diesem Fall nicht erforderlich. Die Aufsicht über das Eingangslager kann gemeinsam mit der Aufsicht über das Endlager ausgeübt werden.

Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist gegenüber einem Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager betrieben wird, höher, siehe hierzu auch Kapitel 2.3.3.5.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Die Entscheidung, das Eingangslager als Pufferlager statt als zentrales Zwischenlager auszulegen, zwingt dazu, die Zwischenlagerung an den bestehenden Standorten zu verlängern oder eine andere Übergangslösung bis zur Inbetriebnahme des Endlagers umzusetzen. Darüber hinaus ist die Anzahl der benötigten Transporte zur Anlieferung abhängig von der Art des Zwischenlagers. Wenn TLB bis zur Anlieferung in einem zentralen Zwischenlager (siehe Kapitel 2.2.3.2) aufbewahrt werden, können sie dort für einen Transport so zusammengestellt werden, dass jede Lieferung anschließend eine optimale Beladung von ELB ermöglicht und pro Anlieferungskampagne nur ein Transport (s.o.) notwendig ist. Bei Zwischenlagerung an mehreren zentralen Standorten (siehe Kapitel 2.2.3.3) steigt u. U. die Anzahl der benötigten Transporte. Im Fall einer dezentralen Zwischenlagerung, bspw. in den bestehenden Standortzwischenlagern (siehe Kapitel 2.2.3.1), sind für die Anlieferung von TLB einer Kampagne u. U. mehrere Transporte zu erwarten.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als Pufferlager hat insofern Einfluss auf den Betrieb des Endlagers, als die Abhängigkeit von einer rechtzeitigen Anlieferung und Konditionierung der einzulagernden Abfälle zwar verringert, aber nicht vollständig aufgehoben wird. Eine längerfristige Störung bei der Anlieferung wird auch den Betrieb von Konditionierungsanlage und Endlager irgendwann zum Erliegen bringen. Die Pufferung sowohl von TLB als auch ELB verlängert jedoch die Frist, während der der Einlagerungsbetrieb ohne Anlieferung von TLB aufrechterhalten werden kann, gegenüber den Optionen EG 1 a) und EG 1 b).

Das Endlager wirkt wiederum insofern auf den Betrieb des Eingangslagers zurück, als aus der Geschwindigkeit der Einlagerung und der vorherigen Konditionierung Anforderungen an das Anlieferungsmanagement des Eingangslagers entstehen.

Konditionierungsanlage: Wechselwirkungen zwischen Eingangslager und Konditionierungsanlage bestehen insofern, als Verzögerungen bei der Konditionierung oder bei der Anlieferung von TLB vom Eingangslager gepuffert werden müssen.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die benötigte Kapazität des Pufferlagers hängt von verschiedenen Faktoren wie dem Arbeitsfortschritt der Konditionierungsanlage und deren Kapazität, dem zeitlichen Genehmigungsaufwand für Transporte zur Anlieferung, der Entfernung des oder der Zwischenlager vom Endlagerstandort etc. ab. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers im Detail beantwortet werden.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung eines Pufferlagers für TLB und ELB am Endlagerstandort ist technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Eingangslager erfüllen muss, sind bekannt und können im Wesentlichen aus der Erfahrung mit der trockenen Zwischenlagerung abgeleitet werden. Durch die gleichzeitige Pufferlagerung von ELB auf dem Gelände des Endlagers entsteht jedoch ein zusätzlicher Aufwand. Allerdings steht eine Konzeption des Eingangslagers als



Pufferlager im Widerspruch zur im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen.

Einflussfaktoren

Bezüglich der Einflussfaktoren Zeit und Politik/Gesellschaft gelten die gleichen Aspekte wie für Option EG 1 a).

2.3.3.4. Pufferung der Rückholung (Option EG 1 d)

Definition/Kurzbeschreibung

Nach dem StandAG (2017) ist die "Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers" vorzusehen. Das bedeutet, das bereits eingelagerte Endlagergebinde erforderlichenfalls wieder zurück an die Oberfläche geholt werden. Abhängig vom Grund, der zur Entscheidung zur Rückholung geführt hat, können in der Folge eine Reparatur oder Ertüchtigung einzelner oder aller Endlagergebinde, eine Umladung in neue ELB oder TLB und möglicherweise eine erneute Zwischenlagerung erforderlich sein. Eine Pufferung rückgeholter Behälter auf dem Gelände des Endlagers ist dabei in jedem Fall hilfreich. Die oben beschriebenen Optionen EG 1 a) bis c) müssen dafür um die Funktion erweitert werden, im Fall einer Rückholung rückgeholte ELB bis zu deren Weitertransport oder Behandlung aufzunehmen und so die Rückholung zu verstetigen. Im Folgenden wird nur auf notwendige Änderungen und Ergänzungen der genannten Optionen eingegangen.

Technische Aspekte

Transporte: Für eine Pufferung der Rückholung auf dem Gelände des Endlagers sind keine Transporte auf öffentlichen Straßen erforderlich.

Technische Infrastruktur: Es müssen technische Einrichtungen zur Handhabung von ELB entsprechend der Optionen EG 1 a) bis c) vorgehalten werden. Für den Fall, dass sich auf dem Gelände des Endlagers keine Konditionierungsanlage befindet (siehe auch Kapitel 2.3.3.2), ist eine Heiße Zelle zur Arbeit an ELB und u. U. TLB erforderlich.

Es ist nicht davon auszugehen, dass die Rückholung schneller vonstattengeht als die Einlagerung. Einige Einlagerungskammern werden ggf. bereits verschlossen sein und Barrierebauwerke und Versatz müssen vor der Rückholung entfernt werden, daher kann sogar von einem höheren zeitlichen Aufwand ausgegangen werden. Im Falle einer vollständigen Rückholung nach Einlagerung aller Abfälle ist deshalb mit einer Verlängerung der Betriebs- und damit auch Lebensdauer des Eingangslagers zu rechnen. Entsprechend höhere Anforderungen sind an die Auslegung der Anlage und seiner technischen Einrichtungen zu stellen. Auch muss die Möglichkeit zur Adaption des Eingangslagers an gestiegene Anforderungen für einen deutlich längeren Zeitraum erhalten bleiben und darüber hinaus in Betracht gezogen werden, die Anlage vollständig zu erneuern bzw. durch eine neue zu ersetzen. Sollten nicht abschirmende ELB zum Einsatz kommen, muss die Anlage zudem so ausgelegt werden, dass die Bestimmungen des Strahlenschutzes auch unter den Bedingungen einer Rückholung eingelagerter ELB noch eingehalten werden. Eine Abschirmung durch das Gebäude erfordert in jedem Fall aufwändige bauliche Maßnahmen wie z. B. deutlich massivere Wände aus Spezialbeton mit Abschirmelementen, Einrichtungen zur vollständigen Automatisierung der Behälterhandhabung, um die Notwendigkeit eines Aufenthalts von Personal in der direkten Umgebung der Behälter auszuschließen, und Schleusen zur Ein- und Auslagerung von ELB aus dem WERA "Oko-Institut e.V.

Eingangslager. Bei Verwendung nicht abschirmender ELB ist eine Lagerung aller Abfälle im Eingangslager nach einer Rückholung als nicht realistisch anzusehen.

Kapazität: Die für die Pufferung rückgeholter ELB erforderliche Lagerkapazität hängt entscheidend von der weiteren Planung zum Umgang mit den rückgeholten ELB bzw. Abfällen ab sowie von der Menge der zurückzuholenden ELB. In den Optionen EG 1 b) und c) sind Lagerkapazitäten für ELB grundsätzlich vorgesehen; Option EG 1 a) muss für den Fall, dass sie um die Pufferfähigkeit für den Fall der Rückholung erweitert werden soll, sinnvollerweise analog zu Option EG 1 c) ausgelegt werden.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Im Fall einer Rückholung hochradioaktiver Abfälle aus dem Endlager müssen mögliche Ursachen wie schadhafte ELB oder systematische Fehler bei der Konditionierung in Betracht gezogen werden. Eine Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle im gleichen Gebäude, das rückgeholte Abfälle aufnehmen können muss, mit dem damit einhergehenden Risiko einer gegenseitigen Beeinflussung der Abfallarten, ist daher aus sicherheitstechnischen Gründen auszuschließen.

Managementbezogene Aspekte

Zusätzlich zu den in den Kapiteln 2.3.3.1 bis 2.3.3.3 ausgeführten Aspekten erwachsen aus der Funktion der Pufferung rückgeholter ELB neue Management-Anforderungen. Im Wesentlichen muss gewährleistet werden, dass die Rückholung reibungslos und ohne Verzögerungen ablaufen kann. Reparatur, Ertüchtigung oder Weitertransport an ein Zwischenlager, an ein neues Endlager, an eine Konditionierungsanlage oder zu einem anderen Ziel, müssen so organisiert werden, dass es zu keinem Rückstau bei der Auslagerung aus dem Endlager kommt. Das beinhaltet ggf. auch das Vorhalten oder den umgehenden Beginn der Produktion von entsprechenden Behältern mit der Entscheidung zur Rückholung.

Ökonomische Aspekte

Das Eingangslager muss für eine deutlich höhere Lebensdauer ausgelegt und, zumindest gegenüber der Option EG 1 a), größer ausgelegt und technisch aufwändiger ausgestattet werden. Das verursacht zusätzliche Kosten in beträchtlicher Höhe.

Administrative Aspekte

Mit der Entscheidung zur Rückholung, insbesondere, wenn mehrere oder alle ELB davon betroffen sind, muss eine Entscheidung über den weiteren Verbleib der ELB bzw. Abfälle verbunden sein. Handelt es sich um eine begrenzte Rückholung zur Reparatur oder Ertüchtigung einzelner Behälter, ist der Umgang mit ihnen nur mit geringem Aufwand verbunden. Im Falle einer vollständigen Rückholung müssen beispielsweise Genehmigungen für den Bau neuer Zwischenlager, Konditionierungsanlagen oder anderer Einrichtungen zur Behandlung der Abfälle zeitnah erteilt werden, um einen reibungslosen Ablauf der Rückholung zu ermöglichen. Sollen die Abfälle transportiert werden, müssen die ELB u. U. für den Transport qualifiziert oder in Transferbehälter o. ä. verladen werden. Diese Transferbehälter müssen ebenfalls entwickelt, produziert und genehmigt werden, so sie noch nicht bereitstehen. Darüber hinaus ist für den Umgang mit rückgeholten Behältern, insbesondere, wenn sie schon mehrere Jahrzehnte eingelagert waren und es sich um nicht abschirmende Behälter handelt, mit erhöhten Anforderungen an den Strahlenschutz und die Aufsicht zu rechnen.



Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Für den Fall einer Rückholung, selbst einer vollständigen Rückholung nach Einlagerung aller Abfälle, ist nicht damit zu rechnen, dass die bestehenden Zwischenlager erneut als Lagerorte für die hochradioaktiven Abfälle genutzt werden. Sollten sie zum Zeitpunkt der Rückholung noch nicht zurückgebaut sein, ist dennoch davon auszugehen, dass die Lebensdauer der Zwischenlager zu diesem Zeitpunkt schon deutlich überschritten sein wird und eine erneute Zwischenlagerung in diesen Anlagen nicht genehmigungsfähig ist. Insofern sind keine Wechselwirkungen zwischen den bestehenden Zwischenlagern und dem Rückholungs-Pufferlager zu erwarten. Anders verhält es sich mit möglichen zentralen Zwischenlagern, die für die verlängerte Zwischenlagerung neu gebaut werden und dabei auch für die Aufnahme rückgeholter Behälter ausgelegt werden könnten.

Endlager: Das Sicherheitskonzept und die Auslegung haben Auswirkungen auf die Geschwindigkeit einer Rückholung und damit mittelbar auf die benötigte Kapazität des Eingangslagers.

Konditionierungsanlage: Im Falle einer Planung des Eingangslagers als Pufferlager auch für die Rückholung birgt eine Konditionierungsanlage am Standort eine Reihe von Vorteilen. Sie ermöglicht sowohl die Reparatur einzelner ELB als auch die Umladung weniger oder aller Abfälle in neue ELB oder TLB.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Wesentliche Informationen zur anforderungsgerechten Auslegung eines Pufferlagers für die Rückholung eingelagerter Abfälle hängen von der Ursache und den weiteren Umständen ab, die zur Rückholungsentscheidung führen. Diese Umstände werden bei Errichtung des Eingangslagers nicht bekannt sein. Es handelt sich demnach auch bei der Entscheidung über Auslegung und Bau des Eingangslagers um eine Entscheidung, die unter einem hohen Maß an Ungewissheit getroffen wird.

Plausibilität der realen Umsetzung

Da die Möglichkeit zur Rückholung eingelagerter hochradioaktiver Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers vorzusehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch eine Möglichkeit zur Aufnahme rückgeholter Abfallgebinde am Endlagerstandort vorgesehen wird. Es liegt nahe, das Eingangslager für diesen Zweck zu nutzen.

Einflussfaktoren

Zeit: Die o.g. Ungewissheiten führen dazu, dass Zeit einen entscheidenden Einfluss haben wird, sollten tatsächlich eingelagerte ELB zurückgeholt werden müssen. Vor diesem Hintergrund kann es sinnvoll sein, das Pufferlager größer auszulegen, als für die Einlagerung benötigt, um im Fall einer Rückholung wertvolle Zeit für die Schaffung einer neuen Entsorgungs- oder zumindest Zwischenlagerlösung zu gewinnen.

Politik/Gesellschaft: Im Unterschied zu den Optionen EG 1 a) bis c) kann die Auslegung des Eingangslagers zur Aufnahme rückgeholter Abfälle die Akzeptanz bei der Standortbevölkerung negativ beeinflussen. Eine solche Entscheidung wird möglicherweise nicht als vorsorgende Maßnahme rezipiert werden, sondern als ein Anzeichen fehleranfälliger Planung des Endlagers. Daraus ergeben sich höhere Anforderungen an die Kommunikation von Betreiber und Aufsichtsbehörde, aber auch der Politik.

2.3.3.5. Zentrales Zwischenlager für TLB (Option EG 2 a)

Definition/Kurzbeschreibung

Alle hochradioaktiven Abfälle werden in TLB in das Eingangslager angeliefert. Dort werden sie anschließend einer Eingangskontrolle unterzogen. Die Konditionierungsanlage befindet sich auf dem Gelände des Endlagers in unmittelbarer Nachbarschaft zum Eingangslager oder auch im gleichen Gebäudekomplex. Die hochradioaktiven Abfälle werden im Eingangslager zwischengelagert, bis das Endlager errichtet ist.

Rechtzeitig vor Beginn des Einlagerungsbetriebs wird mit der Weiterleitung der TLB an die Konditionierungsanlage begonnen. Durch die Errichtung des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager am Endlagerstandort können die bestehenden Zwischenlager entlastet und nach ihrer Leerung stillgelegt und zurückgebaut werden, soweit sie nicht mehr zur Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle benötigt werden (Beispiel Zwischenlager Ahaus).

Technische Aspekte

Transporte: Es werden voraussichtlich etwa 1.900 TLB aus den bestehenden Zwischenlagern an das Eingangslager geliefert werden. Nach Fertigstellung hängt die Geschwindigkeit, mit der Abfälle angeliefert werden, davon ab, wie schnell die Transportgenehmigungen für die einzelnen Transporte aus den verschiedenen Zwischenlagern erteilt werden, wie schnell die Transporte durchgeführt werden und die TLB angenommen werden können, d. h. von der Dauer der Eingangskontrolle und anschließenden Verbringung der TLB an ihren jeweiligen Stellplatz.

Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung verschlossener TLB verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten Behälter an ihren Stellplätzen möglich sein. Dazu gehören die Überwachung der Behälterdichtungen mittels Druckschalter sowie die radiologische Überwachung der Umgebungsluft im Eingangslager, der Abluft und der Umgebung am Anlagenzaun des Eingangslagers bzw. des Endlagergeländes. Auf die Einrichtung einer Fläche oder einer Heißen Zelle für die Reparatur beschädigter TLB kann verzichtet werden, da diese Funktion von der benachbarten Konditionierungsanlage übernommen werden kann.

Die Lebensdauer der Anlage richtet sich nach der Dauer von der Annahme des ersten TLB bis zur Konditionierung des letzten TBL. Dafür ist die Dauer des Einlagerungsbetriebes maßgeblich (siehe dazu auch Kapitel 1.2.2). Analog zu Option EG 1 a) sind dafür bis zu 100 Jahre zu veranschlagen. Unter der Annahme, dass die Inbetriebnahme des Endlagers 20 Jahre nach der Standortentscheidung erfolgen kann (ESK 2015a) ergibt sich eine erforderliche Lebensdauer von bis zu 120 Jahren. Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene Anforderungen ein. Analog zu Option EG 1 a) sind dafür ca. 70 Jahre zu veranschlagen. Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene Anforderungen ein.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal anderer Einrichtungen wie dem der Konditionierungsanlage oder dem des Endlagerbergwerks genutzt werden. Auch die Sicherung einer zentralen Anlage



gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich koordiniert für den ganzen Endlagerstandort organisiert werden.

Kapazität: Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager alle hochradioaktiven Abfälle aus den bestehenden Zwischenlagern aufnimmt, muss für etwa 1.900 TLB ausgelegt sein. Zum tatsächlichen Flächenbedarf für eine Anlage dieser Größe kann im Rahmen dieses Projektes keine zuverlässige Angabe gemacht werden. Die Menge der einzulagernden TLB entspricht etwa der fünffachen Kapazität der zentralen Zwischenlager Ahaus oder Gorleben. Eine einfache Multiplikation der Lagerfläche führte zu einem Flächenbedarf von 25.000 m². Dabei wird jedoch vernachlässigt, dass für ein Eingangslager dieser Größe höhere Anforderungen an die Statik zu stellen sind, eine längere Lebensdauer eine massivere Bauweise erfordern kann, um genehmigungsfähig zu sein, die Dosisleistung von 1.900 beladenen TLB eine sehr viel stärkere Abschirmung des Lagers gegenüber der Umgebung erfordert, dazu u. U. größere Abstände zwischen den Behälterstellplätzen und kleinere Hallenschiffe oder mehrere geeignet verbundene Gebäude erforderlich sind etc.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Für eine gemeinsame Nutzung des Eingangslagers zur Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle gilt die Darstellung in Kapitel 2.3.3.1 analog. Wie oben dargestellt, handelt es sich bei einem zentralen Zwischenlager um eine im Vergleich zu bestehenden Zwischenlagern sehr große Anlage. Sollten sämtliche für ein Endlager vorgesehenen schwach- und mittelradioaktiven Abfälle am Standort im Sinne eines zentralen Zwischenlagers konzentriert werden, müsste die Kapazität des Lagergebäudes noch einmal erheblich vergrößert werden.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement muss so ausgelegt werden, dass die Zwischenlager abhängig vom Ende ihrer jeweiligen Genehmigungsdauer geleert werden. Auf diese Weise kann eine geordnete Beendigung der dezentralen Zwischenlagerung erreicht werden, ohne dass Genehmigungen erlöschen, während sich noch hochradioaktive Abfälle in den Lagern befinden. Entsprechend wären zunächst die zentralen Zwischenlager Gorleben (genehmigt bis 2034) und Ahaus (genehmigt bis 2036) zu leeren, gefolgt von Lubmin (2039), Lingen (2042), Biblis, Grafenrheinfeld, Grohnde, Gundremmingen, Krümmel und Neckarwestheim (2046) und schließlich Brokdorf, Isar, Philippsburg und Unterweser (2047). Dabei sind die Zwischenlager in Jülich und Brunsbüttel, die derzeit nicht über eine Genehmigung zur Zwischenlagerung verfügen, noch nicht berücksichtigt.

Selbst unter der Annahme, dass eine Genehmigung zur Errichtung eines Eingangslagers zeitgleich mit der Standortentscheidung erteilt wird, ist die Errichtung, Inbetriebnahme und anschließende Annahme samt vorausgehendem Transport aller 113 TLB aus dem Zwischenlager Gorleben innerhalb von nur drei Jahren ein sehr ambitioniertes Ziel. Vor diesem Hintergrund ist möglicherweise die Umsetzung einer Zwischenlager-Option, die zumindest für die in den ältesten Zwischenlagern aufbewahrten TLB eine alternative Lösung wie beispielsweise die Neugenehmigung der Zwischenlager oder den Neubau eines oder mehrerer Zwischenlager vorsieht, eine realistische Vorstufe.

Bei der Einlagerung der TLB in das Eingangslager muss die spätere Weiterleitung an die Konditionierungsanlage bereits berücksichtigt werden. Die TLB müssen so zugänglich sein, dass mit jeder Charge, die ausgelagert wird, eine optimale Konfiguration des Abfallinventars in den ELB möglich ist. Das Einlagerungsmanagement wird also vom Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers bestimmt. Diese Anforderung muss mit zunehmender Füllung des Eingangslagers auch beim Anlieferungsmanagement stärker berücksichtigt werden.

Ökonomische Aspekte

Aufgrund der langen Lebensdauer und deutlich größeren Kapazität gegenüber einem Pufferlager ist für ein als zentrales Zwischenlager ausgelegtes Eingangslager von um ein Vielfaches höheren Baukosten auszugehen als für ein Pufferlager. Auch für den Unterhalt der Anlage und notwendige Anpassungen an den weiterentwickelten Stand von Wissenschaft und Technik ist ein höherer Aufwand zu erwarten. Die Kosten für Personal, Infrastruktur und Betrieb werden sich von einem Pufferlager hingegen kaum unterscheiden.

Administrative Aspekte

Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager ausgeführt ist, wird aller Voraussicht nach (s.o.) direkt nach der Entscheidung über den Endlagerstandort errichtet werden müssen, um die bestehenden Zwischenlager zu entlasten. Das Genehmigungsverfahren muss entsprechend gut vorbereitet und so zügig, wie unter Einhaltung des Regelwerks möglich, durchgeführt werden. Gleiches gilt für die anschließende Betriebsgenehmigung und die Transportgenehmigungen. Da nach der Standortentscheidung für Errichtung und Betrieb des Endlagers ein deutlich längerer Zeitbedarf zu veranschlagen ist als für die Errichtung des Eingangslagers, auch für die Durchführung der Genehmigungsverfahren, wird das Eingangslager als eigenständige kerntechnische Anlage genehmigt werden müssen.

Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist gegenüber einem Eingangslager, das als Pufferlager betrieben wird, niedriger. Zwar müssen in jedem Fall alle TLB zum Eingangslager transportiert werden, aber da der Lagerraum im Eingangslager für das gesamte Abfallinventar der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik konzipiert ist, kann pro Transport jeweils die technisch maximal mögliche Anzahl von TLB angeliefert werden.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Wird das Eingangslager als zentrales Zwischenlager ausgelegt, können die bestehenden Standortzwischenlager sukzessive geleert und anschließend stillgelegt werden.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager ermöglicht im Zusammenspiel mit der Konditionierungsanlage einen kontinuierlichen Einlagerungsbetrieb. Die Anforderungen, die durch das Sicherheitskonzept des Endlagers an die Konditionierung der ELB gestellt werden (Temperatur, radiologisches Inventar), beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers.

Konditionierungsanlage: Die Anforderungen an die Konditionierung der ELB beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers. Diese Einflüsse hängen jedoch nur mittelbar mit der Konditionierungsanlage zusammen, eher sind sie im Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers begründet (s. o.).

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die tatsächlich erforderliche Lebensdauer des Eingangslagers hängt im Wesentlichen vom Endlagerkonzept und dem Fortschritt der Endlagerung selbst ab. Sie kann kürzer als oben veranschlagt ausfallen, aber auch länger, wenn höhere Sicherheitsmargen für den Fall von Verzögerungen, Rückschritten etc. bei Errichtung und Betrieb des Lagers berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der



damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers im Detail beantwortet werden.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung der dargestellten Option ist technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Eingangslager erfüllen muss, sind bekannt und können im Wesentlichen aus der Erfahrung mit der trockenen Zwischenlagerung abgeleitet werden. Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager steht im Einklang mit der im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen. Die Errichtung eines Zwischenlagers für 1.900 TLB mit hochradioaktiven Abfällen wird allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Widerstand der Bevölkerung am Endlagerstandort stoßen.

Einflussfaktoren

Zeit: Die Zeit, die nach der Standortentscheidung zur Planung und Errichtung des Eingangslagers zur Verfügung steht, ist äußerst knapp, soll damit die Leerung der bestehenden Zwischenlager vor Erlöschen der jeweiligen Genehmigung ermöglicht werden (s. o.). Die lange Lebensdauer des Eingangslagers erfordert ein intensives Alterungsmanagement der Anlage.

Politik/Gesellschaft: Die Errichtung einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel mit Widerstand der betroffenen Standortbevölkerung verbunden. Für ein zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland ist mit sehr wenig Akzeptanz zu rechnen. Da das Eingangslager darüber hinaus voraussichtlich die erste Anlage sein wird, die am Endlagerstandort errichtet wird, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Bereitschaft zur Übernahme der gesellschaftlichen Last der Endlagerung in der Standortbevölkerung davon weiter beeinträchtigt wird.

2.3.3.6. Zentrales Zwischenlager für ELB (Option EG 2 b)

Definition/Kurzbeschreibung

Die Konditionierung erfolgt auf dem Gelände des Endlagers oder in einer oder mehreren Konditionierungsanlagen, die unabhängig vom Endlagerstandort errichtet werden. Konditionierte hochradioaktive Abfälle in ELB werden in das Eingangslager angeliefert. Dort werden die ELB einer Eingangskontrolle unterzogen. Die hochradioaktiven Abfälle werden bis zu ihrer Einlagerung in das Endlager im Eingangslager zwischengelagert. Die Zwischenlagerung fertig konditionierter ELB im Eingangslager ist nur sinnvoll, wenn die Option der verlängerten Zwischenlagerung in den bestehenden TLB nicht mehr zur Verfügung steht.

Bei Aufnahme des Einlagerungsbetriebes werden die Endlagergebinde aus dem Eingangslager sukzessive zur Einlagerung an den Einlagerungsschacht oder die Rampeneinfahrt der Zugangsrampe weitergeleitet. Das Eingangslager dient der Entlastung der bestehenden Zwischenlager sowie der Verstetigung der Einlagerung.

Der Fall, dass das Sicherheitskonzept des Endlagers die Einlagerung in nicht abschirmenden ELB vorsieht, wird in der dargestellten Option nicht betrachtet. Es müssten in diesem Fall für den Transport von Zwischenlager oder Konditionierungsanlage zum Eingangslager sowie für den Transport auf dem Gelände des Endlagerstandorts und nach Untertage bis zum Lagerort Transporteinrichtungen, Transferbehälter o. ä. verwendet werden, die die ionisierende Strahlung an der Außenseite des ELB abschirmen. Angesichts der zu erwartenden Anzahl an ELB und der daraus resultierenden WERA "Öko-Institut e.V.

Transporte wird ein solches Vorgehen sowohl unter sicherheitstechnischen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten als unrealistisch eingeschätzt.

Technische Aspekte

Transporte: Abhängig vom umgesetzten Endlagerkonzept kann von einer Anlieferung von bis zu etwa 20.000 ELB an das Eingangslager ausgegangen werden (siehe unten).

Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung konditionierter Endlagergebinde verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten ELB an ihren Stellplätzen möglich sein. Technische Möglichkeiten zur Überwachung von ELB und Abfallinventar sind bisher nicht entwickelt. Sie sind abhängig von der Entscheidung über das Sicherheitskonzept für ein Endlager und darauf aufbauend der Entwicklung eines Endlagerbehälters. Ausgehend von der Annahme, dass aus Gründen der Langzeitsicherheit, der Handhabbarkeit über und unter Tage und des betrieblichen Strahlenschutzes die ELB nach der Beladung dauerhaft verschlossen werden, kann von einer Möglichkeit zur Überwachung des Behälterinneren nach heutigem Wissensstand nicht ausgegangen werden. Möglich sind in jedem Fall die Überwachung der Temperatur an der Behälteroberfläche mit Temperatursensoren und die radiologische Überwachung am Behälter, der Umgebungsluft im Eingangslager, der Abluft und der Umgebung am Anlagenzaun des Eingangslagers bzw. des Endlagergeländes.

Sollte sich die Konditionierungsanlage nicht auf dem Endlagergelände befinden, muss im Eingangslager eine Heiße Zelle für die Reparatur beschädigter ELB vorgesehen werden. Für den Fall, dass ein ELB bei der Eingangskontrolle als beschädigt erkannt wird, wird ein Transport zu einer Konditionierungsanlage u. U. nicht genehmigungsfähig sein. Der Behälter bzw. das Endlagergebinde müssen demnach vor Ort zu reparieren oder nachzuqualifizieren sein. Auch ein Umladen des Behälterinventars in einen neuen ELB und dessen qualifizierter Verschluss müssen vorgesehen werden. Alternativ ist die Entwicklung einer hermetisch schließenden und abschirmenden Transportvorrichtung denkbar, die den Transport beschädigter ELB zu einer Konditionierungsanlage ermöglicht.

Die Lebensdauer der Anlage richtet sich nach der Dauer der Zwischenlagerung von der Annahme des ersten ELB bis zum Ende des Einlagerungsbetriebes. Für die Betriebsdauer muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene Anforderungen ein.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden – wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal – können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal anderer Einrichtungen wie dem der Konditionierungsanlage oder dem des Endlagerbergwerks genutzt werden. Auch die Sicherung einer zentralen Anlage gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich für den ganzen Endlagerstandort koordiniert organisiert werden.

Kapazität: Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager alle hochradioaktiven Abfälle aus den bestehenden Zwischenlagern aufnimmt, muss für bis zu etwa 20.000 ELB ausgelegt sein (siehe auch Kapitel 1.2.2). Zum tatsächlichen Flächenbedarf für eine Anlage dieser Größe kann im Rahmen dieses Projektes keine zuverlässige Angabe gemacht werden. Abhängig von der Bauart und Beladung der ELB, d. h. Außenmaße der Behälter, Dosisleistung, Temperatur, Masse, Vorrichtungen zur Handhabung etc., variiert der zur Zwischenlagerung benötigte Platz. Diese Parameter werden wiederum durch das gewählte Sicherheitskonzept und die Auslegung des Endlagers bestimmt.



Darüber hinaus sind für ein Eingangslager dieser Größe höhere Anforderungen an die Statik zu stellen, eine längere Lebensdauer kann eine massivere Bauweise erfordern, um genehmigungsfähig zu sein, die Dosisleistung von knapp 20.000 beladenen ELB erfordert eine sehr viel stärkere Abschirmung gegenüber der Umgebung als die Lagerung von TLB in den bestehenden Zwischenlagern, dazu sind u. U. größere Abstände zwischen den Behälterstellplätzen und kleinere Hallenschiffe erforderlich etc.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Es gelten analog die in den Kapiteln 2.3.3.2 und 2.3.3.5 dargestellten Gesichtspunkte. Die benötigte Kapazität für ein gemeinsames Eingangslager wäre gegenüber der Option 2 a) noch einmal deutlich erhöht.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement richtet sich im Wesentlichen nach dem Fortschritt der Konditionierung. Unabhängig vom Standort der Konditionierungsanlage oder -anlagen muss deren Betrieb wiederum so ausgelegt werden, dass die Zwischenlager abhängig vom Ende ihrer jeweiligen Genehmigungsdauer geleert werden können. Auf diese Weise könnte eine geordnete Beendigung der dezentralen Zwischenlagerung erreicht werden, ohne dass Genehmigungen erlöschen, während sich noch hochradioaktive Abfälle in den Lagern befinden (siehe hierzu auch Kapitel 2.3.3.5.). Unter der Annahme einer Standortentscheidung im Jahr 2031 und vor dem Hintergrund der notwendigen Konditionierung vor der Anlieferung in das Eingangslager ist dieses Ziel jedoch realistisch nicht zu erreichen.

Bei der Einlagerung der ELB in das Zwischenlager muss deren spätere Weiterleitung an das Endlager bereits berücksichtigt werden. Die Behälter müssen so zugänglich sein, dass mit jeder Charge, die ausgelagert wird, eine passende Konfiguration des Abfallinventars zur Befüllung der Einlagerungsstrecken oder -kammern möglich ist. Das Einlagerungsmanagement wird also vom Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers bestimmt. Diese Anforderung muss mit zunehmender Füllung des Eingangslagers auch beim Anlieferungsmanagement stärker berücksichtigt werden.

Ökonomische Aspekte

Aufgrund der längeren Lebensdauer und deutlich größeren Kapazität gegenüber einem Pufferlager ist für ein zentrales Zwischenlager von um ein vielfaches höheren Baukosten auszugehen als für ein Pufferlager. Auch für den Unterhalt der Anlage und notwendige Anpassungen an den weiterentwickelten Stand von Wissenschaft und Technik ist ein höherer Aufwand zu erwarten. Die Kosten für Personal, Infrastruktur und Betrieb werden sich von einem Pufferlager hingegen kaum unterscheiden.

Administrative Aspekte

Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager ausgeführt ist, wird aller Voraussicht nach (s.o.) direkt nach der Entscheidung über den Endlagerstandort errichtet werden müssen, um die bestehenden Zwischenlager zu entlasten. Das Genehmigungsverfahren muss entsprechend gut vorbereitet und so zügig, wie unter Einhaltung des Regelwerks möglich, durchgeführt werden. Gleiches gilt für die anschließende Betriebsgenehmigung. Da nach der Standortentscheidung für Errichtung und Betrieb des Endlagers ein deutlich längerer Zeitbedarf als für die Errichtung des Eingangslagers zu veranschlagen ist, auch für die Durchführung der Genehmigungsverfahren, wird das Eingangslager als eigenständige kerntechnische Anlage genehmigt werden müssen.

Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist gegenüber einem Eingangslager, das als Pufferlager für ELB betrieben wird, niedriger. Zwar müssen in jedem Fall alle ELB zum Eingangslager transportiert werden, aber da der Lagerraum im Eingangslager für das gesamte Abfallinventar der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik konzipiert ist, kann pro Transport jeweils die technisch maximal mögliche Anzahl von ELB angeliefert werden. Befindet sich die Konditionierungsanlage auf dem Gelände des Endlagerstandorts, werden die Abfälle aus den bestehenden Zwischenlagern in TLB dorthin angeliefert werden. Ein Transport von ELB über öffentliche Straßen ist dann nicht notwendig.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Wird das Eingangslager als zentrales Zwischenlager ausgelegt, können die bestehenden Standortzwischenlager sukzessive geleert und anschließend stillgelegt werden.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager für ELB ermöglicht einen verzögerungsfreien Ablauf der Einlagerung. Die Anforderungen, die durch das Sicherheitskonzept und die Auslegung des Endlagers an die Konstruktion und Beladung der ELB sowie an die Befüllung von Einlagerungsstrecken oder -kammern gestellt werden (z. B. Temperatur, radiologisches Inventar) beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers.

Konditionierungsanlage: Das Eingangslager muss bei Betriebsbeginn der Konditionierungsanlage ebenfalls betriebsbereit sein. Die Anforderungen an die Konditionierung der ELB beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers. Diese Einflüsse hängen jedoch nur mittelbar mit der Konditionierungsanlage zusammen, eher liegen sie im Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers begründet (s. o.).

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die tatsächlich erforderliche Lebensdauer des Eingangslagers hängt im Wesentlichen vom Endlagerkonzept und dem Fortschritt der Endlagerung selbst ab. Sie kann kürzer oder länger ausfallen, wenn höhere Sicherheitsmargen für den Fall von Verzögerungen, Rückschritten etc. bei Errichtung und Betrieb des Lagers berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers im Detail beantwortet werden.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung der dargestellten Option ist technisch realisierbar. Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager steht im Einklang mit der im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen. Sie setzt jedoch voraus, dass, sofern die Konditionierung nicht auf dem Gelände des Endlagers erfolgt, eine oder mehrere Konditionierungsanlagen an einem oder mehreren Standorten, möglicherweise Zwischenlagerstandorten, errichtet werden, in denen Abfälle aus den Zwischenlagern vor der Anlieferung an das Eingangslager konditioniert werden. Darüber hinaus müssten in diesem Fall die ELB so ausgelegt sein, dass sie eine Transportgenehmigung erhalten können. Alternativ könnte die Konditionierung am Endlagerstandort vor der Annahme der Abfälle in das Eingangslager erfolgen.

Die Konditionierung vor dem Transport an ein zentrales Zwischenlager wird als wenig wahrscheinliche Möglichkeit eingeschätzt.



Einflussfaktoren

Zeit: Die Zeit, die nach der Standortentscheidung zur Planung und Errichtung des Eingangslager zur Verfügung steht, ist knapp, wenn damit die Leerung der bestehenden Zwischenlager vor Erlöschen der jeweiligen Genehmigung ermöglicht werden soll (s. o.). Unter Berücksichtigung der notwendigen Konditionierungsarbeiten kann eine rechtzeitige Leerung der Zwischenlager als nicht realisierbar angesehen werden.

Politik/Gesellschaft: Die Errichtung einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel mit Widerstand der betroffenen Standortbevölkerung verbunden. Für ein zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland ist mit sehr wenig Akzeptanz zu rechnen. Da das Eingangslager darüber hinaus voraussichtlich die erste Anlage sein wird, die am Endlagerstandort errichtet wird, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Bereitschaft zur Übernahme der gesellschaftlichen Last der Endlagerung in der Standortbevölkerung davon weiter beeinträchtigt wird.

2.3.3.7. Zentrales Zwischenlager für TLB und Pufferung von ELB (Option EG 2 c)

Definition/Kurzbeschreibung

Alle hochradioaktiven Abfälle werden in TLB in das Eingangslager angeliefert. Dort werden sie anschließend einer Eingangskontrolle unterzogen. Die Konditionierungsanlage befindet sich auf dem Gelände des Endlagers in unmittelbarer Nachbarschaft zum Eingangslager oder auch im gleichen Gebäudekomplex. Die hochradioaktiven Abfälle werden im Eingangslager bis zu ihrer Konditionierung und anschließenden Endlagerung zwischengelagert. Darüber hinaus wird von Beginn der Einlagerung an eine definierte Anzahl konditionierter Endlagergebinde im Eingangslager vorgehalten, um den Einlagerungsbetrieb für den Fall von Verzögerungen bei der Konditionierung aufrechterhalten zu können. Durch die Errichtung des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager am Endlagerstandort können die bestehenden Zwischenlager entlastet und nach ihrer Leerung stillgelegt und zurückgebaut werden, soweit sie nicht mehr zur Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle benötigt werden.

Technische Aspekte

Technische Infrastruktur: Das Eingangslager muss über Anlagen zur Handhabung verschlossener TLB und ELB verfügen. Darüber hinaus muss die Überwachung der gelagerten Behälter an ihren Stellplätzen möglich sein. Dazu gehören die Überwachung der Behälterdichtungen mittels Druckschalter sowie die radiologische Überwachung der Umgebungsluft im Eingangslager, der Abluft und der Umgebung am Anlagenzaun des Eingangslagers bzw. des Endlagergeländes.

Technische Möglichkeiten zur Überwachung von ELB und Abfallinventar sind bisher nicht entwickelt. Sie sind abhängig von der Entscheidung über das Sicherheitskonzept für ein Endlager und darauf aufbauend der Entwicklung eines Endlagerbehälters. Ausgehend von der Annahme, dass aus Gründen der Langzeitsicherheit, der Handhabbarkeit über und unter Tage und des betrieblichen Strahlenschutzes die ELB nach der Beladung dauerhaft verschlossen werden, kann von einer Möglichkeit zur Überwachung des Behälterinneren nach heutigem Wissensstand nicht ausgegangen werden. Möglich sind in jedem Fall die Überwachung der Temperatur an der Behälteroberfläche mit Temperatursensoren und die radiologische Überwachung am Behälter. Auf die Einrichtung einer Fläche oder einer Heißen Zelle für die Reparatur beschädigter TLB und ELB kann verzichtet werden, da diese Funktion von der benachbarten Konditionierungsanlage übernommen werden kann.

Die Lebensdauer der Anlage richtet sich nach der Dauer der Zwischenlagerung von der Annahme des ersten TLB bis zum Ende des Einlagerungsbetriebes. Unter der Annahme, dass die Inbetriebnahme des Endlagers 20 Jahre nach der Standortentscheidung erfolgen kann (ESK 2015a), ergibt sich eine erforderliche Lebensdauer von ca. 70 Jahren (siehe auch Kapitel 1.2.2). Für diesen Zeitraum muss die Übernahme der unter 2.3.2 genannten Anforderungen und Funktionen durch die Anlage gewährleistet sein. Das schließt die Möglichkeit zur Erweiterung und Adaption an geänderte, insbesondere an gestiegene Anforderungen ein.

Anlagenteile, die analog zum Zwischenlager auch in einem Eingangslager benötigt werden wie eine Werkstatt, Feuerwehrgebäude oder Räume für das Personal können auf dem Gelände des Endlagers u. U. gemeinsam mit dem Personal anderer Einrichtungen wie dem der Konditionierungsanlage oder dem des Endlagerbergwerks genutzt werden. Auch die Sicherung einer zentralen Anlage gegen unbefugtes Eindringen wird mutmaßlich koordiniert für den ganzen Endlagerstandort organisiert werden.

Transporte: Es werden etwa 1.900 TLB aus den bestehenden Zwischenlagern an das Eingangslager geliefert werden.

Kapazität: Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager alle hochradioaktiven Abfälle aus den bestehenden Zwischenlagern aufnimmt, muss für etwa 1.900 TLB ausgelegt sein. Zum Vergleich mit den bestehenden Zwischenlagern siehe Kapitel 2.2.. Zum tatsächlichen Flächenbedarf für eine Anlage dieser Größe kann im Rahmen dieses Projektes keine zuverlässige Angabe gemacht werden. Die Menge der einzulagernden TLB entspricht etwa der fünffachen Kapazität der zentralen Zwischenlager Ahaus und Gorleben. Eine einfache Multiplikation der Lagerfläche führte zu einem Flächenbedarf von 25.000 m². Dabei wird jedoch vernachlässigt, dass für ein Eingangslager dieser Größe höhere Anforderungen an die Statik zu stellen sind, eine längere Lebensdauer eine massivere Bauweise erfordern kann, um genehmigungsfähig zu sein, die Dosisleistung von 1.900 beladenen TLB eine sehr viel stärkere Abschirmung des Lagers gegenüber der Umgebung erfordert, dazu u. U. größere Abstände zwischen den Behälterstellplätzen und kleinere Hallenschiffe erforderlich sind etc. Darüber hinaus müssen Stellplätze zur Pufferlagerung der konditionierten ELB vorgesehen werden. Zur erforderlichen Kapazität zur Aufrechterhaltung des Einlagerungsbetriebes im Fall von Verzögerungen bei der Konditionierung siehe auch Kapitel 2.3.3.3.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Es gelten die für die Optionen 2 a) und 2 b) dargestellten Gesichtspunkte.

Managementbezogene Aspekte

Das Anlieferungsmanagement muss so ausgelegt werden, dass die Zwischenlager abhängig vom Ende ihrer jeweiligen Genehmigungsdauer geleert werden. Auf diese Weise kann eine geordnete Beendigung der dezentralen Zwischenlagerung erreicht werden, ohne dass Genehmigungen erlöschen, während sich noch hochradioaktive Abfälle in den Lagern befinden. Siehe hierzu auch Kapitel 2.3.3.5.

Bei der Einlagerung der TLB in das Zwischenlager muss die spätere Weiterleitung an die Konditionierungsanlage bereits berücksichtigt werden. Die TLB müssen so zugänglich sein, dass mit jeder Charge, die ausgelagert wird, eine optimale Konfiguration des Abfallinventars in den ELB möglich ist. Das Einlagerungsmanagement wird also vom Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers bestimmt. Diese Anforderung muss berücksichtigt werden.



Die Pufferlagerung von ELB dient der Überbrückung eines nicht vorhersehbaren Ereignisses (siehe auch Kapitel 2.3.3.2).

Ökonomische Aspekte

Aufgrund der längeren Lebensdauer und deutlich größeren Kapazität gegenüber einem Pufferlager ist für ein zentrales Zwischenlager von um ein vielfaches höheren Baukosten auszugehen als für ein Pufferlager. Auch für den Unterhalt des Gebäudes und notwendige Anpassungen an den weiterentwickelten Stand von Wissenschaft und Technik ist ein höherer Aufwand zu erwarten. Die Kosten für Personal, Infrastruktur und Betrieb werden sich von einem Pufferlager hingegen kaum unterscheiden.

Administrative Aspekte

Ein Eingangslager, das als zentrales Zwischenlager ausgeführt ist, wird aller Voraussicht nach (s.o.) direkt nach der Entscheidung über den Endlagerstandort errichtet werden müssen, um die bestehenden Zwischenlager zu entlasten. Das Genehmigungsverfahren muss entsprechend gut vorbereitet und so zügig, wie unter Einhaltung des Regelwerks möglich, durchgeführt werden. Gleiches gilt für die anschließende Betriebsgenehmigung. Da nach der Standortentscheidung für Errichtung und Betrieb des Endlagers ein deutlich längerer Zeitbedarf zu veranschlagen ist, auch für die Durchführung der Genehmigungsverfahren, wird das Eingangslager als eigenständige kerntechnische Anlage genehmigt werden müssen.

Die Anzahl der Transporte und damit der benötigten Transportgenehmigungen ist gegenüber einem Eingangslager, das als Pufferlager betrieben wird, niedriger. Zwar müssen in jedem Fall alle TLB zum Eingangslager transportiert werden, aber da der Lagerraum im Eingangslager für das gesamte Abfallinventar der hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik konzipiert ist, kann pro Transport jeweils die technisch maximal mögliche Anzahl von TLB angeliefert werden.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Wird das Eingangslager als zentrales Zwischenlager ausgelegt, können die bestehenden Standortzwischenlager sukzessive geleert und anschließend stillgelegt werden.

Endlager: Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager und Pufferlager für ELB ermöglicht im Zusammenspiel mit der Konditionierungsanlage einen verzögerungsfreien Ablauf der Einlagerung. Die Anforderungen, die durch das Sicherheitskonzept und die Auslegung des Endlagers an die Konstruktion und Beladung der ELB sowie an die Befüllung von Einlagerungsstrecken oder -kammern gestellt werden (z. B. Temperatur, radiologisches Inventar), beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers. Das gilt auch für die im Pufferlager vorzuhaltenden ELB.

Konditionierungsanlage: Die Anforderungen an die Konditionierung der ELB beeinflussen das Einlagerungs- und Auslagerungsmanagement des Eingangslagers. Diese Einflüsse hängen jedoch nur mittelbar mit der Konditionierungsanlage zusammen, eher liegen sie im Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers begründet (s. o.).

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die tatsächlich erforderliche Lebensdauer des Eingangslagers hängt im Wesentlichen vom Endlagerkonzept und dem Fortschritt der Endlagerung selbst ab. Sie kann kürzer als oben veranschlagt ausfallen, aber auch länger, wenn höhere Sicherheitsmargen für den Fall von Verzögerungen, Rückschritten etc. bei Errichtung und Betrieb des Lagers berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Fragen erst mit dem weiteren Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der damit einhergehenden Konkretisierung der Sicherheitskonzepte und Auslegungen des Endlagers im Detail beantwortet werden.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung der dargestellten Option ist technisch realisierbar. Die Anforderungen an die Anlage und die Funktionen, die das Eingangslager erfüllen muss, sind bekannt und können im Wesentlichen aus der Erfahrung mit der trockenen Zwischenlagerung abgeleitet werden. Es entsteht zusätzlicher Aufwand durch die gleichzeitige Pufferlagerung von ELB im Eingangslager; im Fall der Verwendung nicht abschirmender ELB wird die Unterbringung von Eingangslager und Konditionierungsanlage innerhalb eines Gebäudekomplexes der Errichtung zweier getrennter Anlagen vorzuziehen sein, um insbesondere unter Aspekten des betrieblichen Strahlenschutzes sowohl administrative als auch Handhabungsvorgänge zu erleichtern.

Die Konzeption des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager steht im Einklang mit der im NaPro skizzierten Absicht, mit dem Bau des Eingangslagers die bestehenden Zwischenlager zu räumen. Die Errichtung eines Zwischenlagers für 1.900 TLB mit hochradioaktiven Abfällen wird allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Widerstand der Bevölkerung am Endlagerstandort stoßen.

Einflussfaktoren

Zeit: Die Zeit, die nach der Standortentscheidung zur Planung und Errichtung des Eingangslagers zur Verfügung steht, ist äußerst knapp, soll damit die Leerung der bestehenden Zwischenlager vor Erlöschen der jeweiligen Genehmigung ermöglicht werden (s. o.). Die lange Lebensdauer des Eingangslagers erfordert ein intensives Alterungsmanagement der Anlage.

Politik/Gesellschaft: Die Errichtung einer kerntechnischen Anlage ist in der Regel mit Widerstand der betroffenen Standortbevölkerung verbunden. Für ein zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle der Bundesrepublik Deutschland ist mit wenig Akzeptanz zu rechnen. Da das Eingangslager darüber hinaus voraussichtlich das erste Gebäude sein wird, das am Endlagerstandort errichtet werden wird, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Bereitschaft zur Übernahme der gesellschaftlichen Last der Endlagerung in der Standortbevölkerung davon weiter beeinträchtigt wird.

2.3.3.8. Zentrales Zwischen- und Rückholungslager (Option EG 2 d)

Definition/Kurzbeschreibung

Nach dem StandAG (2017) ist die "Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers" vorzusehen. Das bedeutet, dass bereits eingelagerte Endlagergebinde erforderlichenfalls wieder zurück an die Oberfläche geholt werden. Je nach Ursache für die Entscheidung zur Rückholung können in der Folge eine Reparatur oder Ertüchtigung einzelner oder aller Endlagergebinde, eine Umladung in neue ELB oder TLB und möglicherweise eine erneute Zwischenlagerung erforderlich sein. Eine Pufferung rückgeholter Behälter auf dem Gelände des Endlagers ist dabei in jedem Fall hilfreich. Die oben beschriebenen Optionen EG 2 a) bis c) müssen dafür um die Funktion erweitert werden, im Fall einer Rückholung rückgeholte ELB bis zu deren Weitertransport oder Behandlung aufzunehmen und so die Rückholung zu verstetigen. Abweichend von der Option EG 1 d)



wird auch die Möglichkeit einer kurzfristigen Lagerung aller ELB diskutiert. Im Folgenden wird nur auf notwendige Änderungen und Ergänzungen der genannten Optionen eingegangen.

Technische Aspekte

Transporte: Für eine Pufferung oder kurzfristige Zwischenlagerung der zurückgeholten ELB auf dem Gelände des Endlagers sind keine Transporte über öffentliches Gelände erforderlich.

Technische Infrastruktur: Es müssen technische Einrichtungen zur Handhabung von ELB entsprechend den Optionen EG 2 b) und c) auch für die Option 2 a) vorgehalten werden. Für den Fall, dass sich auf dem Gelände des Endlagers keine Konditionierungsanlage befindet (siehe Kapitel 2.3.3.6), ist eine Heiße Zelle zur Arbeit an ELB und u. U. TLB erforderlich.

Es ist nicht davon auszugehen, dass die Rückholung schneller vonstattengeht als die Einlagerung. U. U. werden einige Einlagerungskammern bereits verschlossen sein und Barrierebauwerke und Versatz vor der Rückholung entfernt werden müssen. Zudem können der oder die Auslöser der Rückholung (Störfall, Gebindeversagen etc.) zu einem zusätzlichen technischen Aufwand und damit auch zeitlichen Aufwand führen. Im Falle einer vollständigen Rückholung nach Einlagerung aller Abfälle ist deshalb mit einer Verlängerung der Betriebs- und damit auch Lebensdauer des Eingangslagers zu rechnen. Entsprechend höhere Anforderungen sind an die Auslegung des Gebäudes und seiner technischen Einrichtungen zu stellen. Auch die Möglichkeit zur Adaption des Eingangslagers an gestiegene Anforderungen muss für einen deutlich längeren Zeitraum erhalten bleiben.

Mit zunehmender Lebensdauer steigen auch die Belastungen für die Anlage durch den Eintrag von Wärme und ionisierender Strahlung und durch konventionelle Alterung der eingesetzten Materialien. Vor diesem Hintergrund erscheint eine längerfristige Lagerung aller Abfälle im Eingangslager im Anschluss an die Rückholung, unabhängig davon, ob in ELB oder TLB, nur schwer realisierbar. Falls diese Möglichkeit vorgesehen werden soll, muss das Eingangslager entsprechend konzipiert werden, alternativ sind Nachrüstungen erforderlich. Auch in diesem Fall wird die Nutzungsdauer der Anlage aber begrenzt sein.

Kapazität: Die erforderliche Lagerkapazität hängt entscheidend von der weiteren Planung zum Umgang mit den rückgeholten Abfällen ab sowie von der Menge der zurückzuholenden ELB. Für eine Rückholung aller hochradioaktiven Abfälle, nachdem sie vollständig in das Endlager eingelagert wurden, entspricht die Kapazität der für die Option EG 2 b) skizzierten. Bei einer Umlagerung aller rückgeholten Abfälle in TLB und anschließender Zwischenlagerung im Eingangslager wäre eine geringere Lagerkapazität entsprechend der Option EG 2 a) ausreichend.

Gemeinsame Nutzung als Eingangslager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Wie bei der Option 1 d) dargestellt, ist eine gemeinsame Lagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in einem Lagergebäude, das auch möglicherweise beschädigte zurückgeholte ELB aufnehmen soll unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten auszuschließen.

Managementbezogene Aspekte

Zusätzlich zu den in den Kapiteln 2.3.3.5 bis 2.3.3.7 ausgeführten Aspekten müssen im Fall einer anschließenden Lagerung der Abfälle Überlegungen zur Lagerung in "Overpacks" angestellt werden, die so robust sein müssten, dass insbesondere defekte ELB gelagert werden können. Diese Overpacks müssen ggf. ebenfalls entwickelt und genehmigt werden. Hier wäre denkbar, sehr kurzfristig die Produktion von Overpacks aufnehmen zu können. Alternativ müssen Overpacks zur Aufnahme aller Abfälle vorgehalten werden.

Ökonomische Aspekte

Das Eingangslager muss für eine deutlich höhere Lebensdauer ausgelegt und, zumindest gegenüber der Option EG 2 a), größer ausgelegt und technisch aufwändiger ausgestattet werden, wenn die Lagerung aller Abfälle im Fall einer vollständigen Rückholung in ELB erfolgen soll. Das verursacht zusätzliche Kosten in beträchtlicher Höhe.

Administrative Aspekte

Mit der Entscheidung zur Rückholung, insbesondere, wenn mehrere ELB davon betroffen sind, muss eine Entscheidung über den weiteren Verbleib der ELB bzw. Abfälle verbunden sein. Handelt es sich um eine begrenzte Rückholung zur Reparatur oder Ertüchtigung einzelner Behälter, ist der Umgang mit ihnen mit vergleichsweise geringerem Aufwand verbunden. Aber auch in diesem Fall muss die Vorgehensweise von der Aufsicht mindestens geprüft werden. Der Aufwand wird davon abhängen, was bereits mit der Betriebsgenehmigung geprüft und genehmigt wurde. Im Falle einer vollständigen Rückholung müssen zusätzliche Genehmigungen beispielsweise für den Bau neuer Zwischenlager, Konditionierungsanlagen oder anderer Einrichtungen zur Behandlung der Abfälle erteilt werden. Sollen die Abfälle nach der Rückholung transportiert werden, müssen die ELB u. U. für den Transport qualifiziert oder in Transferbehälter o. ä. verladen werden. Diese Transferbehälter müssen ggf. ebenfalls entwickelt und genehmigt werden, so sie noch nicht bereitstehen. Darüber hinaus ist für den Umgang mit rückgeholten Behältern, insbesondere, wenn sie schon mehrere Jahrzehnte eingelagert waren und es sich um nicht abschirmende Behälter handelt, mit erhöhten Anforderungen an den Strahlenschutz sowie dem daraus abzuleitenden Aufwand für administrative Vorgänge zu rechnen.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Zum Zeitpunkt einer Rückholung während des Einlagerungsbetriebs ist damit zu rechnen, dass zunächst keine Einlagerung ins Endlager, keine Konditionierung und auch keine weiteren Transporte von TLB zum Endlagerstandort stattfinden werden. Die Zwischenlagerung kann demnach durch eine Rückholung verlängert werden, mit allen möglichen Konsequenzen siehe Kapitel 2.2.3). Findet eine Rückholung nach Beendigung des Einlagerungsbetriebs statt, besteht die Zwischenlagerung nicht mehr, da alle Abfälle ins Endlager eingelagert wurden.

Endlager: Das Sicherheitskonzept und die Auslegung (z. B. Anzahl der ELB, abgeschirmte/nichtabgeschirmte ELB) haben Auswirkungen auf die Geschwindigkeit einer Rückholung und damit mittelbar auf die benötigte Lebensdauer des Eingangslagers, das für die Abfälle aus der Rückholung genutzt wird.

Konditionierungsanlage: Abhängig von der Ursache für die Rückholung einiger oder aller Abfälle wird eine Konditionierungsanlage am Endlagerstandort benötigt werden, deren Lebensdauer sich auch am Zeitbedarf für die Rückholung orientieren muss. Da die Ursache einer Rückholung nicht planbar ist, sollte ein Konzept für die Konditionierung von rückgeholten Abfällen entwickelt werden, das, sollte eine Rückholung notwendig werden und rückgeholte Abfälle konditioniert werden müssen, möglichst flexibel an die dann notwendigen Erfordernisse angepasst werden kann.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Wesentliche Informationen zur anforderungsgerechten Auslegung eines Eingangslagers als Pufferlager oder Zwischenlager für die Rückholung eingelagerter Abfälle hängen von der Ursache und den weiteren Umständen ab, die zur Rückholungsentscheidung führen. Diese Umstände können bei Errichtung des Eingangslagers nicht bekannt sein. Es handelt sich demnach auch bei der

Entscheidung über Auslegung und Bau des Eingangslagers um eine Entscheidung, die unter einem hohen Maß an Ungewissheit getroffen wird. Zu klären wäre, in welchem Maß und an welcher Stelle Flexibilitäten bei der Planung und Errichtung des Eingangslagers notwendig und möglich sind (gemeint sind Vorkehrungen, die ggf. zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden können, wie beispielsweise die Vorkehrungen, die beim Neubau des Zwischenlagers ESTRAL in Lubmin für eine Heiße Zelle getroffen werden (EWN 2020)).

Plausibilität der realen Umsetzung

Da die Möglichkeit zur Rückholung eingelagerter hochradioaktiver Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers vorzusehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch eine Möglichkeit zur Aufnahme rückgeholter Abfallgebinde am Endlagerstandort vorgesehen werden wird. Es liegt nahe, das Eingangslager für diesen Zweck zu nutzen. Entsprechende Konzepte müssen Bestandteil der Betriebsgenehmigung sein.

Einflussfaktoren

Zeit: Wie oben ausgeführt, hat die benötigte Lebensdauer einen entscheidenden Einfluss auf die technische Ausgestaltung des Eingangs- und Rückholungslagers.

Politik/Gesellschaft: Die Auslegung des Eingangslagers zur Aufnahme rückgeholter Abfälle stellt einerseits die konsequente Umsetzung der Anforderung an die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle aus dem StandAG (2017) dar. Auf der anderen Seite können die längere Lebensdauer und die zusätzliche Auslegung als Rückholungslager die Akzeptanz bei der Standortbevölkerung negativ beeinflussen. Eine solche Entscheidung wird möglicherweise nicht als vorsorgende Maßnahme rezipiert werden, sondern als ein Anzeichen fehleranfälliger Planung des Endlagers. Daraus ergeben sich höhere Anforderungen an die Kommunikation von Betreiber und Aufsichtsbehörde, aber auch der Politik.

2.4. Konditionierungsanlage

In diesem Kapitel werden die Aufgabe und die Komponenten der Konditionierungsanlage dargestellt. Anschließend werden die möglichen Optionen für die Konditionierungsanlage hergeleitet, dargestellt und beschrieben.

2.4.1. Aufgaben der Konditionierungsanlage

Die Konditionierungsanlage dient primär dazu, die dort angelieferten hochradioaktiven Abfälle (wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente (BE)) in endlagergerechte Behälter zu verpacken und Endlagergebinde zu erzeugen, die die Annahmebedingungen des Endlagers erfüllen. Die Anlage muss so ausgelegt werden, dass sie die Endlagergebinde qualitätsgesichert und zuverlässig befüllt und verschließt. Eine Konditionierungsanlage unterliegt den gleichen hohen atomrechtlichen Anforderungen, wie sie an andere kerntechnische Anlagen gestellt werden, die nach § 7 AtG genehmigt werden.

Zuständig für Planung, Bau und Betrieb der Konditionierungsanlage ist nach Festlegung des BMU von Anfang 2020 der Vorhabenträger BGE¹². Alle notwendigen vorbereitenden Arbeitsschritte von der Planung bis zur Inbetriebnahme sind an dem Plan für die Errichtung und den Betrieb des

¹² https://www.bge.de/de/aktuelles/meldungen-und-pressemitteilungen/meldung/news/2021/2/527-endlagersuche/

Endlagers auszurichten. Das betrifft sowohl die Anpassung aller Prozessschritte an die für das Endlager ausgewählten und festgelegten Endlagergebinde und den vorgesehenen Einlagerungsfortschritt (Gebinde pro Zeiteinheit) als auch den Zeitrahmen für die Bereitstellung erster Endlagergebinde für das Endlager. Aufgrund dieser Abhängigkeit (Entscheidung zum Wirtsgestein, zum Endlagerkonzept und letztendlich zum Endlagerbehälter), können die Planungen für die Konditionierungsanlage nur Hand in Hand mit der Entwicklung des Endlagerkonzeptes gehen.

Im Fall einer zusätzlichen Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am gleichen Standort müssten diese ebenfalls konditioniert werden. Die zur Konditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle notwendigen Prozesse und technischen Einrichtungen unterscheiden sich jedoch so grundlegend von Anlagen zur Konditionierung hochradioaktiver Abfälle, dass keine Überschneidungen oder Synergien zu erwarten sind. Daher werden Optionen für den Entsorgungsschritt Konditionierungsanlage im Folgenden ausschließlich im Hinblick auf hochradioaktive Abfälle dargestellt.

2.4.2. Komponenten einer Konditionierungsanlage

Zu einer Konditionierungsanlage, die gemäß NaPro (BMUB 2015) auf dem Gelände des Endlagers errichtet werden soll, zählen grundsätzlich die folgenden wesentlichen Komponenten und Einrichtungen. In der nachfolgenden Aufzählung wird beispielhaft davon ausgegangen, dass die abgebrannten Brennelemente nach der Entladung aus den Transport- und Lagerbehältern zerlegt werden. Da bisher keine Entscheidung zu einem Endlagerbehälter getroffen wurde, ist die Zerlegung aber nicht zwingend notwendig. Die Entscheidung darüber wird im Wesentlichen von dem gewählten Endlagerkonzept für das ausgewählte Wirtsgestein abhängen. Darüber hinaus ist der Zustand der Brennelemente zum Zeitpunkt der Entladung aus den Transport- und Lagerbehältern wesentlich für die Umsetzung des gewählten Konditionierungsverfahrens. So ist zu prüfen, ob Brennelemente, die aus irgendeinem Grunde nicht zerlegt werden können, mittels eines anderen Innenkorbes des Endlagerbehälters, der ansonsten geometrisch gleichbleibt, als Ganzes aufgenommen werden können.

- Eingangshalle und Empfangsbereich (Eingangskontrolle),
- Umladebereich (Andocken von Transport- und Lagerbehältern (TLB) an Heiße Zelle und Entnahme von Brennelementen oder Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen),
- Heiße Zellen
 - zur BE-Zerlegung,
 - zur Befüllung von Boxen mit Brennstäben¹³,
 - zur Kompaktierung der BE-Strukturteile,
 - zur Befüllung von Boxen/Behältern mit Strukturteilen,
 - zur Befüllung von Endlagerbehältern mit BE-Stäben, BE-Strukturteilen oder Kokillen,
 - zum Verschweißen des Endlagerbehältersbspw. des Innenbehälters eines POLLUX®-Behälters,
 - zum Verschluss des Endlagerbehälters z. B. mit 2. Deckel; je nach ausgewähltem Behältertyp,

¹³ Die Boxen werden z. B. bei einem POLLUX-Behälter als Einheit in den Innenbehälter geschoben; dies dient der Prozessvereinfachung und Sicherheit bei der Beladung.



 Finale Qualitätssicherung des Endlagergebindes (befüllter Endlagerbehälter) vor Freigabe zum Transport ins Eingangslager des Endlagers,

- Ausschleusung des ELB aus der Konditionierungsanlage, ggf. Einstellen in einen Transfer- oder Abschirmbehälter,
- Infrastrukturräume (Werkstätten, Lager etc.),
- Pufferhalle zur temporären Lagerung von angelieferten beladenen sowie teilentleerten TLB. TLB (siehe Kapitel 2.3.2.1),
- Pufferhalle zur temporären Lagerung von Endlagergebinden (befüllter Behälter) z. B. im Falle von Störungen im Betriebsablauf oder zur Lagerung vor einer erforderlichen Reparatur/Nachbesserung von Gebinden (siehe auch hierzu Kapitel 2.3.2.1),
- Einrichtungen zur Annahme und Einschleusung von leeren ELB sowie zur Ausschleusung von entleerten TLB und deren Dekontamination.

Zur Abgrenzung der Begriffe "Heiße Zelle" und "Konditionierungsanlage" sei folgendes gesagt: Eine Reparatur von TLB, die über das heutige Konzept hinaus geht, bedeutet den Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen. Dafür ist mindestens eine Heiße Zelle erforderlich, die groß genug ist, um die TLB zu handhaben. Für die spätere Konditionierung der radioaktiven Abfälle wird eine Umverpackung notwendig sein. Auch hierfür ist eine Heiße Zelle erforderlich, in der neben den TLB auch ELB gehandhabt werden müssen. Eine Konditionierungsanlage soll darüber hinaus einen hohen Umsatz bei der Umverpackung erlauben und stellt damit eine größere Anlage als eine Heiße Zelle dar. Die Größe einer Heißen Zelle zur Reparatur eines TLB hängt davon ab, ob das Inventar im TLB verbleiben kann oder ggf. auch in neue Behälter umverpackt werden muss und ob eine solche Reparatur nur in seltenen Einzelfällen erforderlich wird oder ob aufgrund von systematischen Alterungserscheinungen auch eine größere Anzahl von TLB ersetzt werden muss. In einem solchen Fall wäre der Unterschied einer "Heißen Zelle für Reparaturzwecke" und einer Konditionierungsanlage geringer. Wenn daher im folgernden von einer Heißen Zelle die Rede ist, kann damit eine Einrichtung bis hin zu einer Konditionierungsanlage gemeint sein.

Im Vorhaben WERA wird angenommen, dass die entladenen TLB einer Wiederverwertung zugeführt werden; entweder zur Nutzung für den Transport oder zur Lagerung von Brennelementen aus ausländischen Kraftwerken außerhalb Deutschlands. Hierfür wird die Dekontamination des Behälterinnenraums der TLB nötig sein. Falls es für die TLB keinen Markt geben sollte, ist ein gesonderter Verwertungsplan zu entwickeln. Das könnte auch die schadlose Verwertung des freigemessenen Gusskörpers und seiner Einbauten sein.

Die Pilot-Konditionierungsanlage (PKA) in Gorleben (BLG) wurde in den 1990er Jahren geplant und gebaut, um den Konditionierungsprozess für abgebrannte Brennelemente zu erproben. Die PKA hat noch eine zweite Funktion. Sie ist technisch so konzipiert und ausgestattet, dass defekte TLB aufgenommen und dort repariert werden können. Obwohl die Genehmigung zur Konditionierung von LWR-Brennelementen im Jahr 2000 erteilt wurde, ist die Anlage nicht in Betrieb genommen worden. Ende 2019 wurde vom zuständigen Landesumweltministerium in Niedersachsen angekündigt, diese Anlage zurückzubauen.

Die Pilot-Konditionierungsanlage befindet sich auf dem Gelände des Werkes Gorleben der BGZ (Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung, früher BLG-Brennelemente Lagergesellschaft) und besteht aus dem Konditionierungsgebäude, dem Stromversorgungsgebäude, dem Versorgungsgebäude für die Versorgung mit Medien sowie den zugehörigen Infrastruktureinrichtungen. Im Zellentrakt des Konditionierungsgebäudes sind zentral in T-Form die Entladezelle, die Beladezelle und die Zerlegezelle angeordnet. Unterhalb der Zerlegezelle befindet sich die Abfallbehandlungszelle. Im Kontrollbereich des Konditionierungsgebäudes (Behälter- und Zellenbereich) ist durch Unterdruckstaffelung und entsprechenden Luftabzug eine gerichtete Luftströmung von außen bzw. aus kontaminationsfreien Räumen zu Räumen mit höherem Kontaminationspotential vorhanden.

Im Konditionierungsgebäude (ZFA) sind sämtliche Tätigkeiten und Verfahrensabläufe, die der Konditionierung der Brennelemente oder der Abfallbehandlung dienen, zusammengefasst. Das Konditionierungsgebäude ist in drei Bereiche gliedert: Sozialbereich (mit Versorgungseinrichtungen), Behälterbereich, Zellenbereich.

Nach StandAG soll die Standortentscheidung für das Endlager bis 2031 getroffen werden. Erst mit der Standortentscheidung wird auch eine Entscheidung über das Wirtsgestein, das technische Endlagerkonzept und damit den Endlagerbehälter gefällt. Letzteres ist Voraussetzung, um die Detailprozesse und –komponenten der Konditionierungsanlage festzulegen.

Ein besonderer Aspekt für die Konditionierungsanlage ist die im StandAG ausdrücklich vorgesehene Möglichkeit der Rückholung der eingelagerten Endlagergebinde. Bei der Planung der Konditionierungsanlage sollte geprüft werden, ob entsprechende zusätzliche Räume dafür (Eingangskontrolle bei Anlieferung aus dem Endlager, Reinigungsprozesse und –techniken, Pufferhallen etc.) vorzusehen sind.

Theoretisch ist denkbar, dass

- sich TLB nach sehr langer Zwischenlagerzeit nicht mehr öffnen lassen;
- nach sehr langer Zwischenlagerzeit die Brennelemente nicht entladen werden können (Verformungen, Korrosion, etc.);
- TLB-Deckel während der Zwischenlagerzeit verschweißt wurden (Dichtungen waren defekt).

Grundsätzlich sind bei der Konzeptionierung der Konditionierungsanlage die genannten Möglichkeiten und alle weiteren Arten von Spezialfällen zu berücksichtigen.

2.4.3. Beschreibung möglicher Optionen für die Konditionierungsanlage

Gemäß NaPro (2015) soll nach Festlegung des Endlagerstandortes dort auch ein Eingangslager mit entsprechender Konditionierungsanlage errichtet werden. Hinsichtlich der räumlichen Zuordnung von Konditionierungsanlage und Endlager gibt es mehrere Optionen, die als realistisch betrachtet werden:

- Konditionierungsanlage und Eingangslager sind eine zusammenhängende Anlage auf dem Endlagergelände,
- Konditionierungsanlage und Eingangslager sind zwei getrennte Anlagen auf dem Endlagergelände,
- Konditionierungsanlage steht nicht auf dem Gelände des Endlagers; sondern an einem anderen Standort (z. B. in der Nähe des Endlagers),
- mehrere Konditionierungsanlagen; an jedem Zwischenlagerstandort eine Anlage,
- mehrere Konditionierungsanlagen; getrennte Konditionierungsanlagen für die verschiedenen Abfallarten an unterschiedlichen Standorten: 1x für BE aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER), 1x für BE aus Forschungs- und Prototyp-Reaktoren (z. B.: AVR-BE), 1x für Wiederaufarbeitungsabfälle (WAA-Abfälle).



Für jede der vorgenannten 5 Optionen erfolgt nachfolgend eine qualitative Bewertung nach technischen, ökonomischen, administrativen und managementbezogenen Aspekten.

Konditionierungsanlage und Eingangslager sind eine zusammenhängende An-2.4.3.1. lage auf dem Gelände des Endlagers (Option K1)

Kurzbeschreibung der Option

Die Option K1 sieht vor, dass eine Kombination von Eingangslager und Konditionierungsanlage auf dem Gelände des Endlagers in der Weise vorgesehen wird, dass eine Anlage mit beiden Funktionen entsteht: ein zentrales Eingangslager, in dem die TLB aus den Standortzwischenlagern aufgenommen werden, und eine Konditionierungsanlage mit den oben beschrieben Funktionen. Im Eingangslager wird im Wesentlichen eine Überprüfung der angelieferten TLB auf Konformität mit den Lieferspezifikationen vorgenommen und eine Eingangsprüfung sowie eine anschließende Lagerpositionierung bis zum Abtransport zur Konditionierung. In der Konditionierungsanlage, die nur durch Tore innerhalb des Gesamtgebäudes von dem Eingangslager getrennt ist, erfolgt ebenfalls zunächst eine Überprüfung der angelieferten TLB auf Konformität mit den Lieferspezifikationen und eine Eingangsprüfung. Daran schließt sich an der komplexe Prozess von Entladung der Abfälle aus dem TLB und die Weiterleitung in die Prozessketten.

Technische Aspekte

Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und spätere Stilllegung der Gesamtanlage können aus technischer Sicht unproblematisch erfolgen. Es handelt sich um eine eigenständige kerntechnische Anlage mit zwei Hauptfunktionen, für die eine zusammenhängende Genehmigung einzuholen ist. Die technischen Ausrüstungen und Einrichtungen sind für das Eingangslager und für die Konditionierungsanlage zwar grundsätzlich verschieden; aber erschweren weder eine Planung noch eine Beschaffung. Ein Vorteil ergibt sich aus der zusammenhängenden Konstruktion des Gebäudes in der Weise, dass der Weitertransport von angelieferten hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen auf dem Endlagergelände mittels Transport- und Lagerbehältern vom Eingangslager zur Konditionierung unter sozusagen einem Dach stattfindet. Es erübrigen sich ggf. erforderlich Genehmigungen für Transporte auf dem Endlagergelände.

Ökonomische Aspekte

Ökonomisch ist die Errichtung und der Betrieb von zwei technischen Anlagen in einem Gebäude auf dem Endlagergelände im Vergleich zu einer getrennten Lösung wahrscheinlich von Vorteil. Es ist nur ein komplettes Gebäude zu errichten für zwei Hauptfunktionen. Zum finanziellen Vorteil bei der Errichtung kommt der erforderliche genehmigungstechnische Aufwand hinzu, der in diesem Fall voraussichtlich geringer ausfällt als bei zwei getrennten Anlagen. Ein einziges Verfahren für beide Funktionen in einem Gebäude scheint einfacher zu sein. Dies wäre im Rahmen von Konzeptplanungen aber noch genauer zu untersuchen und mit Zahlen abzuschätzen.

Administrative Aspekte

Bei der Kombination der beiden Funktionen Eingangslager und Konditionierungsanlage lassen sich administrative Prozesse und Aufwände relativ zu zwei getrennten Anlagen reduzieren. Dazu zählen z. B. die Abwicklung eines gebündelten Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahrens, die einfachere Koordination der Errichtungsarbeiten, einfachere Abstimmung der Prozesse des WERA

WERA

innerbetrieblichen Transports der TLB vom Eingangslager in die Konditionierungsanlage, Synergien beim Einsatz von Betriebspersonal einschließlich Wachpersonal.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung dieser Option wird als sehr wahrscheinlich eingeschätzt, weil sie technisch, ökonomisch und administrativ vorteilhaft gegenüber zwei getrennten Anlagen erscheint.

Einflussfaktoren

Zeit: aller Voraussicht nach wird man bei einer kombinierten Lösung von Eingangslager und Konditionierungsanlage bei der Planung, Genehmigung und Errichtung Zeit gegenüber zwei getrennten Anlagen gewinnen.

Politik/Gesellschaft: Die Option K1 ist im Einklang mit politischen Vorgaben (NaPro); sie verlangt aber von der Gesellschaft die Akzeptanz/Einwilligung von zwei – auch getrennt an unterschiedlichen Standorten möglichen – kerntechnischen Anlagen an einem Standort, an dem auch das Endlager errichtet und über mehrere Jahrzehnte betrieben wird. Das könnte Konfliktpotenzial bedeuten mit Blick auf gesellschaftlich und politisch ggf. gewünschte Lastenteilung.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Die Option K1 bietet gute technische und administrative Voraussetzungen für die sukzessive Entladung und dann Stilllegung der Zwischenlager.

Endlager: Die Kombination von Eingangslager und Konditionierungsanlage am Endlagerstandort ist hinsichtlich der Sicherheit und der technischen und administrativen Prozesse nahezu das Optimum; kurze Wege (nur innerbetriebliche Transporte), auch im Falle einer möglichen Rückholung.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Zum Störfallpotential der Konditionierungsanlage würde sich das Störfallpotential des Eingangslagers addieren. Mit der Größe des Eingangslagers könnte sich auch die Bewertung der Risiken verändern.

Ungewissheit liegt in der Frage, ob eine Konzentration von kerntechnischen Anlagen an einem Standort (nationales Entsorgungszentrum: Eingangslager, Konditionierungsanlage und Endlager) gesellschaftlich mitgetragen würde.

2.4.3.2. Konditionierungsanlage und Eingangslager sind zwei getrennte Anlagen auf dem Gelände des Endlagers (Option K2)

Kurzbeschreibung der Option

Die Trennung des Eingangslagers auf dem Gelände des Endlagers von der Konditionierungsanlage kann aus technischer Sicht unproblematisch erfolgen. Es handelt sich dann um zwei eigenständige kerntechnische Anlagen, für die jeweils Genehmigungen einzuholen sind. In der Konditionierungsanlage erfolgt eine Überprüfung der angelieferten TLB auf Konformität mit den Lieferspezifikationen und eine Eingangsprüfung. Daran schließt sich der komplexe Prozess von Entladung der Abfälle aus dem TLB und die Weiterleitung in die Prozessketten an.



Technische Aspekte

Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und spätere Stilllegung der beiden Anlagen können aus technischer Sicht unproblematisch erfolgen. Es handelt sich um zwei eigenständige kerntechnische Anlagen mit je einer Hauptfunktion, für die je eine Genehmigung einzuholen ist. Ein Nachteil ergibt sich aus der Tatsache, dass der Weitertransport von angelieferten hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen mittels Transport- und Lagerbehältern vom Eingangslager zur Konditionierungsanlage auf dem Endlagergelände erfolgen muss. Hier wäre zu klären, welche Genehmigungen dafür zusätzlich erforderlich sind.

Ökonomische Aspekte

Ökonomisch sind die Errichtung und der Betrieb von zwei getrennten Anlagen auf dem Endlagergelände im Vergleich zu einer kombinierten Lösung wahrscheinlich nicht vorteilhaft. Schließlich sind zwei komplette Anlagen zu errichten anstelle von einer Anlage mit zwei Hauptfunktionen. Zum finanziellen Aufwand kommt der jeweils erforderliche genehmigungstechnische Aufwand hinzu: doppelter Satz an Unterlagen und zwei getrennte Verfahren. Da scheint ein einziges Verfahren für beide Funktionen in einer Anlage einfacher zu sein. Darüber hinaus sind zum Betrieb der Anlagen jeweils unabhängige Mannschaften einschließlich Wachpersonal bereit zu stellen. Dies wäre im Rahmen von Konzeptplanungen aber noch genauer zu untersuchen und mit Zahlen abzuschätzen.

Administrative Aspekte

Bei der Trennung der beiden Funktionen Eingangslager und Konditionierungsanlage werden administrative Prozesse und Aufwände relativ zu einer Kombinationsanlage höher. Dazu zählen z. B. die Abwicklung von getrennten Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahren, die komplexere Koordination der Errichtungsarbeiten und Abstimmung der Prozesse vom innerbetrieblichen Transport der TLB vom Eingangslager in die Konditionierungsanlage. Synergien wie bei der Kombinationsanlage beim Einsatz von Betriebspersonal einschließlich Wachpersonal sind nicht zu erwarten.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung dieser Option wird als wahrscheinlich eingeschätzt, weil sie der Vorgabe im NaPro entspricht (Eingangslager mit entsprechender Konditionierungsanlage am Endlagerstandort). Auch wenn es technisch, ökonomisch und administrativ vorteilhafter ist, eine Kombinationsanlage zu planen, zu errichten und zu betreiben, so spricht grundsätzlich nichts gegen die Realisierung dieser Option.

Einflussfaktoren

Zeit: Gegenüber der in Option K1 beschriebenen kombinierten Lösung von Eingangslager und Konditionierungsanlage wird man bei aller Voraussicht nach bei der Planung, Genehmigung und Errichtung etwas mehr Zeit benötigen. Außerdem könnten bei getrennten Anlagen unterschiedliche Realisierungszeitpunkte in Erwägung gezogen werden. Daraus können sich auch Vorteile ergeben (z. B. kann, wenn das Eingangslager vor der Konditionierungsanlage betriebsbereit ist, die Leerung der Zwischenlager beginnen – auch wenn die Konditionierungsanlage noch nicht betriebsbereit ist.

Politik/Gesellschaft: Die Einschätzung zur Option K2 deckt sich mit der zu Option K1.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Die Option 2 bietet wie Option K1 gute technische und administrative Voraussetzungen für die sukzessive Entladung und dann Stilllegung der Zwischenlager.

Endlager: Die Errichtung und der Betrieb von Eingangslager und Konditionierungsanlage am Endlagerstandort ist hinsichtlich der Sicherheit und der technischen und administrativen Prozesse nahezu das Optimum; kurze Wege auch im Falle einer möglichen Rückholung (nur innerbetriebliche Transporte).

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Ungewissheit liegt in der Frage, ob eine Konzentration von kerntechnischen Anlagen an einem Standort (nationales Entsorgungszentrum: Eingangslager, Konditionierungsanlage und Endlager) gesellschaftlich mitgetragen würde (wie Option K1).

2.4.3.3. Konditionierungsanlage steht nicht auf dem Gelände des Endlagers; sondern an einem Standort in der Nähe des Endlagers (Option K3)

Kurzbeschreibung der Option

In dieser Option wird der Idee Rechnung getragen, dass es aus sozioökonomischer Sicht für die Realisierung des Gesamtprojektes Endlager Vorteile haben kann, wenn nicht alle notwendigen kerntechnischen Anlagen auf ein und demselben Gelände stehen. Insofern stellt Option K3 eine Weiterentwicklung der Option K2 dar. Dabei wird angenommen, dass das Eingangslager auf dem Gelände des Endlagers steht, die Konditionierungsanlage getrennt davon in einer z. B. benachbarten Gemeinde und nicht mehrere hundert Kilometer entfernt, um auch die Transportwege gering zu halten. Zunächst wird voraussichtlich ein Auswahlverfahren für den Standort nach definierten Kriterien durchzuführen sein. Die Möglichkeit des Transports von TLB direkt aus den Zwischenlagern zur Konditionierung wird hier nicht betrachtet.

Technische Aspekte

Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und spätere Stilllegung der Konditionierungsanlage an einem Standort in der Nähe des Endlagerstandortes kann aus technischer Sicht unproblematisch erfolgen. Es handelt sich dann um eine eigenständige kerntechnische Anlage, für die eine eigenständige Intrastruktur (Verkehrsanbindung, Energieversorgung etc.) zu schaffen wäre und eine separate Genehmigung einzuholen ist. Zur Verstetigung der Konditionierung benötigt die Konditionierungsanlage ein Pufferlager.

Erfolgt der Transport von TLB vom Eingangslager auf dem Endlagergelände zur Konditionierungsanlage und der Transport konditionierter Endlagergebinde in dafür noch zu entwickelnden Transportbehältern von der Konditionierungsanlage zum Endlager, vergrößert sich die Zahl der benötigten Transporte erheblich. Für die Transporte auf öffentlichen Verkehrswegen sind zusätzliche Genehmigungen erforderlich. Als Nachteil dieser Option ist auf jeden Fall der zusätzliche Transport von hochradioaktiven Stoffen anzusehen.

Ökonomische Aspekte

Ökonomisch ist die Errichtung und der Betrieb einer Konditionierungsanlage an einem vom Endlager verschiedenen Standort mit der Option K2 vergleichbar, bei der die Konditionierungsanlage auf dem



Endlagergelände stehen soll. Zusätzlicher finanzieller Aufwand entsteht jedoch für die Transporte zur Konditionierungsanlage und von dort zurück zum Endlagerstandort sowie für die noch zu entwickelnden Transportbehälter für die konditionierten Endlagergebinde. Außerdem entstehen Kosten für die erwähnte Infrastruktur und eigenes Wachpersonal. Dies wäre im Rahmen von Konzeptplanungen aber genauer zu untersuchen und mit Zahlen abzuschätzen.

Administrative Aspekte

Bei der Trennung der beiden Funktionen Eingangslager und Konditionierungsanlage und den unterschiedlichen Standorten werden administrative Prozesse und Aufwände relativ zu einer Kombinationsanlage an einem Standort höher. Dazu zählen z. B. die Abwicklung von getrennten Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahren. Außerdem bedarf es der Koordinierung der Transportlogistik zur Konditionierungsanlage und von dort zum Endlagerstandort. Synergien beim Einsatz von Betriebspersonal einschließlich Wachpersonal sind aufgrund der unterschiedlichen Standorte sind nicht zu erwarten.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung dieser Option wird als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, weil sie zwar technisch realisierbar erscheint, aber ökonomisch und administrativ eine Menge an Nachteilen gegenüber einer kombinierten Lösung (Option K1) oder zumindest gegenüber zwei getrennten Anlagen auf einem Gelände hat (zusätzliche Transporte, Transportgenehmigungen, Transportbehälter, Infrastruktur, etc.). Es bleibt zu klären, ob der gesellschaftliche Vorteil einer räumlichen Trennung der kerntechnischen Anlagen, die wirtschaftlichen und vor allem die zusätzlichen Transporte auf öffentlichen Strassen kompensieren kann.

Einflussfaktoren

Zeit: Bei der Planung, Genehmigung und Errichtung einer Konditionierungsanlage an einem vom Endlager getrennten Ort müsste geprüft werden, ob insgesamt Zeit zu sparen ist. Während des Betriebes schlagen dann aber Zeiten für die Transporte zu Buche. Hier bedarf es in beiden Richtungen (TLB zur Konditionierung und ELB von der Konditionierung zum Endlager) einer gut abgestimmten Logistik.

Politik/Gesellschaft: Die Option K3 bietet die Möglichkeit, das Prinzip der "Lastenteilung" umzusetzen. Damit würde die Konzentration kerntechnischer Anlagen auf einem Gelände entzerrt. Nachteilig ist jedoch dabei die Vielzahl an zusätzlichen Transporten mit hochradioaktiven Stoffen. Dies bedarf einer sorgfältigen Abwägung.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Im Vergleich mit den Optionen K1 und K2 sind die technischen und administrativen Voraussetzungen für die sukzessive Entladung und dann Stilllegung der Zwischenlager ähnlich. Es bedarf einer gut abgestimmtem Transportlogistik einschließlich des zugehörigen Genehmigungsmanagements.

Eingangslager: Die zuverlässige Anlieferung von TLB aus dem Eingangslager ist bei dieser Option wesentlich für eine reibungslose Konditionierung der Endlagergebinde.

Endlager: Der Betrieb des Endlagers ist stark abhängig von zuverlässigen, technischen und administrativen Prozessen bei der Anlieferung konditionierter Gebinde aus der Konditionierungsanlage. Ein Pufferlager für ELB wäre sinnvoll für die Verstetigung der Einlagerung. Für rückgeholte ELB stände keine Konditionierungsanlage am Endlagerstandort bereit. Die rückgeholten Gebinde müssten ggf. zur Konditionierungsanlage transportiert werden, wenn eine Konditionierung notwendig wäre. Die hierfür notwendigen Prozesse wären wahrscheinlich sehr umfangreich.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die größte Ungewissheit liegt in der Frage, ob die Transporte der TLB zur Konditionierungsanlage und die Transporte der Endlagergebinde zum Endlager kontinuierlich gewährleistet werden können.

2.4.3.4. Mehrere Konditionierungsanlagen (bis zu 16); an jedem Zwischenlagerstandort eine Anlage (Option K4)

Kurzbeschreibung der Option

Eine weitere Option wäre die Errichtung von Konditionierungsanlagen mit geringerer Leistung direkt an den Standorten der heute existierenden Zwischenlager. Der Grundgedanke dabei ist die gesellschaftliche "Lastenteilung". Aus technischer Sicht sind solche in der Dimension kleineren Anlagen genauso zu realisieren wie eine zentrale Anlage auf dem Endlagergelände. Unter ökonomischen und organisatorischen Gesichtspunkten ist diese Untervariante sowohl die kostspieligere als auch von der Organisation der Prozesse und Abläufe die komplexere Lösung im Vergleich zu der oben beschriebenen Option der zentralen Konditionierungsanlage, die nur räumlich vom Eingangslager auf dem Endlagergelände getrennt ist.

Technische Aspekte

Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und spätere Stilllegung der Konditionierungsanlage an den Standorten der Zwischenlager erscheint aus technischer Sicht machbar. Es handelt sich dann um jeweils eigenständige kerntechnische Anlagen, für die separate Genehmigungen einzuholen sind. Als Nachteil dieser Option ist auf jeden Fall der Transport konditionierter Endlagergebinde in dafür noch zu entwickelnden Transportbehältern von den dezentralen Konditionierungsanlagen zum Endlager anzusehen. Für die Transporte auf öffentlichen Verkehrswegen sind zusätzliche Genehmigungen erforderlich.

Ökonomische Aspekte

Ökonomisch betrachtet ist die Errichtung und der Betrieb von dezentralen Konditionierungsanlagen an den Zwischenlagerstandorten die unwirtschaftlichste Option. Neben den vielfach höheren Baukosten (z. B. Heiße Zellen in allen Anlagen inkl. Manipulatoren und Schleusen, etc.) sind auch die Genehmigungsverfahren für alle Anlagen ein enormer Zeit- und Kostenfaktor. Ein zusätzlicher finanzieller Aufwand ist auch für die Transporte zum Endlager in noch zu entwickelnden Transportbehältern für die konditionierten Endlagergebinde zu erwarten. Dies wäre im Rahmen von Konzeptplanungen aber noch genauer zu untersuchen und mit Zahlen abzuschätzen.

Administrative Aspekte

In dieser Option erscheint der Aufwand für administrative Prozesse am komplexesten. Die Abwicklung von zahlreichen separaten Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahren für die jeweilige Konditionierungsanlage ist wesentlich aufwändiger als für eine einzelne Anlage oder eine kombinierte Lösung (Option K2). Und es bedarf eines großen Aufwandes an Koordinierung für die Transportlogistik zum Endlager.



Plausibilität der realen Umsetzung

Die Umsetzung dieser Option wird als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, weil sie zwar technisch realisierbar erscheint, aber ökonomisch und administrativ eine Menge an Nachteilen gegenüber einer Einzelanlage oder einer kombinierten Lösung (Option K2) darstellt. Dazu zählen neben den relativ zu den anderen Varianten sehr hohen Bau- und Beschaffungskosten auch Aufwände für Transportgenehmigungen vom jeweiligen Standort zum Endlager, zus. Transportbehälter, etc.). Es bleibt zu klären, ob der gesellschaftliche Vorteil einer räumlichen Trennung der kerntechnischen Anlagen, die wirtschaftlichen und vor allem die zusätzlichen Transporte auf öffentlichen Wegen kompensieren kann. Dagegen spricht auch die politische Zusage, die Zwischenlager baldmöglichst zu leeren.

Einflussfaktoren

Zeit: Bei der Planung, Genehmigung und Errichtung von vielen dezentralen Konditionierungsanlagen an bestehenden Zwischenlagerstandorten wird man aller Voraussicht insgesamt deutlich mehr Zeit benötigen als bei einer zentralen Anlage – egal ob auf dem Endlagergelände oder davon entfernt. Eine Parallelisierung der Arbeiten an allen Standorten erscheint unrealistisch, weil es dazu in Deutschland sowohl an hinreichend Know-How als auch an Kapazitäten/Unternehmen fehlt. Während des Betriebes sind dann auch besonders viele logistische Fragen (Transporte) zu klären, um zuverlässig das Endlager mit konditionierten Abfällen zu versorgen.

Politik/Gesellschaft: Die Option K4 bietet die Möglichkeit, das Prinzip der "Lastenteilung" umzusetzen, wohlwissend, dass dabei bisherige ZL-Standorte eine zusätzliche Last vorübergehend zu tragen hätten; aber eben nicht nur eine Region/ein Ort. Nachteilig ist jedoch dabei sowohl die Vielzahl an neuen kerntechnischen Anlagen als auch an zusätzlichen Transporten mit hochradioaktiven Stoffen. Dies bedarf einer sorgfältigen Abwägung.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Im Vergleich mit den Optionen K1 bis K3 ist in dieser Option nicht vorgesehen, sukzessive die Zwischenlager zu leeren und stillzulegen, sondern diese während der Betriebszeit des Endlagers weiter zu nutzen.

Eingangslager: Ein Eingangslager für TLB kann bei dieser Option entfallen. Am Endlagerstandort würde dann ein gegebenenfalls etwas größerer Empfangsbereich am Endlager genügen. Die Anlieferung von konditionierten Endlagergebinden würde direkt von den Konditionierungsanlagen an den Zwischenlagern erfolgen. Ggf. kann auch ein Eingangslager für ELB (siehe Kapitel 2.3.3. 2 und 2.3.3.6) sinnvoll sein. Es bedarf in jedem Fall einer gut abgestimmten Transportlogistik einschließlich des zugehörigen Genehmigungs-Managements.

Endlager: Der Betrieb des Endlagers ist stark abhängig von zuverlässigen, technischen und administrativen Prozessen bei der Anlieferung konditionierter Gebinde aus den Konditionierungsanlagen an den Standortzwischenlagern.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die größte Ungewissheit liegt in der Frage, ob die Verteilung der kerntechnischen Anlagen auf mehr als ein Dutzend Standorte in Deutschland gesellschaftlich akzeptiert wird. Dabei spielt insbesondere das Argument eine Rolle, dass politisch gewollt ist und auch so kommuniziert wurde, dass sowohl die Zahl der Transporte als auch die Anzahl der kerntechnischen Anlagen zu minimieren sei. Die Zwischenlagerstandortgemeinden drängen seit Langem auf den Abtransport der hochradioaktiven Abfälle und den Rückbau der leeren Zwischenlager. Eine dezentrale Organisation der Konditionierung der hochradioaktiven Abfälle genau an diesen Standorten stände diesem Ziel vollständig entgegen.

2.4.3.5. Mehrere Konditionierungsanlagen (3); Getrennte Konditionierungsanlagen für die verschiedenen Abfallarten an unterschiedlichen Standorten (Option K5)

Kurzbeschreibung der Option

Eine fünfte Option unterstellt, dass für jede Kategorie von hochradioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen, die zu konditionieren ist, eine eigenständige Anlage an jeweils unterschiedlichem Standort errichtet wird. Auch solche Anlagen sind aus technischer Sicht realisierbar. Diese Trennung nach Abfallklassen (1x für BE aus Leistungsreaktoren (DWR, SWR, WWER), 1x für BE aus Forschungs- und Prototyp-Reaktoren (z. B.: AVR-BE), 1x für WA-Abfälle) könnte die Prozesse in der Anlage vereinfachen; jedoch bedeutet es auch, dass mindestens drei solcher Anlagen zu planen, zu genehmigen, zu errichten und zu betreiben wären. Insofern kann man á priori schon feststellen, dass diese Option wesentlich teurer wird als eine einzige zentrale Anlage. Zudem bedeutet diese Trennung, dass die Abfallströme zur Konditionierungsanlage und von dort zum Eingangslager (für ELB) respektive Endlager komplexer sind, was einen erheblichen Mehraufwand in der Organisation nach sich zieht. Auch für diese Anlagen würde voraussichtlich ein Auswahlprozess für den Standort durchzuführen sein.

Technische Aspekte

Die Planung, Errichtung, Inbetriebnahme, Betrieb und spätere Stilllegung von drei Konditionierungsanlagen an unterschiedlichen Standorten erscheint aus technischer Sicht machbar, gegebenenfalls
sogar jeweils einfacher zu realisieren wegen der klaren Zuordnung von Abfallklassen. Es handelt
sich dann wie in der Option K4 um jeweils eigenständige kerntechnische Anlagen, für die separate
Genehmigungen einzuholen sind. Als Nachteil dieser Option ist auch hier der Transport von hochradioaktiven Abfällen konditionierter Endlagergebinde in dafür noch zu entwickelnden Transportbehältern von den dezentralen Konditionierungsanlagen zum Endlager anzusehen. Für die Transporte
auf öffentlichen Verkehrswegen sind zusätzliche Genehmigungen erforderlich.

Ökonomische Aspekte

Ökonomisch betrachtet ist die Errichtung und der Betrieb von drei Konditionierungsanlagen an jeweils unterschiedlichen Standorten aufwändiger als eine zentrale Anlage. Neben den mindestens 3-fach höheren Baukosten (z. B. Heiße Zellen in allen Anlagen inkl. Manipulatoren und Schleusen, etc.) sind auch die Genehmigungsverfahren für alle Anlagen ein enormer Kostenfaktor. Ein zusätzlicher finanzieller Aufwand ist auch für die Transporte zu erwarten. Dies wäre im Rahmen von Konzeptplanungen aber noch genauer zu untersuchen und mit Zahlen abzuschätzen.

Administrative Aspekte

In dieser Option erscheint der Aufwand für administrative Prozesse hinsichtlich Komplexität zwischen dem für die zentralen Anlagen und der an den Standortzwischenlagern zu liegen. Die Abwicklung von drei separaten Genehmigungs- und Ausschreibungsverfahren für die jeweilige Konditionierungsanlage ist aufwändiger als für eine einzelne Anlage oder eine kombinierte Lösung (Option K2), aber voraussichtlich weniger aufwändig als für die an den Zwischenlagerstandorten. Der höchste Koordinierungsaufwand wird in der Steuerung der Zulieferung der "sortenreinen" radioaktiven



Abfälle zu den Konditionierungsanlagen und in der Abruflogistik der konditionierten Endlagergebinde für das Endlager gesehen.

Plausibilität der realen Umsetzung

Hier gilt in etwa die gleiche Einschätzung wie für Option K4. Die Umsetzung dieser Option wird als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, weil sie zwar technisch realisierbar erscheint, aber ökonomisch und administrativ eine Menge an Nachteilen gegenüber einer Einzelanlage (Option K1 und K3) oder einer kombinierten Lösung (Option K2) darstellt. Dazu zählen neben den relativ zu den anderen Varianten sehr hohen Bau- und Beschaffungskosten auch Aufwände für Transportgenehmigungen. Es bleibt zu klären, ob der gesellschaftliche Vorteil einer räumlichen Trennung der kerntechnischen Anlagen, die wirtschaftlichen und vor allem die zusätzlichen Transporte auf öffentlichen Wegen kompensieren kann.

Einflussfaktoren

Zeit: Bei der Planung, Genehmigung und Errichtung von drei dezentralen Konditionierungsanlagen an unterschiedlichen Standorten wird man insgesamt deutlich mehr Zeit benötigen als bei einer zentralen Anlage – egal ob auf dem Endlagergelände oder davon entfernt. Eine Parallelisierung der Arbeiten an den drei Standorten erscheint realistisch, auch wenn es dazu in Deutschland sowohl an hinreichend Know-How als auch an Kapazitäten/Unternehmen in großem Umfang fehlt. Während des Betriebes sind, wie auch bei Option K4, viele logistische Fragen (Transporte) zu klären, um zuverlässig das Endlager mit konditionierten Abfällen zu versorgen.

Politik/Gesellschaft: Die Option K5 bietet wie die Optionen K3 und K4 die Möglichkeit, das Prinzip der "Lastenteilung" umzusetzen. Nachteilig ist jedoch dabei sowohl die Errichtung von drei neuen kerntechnischen Anlagen zusätzlich zum Endlager als auch die Vielzahl an zusätzlichen Transporten mit radioaktiven Stoffen. Dies bedarf einer sorgfältigen Abwägung.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: Im Vergleich mit Option K3 sind die technischen und administrativen Voraussetzungen für die sukzessive Entladung und Stilllegung der Zwischenlager ähnlich, nur dass die TLB an drei Standorte zu liefern sind. Es bedarf auch hier einer gut abgestimmtem Transportlogistik einschließlich des zugehörigen Genehmigungs-Managements.

Eingangslager: Ein Eingangslager für TLB kann bei dieser Option entfallen. Am Endlagerstandort wäre ein Eingangslager für ELB sinnvoll. Es bedarf in jedem Fall einer gut abgestimmten Transportlogistik einschließlich des zugehörigen Genehmigungs-Managements.

Endlager: Der Betrieb des Endlagers ist stark abhängig von zuverlässigen, technischen und administrativen Prozessen bei der Anlieferung konditionierter Gebinde aus den drei Konditionierungsanlagen. Die Abruflogistik scheint etwas einfacher zu sein als bei den anderen Optionen, weil vom Endlager voraussichtlich auch Einlagerungsbereiche nur mit einer Art von Abfall jeweils beladen wird.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die größte Ungewissheit liegt in der Frage, ob die Verteilung der kerntechnischen Anlagen auf drei zusätzliche Standorte zum Endlagerstandort in Deutschland gesellschaftlich akzeptiert wird. Dabei spielt insbesondere das Argument eine Rolle, dass politisch gewollt ist und auch so kommuniziert wurde, dass sowohl die Zahl der Transporte als auch die Anzahl der kerntechnischen Anlagen zu minimieren sei.

2.5. Endlager

Nach dem Abschlussbericht der Endlagerkommission (2016) wird der Begriff Endlager wie folgt definiert:

"Als Endlager wird der Ort bezeichnet, an dem eine dauerhafte Lagerung radioaktiver Abfälle erfolgt. In Deutschland gibt es bisher kein Endlager für hoch radioaktiven Abfall. Ziel des Standortauswahlverfahrens gemäß StandAG ist es, einen Standort für den Bau eines solchen Endlagers zu finden."

Im Sinne des § 2 StandAG ist Endlagerung "die Einlagerung radioaktiver Abfälle in eine Anlage des Bundes nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes (Endlager), wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist."

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens wird auch die Möglichkeit der Endlagerung schwachund mittelradioaktiver Abfälle am Standort des Endlagers für hochradioaktive Abfälle geprüft. Da in einem solchen Fall gemäß § 21 Abs. 2 EndlSiAnfV (2020) "ein separates Endlagerbergwerk aufzufahren" ist und "zwischen der technischen Infrastruktur dieses Endlagerbergwerkes und der technischen Infrastruktur des Endlagerbergwerkes für hochradioaktive Abfälle [...] keine sicherheitsrelevanten wechselseitigen Abhängigkeiten oder nachteiligen Beeinflussungen bestehen" dürfen, werden mögliche Synergien oder Einflüsse dieser Abfälle auf den Entsorgungsschritt Endlagerung im Folgenden nicht betrachtet.

2.5.1. Aufgaben des Endlagers

Das Endlager dient primär dazu, die dort angelieferten hochradioaktiven Abfälle dauerhaft zu lagern und "...den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt" (StandAG 2017) zu gewährleisten. Es besteht weltweit Konsens, dass die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle im tiefen geologischen Untergrund die beste Lösung dafür darstellt. Zu diesem Zweck werden entsprechende Endlagerbergwerke in unterschiedlichen Wirtsgesteinen konzipiert, geplant oder schon gebaut (Finnland seit 2015). In Deutschland werden gemäß StandAG von 2017 drei Gesteinsarten als potenzielle Wirtsgesteine betrachtet: Kristallingestein, Tonstein und Steinsalz.

Zuständig für Standortauswahl, Planung, Bau, Betrieb und Stilllegung des Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland ist die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE). Für die Genehmigung des Endlagers ist das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) im Geschäftsbereich des BMUV zuständig.

2.5.2. Komponenten eines Endlagers

Zu einem Endlager gehören im Wesentlichen drei Bereiche, die geplant, gebaut, betrieben und stillgelegt werden müssen, um die Aufgabe der Endlagerung umzusetzen:

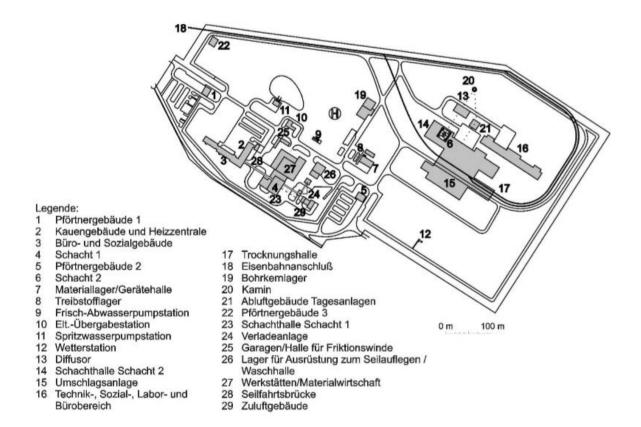
- die Tagesanlagen (übertägige Gebäude und Einrichtungen),
- der Zugang von Übertage nach Untertage (Schächte und / oder Rampen),
- das Endlagerbergwerk zur dauerhaften Aufnahme der Endlagergebinde.



Komponenten der Tagesanlagen sind:

- Pförtnergebäude
- Technik-, Büro- und Sozialgebäude
- Material- und Treibstofflager
- Werkstätten
- Schachthallen und Schachttürme
- Abluftgebäude
- Anschlüsse für Straße und Bahn
- Infrastrukturräume (Werkstätten, Lager etc.)
- Eingangshalle und Empfangsbereich für angelieferte Endlagergebinde (Eingangskontrolle)
- Umladebereich: Umladung der per LKW oder Bahn angelieferten Endlagergebinde auf innerbetriebliche Transportmittel
- Heiße Zellen: für den Fall einer Reparatur, etc.
- Kontroll- und Überwachungseinrichtungen für kerntechnische Bereiche
- Pufferhalle
 - o zur temporären Lagerung von Endlagergebinden (befüllter Behälter) z. B. im Falle von Störungen im Betriebsablauf oder zur Lagerung vor einer erforderlichen Reparatur/Nachbesserung von Gebinden.
 - o zur temporären Lagerung von Endlagergebinden (befüllter Behälter) z. B. im Falle einer angeordneten Rückholung
- etc.

Abbildung 2-1: Beispiel für Tagesanlagen eines HAW-Endlagers



Quelle: GRS – 272; ISBN 978-3-939355-48-9: Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Juli 2011

Komponenten für den Zugang nach Untertage sind:

- Schacht-/Rampenhalle mit Einlagerungsschacht oder Zugang zur Rampe
- Schachtförderanlagen (Transport von Personal, Mannschaft und Endlagergebinde)
- Frischwetter- und Mannschaftsschacht
- Abwetter- und Gebindetransportschacht
- Lüfteranlage
- Ver- und Entsorgungsleitungen für Wasser, Strom, Druckluft, Monitoring, etc.

Komponenten des Endlagerbergwerkes sind:

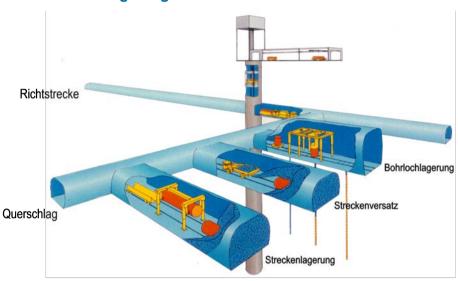
- Infrastrukturräume (Füllörter, Werkstätten, Lagerräume, Maschinenpark für bergmännische Arbeiten, Maschinenpark für Transport und Einlagerung von Endlagergebinden.)
- Bunker (für Abraummaterial, Versatzmaterial, etc.)
- Richt- und Transportstrecken
- Querschläge/Zugänge zu Einlagerungsbereichen



₩ Öko-Institut e.V. **WERA**

- Einlagerungsstrecken respektive Überfahrungsstrecken über Einlagerungsbohrungen
- Maschinen und Einrichtungen zum Transport und zur Einlagerung von Endlagergebinden
- Maschinen und Einrichtungen zum Versetzen der Grubenräume und zum Verschluss von Bohrlöchern und Strecken
- Kontroll- und Überwachungseinrichtungen für kerntechnische Bereiche
- Monitoringsysteme
- etc.

Abbildung 2-2: Schematische Zeichnung eines Endlagerkonzeptes in Salz mit übertägigen Anlagen, Gebindetransportschacht und untertägigen Transport- und Einlagerungsstrecken



Quelle: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Synthesebericht (TEC-29-2008-AB), DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2011

2.5.3. Beschreibung möglicher Optionen für ein Endlager

Mit dem Neustart des Standortauswahlverfahrens für ein HAW-Endlager kommen in Deutschland drei Wirtsgesteine in Betracht. Da es bisher zum Wirtsgestein, zum Endlagerbehälter und zum Einlagerungskonzept keine Festlegung gibt, gäbe es theoretisch mehr als 30 zu betrachtende Endlagerkonzepte. Im Vorhaben WERA wird angenommen, dass die Berücksichtigung von je 2 Einlagerungsvarianten pro Wirtsgestein, also 6 Endlagerkonzepte, ausreicht, um Wechselwirkungen mit den anderen Entsorgungsschritten wie Eingangslager und Konditionierungsanlage zu veranschaulichen. Zu diesem Zweck wird der aktuelle Stand zu Endlagerkonzeptentwicklungen durch das laufende FuE-Vorhaben RESUS der BGE miteinbezogen und in den folgenden Kurzbeschreibungen zusammengefasst. Die thermische Auslegungshöchsttemperatur ist gemäß StandAG für alle Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte aus Vorsorgegründen auf 100° Celsius festgelegt worden, solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind" (§ 27 Abs. 4StandAG 2017).

Betrachtete Endlagerkonzepte:

Option 1: Tonstein; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem T 1)

- Option 2: Tonstein; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem T 2)
- Option 3: Steinsalz; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem S 1)
- Option 4: Steinsalz; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem S 2)
- Option 5: Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem K 1)
- Option 6: Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (RESUS; Endlagersystem K 4)

2.5.3.1. Tonstein; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E1)

Kurzbeschreibung der Optionen

Im FuE-Vorhaben RESUS der BGE (Referenz: RESUS; Endlagersystem T1 (Alfarra et al. 2020d)) wird im sogenannten Endlagersystem T1 die Einlagerung von jeweils drei nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern in vertikalen - wegen der Rückholungsoption verrohrten - Bohrlöchern in einer mächtigen Tonformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100 °C an der Behälteroberfläche vorgesehen. Die Einlagerungssohle des durch zwei Schächte erschlossenen und betriebenen Endlagerbergwerkes befindet sich dabei 700 m u. GOK.

Als Endlagerbehälter werden sogenannte Brennstabkokillen (BSK) für die nachfolgend aufgeführten Abfallarten gewählt und in vertikalen Bohrlöchern eingelagert;

- 11.159 BSK (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 1,9 Brennelementen pro BSK),
- 1.868 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: zwei CSD-V pro BSK),
- 1.415 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: drei CSD-B oder CSD-C pro BSK).

Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

- 530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs¹⁴ (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und
- 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelement-Strukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Alle Grubenräume - auch die Einlagerungsstrecken - werden mit stützendem Betonausbau und Gebirgsankern langfristig gesichert, um Arbeits- und Betriebssicherheit jederzeit während des auf einige Jahrzehnte angelegten Endlagerbetriebs zu gewährleisten. Arteigenes Material aus der Streckenauffahrung wird zusammen mit quellfähigem Tonmaterial (z. B. Bentonit) als Versatzmaterial für die Strecken verwendet. Für die Verschlüsse der Einlagerungsbohrlöcher und für die Streckenverschlüsse in der Nähe der beiden Schächte werden als Dichtelement Bentonitbaukörper vorgesehen.

^{14,} Die Entwicklung von Lösungen für die bereits in kleinen CASTOR-Behältern zwischengelagerten BE aus Versuchs-Prototypkernkraftwerken ist derzeit Gegenstand von F&E.



Technische Aspekte

Beim Endlager handelt es sich um eine eigenständige technisch/kerntechnische Anlage mit den Funktionen zur Annahme, Einlagerung und ggf. Rückholung von Endlagergebinden. Für die gesamte Anlage des Endlagers ist eine Genehmigung einzuholen, ggf. für einzelne Phasen der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung einschließlich Verschluss. Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und Verschluss des Endlagers werden als technisch machbar eingeschätzt. Kompetenz und Erfahrung liegen sowohl für übertägige Gebäude und Einrichtungen als auch grundsätzlich für Errichtung, Betrieb und inzwischen auch Verschluss von Bergwerken vor. Für Bergwerke in Tonstein ist der Erfahrungsschatz jedoch begrenzt; dort kann man aber auf Erfahrungen im Tunnelbau zurückgreifen und auf erste Erfahrungen im URL Bure der Andra. Die Anlieferung von Endlagergebinden mit hochradioaktiven Abfällen am Endlager kann entweder von der auf demselben Gelände errichteten Konditionierungsanlage oder von einer außerhalb des Geländes errichteten Konditionierungsanlage erfolgen. Im ersten Fall erübrigen sich ggf. erforderliche Genehmigungen für Transporte.

Die Transport- und Einlagerungstechnik ist zu entwickeln und zu erproben. Auf Ergebnisse und Erfahrungen von Demonstrationsversuchen zur Einlagerung von sogenannten Brennstabkokillen kann dabei zurückgegriffen werden (Filbert et al. 2010).

Ein besonderer Aspekt bei einem Endlager in Tonstein ist der erforderliche stützende Ausbau aller untertägigen Grubenräume (Füllörter, Werkstätten, Lagerräume aber auch Transport und Einlagerungsstrecken). Dafür kommt wegen der langen über mehrere Jahrzehnte dauernden Nutzung (wartungsfrei) nur ein massiver Betonausbau in Frage. Erfahrungen dafür liegen im Tunnelbau vor oder auch bei der Errichtung des Endlagers Konrad.

Ökonomische Aspekte

Bei der ökonomischen Betrachtung für ein Endlager wird im Vorhaben WERA angenommen, dass sowohl die übertägigen Gebäude und Einrichtungen als auch die Schächte für den Zugang zum Endlagerbergwerk für alle drei Wirtsgesteine ähnlichen Aufwand erfordern.

Ebenso werden die Aufwendungen für die Entwicklung und Erprobung der technischen Komponenten wie Behälter, Transportfahrzeuge und -einrichtungen sowie Einlagerungsmaschinen in vergleichbarer Größenordnung erwartet. Differenzen werden voraussichtlich erst bei konkreten Planungen im Anschluss an die Konzeptplanung sichtbar werden.

Einen wesentlichen ökonomischen Unterschied, den man nur bei weiteren Planungen quantifizieren kann, stellt die Art und Verarbeitung des Versatzmaterials dar. Während bei einem Endlager in Salz das bei der Streckenauffahrung gewonnene Salzhaufwerk als arteigenes Versatzmaterial genutzt wird, sind bei Endlagerbergwerken in Tonstein und auch im Kristallin Bentonitmaterialien als Versatz oder Zusatz zum Versatz vorgesehen. Dieses Material, das in der Beschaffung und Herstellung einen hohen Aufwand erfordert, wird entweder als vorkompaktierte Pellets oder in kleineren Körnungen hergestellt und zusammen als ein Gemisch mit einer möglichst hohen Anfangsdichte eingesetzt, damit die Abdichtfunktion durch Quellen bei Wasserzutritt auch erreicht wird. Bei weiteren Planungen ist auch zu prüfen, inwieweit Bentonit langfristig (Endlagerbeginn nicht vor 2050 und über mehrere Jahrzehnte) national oder auch weltweit in ausreichender Menge und in hinreichend guter Qualität bereitgestellt werden kann.

WERA "Öko-Institut e.V.

Verschlüsse von Strecken und Schächten hingegen werden wieder sehr ähnlich sein in allen drei Wirtsgesteinen – einzelne Bauteile angepasst an örtliche Geologie – und damit ökonomisch nur geringe Unterschied aufweisen.

Für Endlager in Tongestein schlägt wirtschaftlich jedoch der unbedingt notwendige massive stützende Betonausbau für alle untertägigen Grubenbaue zu Buche. Für die Wirtsgesteine Steinsalz und Kristallin kann darauf grundsätzlich verzichtet werden. Im Rahmen weiterer Planungen, die über bisherige generische Konzepte hinaus gehen, lassen sich auch quantifizierte Aussagen dazu ermitteln.

Administrative Aspekte

Die Leistungsfähigkeit des Endlagers, d. h. die Anzahl an Endlagergebinden, die pro Tag angenommen, nach Untertage transportiert und eingelagert werden, bestimmt im Wesentlichen auch die Kapazitäten der Konditionierungsanlage. In generischen Studien (z. B. ERATO (Pöhler et al. 2010)) wurde ermittelt, dass bei einem Zweischichtbetrieb ein Gebinde pro Tag eingelagert werden kann. Insofern ist es für das Endlager weniger relevant, wo eine Konditionierungsanlage errichtet wird; entscheidend ist eine kontinuierliche Anlieferung am Endlager.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die technische Machbarkeit des vor beschrieben Endlagerkonzeptes wurde im Rahmen des FuE-Vorhaben ERATO (Pöhler et al. 2010) planerisch gezeigt und die Transport- und die Einlagerungstechnik für BSK (geplant für ein Endlager in Salz) erfolgreich demonstriert (Filbert et al. 2010). Es muss jedoch noch geprüft werden, ob mit Blick auf die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) Anforderungen zu Rückholbarkeit und Bergung vollständig erfüllt werden können. Eine solche Bewertung könnte zu einem etwas anderen Behälterkonzept führen, stellt die grundsätzliche Machbarkeit der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung eines Endlagers in Tonstein jedoch nicht in Frage.

Einflussfaktoren

Zeit: zusätzlich zu dem wahrscheinlich hohen Zeitaufwand für das Genehmigungsverfahren für das Endlager kommt bei dem skizzierten Konzept des Endlagerbergwerkes in Tonstein ein erheblicher Zeitaufwand für den massiven stützenden Ausbau aller Grubenräume hinzu. Darüber hinaus ist der Betrieb des Endlagers direkt abhängig von einer kontinuierlichen Anlieferung von qualifizierten Endlagergebinden.

Politik/Gesellschaft: Die Option E1 ist im Einklang mit politischen Vorgaben (NaPro); verlangt aber von der Gesellschaft die Akzeptanz/Einwilligung eines auf mehrere Jahrzehnte zu betreibenden Endlagerbergwerkes (kerntechnische Anlage).

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten

Zwischenlager: keine direkten Wechselwirkungen.

Konditionierungsanlage: Die Leistungsfähigkeit des Endlagers, d. h. die Anzahl an Endlagergebinden, die pro Tag angenommen, nach Untertage transportiert und eingelagert werden, hängt von einer kontinuierlichen Anlieferung von Endlagergebinden ab. Da hat eine Konditionierungsanlage, die mit auf dem Endlagergelände errichtet wird, deutlichere Vorteile gegenüber einer Anlage, die



außerhalb steht. Es wären nur kurze Wege (nur innerbetriebliche Transporte) auch im Falle einer möglichen Rückholung zu berücksichtigen.

Eingangslager: Ein Pufferlager für ELB bringt zusätzliche Sicherheit für die Verstetigung des Einlagerungsbetriebs.

Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die größte Ungewissheit liegt in der fehlenden Entscheidung zum Behälterkonzept. Der Behälter bestimmt maßgeblich die Transport- und Einlagerungstechnik sowie -prozesse und damit auch die Auslegung des Endlagerbergwerkes, die sich an dem dafür entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzept orientiert. Darüber hinaus hat die Entscheidung zum Endlagerbehälter direkte Auswirkungen auf die Auslegung der Konditionierungsanlage.

Möglichkeit der Rückholung der eingelagerten Endlagergebinde: Dazu gibt es Konzeptstudien, aber keinen Stand der Technik. Dieser ist noch zu erarbeiten.

2.5.3.2. Tonstein; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E2)

Kurzbeschreibung der Option

Im FuE-Vorhaben RESUS der BGE (Alfarra et al. 2020b) wird im sogenannten Endlagersystem T2 die Einlagerung von selbst abschirmenden Endlagerbehältern in Strecken in einer geringmächtigen Tonformation vorgesehen. Die Einlagerungssohle befindet sich bei 700 m u. GOK.

Für die Endlagerung dieser Abfälle in horizontalen Strecken werden für die Abfalltypen folgende Endlagerbehälter angenommen:

- 9.637 POLLUX®-Behälter (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 2,2 Brennelementen pro POLLUX®-Behälter)
- 1.245 POLLUX®-Behältern (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: zwei CSD-V pro POLLUX®-Behältern) und
- 472 POLLUX®-9-Behälter (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: neun CSD-B/C pro POLLUX®-Behälter).

Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

- 530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und
- 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelementstrukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Technische Aspekte

Für die Option E2 gelten nahezu dieselben technischen Randbedingungen wie für Option E1. Der Unterschied liegt in der geringeren Mächtigkeit der Tonformation (100m) begründet, die auch zu dem Einlagerungskonzept von Endlagerbehältern in horizontalen Strecken führt.

Ökonomische Aspekte

Für die Option E2 gelten auch hier nahezu dieselben ökonomischen Aspekte wie für Option E1. Das benötigte Grubengebäude zeichnet sich dadurch aus, dass die Länge der Strecken insgesamt etwa nur halb so groß ist wie beim Konzept der Bohrlochlagerung (Pöhler et al. 2010). Damit einhergehend reduziert sich – zwar nicht linear – auch der Aufwand für Auffahrung und spätere Verfüllung der Grubenräume.

Administrative Aspekte

Für die Option E2 gelten auch hier nahezu dieselben administrativen Aspekte wie für Option E1.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die technische Machbarkeit der Option E2 wurde ebenfalls im Rahmen des FuE-Vorhaben ERATO (Pöhler et al. 2010) planerisch gezeigt und die Transport- und die Einlagerungstechnik von POL-LUX® - Behältern bereits Anfang der 1990er Jahre erfolgreich demonstriert (Engelmann et al. 1995). Es muss jedoch geprüft werden, ob mit Blick auf die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) Anforderungen zu Rückholbarkeit und Bergung vollständig erfüllt werden können. Eine solche Bewertung könnte zu einem etwas anderen Behälterkonzept führen, stellt die grundsätzliche Machbarkeit der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung eines Endlagers in Tonstein jedoch nicht in Frage.

Einflussfaktoren, Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten, Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Für die Einflussfaktoren Zeit, Politik und Gesellschaft, die Wechselwirkungen sowie die Ungewissheiten gelten dieselben Aspekte wie für Option E1.

2.5.3.3. Steinsalz; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E3)

Kurzbeschreibung der Option

Im FuE-Vorhaben RESUS der BGE wird im sogenannten Endlagersystem S 2 die Einlagerung von nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern in bis zu 300 m tiefen vertikalen, wegen der Rückholungsoption verrohrten, Bohrlöchern in einer steil lagernden Steinsalzformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100°C an der Behälteroberfläche vorgesehen (Bertrams et al. 2020c). Die Einlagerungssohle des durch zwei Schächte erschlossenen und betriebenen Endlagerbergwerkes befindet sich bei 900 m u. GOK.

Als Endlagerbehälter werden sogenannte Brennstabkokillen (BSK) für die nachfolgend aufgeführten Abfallarten gewählt und in vertikalen Bohrlöchern eingelagert:

- 8.836 BSK (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 2,4 Brennelementen pro BSK)
- 1.244 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-V pro BSK)
- 1.415 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-B oder CSD-C pro BSK)



Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

 530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und

 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelementstrukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Alle Grubenräume – auch die Einlagerungsstrecken – können ohne jeglichen Ausbau hergestellt und langfristig sicher betrieben werden. Arbeits- und Betriebssicherheit ist jederzeit während des auf einige Jahrzehnte angelegten Endlagerbetriebs gewährleistet. Der Ringraum in einem Bohrloch und der Raum bis zur vorgesehenen Lage der nächsten BSK werden direkt nach der Einlagerung einer BSK wird mit Sand verfüllt. Über die oberste BSK eines Bohrloches wird 10 m Sand eingefüllt, darüber kommt ein Deckel aus Stahl. Der Bohrlochkeller wird mit einem geeigneten noch zu spezifizierenden Baustoff verfüllt. Als Versatzmaterial für die Strecken wird arteigenes Material aus der Streckenauffahrung ohne jeglichen Zusatz verwendet.

Technische Aspekte

Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und Verschluss des Endlagers werden als technisch machbar eingeschätzt. Kompetenz und Erfahrung liegen sowohl für übertägige Gebäude und Einrichtungen als auch grundsätzlich für Errichtung, Betrieb und inzwischen auch Verschluss von Bergwerken vor. Für Bergwerke in Steinsalz ist der Erfahrungsschatz enorm; seit mehr als 150 Jahren wird Salzbergbau erfolgreich und sicher in der ganzen Welt betrieben. Die Anlieferung von Endlagergebinden am Endlager kann entweder von der auf demselben Gelände errichteten Konditionierungsanlage oder von einer außerhalb des Geländes errichteten Konditionierungsanlage erfolgen. Im ersten Fall erübrigen sich ggf. erforderliche Genehmigungen für Transporte.

Die Transport- und Einlagerungstechnik entsprechen nicht dem Stand der Technik und sind zu entwickeln und zu erproben. Auf Ergebnisse und Erfahrungen von Demonstrationsversuchen zur Einlagerung von sogenannten Brennstabkokillen kann dabei zurückgegriffen werden (Filbert et al. 2010).

Ökonomische Aspekte

Bei der ökonomischen Betrachtung der Komponente Endlager wird im Vorhaben WERA angenommen, dass sowohl die übertägigen Gebäude und Einrichtungen als auch die Schächte für den Zugang zum Endlagerbergwerk für alle drei Wirtsgesteine ähnlichen Aufwand erfordern. Da die Beladung des Endlagergebindes durch die vom Gesetzgeber vorgegebene max. Temperatur von 100°C an der Gebindeoberfläche bestimmt wird, ergeben sich für Endlagerbergwerke in verschiedenen Wirtsgesteinen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und in unterschiedlicher Teufe Differenzen in der Anzahl an Endlagergebinden (Differenz: bis 3000 Gebinde). Damit sind nicht nur die Kosten für Behälterbeschaffung und Konditionierung deutlich unterschiedlich, sondern auch für die betrieblichen Aufwände für Transport und Einlagerung. Seriös quantifizierbar sind solche Unterschiede erst bei detaillierterer Planung.

Demgegenüber werden die Aufwendungen für die Entwicklung und Erprobung der technischen Komponenten wie Behälter, Transportfahrzeuge und -einrichtungen sowie Einlagerungsmaschinen in vergleichbarer Größenordnung erwartet. Differenzen werden voraussichtlich erst bei konkreten Planungen im Anschluss an die Konzeptplanung sichtbar werden.

WERA

WERA

Die ökonomischen Unterschiede bei Art und Verarbeitung des Versatzmaterials sowie bei Verschlüssen von Strecken und Schächten sind vergleichbar mit Option E1.

Administrative Aspekte

Die administrativen Aspekte sind die gleichen wie bei Option E1.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die technische Machbarkeit des vor beschrieben Endlagerkonzeptes wurde im Rahmen verschiedener FuE-Vorhaben planerisch gezeigt, z. B. im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (Bollingerfehr et al. 2011). Mehr als 150 Jahre Salzbergbau belegen, dass Bergwerke in Steinsalz über Jahrzehnte sicher betrieben werden können.

Einflussfaktoren

Zeit: zusätzlich zu dem wahrscheinlich hohen Zeitaufwand für das Genehmigungsverfahren für das Endlager ist bei dem skizzierten Konzept des Endlagerbergwerkes in Steinsalz kein unverhältnismäßiger Zeitaufwand für den Bau, Betrieb und die Stilllegung zu erwarten. Der Betrieb des Endlagers ist wie alle anderen Optionen auch direkt abhängig von einer kontinuierlichen Anlieferung von qualifizierten Endlagergebinden.

Politik/Gesellschaft: siehe Option E1.

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten, Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Für die Wechselwirkungen sowie die Ungewissheiten gelten dieselben Aspekte wie für Option E1.

2.5.3.4. Steinsalz; horizontale Einlagerung von Endlagergebinden (Option E4)

Kurzbeschreibung der Option

Im FuE-Vorhaben RESUS der BGE wird im sogenannten Endlagersystem S1 die Einlagerung von selbst abschirmenden Endlagerbehältern in Strecken in einer flach lagernden Salzformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100 °C an der Behälteroberfläche vorgesehen (Bertrams et al. 2020a). Die Einlagerungssohle befindet sich bei 810 m u. GOK.

Für die Endlagerung dieser Abfälle in horizontalen Strecken bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden für die Abfalltypen folgende Endlagerbehälter angenommen:

- 5300 POLLUX®-Behälter (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 4 Brennelementen pro POLLUX®-Behälter)
- 1.245 POLLUX®-Behältern (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: drei CSD-V pro POLLUX®-Behältern) und
- 472 POLLUX®-9-Behälter (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: neun CSD-B/C pro POLLUX®-Behälter)

Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und



 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelement-strukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Alle Grubenräume - auch die Einlagerungsstrecken - können ohne jeglichen Ausbau hergestellt und langfristig sicher betrieben werden. Arbeits- und Betriebssicherheit ist jederzeit während des auf einige Jahrzehnte angelegten Endlagerbetriebs gewährleistet. Der Zwischenraum zwischen eingelagertem POLLUX® und der Streckenkontur wird mit Salzgrus versetzt. Salzgrus ist arteigenes Material aus der Streckenauffahrung ohne jeglichen Zusatz. Die nicht mehr benötigten Strecken des Bergwerkes werden sukzessive ebenfalls mit Salzgrus versetzt.

Technische Aspekte, Ökonomische Aspekte, Administrative Aspekte, Plausibilität der realen Umsetzung, Einflussfaktoren, Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten, Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Für die Option E4 gelten im Wesentlichen dieselben Aspekte wie für Option E3.

2.5.3.5. Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (drei BSK in einem Bohrloch (Option E5))

Kurzbeschreibung der Option

Im FuE-Vorhaben RESUS der BGE wird im sogenannten Endlagersystem K1 die Einlagerung von nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern, sogenannten Brennstabkokillen (BSK), in vertikalen Bohrlöchern in einer Kristallinformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100 °C an der Behälteroberfläche vorgesehen (Becker et al. 2020a). Die Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems beruht im Wesentlichen auf technischen (Behälter) und geotechnischen Barrieren (Bohrlochverschluss und Streckenverschluss) sowie auf der Einschlusswirksamkeit von einzelnen Wirtsgesteinsbereichen (Konzept der multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche).

Als Endlagerbehälter werden sogenannte Brennstabkokillen (BSK) – hier kupferummantelt – für die nachfolgend aufgeführten Abfallarten gewählt und in vertikalen Bohrlöchern eingelagert;

- 10.602 BSK (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 2 Brennelementen pro BSK)
- 1.244 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-V pro BSK)
- 1.415 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-B oder CSD-C pro BSK)

Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

- 530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und
- 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelementstrukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K1 sieht die Einlagerung von drei BSK in einem Bohrloch vor. Der Ringraum zwischen den BSK und der Bohrlochwand sowie die Bereiche zwischen den BSK werden mit Sand verfüllt. Über dem Bohrloch wird ein Bohrlochverschluss installiert, der aus quellfähigen Tonmaterialen (z. B. Bentonit) besteht. Das Bohrloch wird mit einem Widerlager anschließend verschlossen. Nach der Einlagerung wird die Bohrlochüberfahrungsstrecke mit quellfähigen Tonmaterialen versetzt.

In Endlagerkonzepten in Steinsalz und Tonstein mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich (ewG) umschließen Richtstrecken die Einlagerungsfelder. Im hier vorliegend Konzept des multiplen ewG-Konzept liegen zwei Richtstrecken im Zentrum der Einlagerungsfelder. Von beiden Richtstrecken gehen wiederum (blinde) Bohrlochüberfahrungsstrecken senkrecht ab, um die Standorte der vertikalen Bohrlöcher für die Einlagerung der Abfälle zu erschließen. Die Teufe der Endlagersohle wird auf 600 m angenommen.

Technische Aspekte

Beim Endlager handelt sich um eine eigenständige technisch/kerntechnische Anlage mit den Funktionen zur Annahme, Einlagerung und ggf. Rückholung von Endlagergebinden. Für die gesamte Anlage des Endlagers ist eine Genehmigung einzuholen, ggf. für einzelne Phasen der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung einschließlich Verschluss. Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und Verschluss des Endlagers werden als technisch machbar eingeschätzt. Kompetenz und Erfahrung liegen sowohl für übertägige Gebäude und Einrichtungen als auch grundsätzlich für Errichtung, Betrieb und inzwischen auch Verschluss von Bergwerken vor. Für Bergwerke in Kristallin ist der Erfahrungsschatz jedoch begrenzt; dort kann man aber auf Erfahrungen im Tunnelbau zurückgreifen und auf erste Erfahrungen im URL ÄSPÖ der SKB (Schweden) und im URL ONKALO von Posiva (Finnland). Die Anlieferung von Endlagergebinden am Endlager kann entweder von der auf demselben Gelände errichteten Konditionierungsanlage oder von einer außerhalb des Geländes errichteten Konditionierungsanlage erfolgen. Im ersten Fall erübrigen sich ggf. erforderliche Genehmigungen für Transporte.

Die Transport- und Einlagerungstechnik ist noch zu entwickeln und zu erproben. Auf Ergebnisse und Erfahrungen von Demonstrationsversuchen zur Einlagerung von sogenannten Brennstabkokillen kann dabei zurückgegriffen werden (Filbert et al. 2010).

Ein besonderer Aspekt bei einem Endlager in Kristallin ist die Wasserhaltung. Am Beispiel des URL ÄSPÖ kann man das Wassermanagement für ein Bergwerk studieren. Ein Beispiel für trockenere Bereiche im Kristallin zeigt das URL ONKALO. Dort tritt bei der Auffahrung kaum Wasser aus dem Gestein. Es wird gesammelt, geleitet und nach Übertage gefördert. Beim vorliegenden Konzept des multiplen ewG im Vorhaben RESUS wird angenommen, dass zusammenhängende Gebirgsbereiche in der Teufe von 600m gefunden werden können, die homogen und nahezu trocken und kluftfrei sind.

Ökonomische Aspekte

Zur ökonomischen Betrachtung der übertägigen Gebäude und Einrichtungen als auch der Schächte für den Zugang zum Endlagerbergwerk siehe Option E3. Verschlüsse von Strecken und Schächten hingegen werden sehr ähnlich in allen drei Wirtsgesteinen sein – einzelne Bauteile angepasst an örtliche Geologie – und damit ökonomisch nur geringe Unterschied aufweisen.

Bezüglich der Art und Verarbeitung des Versatzmaterials siehe Option E1.

Für Endlager in Kristallin schlägt wirtschaftlich jedoch das Wassermanagement zu Buche. Für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein kann darauf grundsätzlich verzichtet werden. Im Rahmen weiterer Planungen, die über bisherige generische Konzepte hinausgehen, lassen sich auch quantifizierte Aussagen dazu ermitteln.



Administrative Aspekte

Zu den administrativen Aspekten siehe Option E1.

Plausibilität der realen Umsetzung

Die technische Machbarkeit des vor beschrieben Endlagerkonzeptes wurde durch die beiden skandinavischen Endlagerorganisationen SKB (Schweden) und Posiva (Finnland) gezeigt und in Deutschland planerisch auch im Rahmen der FuE-Vorhaben KONEKD (Bertrams et al. 2017) und CHRISTA (Jobmann et al. 2016). In Deutschland muss dabei noch geprüft werden, ob mit Blick auf die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) Anforderungen zu Rückholbarkeit und Bergung erfüllt werden können. Eine solche Bewertung könnte zu einem etwas anderen Behälterkonzept führen, stellt die grundsätzliche Machbarkeit der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung eines Endlagers in Kristallin jedoch nicht in Frage.

Einflussfaktoren

Zeit: Im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen kommt bei dem skizzierten Konzept des Endlagerbergwerkes in Kristallin ein erheblicher Zeitaufwand für das Wassermanagement hinzu.

Politik/Gesellschaft: siehe Option E1

Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten und Ungewissheiten bzw. offene Fragen

siehe Option E1.

Kristallin; vertikale Einlagerung von Endlagergebinden (kupferummantelten BSK 2.5.3.6. in einem Bohrloch (Option E6))

Kurzbeschreibung der Option

Im Endlagersystem K4 ist die Einlagerung von nicht selbst abschirmenden Endlagerbehältern, sogenannten Brennstabkokillen (BSK), in vertikalen Bohrlöchern in einer Kristallinformation bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100°C an der Behälteroberfläche vorgesehen (Becker et al. 2020c). Die Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems beruht im Wesentlichen auf dem Endlagerbehälter mit Kupferhülle und dem ihn umgebenden Bentonitbuffer¹⁵ (modifiziertes KBS-3 Konzept: mKBS-3). Die Teufe der Endlagersohle wird auf 600 m angenommen.

Für die Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C werden für die Abfalltypen folgende Endlagerbehälter angenommen:

 7.547 BSK (gefüllt mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO2 und 11 % MOX; Beladung: Brennstäbe aus 2,8 Brennelementen pro BSK)

¹⁵ Eine wörtliche deutsche Übersetzung der englischen Bezeichnung Bentonite-Buffer als Bentonit-Puffer erscheint wegen der sprachlichen Nähe zur Pufferung eines chemischen Millieus (pH-Pufferung) unglücklich, daher wird an dieser Stelle darauf verzichtet. Bentonit wird im englischen als Buffer bezeichnet, weil sein Einsatz die Freisetzung und den Transport radioaktiver Stoffe in verschiedener Hinsicht puffert, d. h. verzögert. Es handelt sich bei Bentonit um ein Lockersediment, das als Verwitterungsprodukt vulkanischer Aschen entsteht. Wesentlicher Bestandteil sind Tonminerale. Insbesondere ein hoher Anteil an Montmorillonit, einem Tonmineral, das durch interkristalline Quellfähigkeit im Kontakt mit Wasser eine Volumenvergrößerung erfährt und dadurch abdichtend wirkt, ist eine für den Einsatz von Bentonit im Deponiewesen oder bei geotechnischen Bauwerken gesuchte Eigenschaft.

 1.244 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-V pro BSK)

 1.415 BSK (gefüllt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung; Beladung: 3 CSD-B oder CSD-C pro BSK)

Darüber hinaus werden in horizontalen Strecken noch eingelagert:

- 530 CASTOR®-Behälter verschiedenen Typs (gefüllt mit ausgedienten Brennelementen aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren) und
- 2.620 Gussbehälter Typ II (MOSAIK®-Behälter) (gefüllt mit Brennelement-Strukturteilen ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren).

Das technische Endlagerkonzept für das Endlagersystem K4 sieht die Einlagerung einer kupferummantelten BSK in einem Bohrloch vor. Der Ringraum zwischen der BSK und der Bohrlochwand wird mit Bentonitscheiben bzw. -ringen als Buffer verfüllt. Das Bohrloch wird mit einem Widerlager anschließend verschlossen. Das Bohrloch ist über eine Bohrlochüberfahrungsstrecke erreichbar.

Technische, ökonomische und administrative Aspekte, Plausibilität der realen Umsetzung, Einflussfaktoren, Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten, Ungewissheiten bzw. offene Fragen

Die Option E6 unterscheidet sich bis auf die unterschiedlichen Einschlusskonzepte und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Anzahl der BSK, die mit Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in einem Mischungsverhältnis von 89 % UO₂ und 11 % MOX gefüllt sind, nicht wesentlich von Option E5.

2.6. Rückholung

Die Rückholung ist kein notwendiger eigener Entsorgungsschritt, sondern eine Maßnahme, die ggf. erforderlich werden könnte. Die Rückholung ist während der Betriebsphase der Endlagerung zu ermöglichen. Sie soll hier aber trotzdem behandelt werden, da sich durch die Anforderung zur befristet rückholbaren Einlagerung Auswirkungen auf die anderen Entsorgungsschritte ergeben können. Rückholung wird nicht so ausführlich behandelt wie die anderen Entsorgungsschritte, da eine Rückholung nicht beabsichtigt ist, sondern dadurch im Wesentlichen eine Möglichkeit zum Zugriff auf bereits eingelagerte Endlagergebinde geschaffen werden soll. Entsprechend definiert das StandAG (2017) Endlagerung auch als "die Einlagerung radioaktiver Abfälle [...], wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist". Die konkreten Gründe für eine Rückholung können entsprechend sehr unterschiedlich sein (z. B. Verwendung der Abfälle als Wertstoff, Endlagerstandort war ungeeignet – neue Standortsuche, Endlagerkonzept war ungeeignet – Änderung des Endlagerkonzepts).

2.6.1. Rahmenbedingungen für die Rückholung

Im AtG wird der Begriff der Rückholung bzw. Rückholbarkeit im Zusammenhang mit der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen nicht verwendet. Er findet aber Anwendung in § 57b, wo im Zusammenhang mit der Schachtanlage Asse II die "Rückholung radioaktiver Abfälle und hiermit im Zusammenhang stehender Maßnahmen" erwähnt werden.

Bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen ist nach § 1 StandAG die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers vorzusehen. Unter dem Begriff



"Rückholbarkeit" versteht das StandAG "die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase".

Gemäß § 10 der Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) muss das Sicherheitskonzept für das Endlager die Maßnahmen darstellen, mit denen die Rückholbarkeit der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle bis zum Beginn der Stilllegung gewährleistet wird. Nach § 13 ist die Rückholung so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt. Die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen sind während des Betriebes vorzuhalten. In der Begründung des Referentenentwurfs der Verordnung wird dargelegt, dass hiermit aber nicht eine Lagerungsmöglichkeit für das gesamte Abfallinventar des Endlagers gemeint ist. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass bei einer eventuellen Rückholung ausreichende Zeitpuffer vorhanden seien, um entsprechende Lagerungsmöglichkeiten zu schaffen bzw. noch vorhandene zu ertüchtigen. Die u. U. notwendige Konditionierungsanlage wird in diesem Zusammenhang nicht explizit erwähnt.

Nach § 15 müssen im Rahmen der Errichtung des Endlagers auch alle technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Endlagergebinden erforderlich sind, bereitgestellt werden. Nach § 16 muss die Funktionsfähigkeit dieser technischen Einrichtungen vor der erstmaligen Annahme von hochradioaktiven Abfällen zum Zweck der Endlagerung sichergestellt werden. In der Begründung des Referentenentwurfs der Verordnung wird hierzu ausgeführt, dass die Erprobung der für eine Rückholung von bereits eingelagerten Endlagergebinden erforderlichen technischen Einrichtungen als Demonstration der technischen Machbarkeit der Rückholung vor Beginn der tatsächlichen Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen erforderlich ist.

Die Endlagerbehälter müssen der Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle vom 06.10.2020 entsprechend der geltenden Anforderungen den sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleisten (§ 14 Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebinde). Gemäß den Empfehlungen der Entsorgungskommission in den "Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" (ESK 2017) müssen Abfallbehälter aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren geborgen werden können. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten. Das heißt, dass die Behälter nachweislich über diesen Zeitraum dicht sein müssen. Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen ist nicht davon auszugehen, dass die rückgeholten Behälter undicht sind.

2.6.2. Möglicher Ablauf der Rückholung

Grundsätzlich muss die Rückholung bei der Planung und Auslegung des Endlagers bereits berücksichtigt und bei der Errichtung des Endlagers erprobt werden. Die dafür notwendigen technischen Einrichtungen sind während des Betriebs des Endlagers vorzuhalten (§ 13 Abs. 2 EndlSiAnfV 2020). Bezüglich des Zeitrahmens kann davon ausgegangen werden, dass die Rückholung in etwa denselben Zeitbedarf hat wie die Einlagerung der Behälter – hier wird derzeit von einem Behälter pro Tag ausgegangen (siehe Kapitel 1.2.2).

Für die weitere Behandlung rückgeholter Endlagergebinde gibt es bislang keine Vorgaben bzw. Planungen. Rückgeholte Abfälle werden voraussichtlich bis zu einer endgültigen Endlagerung erneut und u. U. längerfristig trocken in Transport- und Lagerbehältern gelagert. In der Regel werden rückgeholte Endlagerbehälter nicht für die Lagerung geeignet sein. Insofern müssen im Falle der Rückholung geeignete Lagerbehälter kurzfristig verfügbar sein, in die die Abfälle in einer Konditionierungsanlage umgeladen werden können. Dabei kann es sich um bekannte Typen von TLB mit geeigneten Aufnahmen bzw. Innenbehältern oder Tragkörben handeln. Alternativ sind Lager- und ggf. Transportbehälter für die weitere Lagerung zu entwickeln. Berücksichtigt werden muss dabei u. a., dass Brennelemente bei der Konditionierung ggf. zerlegt wurden. Des Weiteren bedarf es einer ausreichend großen Lagerkapazität, d. h. Lagergebäude, für die jeweils zurückgeholten hochradioaktiven Abfälle.

Nicht zuletzt ist im Fall einer Rückholung ein neues Konzept für das weitere Management der Abfälle erforderlich. Im Folgenden werden die für das Konzept relevanten Punkte genannt. Außerdem werden die Auswirkungen auf die anderen Entsorgungsschritte kursorisch betrachtet.

- Konditionierung: Da eine Rückholung gem. § 1 StandAG nur während der Betriebsphase des Endlagers vorgesehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Konditionierungsanlage in Betrieb oder zumindest noch nicht zurückgebaut sein wird. Die Anlage könnte entweder vorausschauend dafür ausgelegt oder entsprechend umgerüstet werden, Endlagerbehälter zu entladen und hochradioaktive Abfälle ggf. in neue Lagerbehälter oder TLB zu verpacken.
- Lagerbehälter: Für den Fall einer verlängerten trockenen Zwischenlagerung der Abfälle nach der Rückholung müssen entsprechende Lagerbehälter verfügbar sein. Hierzu könnten die entleerten Transport- und Lagerbehälter vorgehalten werden – es muss allerdings in Frage gestellt werden, dass diese Jahrzehnte, nachdem sie entleert wurden, noch genehmigungsfähig sind. Es müssten dann neue Behälter bekannten Typs gebaut oder möglicherweise ein neuer Behältertyp entwickelt werden.
- Transport: Sollen die hochradioaktiven Abfälle nach der Rückholung transportiert werden, so sind Transportbehälter notwendig.
- Anlage zur weiteren Lagerung: Eine entsprechende Anlage muss verfügbar sein bzw. errichtet werden. Für die Lagerung käme ggf. das Eingangslager in Frage. Dieses müsste dann für die Lagerung der rückgeholten Abfälle ausgelegt und genehmigt sein. Es ist nicht anzunehmen, dass ein Eingangslager am Endlagerstandort für den Fall einer weiteren Lagerung nach der Rückholung sämtlicher Abfälle ausgelegt werden kann. Entsprechend wird für diesen Fall ein an diesen Zweck angepasstes Lagerkonzept benötigt. Ein neues Endlager, in dem die zurückgeholten Abfälle entsorgt werden, muss geplant, genehmigt und errichtet werden.

Grundsätzlich sind folgende Abläufe nach einer Entscheidung zur Rückholung denkbar:

- Nach der Entscheidung zur Rückholung ist kein zeitnaher Beginn der Rückholung notwendig. Vielmehr kann das Endlagerbergwerk über einen längeren Zeitraum (10-15 Jahre, ggf. auch länger) offengehalten werden. Erst dann beginnt die Rückholung. Insgesamt müsste ein Konzept zum weiteren Management der hochradioaktiven Abfälle entwickelt werden. Entsprechend diesem Konzept wäre die weitere Behandlung der rückgeholten Endlagerbehälter zu realisieren. Mit dieser Option bestünde auch hinreichend Zeit, das weitere Abfallmanagement an der Oberfläche vorzubereiten.
- Nach der Entscheidung zur Rückholung ist ein zeitnaher Beginn der Rückholung erforderlich. Ein Konzept zum weiteren Management der hochradioaktiven Abfälle, mindestens jedoch zur längerfristigen Lagerung, muss zum Zeitpunkt einer Rückholungsentscheidung vorliegen. Notwendige Infrastruktur (Konditionierungsanlage, Transport- und Lagerbehälter, eine Anlage zur Lagerung) bzw. Lagermöglichkeiten einschließlich der dazugehörigen Behälter/Anlagen bis zur Fertigstellung der notwendigen Infrastruktur müssen geschaffen werden.

Aus Gründen der Konservativität muss für den Fall der Rückholung damit gerechnet werden, dass ein zeitnaher Beginn der Rückholung erforderlich sein wird. Dafür ist es notwendig, neben



technischen Einrichtungen zur Rückholung ein Konzept für die weitere Lagerung zu haben. Das Konzept muss darlegen, wie eine Lagerung der rückgeholten Abfälle nach der Entscheidung zur Rückholung zeitnah umgesetzt werden kann – auch für den Fall, dass vor dem Beginn der Verschlussphase des Endlagers alle Abfälle rückgeholt werden müssen.

Entwicklung von Szenarien für den Entsorgungsweg hochradioaktiver Abfälle

Methodischer Ansatz 3.1.

Ziel der Entwicklung alternativer Szenarien ist es, eine möglichst breite Schar möglicher zukünftiger Verläufe des Entsorgungsweges darzustellen. Ausgehend von einem Referenzszenarium werden Abweichungen auf Basis der oben ausgeführten Optionen zur Ausgestaltung der einzelnen Entsorgungsschritte (siehe hierzu Kapitel 2) angenommen. Im Vorhaben wird immer dann von einem Szenario ausgegangen, wenn eine vom Referenzszenario abweichende Option Konsequenzen für einen oder mehrere nachfolgende Entsorgungsschritte hat.

Bei der Entwicklung von Alternativszenarien wird jeweils auf alle Schritte des Entsorgungsweges Bezug genommen und die jeweiligen Konsequenzen abgeleitet. Für eine systematische Betrachtung und der Berücksichtigung möglichst vieler Szenarien sind diese in Tabellenform dargestellt.

Alternative Szenarien wurden abgeleitet aufgrund von Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit

- der verlängerten Zwischenlagerung,
- dem Eingangslager,
- der Konditionierungsanlage oder
- dem Endlager.

Darüber hinaus ist vorstellbar, dass aus politisch-gesellschaftlichen Gründen von einzelnen Schritten des Referenzszenariums abgewichen wird, bspw. aus Gründen mangelnder Akzeptabilität eines Entsorgungsschritts. Entwicklungen, die für den Entsorgungsweg hochradioaktiver Abfälle akzeptanzfördernd bzw. akzeptanzschwächend sind, haben in der Regel komplexe Ursachen. Einfluss darauf können haben beispielsweise ethische Haltungen und politische Entscheidungen, das Vertrauen der Bevölkerung gegenüber Politik und Wissenschaft, die Ausprägung von Bildungsunterschieden und wirtschaftliche Entwicklungen.

Alternative Entsorgungsoptionen zur Endlagerung werden in WERA nicht betrachtet. Die Möglichkeit einer vollständigen Rückholung aller eingelagerten Abfälle ist jedoch als Abweichung vom Referenzszenarium eingeschlossen.

Die dargestellten Szenarien von Entsorgungspfaden werden schließlich einer kritischen Würdigung und Plausibilitätsprüfung unterzogen (siehe Kapitel 0). Als unplausibel eingeschätzte Szenarien werden im Rahmen der anschließenden Analyse kombinierter Szenarien (Kapitel 4) nicht weiter berücksichtigt.

Auf die mögliche Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am Standort eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gemäß § 1 Abs. 6 StandAG und deren Auswirkungen auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird im Rahmen der Entwicklung alternativer Szenarien nicht eingegangen. Gemäß den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) dürfen "zwischen der technischen Infrastruktur dieses Endlagerbergwerkes und der technischen Infrastruktur des Endlagerbergwerkes für hochradioaktive Abfälle [...] keine sicherheitsrelevanten wechselseitigen Abhängigkeiten oder nachteiligen Beeinflussungen bestehen. Die übertägige Handhabung und Behandlung der hochradioaktiven Abfälle und der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sind voneinander zu trennen." Im Vorhaben WERA wird davon ausgegangen, dass diese Regelung auch für Szenarien anzuwenden ist, in denen Eingangslager oder Konditionierungsanlage entfernt vom Endlagerstandort errichtet werden und damit nicht Teil der Tagesanlagen des Endlagers sind. Eine gemeinsame Zwischenlagerung der genannten Abfälle findet, wie in Kapitel 2 dargestellt, nur im Zwischenlager Ahaus statt.

3.2. Referenzszenarium

Das Referenzszenarium folgt der Prämisse, den gesamten Entsorgungsweg der hochradioaktiven Abfälle vom Zwischenlager bis zur Einlagerung im Endlager mit möglichst wenigen Handhabungsvorgängen von TLB und hochradioaktiven Abfällen zu gestalten. Die Entscheidung für einen Endlagerstandort erfolgt, wie nach dem StandAG (2017) angestrebt, 2031. Die Entsorgungsschritte folgen der unten dargestellten Reihenfolge:

- Zwischenlager: Die Zwischenlagerung kann in den bestehenden Zwischenlagern weiter erfolgen.
 Es kann nachgewiesen werden, dass die TLB ihre Funktion für weitere wenige Jahrzehnte nach
 Ablauf der genehmigten Betriebsdauer von 40 Jahren erfüllen können. Auch die Zwischenlager
 können ihre Sicherheitsfunktion über den derzeitig genehmigten Zeitraum hinaus erfüllen. Für die
 bestehenden Zwischenlager werden neue Genehmigungen erteilt.
- Eingangslager: Nach der Standortentscheidung wird ein Eingangslager am Endlagerstandort gemäß den Vorgaben des NaPro (BMUB 2015) geplant und errichtet. Das Eingangslager nimmt die nach Beendigung der Kernenergienutzung in etwa 1.900 Behältern lagernden hochradioaktiven Abfälle vollständig auf. Da als erstes die Genehmigung des Zwischenlagers in Gorleben bereits 2034 endet, sollte trotz der Annahme, dass die Zwischenlagerung am Standort fortgesetzt werden kann, das Genehmigungsverfahren möglichst zügig durchgeführt werden. Durch die Auslegung des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager wird die Möglichkeit eröffnet, die bestehenden zentralen und Standortzwischenlager sukzessive zu leeren und zurückzubauen. Die Inbetriebnahme des Eingangslagers erfordert umfassende Transporte von den Zwischenlagern zum Eingangslager, die entsprechenden Transportkapazitäten voraussetzt. Auch ein Konzept zur Logistik, nach welchen Kriterien wann welche Zwischenlager zu leeren sind, ist auszuarbeiten. Darüber hinaus wird das Eingangslager so konzipiert, dass auch die Lagerung von beladenen ELB möglich ist. Dies ermöglicht, vor Beginn der Einlagerung erste ELB zu konditionieren und bereitzustellen, damit die Einlagerung unverzüglich beginnen kann. Auch im Fall einer Rückholung können ELB zunächst im Eingangslager gelagert werden. Durch die großzügigen Lagerflächen entstehen Pufferkapazitäten beispielsweise auch für länger anhaltende Störungen.
- Konditionierungsanlage: Eine Konditionierungsanlage wird am Endlagerstandort errichtet und betrieben. Darin werden die hochradioaktiven Abfälle aus den TLB entladen und in ELB verpackt. Dabei ist es für das hier betrachtete Referenzszenarium unerheblich, ob die Konditionierung ausschließlich die Verpackung ausgedienter Brennelemente und von Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen umfasst, oder ob Brennelemente zusätzlich zerlegt und einzelne Brennstäbe in ELB oder Brennstabkokillen verpackt werden. Eine chemische, thermische oder andere darüber hinausgehende Form der Konditionierung wird nicht angenommen. Konzepte für die endlagergerechte Verpackung von durch Alterungsprozesse während der trockenen Zwischenlagerung geschädigte Brennelemente und evtl. aus Hüllrohren ausgetretene radioaktive Stoffe liegen vor, sie



können in dafür vorbereitete ELB verpackt werden. Im Referenzszenarium wird diesbezüglich von Einzelfällen und nicht von einem systematischen Auftreten ausgegangen.

 Endlager: Die Standortauswahl gelingt im Referenzszenarium im vorgesehenen Zeitplan (2031). Auch Errichtung und Inbetriebnahme laufen nach Plan, es entstehen keine signifikanten zeitlichen Abweichungen (siehe dazu auch Kapitel 1.2.2). Über das Wirtsgestein für das Endlager, das Sicherheitskonzept und die Auslegung des Endlagers wird auf Grundlage der Ergebnisse über- und untertägiger Erkundungen und weiterer Arbeiten im Rahmen des Standortauswahlverfahrens entschieden. Für das Referenzszenarium wird angenommen, dass, unabhängig vom Wirtsgestein, eine horizontale Streckenlagerung von Endlagerbehältern gewählt wird, da diese Einlagerungsvariante technisch weniger aufwändig ist als die Lagerung in horizontalen oder vertikalen Bohrlöchern.

 Rückholung: Die Einlagerung ins Endlager wird im Referenzszenarium ohne technische Schwierigkeiten durchgeführt und es wird während der Betriebsphase keine Entscheidung zur Rückholung getroffen. Die Rückholung einzelner ELB zur Fehlerkorrektur ist mit den entwickelten und erprobten technischen Vorrichtungen aber jederzeit möglich. Das Endlager wird nach Einlagerung des letzten ELB stillgelegt, verfüllt und verschlossen und durch Monitoringmaßnahmen von der Oberfläche aus überwacht

3.3. Alternative Szenarien

3.3.1. Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit verlängerter Zwischenlagerung

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt sind bisher keine relevanten technischen Probleme bei der vor rd. 20 Jahren begonnenen trockenen Zwischenlagerung aufgetreten. Zur verlängerten Zwischenlagerung über die genehmigten 40 Jahre hinaus wurden verschiedene Forschungsvorhaben angestoßen. Diese zielen darauf ab, Effekte zu identifizieren, die bei längerfristiger Lagerung zu Problemen führen könnten (siehe auch Kapitel 1.2.7). Die Ergebnisse sind in den nächsten Jahren zu erwarten und können ggf. zu Anpassungen beispielsweise bei der Alterungsüberwachung führen.

Eine generelle Herausforderung wird die Neugenehmigung des Betriebs von Zwischenlagern nach Ablauf der bisher genehmigten Betriebsdauer von 40 Jahren sein – unabhängig davon, welche Option für den Entsorgungsschritt verlängerte Zwischenlagerung gewählt wurde (siehe Kapitel 2.2). Derzeit sind die damit verbundenen ggf. angepassten Anforderungen an die Zwischenlagerung und die zu erbringenden Sicherheitsnachweise noch offen.

Für die nachfolgend betrachteten Szenarien wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass es grundsätzlich im Rahmen verlängerter Zwischenlagerung insbesondere mit zunehmender Lagerdauer zu Alterungseffekten kommen kann. In der Konsequenz sind umfassendere Maßnahmen zur Wiederherstellung der Zwischenlagerfähigkeit oder ggf. auch der Abtransportierbarkeit erforderlich. Im Forschungsprojekt WERA werden dazu auch Abläufe angenommen und nachfolgend in Szenarien dargestellt, die zum jetzigen Zeitpunkt als sehr unwahrscheinlich bewertet werden, wie z. B. das Versagen von TLB-Bauteilen durch Alterung oder von Sicherheitskomponenten des Zwischenlagers.

WERA "Oko-Institut e.V.

Szenarien 1 & 2: Reparatur von Transport- und Lagerbehältern (TLB) mit notwendiger Öffnung der Behälter

Nach diesen Szenarien ist eine Reparatur des Behälters, die über bestehende Reparaturkonzepte hinaus geht, erforderlich. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn nach Anwendung des Reparaturkonzepts bei Funktionsverlust der Primärdeckeldichtung und dem Aufschweißen eines Fügedeckels auch die Sekundärdichtung ihre spezifikationsgerechte Dichtheit verliert. Angenommen wird der Bedarf einer Behälteröffnung. Dafür erforderliche Heiße Zellen werden entweder an allen Zwischenlagerstandorten errichtet (Szenarium 1) oder nur an einzelnen regionalen Zwischenlagerstandorten (Szenarium 2).

Reparaturen, die keine Behälteröffnung erfordern, können ggf. in den Zwischenlagern (ZL) durchgeführt werden. Sollten dies Reparaturen sein, die über die in der Zwischenlagergenehmigung enthaltenen Handhabungsvorgänge hinausgehen, müssen neben den technischen Voraussetzungen auch die genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen geschaffen werden.

In den hier betrachteten Szenarien wird angenommen, dass die Reparatur eines TLB mindestens eine Behälteröffnung erfordert oder sogar der vollständige Austausch des TLB erfolgen muss. Für solche Szenarien ist folgende prinzipielle Vorgehensweise nötig:

- Die Schwachstelle muss identifiziert und ein Reparaturkonzept erstellt werden,
- der Behälter muss ggf. entladen werden,
- · modifiziert/repariert oder ausgetauscht und
- anschließend wieder beladen und verschlossen werden.
- Die Genehmigung für die Lagerung und die verkehrsrechtliche Zulassung müssen wiederhergestellt werden.
- Die reparierten Behälter lagern weiter im Zwischenlager.

Die Öffnung eines TLB ist nur in einer geschützten Umgebung möglich, die die radioaktive Strahlung der Abfälle vollständig vom Personal und der Umgebung abschirmt. Die dargestellten Szenarien setzen für Entladung, Reparatur und Beladung von TLB daher eine Heiße Zelle voraus. In Szenarium 1 wird für jeden ZL-Standort eine Heiße Zelle angenommen. In Szenarium 2 werden nur an mehreren regionalen Zwischenlagern Heiße Zellen errichtet, so dass von jedem in Betrieb befindlichen Zwischenlager aus eine dieser Zellen bei möglichst kurzen Transportwegen zu Reparaturzwecken genutzt werden kann. Die Reparatur in der zentralen Konditionierungsanlage entspräche dem Referenzszenario und wird hier nicht gesondert dargestellt.

₩ Öko-Institut e.V. WERA

Tabelle 3-1:	Szenarien 1 & 2, Reparatur der TLB m	it Behälteröffnung
Szenarium	Reparatur in Heißer Zelle an jedem ZL-Standort möglich (Szenarium 1)	Reparatur in Heißer Zelle an ausge- wählten ZL-Standorten möglich (Szenarium 2)
Beschreibung	Heiße Zelle an Zwischenlagerstandor- ten, ist in die bestehenden Zwischenla- ger integriert.	Heiße Zelle ist an ausgewählten ZL- Standorten eingerichtet (z.B: Nord, Mitte Süd).
Voraussetzung	Planung, Genehmigung, Errichtung für jeden Standort; angepasst an Standortgegebenheiten und jeweils zwischengelagerten Behältertypen.	Auswahl von ZL für die Errichtung der Heißen Zelle; Planung, Genehmigung, Errichtung angepasst an Standortgegebenheiten und die jeweils zu betreuenden Behältertypen.
		Zudem müssen Transportkonzepte für den Transport reparaturbedürftiger TLB zum Zwischenlagerstandort mit Heißer Zelle vorliegen.
Transporte	Im Reparaturfall keine zusätzlichen Transporte notwendig.	Im Reparaturfall zusätzliche Transporte notwendig; Transportkonzepte für repa- raturbedürftige Behälter erforderlich
	Neue Zulassungen/Zulassungsänderungen für den Transport reparierter Behälter zum Eingangslager erforderlich	Neue Zulassungen/Zulassungsänderungen für den Transport reparierter Behälter zurück zum abgebenden Zwischenlager und zum Eingangslager erforderlich
Kosten	Kosten für Planung, Genehmigung, Errichtung, Rückbau Heißer Zellen an bis zu 16 Zwischenlagern.	Kosten für Planung, Genehmigung und Rückbau sind geringer, da weniger Heiße Zellen gebaut werden. Dafür fal- len im Reparaturfall ggf. Kosten für Transporte an.
Weitere Aspekte	Heißen Zellen an allen ZL-Standorten zu errichten stellt einen hohen Bedarf an Ressourcen dar (neben Kosten auch	Ressourcenbedarf ist im Vergleich zu Szenarium 1 deutlich geringer.
	Kapazitäten und Know-How für Pla- nung, Bau, Genehmigung). Planung und Errichtung brauchen Zeit	Planung und Errichtung brauchen Zeit und sind rechtzeitig vor dem erforderlichen Reparaturfall anzustoßen.
	und sind rechtzeitig vor dem erforderli- chen Reparaturfall anzustoßen.	Ersatzteile für den TLB sind gemäß der Reparaturkonzepte vorzuhalten.
	Ersatzteile für den TLB sind gemäß der Reparaturkonzepte vorzuhalten.	
Offene Fragen	§ 3 Abs. 4 Entsorgungsübergangsgesetz gang mit offener Radioaktivität in Zwische	
	Wie ist das Integrieren einer Heiße Zelle setzen?	in das Zwischenlager regulatorisch umzu-
Konsequenzen für das Eingangslager	Berücksichtigung von reparierten Behälte gangslagers;	ern in den Annahmebedingungen des Ein-
	Handhabung reparierter Behälter muss m	,
Konsequenzen für die Konditionie- rung	Die Reparatur kann prinzipiell die TLB Ko rungsanlage muss auch für die Handhab (Einschleusen, Öffnen, Entladen, leeren l	ung reparierter TLB ausgelegt werden

Quelle: eigene Darstellung

Szenarien 3 & 4: Umverpackung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in alternative Behälter

Ergänzend zu den Szenarien 1 und 2 stellt sich hier die Frage nach der Art des Behälters, in den die Abfälle im Bedarfsfall umgeladen werden. Neben der Verpackung in neue oder reparierte TLB (Szenarien 1 und 2) wird hier die Verpackung entweder in Endlagerbehälter (Szenarium 3) oder in "Standardbehälter" (Szenarium 4), die sowohl als Transport- und Lagerbehälter als auch als Endlagerbehälter dienen könnten, angenommen. In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass diese Behälter im Reparaturfall bereits entwickelt und verfügbar sind und auch für die Lagerung in den existierenden Zwischenlagern genehmigungsfähig sind.

Die Möglichkeit einer Umladung in einen ELB im Reparaturfall ist davon abhängig, dass Endlagerbehälter bereits zur Verfügung stehen. Endlagerbehälter sind als Teil der technischen Barrieren nach § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV anzusehen und damit Teil des Sicherheitskonzepts nach § 10 EndlSiAnfV. Die Ergebnisse der während des StandAV durchgeführten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen müssen nach § 10 Abs. 3 EndlSiAnfV im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden. Das Sicherheitskonzept wird erst mit der Genehmigung zur Errichtung eines Endlagers nach § 9b Abs. 1a AtG festgeschrieben. Damit ist, die parallele Behälterentwicklung vorausgesetzt, mit der Produktion von ELB nicht vor der Genehmigung eines Endlagers zu rechnen. Entsprechend ist eine Umladung von hochradioaktiven Abfällen aus beschädigten TLB direkt in ELB nicht vor der Standortentscheidung und anschließenden Genehmigung des Endlagers möglich. Dieses Szenarium ist dann von Bedeutung, wenn dieses Zeitfenster deutlich vor den Konditionierungskampagnen beginnen kann.

Für eine verlängerte Zwischenlagerung in ELB müssen diese Behälter zudem als Zwischenlagerbehälter und, sollten die Umladung und anschließende Zwischenlagerung nicht am Endlagerstandort erfolgen, als Transportbehälter zugelassen sein oder für die Zwischenlagerung und den Transport zugelassene Überbehälter zur Verfügung stehen. Daraus ergeben sich zusätzliche sicherheitstechnische Anforderungen; diese Anforderungen decken sich jedoch hinsichtlich Handhabbarkeit und der Möglichkeit zur Zwischenlagerung u. U. mit Anforderungen, die aufgrund der Berücksichtigung von Rückholbarkeit und Bergbarkeit nach § 1 Abs. 4 StandAG an ELB zu stellen sind.

Eine Alternative kann die Verwendung eines hier als Standardbehälter bezeichneten Innenbehälters darstellen. Im Reparaturfall und anschließend fortgesetzter Zwischenlagerung könnten Abfälle aus beschädigten TLB in einen solchen Behälter umgeladen werden, der wiederum in dafür konstruierte TLB oder ELB eingesetzt werden könnte. Auf diese Weise können Abfälle aus beschädigten TLB schon vor der Standortentscheidung so verpackt werden, dass sie anschließend mit geringem Handhabungsaufwand in mit Blick auf das Wirtsgestein am gewählten Standort und gemäß dem genehmigten Sicherheitskonzept konstruierte ELB umgeladen werden können. Eine solche Konstruktion böte darüber hinaus Vorteile für den Fall eines vermehrten Auftretens von Schädigungen an Brennelementen während der verlängerten Zwischenlagerung. Diese könnten frühzeitig in Innenbehälter umgeladen werden und auf diese Weise das Risiko minimieren, dass im Zuge einer Konditionierung Probleme bei der Handhabung auftreten, da der Innenbehälter nicht mehr geöffnet werden müsste. Die technische Machbarkeit vorausgesetzt könnte das Szenarium dann relevant sein, wenn ein systematisches Versagen von TLB oder dem Inventar (Hüllrohre) zu erwarten ist.



Tabelle 3-2:	Szenarien 3 & 4, Umverpackung von TLB in alternative Behälter		
Szenarium	Umverpackung in ELB (Szenarium 3)	Umverpackung in Standardbehälter (Szenarium 4)	
Beschreibung	g Die Umverpackung ist im Rahmen der verlängerten Zwischenlagerung erfor- verlängerten Zwischenlagerung erfor- verlängerten Zwischenlagerich und wird in einer Heißen Zelle derlich und wird in einer I gemäß Szenarium 1 oder 2 in ELB gemäß Szenarium 1 oder dardbehälter durchgeführt.		
Voraussetzung	Heiße Zellen sind verfügbar und für die Handhabung des ELB ausgelegt.	Heiße Zellen sind verfügbar und für die Handhabung des Standardbehälters ausgelegt.	
	Endlagerbehälter sind verfügbar. Das ist erst möglich, wenn der Endlager- standort und das Sicherheitskonzept feststehen.	Standardbehälter sind technisch machbar und verfügbar.	
	Die technischen und genehmigungs- rechtlichen Voraussetzungen für eine Lagerung des ELB müssen gegeben sein, z. B. durch geeignete Überbehäl- ter (Entwicklungsbedarf).	Für die weitere Zwischenlagerung werden die Standardbehälter in TLB eingestellt. Technische und genehmigungsrechtliche Voraussetzungen müssen gegeben sein.	
Transporte	Die Zahl der Transporte ist vom Stand- ort der nutzbaren Heißen Zelle abhän- gig (Szenarien 1 bzw. 2).	Die Zahl der Transporte ist vom Stand- ort der nutzbaren Heißen Zelle abhän- gig (Szenarien 1 bzw. 2).	
	Der ELB muss auf Basis technischer und genehmigungsrechtlicher Anforde- rungen transportfähig sein (ggf. mit Überbehälter); abhängig vom Fas- sungsvermögen des ELB ist eine grö- ßere Anzahl Transporte erforderlich.	Der TLB mit eingestelltem Standardbehälter muss auf Basis technischer und genehmigungsrechtlicher Anforderungen transportfähig sein. Herausforderungen können ein größeres Gewicht des Behälters und die ggf. größere Anzahl an Behältern sein.	
Kosten	Die Kosten für die Entwicklung eines ELB sind unabhängig von dem hier dargestellten Szenarium. Zusätzliche Kosten können für die Entwicklung zwischenlagerfähiger und transportierbarer Überbehälter entstehen.	Die Entwicklung eines Standardbehälters, der für die Verpackung der verschiedenen Brennelementtypen in ggf. mehrere TLB-Typen sowie zusätzlich in den ELB geeignet ist, stellt eine technische Herausforderung dar, die sich wahrscheinlich auch in den Entwicklungskosten niederschlagen wird.	
		Da die Standardbehälter den Platz in den TLB reduzieren, können zudem Kosten für zusätzliche TLB anfallen.	
Weitere Aspekte	Klärung der sicherheitstechnisch sowie genehmigungsrechtlich möglichen Zwischenlagerdauer von ELB.	Handhabung von TLB mit eingestelltem Standardbehälter im Zwischenlager und bei Transporten (Gewicht, Anzahl).	
Offene Fragen	Ist die vorzeitige Umverpackung in andere Behälter zeitlich, technisch und genehmigungsrechtlich umsetzbar?		
Konsequenzen fü das Eingangslage		Die Annahmebedingungen des Eingangslagers müssen die Annahme und Lagerung von TLB mit Standardbehälter ermöglichen.	

Szenarium	Umverpackung in ELB (Szenarium 3)	Umverpackung in Standardbehälter (Szenarium 4)
Konsequenzen für die Konditionie- rung	Erfolgt die Verpackung als Standardweg bereits am Zwischenlager könnte die Errichtung einer Konditionierungsanlage entfallen. Bleibt die Verpackung am Zwischenlager des Beneraturfell ergeben eich	Erfolgt die Verpackung als Standardweg bereits am Zwischenlager müsste die Konditionierungsanlage für die Umverpackung der Standardbehälter aus den TLB in die ELB ausgelegt werden. Dies wäre sicherheitstechnisch weniger anspruchsvoll.
	ger der Reparaturfall, ergeben sich keine Veränderungen für die Konditio- nierungsanlage.	Bleibt die Verpackung am Zwischenla- ger der Reparaturfall, ergeben sich keine Veränderungen für die Konditio- nierungsanlage.
Konsequenzen für die Endlagerung	Keine Änderungen zum Referenzszena- rium	Die Endlagerungskonzepte müssen den Umgang mit ELB sowohl ohne als auch mit innenliegendem Standardbehälter berücksichtigen.

Quelle: eigene Darstellung

Exkurs: Betrachtungen zur Möglichkeit der Verwendung einer Mobilen Heißen Zelle

Die Errichtung und der Betrieb von Heißen Zellen an einigen oder allen bestehenden Zwischenlagerstandorten sind mit erheblichem finanziellem, technischem, personellem, logistischem und regulatorischem Aufwand verbunden. Eine alternative Möglichkeit mit geringerem Aufwand Reparaturen an TLB oder den Austausch von Behältern in den bestehenden Zwischenlagern durchzuführen, stellt die Konstruktion einer mobilen Heißen Zelle dar. Sie könnte nach Bedarf zu den einzelnen Standorten transportiert und dort betrieben werden.

Die Konstruktion und Nutzung einer mobilen Heißen Zelle erscheint jedoch aus verschiedenen Gründen als unwahrscheinlich. Durch die Arbeiten in der Heißen Zelle wird der Innenraum mutmaßlich kontaminiert oder aktiviert werden. Um Verschleppungen zu vermeiden ist eine Dekontamination nach jedem Einsatz erforderlich. Dabei entstehende Abfälle müssen aufgefangen und entsorgt werden.

An jedem Standort muss ein Fundament errichtet werden, auf dem die Heiße Zelle bei Bedarf betrieben werden kann. Es muss an jedem Standort ein Kran vorgehalten werden, mit dessen Hilfe die Heiße Zelle oder einzelne Module abgeladen und aufgestellt, unter Umständen aus einer liegenden Position aufgerichtet werden können. Alternativ muss der Kran ebenfalls antransportiert werden.

Zum Transport der Zelle muss ggf. ein Konzept entwickelt werden, das nicht nur dem Regelwerk des Güterverkehrs, sondern auch den Anforderungen des Strahlenschutzrechts gerecht wird. Vor jedem Einsatz der Heißen Zelle an einem neuen Einsatzort muss jeweils die gesamte Anlage abgenommen und der Betrieb genehmigt werden. Dabei ist das Regelwerk für kerntechnische Anlagen zugrunde zu legen.

Die eigentliche Schwierigkeit des Konzepts einer mobilen Heißen Zelle liegt jedoch in den Abmessungen und dem Gewicht begründet, das transportiert werden muss. In den nachfolgenden Abschätzungen dazu wird davon ausgegangen, dass die mobile Heiße Zelle modular aufgebaut wird, und nur die eigentliche Zelle und die Schleuse nicht voneinander getrennt werden können. Filteranlage und Arbeitsplätze werden in eigenen Modulen, vorzugsweise in Standard-Frachtcontainern, untergebracht.



Abmessungen

Eine Heiße Zelle, die beispielsweise eine Behälteröffnung zu Reparaturzwecken ermöglicht, muss groß genug sein, um mindestens einen TLB aufnehmen zu können. Um einen TLB vollständig zu entladen und die Abfälle in einen neuen TLB zu verpacken, müssen entweder zwei TLB gleichzeitig Platz in der Zelle finden oder es muss ausreichend Platz vorhanden sein, um die entladenen Brennelemente oder Kokillen zu lagern, während der defekte TLB ausgeschleust und anschließend ein neuer TLB (oder alternativer Behälter) eingeschleust werden.

Auch eine mobile Heiße Zelle muss über eine massive Abschirmung verfügen, insbesondere gegen Gamma- und Neutronenstrahlung. Sie muss mit einer Schleuse ausgestattet sein, in der ein TLB nach dem Ausschleusen ggf. dekontaminiert werden kann. Innerhalb der Zelle müssen alle Arbeiten, zu deren Durchführung die Heiße Zelle vorgesehen ist, fernhantiert erfolgen können. Die notwendigen Installationen benötigen ebenfalls Platz. Die Abluft aus der Zelle muss über eine Filteranlage gereinigt werden. Anschlüsse für ausreichende Energieversorgung am Einsatzort müssen Teil der Auslegung sein. Zuletzt müssen Arbeitsplätze für das Personal vorgesehen werden, das die Arbeiten in der Zelle ausführt.

Ein TLB vom Typ Castor® V/19 bspw. hat einen Durchmesser von ca. 2440 mm und eine Höhe von 5940 mm. Er wiegt beladen etwa 126 t (Hassel; Köhler; Kurt 2019). Die Wandstärke beträgt 418 mm (Wolf et al. 2012); dementsprechend beträgt der Innendurchmesser etwa 1600 mm. Um einen TLB und einen entnommenen Tragkorb aufnehmen zu können und unter Berücksichtigung eines Abstands zur Handhabung zwischen den beiden Elementen von etwa 500 mm werden damit Innenmaße der Heißen Zelle von mindestens 4500 mm Länge und 2500 mm Breite benötigt. Um den Tragkorb nach oben aus dem stehenden TLB herausheben zu können, muss die Zelle mindestens etwa 11 m hoch sein; um darüber hinaus einen Kran oder andere Werkzeuge zur Handhabung an der Decke der Zelle montieren und bewegen zu können, kann von einem Bedarf von etwa 12 m Höhe ausgegangen werden. Eine solche Zelle würde demnach einen Innenraum von etwa 135 m³ umschließen.

Eine Schleuse, die einen TLB aufnehmen kann, benötigt mindestens eine Innenfläche von etwa 2,5 m x 2,5 m. Geht man im günstigsten Fall davon aus, dass die Wandstärke einer mobilen Heißen Zelle zur Abschirmung nicht stärker konstruiert werden muss als für einen TLB, ergeben sich für die Länge der gesamten Zelle überschlägig ca. 8,5 m, für die Breite ca. 3,5 m, für die Höhe ca. 13 m. Diese Maße stellen nur eine grobe Vereinfachung dar, um die ungefähren Dimensionen einer möglichen mobilen Heißen Zelle zu verdeutlichen.

Masse

Wird für die Wände der Zelle die gleiche Dichte angesetzt wie für das Behältermaterial der TLB vom Typ Castor® V/19 (Gusseisen mit Kugelgraphit: ρ = 7,1 kg/dm³, siehe Hassel; Köhler; Kurt 2019), ergibt sich überschlägig eine Masse von etwa 1.161,65 t (siehe Kasten "Masse einer mobilen Zelle"). Dabei ist nicht berücksichtigt, dass die Wände des TLB Moderatorstäbe aus HDPE in Bohrungen enthalten, wodurch die Masse der Konstruktion um etwa 20 % geringer ausfällt (Siehe Kasten "Dichte Behältermaterial Castor® V/19, berechnet aus Masse und Materialvolumen").

Dichte Behältermaterial Castor® V/19, berechnet aus Masse und Materialvolumen

- Umfang: $2 \pi r = 2 \pi x 1,22 m = 7,67 m$
- Mantelfläche: Umfang x Höhe = 7,67 m x 5,94 m = 45.56 m²
- Innenfläche_{Boden/Deckel}: r = 1,22 m 0,42 m = 0,8 m. $\pi r^2 = \pi x (0,8 \text{ m})^2 = 2,01 \text{ m}^2$
- Gesamtfläche_{Wände}: $45,56 \text{ m}^2 + 2 \text{ x } 2,01 \text{ m}^2 = 49,58 \text{ m}^2$
- Gesamtfläche $_{\text{Wände/Boden/Deckel}}$: 45,56 m² + 2 x 2,01 m² = 49,58 m²
- Volumen_{Wände}: Gesamtfläche x Wandstärke = 49,58 m² x 0,42 m = 20,83 m³
- Masse_{Castor® V/19 leer}: ca. 116.000 kg
- Dichte: Masse_{Castor® V/19 leer} / 116.000 kg / 20.83 dm³ = 5,57 kg/dm³
- Dichte laut Datenblatt (Hassel; Köhler; Kurt 2019): 7,1 kg/dm³

Masse einer mobilen Heißen Zelle

- V_{Boden und Decke}: Länge x Breite x Wandstärke x 2 = 8,5 m x 3,5 m x 0,42 m x 2 = 25 m³
- A_{Längswände}: Länge x Höhe x 2 = 8,5 m x 12 m x 2 = 204 m²
- A_{Querwände}: Breite x Höhe x 3 = 3,5 m x 12 m x 3 = 126 m^2
- V_{Wande} : ($A_{Langswande} + A_{Querwande}$) x Wandstärke = (204 m² + 126 m²) x 0,42 m = 138,6 m³
- M_{Zelle} : $(V_{Boden und Decke} + V_{Wände}) \times \rho = (25 \text{ m}^3 + 138,6 \text{ m}^3) \times 7100 \text{ kg/m}^3 = 1.161.650 \text{ kg} = 1.161,65 \text{ t}$

Transport

Selbst bei einer günstigen Annahme von einer Masse der Heißen Zelle von nur etwa 930 t müsste sie für einen Schienentransport, unter Berücksichtigung der derzeitigen Radsatzlast des Schienennetzes der deutschen Bahn von 22,5 t¹⁶, auf 42 Achsen verteilt werden. Darüber hinaus muss das Fahrzeuggewicht je Längeneinheit, die sogenannte Meterlast, beachtet werden. Schließlich sind Güter mit einer Breite von 3,50 m innerhalb keines Lichtraumprofils, das auf dem Schienennetz der Deutschen Bahn zur Anwendung kommt, transportierbar¹⁷.

Ein Transport auf dem Luftweg erscheint ebenfalls nicht praktikabel. Weder Flugzeuge noch andere Luftfahrzeuge sind in der Lage, Lasten dieser Größenordnung zu transportieren. Die Cargolifter AG (1996 bis 2002) projektierte einen Lastenzeppelin für Lasten von bis zu 160 t, der jedoch nie fertiggestellt wurde. Das größte Transportflugzeug der Welt, die Antonov An-225, hat bisher Lasten von bis zu 247 t transportiert¹⁸.

Es bliebe also nur die Option eines Straßentransports mit einem dafür eigens angefertigten Fahrzeug, oder alternativ die Konstruktion als selbstständiges Fahrzeug. Das setzt aber, genauso wie der Transport auf der Schiene, eine für die entsprechenden Lasten ausgelegte Straßenanbindung an jedem Zwischenlager voraus.

¹⁶ siehe dazu https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/324625/

siehe dazu https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang/licht-raum/grundsaetze_lichtraum-1369000

¹⁸ siehe dazu https://antonov.com/en/history/an-225-mriya

Aufgrund des beschriebenen Sachverhaltes, insbesondere aber den dargestellten Schwierigkeiten beim Transport einer Heißen Zelle, wird diese Möglichkeit in den hier aufgefächerten Szenarien nicht betrachtet.

Szenarien 5 & 6: Neubau oder TLB Verlegung, weil Zwischenlagerung an einzelnen Standorten nicht fortgesetzt werden kann

In diesen Szenarien wird unterstellt, dass einzelne Zwischenlager nicht weiter genutzt werden können. Denkbar sind technische oder regulatorische Gründe. Für die Szenarien wird unterstellt, dass ein Eingangslager die Behälter (noch) nicht aufnehmen kann. Zudem wird angenommen, dass nicht alle, sondern nur einzelne Zwischenlager nicht weiter betrieben werden und die Kapazitäten entweder durch Neubau (Szenarium 5) oder Zusammenlegen (Szenarium 6) ersetzt werden.

Im Folgenden werden zwei Szenarien abgeleitet, die jeweils davon ausgehen, dass einzelne Zwischenlager nicht weiter genutzt werden können. Die Gründe dafür können unterschiedlich sein. Beispielsweise sind über sehr lange Lagerzeiten aufgrund von Alterung Situationen ableitbar, die zu Defiziten bei den Sicherheitsfunktionen des Gebäudes oder der technischen Infrastruktur führen, die nicht mehr reparierbar sind, weil beispielsweise Ersatzteile fehlen oder die Schädigungen zu groß sind. Sowohl hinsichtlich der Sicherheit als auch hinsichtlich der Sicherung¹⁹ könnten als weitere Möglichkeit gestiegene regulatorische Anforderungen dazu führen, dass die Zwischenlager diese nicht mehr erfüllen und aus diesen Gründen nicht weiter genutzt werden können.

Eine solche Situation ist beispielsweise am Zwischenlager Nord (ZLN) der Firma EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN) eingetreten. Die Maßnahmen zur Ertüchtigung des ZLN, um das aktuelle Regelwerk zur Sicherung umzusetzen, können aus technischen Gründen nicht umgesetzt werden, so die Darstellung des BASE²⁰. Für die Fortsetzung der Zwischenlagerung plant die EWN GmbH deshalb den Neubau eines Ersatztransportbehälterlagers (ESTRAL) in unmittelbarer Nachbarschaft. Das ESTRAL soll nach vierjähriger Bauzeit 2027 in Betrieb genommen werden.

Ein anderes Beispiel ist der Abtransport der abgebrannten Brennelemente aus dem stillgelegten Kernkraftwerk Obrigheim. Hier sollte das Nasslager für den Rückbau geräumt werden. Anstelle des Neubaus eines Zwischenlagers für TBL am Standort wurden die Behälter in das Zwischenlager des Kernkraftwerks Neckarwestheim transportiert²¹.

Der nicht fortsetzbare Betrieb eines Zwischenlagers stellt die Voraussetzung für die Szenarien dar. Abgeleitet werden Neubau am gleichen Standort (Szenarium 5) oder Abtransport der TLB in ein anderes Lager (Szenarium 6).

¹⁹ Aufgrund von geänderter Gefährdungsbewertung bzw. neuer Erkenntnisse zu den Auswirkungen durch mögliche gewaltsame Einwirkungen auf ein Zwischenlager wurde bereits 2010, also wenige Jahre nach deren Betriebsbeginn, diskutiert, die Sicherungsmaßnahmen für die bestehenden Zwischenlager durch bauliche Maßnahmen zu optimieren (Härtung). Die Härtungsmaßnahmen wurden umgesetzt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich auch in Zukunft Bewertungen ändern und ergänzende Maßnahmen notwendig werden.

²⁰ Siehe dazu https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zln.html

²¹ Siehe dazu https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/kwo.html

Tabelle 3-3: Szenarium 5 & 6, Neubau oder TLB Verlegung, weil Zwischenlagerung an einzelnen Standorten nicht fortgesetzt werden kann

Szenarium	Neubau (Szenarium 5)	Transport in ein anderes Lager (Szenarium 6)	
Beschreibung	Am ZL-Standort wird ein neues Zwischenlager errichtet.	TLB werden in anderes ZL zur fortgesetzten Lagerung transportiert.	
Voraussetzung	Neugenehmigung nach §6 AtG	Änderungsgenehmigung des aufnehmenden Zwischenlagers; ausreichende Lagerkapazität	
Transporte	Keine zusätzlichen Transporte über öffentliche Straßen, nur innerbetriebliche Transporte.	Zusätzliche Transporte werden erforderlich.	
Kosten	Kosten für Genehmigungsverfahren und Bau	Transportkosten	
Weitere Aspekte	Das neugebaute Zwischenlager ist auf dem neuesten Stand von W+T und für die längerfristige Nutzung geeignet.	Sollte das aufnehmende Zwischenlager selbst nicht mehr weiter genutzt werden können, ist der Aufwand hinsichtlich des	
	Genehmigungsverfahren, Planung und Bau binden Ressourcen (Zeit, Personal, Know-How). Je nach Stand des Endla- gerverfahrens wird das neue ZL-Ge- bäude ggf. nur kurze Zeit genutzt.	Umgangs mit den TLB deutlich größer (Neubau).	
Offene Fragen	Keine	keine	
Konsequenzen für das Eingangsla- ger			
Konsequenzen für die Konditionie- rung	siehe Eingangslager keine Änderungen gegenüber dem renzszenarium		
Konsequenzen für die Endlagerung	keine Änderungen gegenüber dem Referenzszenarium	keine Änderungen gegenüber dem Referenzszenarium	

Quelle: eigene Darstellung

Szenarium 7: Zwischenlagerung kann in allen 16 Zwischenlagern nicht fortgesetzt werden

In diesen Szenarien wird unterstellt, dass es nicht möglich ist, die derzeit bestehenden Zwischenlager nach Ablauf ihres Genehmigungszeitraums von 40 Jahren neu zu genehmigen. Denkbar ist dies aus technischen oder regulatorischen Gründen.



Sollte sich herausstellen, dass es für alle 16 Zwischenlager keine Möglichkeit einer Neugenehmigung gibt, so wäre es denkbar, dass dann die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Optionen ZL2 (Bau eines Zentralen Zwischenlagers) oder ZL3 (Konzentration auf wenige regionale Zwischenlager) zur Umsetzung kommen könnten. Bei beiden Optionen wäre es möglich, eine Heiße Zelle für möglicherweise notwendige Reparaturen am TLB in die Anlage zu integrieren. Beiden Optionen sind in Kapitel 2.2.3 ausführlich beschrieben. Es wird daher an dieser Stelle auf eine weitere Ausführung verzichtet.

3.3.2. Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit dem Eingangslager

Veränderungen im Entsorgungsschritt Eingangslager können ebenfalls Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Entsorgungsschritte haben. Grundlage sind die in Kapitel 2.3 dargestellten Optionen des Eingangslagers. Dort wird insbesondere auf die Unterscheidung der Funktion Eingangslagerung entweder als Pufferlager oder als zentrales Zwischenlager eingegangen.

Da ein Eingangslager in seiner Funktion vergleichbar mit der Zwischenlagerung ist, könnten auch hier Szenarien betrachtet werden, die durch Alterungseffekte ausgelöst werden. Diese wären insbesondere bei langer Lagerung im Eingangslager annehmbar. Da sich daraus aber keine anderen Konsequenzen im Vergleich zu den bereits dargestellten ableiten lassen, wird hier auf eine erneute Darstellung verzichtet. Als Szenarium weiterentwickelt wird hier die Errichtung eines Eingangslagers abseits vom Endlagerstandort.

Szenarium 8: Errichtung des Eingangslagers abseits des Endlagerstandortes

In Szenarium 8 wird angenommen, dass das Eingangslager nicht direkt am Endlagerstandort mit der Konditionierungsanlage errichtet wird. Stattdessen wird ein Standort in der Nähe des Endlagerstandorts für das Eingangslager gewählt. Der gewählte Standort des Eingangslagers erfordert aber einen Transport der TLB über öffentliche Straßen zum Endlagerstandort.

Mögliche Ursachen für dieses Szenarium könnten ein Mangel an geeigneten Flächen, zu berücksichtigende Schutzgebiete oder gesellschaftliche bzw. politische Entscheidungen für einen alternativen Standort sein. Ein Beispiel ist das Bereitstellungslager für das Endlager Schacht Konrad, das so genannte Logistikzentrum (LOK). Hier ist der Standort ca. 130 km vom Endlager Konrad entfernt.

Denkbar ist, dass das Eingangslager gezielt zu einem Zeitpunkt errichtet werden soll, an dem die Standortentscheidung bereits gefallen ist, aber noch keine Genehmigung für das Endlager vorliegt. Um die spätere Planung und Errichtung des Endlagers nicht zu behindern, könnte für das Eingangslager ein separater Standort gewählt werden. Bei einer entsprechenden Größe des Eingangslagers würden damit die Entsorgungsschritte Zwischenlager und Endlager entkoppelt.

Im Szenarium wird davon ausgegangen, dass sich die Konditionierungsanlage am Endlagerstandort befindet. Ebenfalls eine Voraussetzung ist, dass die Anlieferung von TLB zur Konditionierungsanlage und dem Endlager prinzipiell reibungslos durchgeführt werden können. Ein Eingangslager in großer Entfernung zum Endlagerstandort wird deshalb als unplausibel angesehen und hier nicht weiter ausgeführt.

Tabelle 3-4: Szenarium 8, Standort des Eingangslagers abseits des Endlagerstandorts

Szenarium	Errichtung des Eingangslagers abseits des Endlagerstandortes (Szenarium 8)
Beschreibung	Das Eingangslager wird nicht am Endlagerstandort errichtet. Die TLB sind von den ZL zum Eingangslager und vom Eingangslager zum Endlagerstandort mit Konditionierungsanlage zu transportieren. Im Eingangslager wird die Zwischenlagerung ggf. fortgesetzt bis zum Abruf zur Konditionierung.
Voraussetzung	Geeignete Fläche und Anschluss ans Schienen- und Straßennetz liegen vor. Ein eigenes Genehmigungsverfahren unabhängig vom Genehmigungsverfahren für das Endlager ist durchzuführen.
Transporte	Es werden zusätzliche Transporte vom Eingangslager zur Konditionierungsanlage am Endlagerstandort über öffentliche Straßen notwendig.
Kosten	Höhere Kosten entstehen durch zusätzliche Transportvorgänge. Zusätzliche Betriebskosten können entstehen, weil Synergien mit anderen Anlagen am Endlagerstandort nicht genutzt werden können (Bedarf an zusätzlicher Infrastruktur, Personal etc.).
	Hinsichtlich der Baukosten ist eine Abschätzung schwierig. Ggf. könnten sie steigen, da Synergieeffekte nicht genutzt werden, ggf. aber auch sinken, da sich die verschiedenen Baumaßnahmen weniger beeinflussen.
Weitere Aspekte	Die zusätzlichen Transporte könnten zu einer aufwändigeren Logistik führen, insbesondere wenn Antransporte an und Abtransporte aus dem Eingangslager gleichzeitig erfolgen.
	Die mit der Entsorgung verbundenen Lasten für die Bevölkerung werden auf mehrere Standorte verteilt. Es ist offen, ob das zu eher mehr oder eher weniger Akzeptabilität führt.
Offene Fragen	Ist ein solches Eingangslager nur in der Form eines (großen) zentralen Zwischenlagers realisierbar, oder auch als (vergleichsweise kleines) Pufferlager?
Konsequenzen für das Zwischenlager	Das Eingangslager kann die Aufgabe der Zwischenlagerung übernehmen und würde dann einem zentralen Zwischenlager entsprechen (Option ZL2, Kapitel 2.2.3.2), auch wenn Verzögerungen bei den nachfolgenden Prozessschritten auftreten. Die Zwischenlager könnten dann früher geräumt werden.
Konsequenzen für die Konditionierung	Die kontinuierliche Anlieferung von TLB aus dem Eingangslager zur Konditionierungsanlage erfordert ggf. einen höheren logistischen Aufwand gegenüber einem Eingangslager mit Konditionierungsanlage am Endlagerstandort (Behälterabruf, Transporte).
	An der Konditionierungsanlage sind zusätzliche Pufferflächen erforderlich sowohl für angelieferte TLB als auch für konditionierte ELB.
Konsequenzen für die Endlagerung	Die Genehmigungsverfahren von Eingangslager und Endlager werden getrennt geführt; Abhängigkeiten in den Verfahren sind geringer. Dies gilt auch für den Bau des Endlagers.
	Auch für die Endlagerung besteht ein Bedarf an Pufferlagerflächen.
	Sollte eine Rückholung von ELB erforderlich werden, müssten rückgeholte ELB zusätzlich transportiert werden oder zusätzliche Lagermöglichkeiten für rückgeholte ELB am Endlagerstandort geschaffen werden.

Quelle: eigene Darstellung

3.3.3. Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit der Konditionierungsanlage

Bei der Herleitung von Szenarien, die aufgrund von Änderungen, Anpassungen oder technischen Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Konditionierungsanlage eintreten könnten, werden folgende Annahmen getroffen (siehe dazu auch Kapitel 2.4):



 Eine Konditionierungsanlage wird spätestens zu dem Zeitpunkt benötigt, an dem die radioaktiven Abfälle in Endlagerbehälter umverpackt werden sollen.

- Bestenfalls wird die Konditionierungsanlage am Endlagerstandort errichtet, könnte aber auch in dessen näherer Umgebung betrieben werden.
- · Die Konditionierungsanlage wird einige Jahrzehnte betrieben werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage technisch einwandfrei funktioniert und in der gesamten Betriebszeit keine wesentlichen Störungen auftreten.
- Alterungsmechanismen können die Anlage beeinflussen, wenn sie aufgrund von Verzögerungen im Zusammenhang mit den anderen Entsorgungsschritten deutlich länger als geplant betrieben werden muss. Prinzipiell kann eine Konditionierungsanlage nach heutigem Stand für einige Dekaden Betriebsdauer ausgelegt und zudem Möglichkeiten zur fortlaufenden Adaption und Anpassung an die Weiterentwicklung nach Stand von Wissenschaft und Technik vorgesehen werden. Im Rahmen einer solchen Adaption müssen u. U. wichtige technische Komponenten ausgetauscht bzw. auch umgestaltet werden können. Entsprechend wird im Folgenden nicht davon ausgegangen, dass es durch Alterungsmechanismen zu Störungen kommt, für die ein Szenarium entwickelt werden müsste.
- Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage über mehrere Prozessstraßen verfügen wird, so dass mehrere Konditionierungsvorgänge parallel durchgeführt werden können (Redundanzen).
- Der Zustand der zu entladenden Brennelemente in den TLB ist zum Zeitpunkt der Konditionierung u. U. nicht ausreichend bekannt.

Aus diesen Annahmen lassen sich folgende Szenarien, die vom Referenzszenarium abweichen, ableiten:

- Szenarien unter der Annahme, die Konditionierungsanlage befinde sich abseits des Endlagerstandorts,
- Szenarien zur nicht ausreichenden Verfügbarkeit von Endlagerbehältern,
- Szenarien zu Schwierigkeiten bei der Entladung der TLB.

Szenarien 9 & 10: Errichtung der Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts

Die Konditionierungsanlage könnte, statt am Endlagerstandort, auch in dessen näherer Umgebung errichtet werden. Denkbar ist die Platzierung von Eingangslager und Konditionierungsanlage an einem anderen Standort als das Endlager (Szenarium 8). Alternativ befindet sich lediglich die Konditionierungsanlage an einem anderen Standort als das Endlager (Szenarium 9). In beiden Fällen wird von anschließenden Transporten zum Endlager über öffentliche Straßen ausgegangen.

Gründe dafür könnten die mangelnde Flächenverfügbarkeit am Endlagerstandort oder auch die politische/gesellschaftliche Entscheidung sein, "die Last auf mehrere Schultern zu verteilen", in diesem Fall also auf mehrere Standortgemeinden. Denkbar ist auch die Notwendigkeit einer vorgezogenen Konditionierung beispielsweise wegen systematischer Degradation der Brennelemente und einer deshalb vorgezogenen Errichtung vor der Genehmigung des Endlagers. Diese könnte auch an einem anderen Standort als dem Endlagerstandort erfolgen.

Nicht betrachtet wird die Variante eines untertägigen Anschlusses der Konditionierungsanlage an das Endlager über einen Tunnel oder eine Rampe mit einige 100 bis 1.000 Metern. Diese Variante könnte bereits im Rahmen des Referenzszenarium umgesetzt werden.

WERA

WERA

Unterschieden werden:

 Szenarium 9: In diesem Fall befinden sich das Eingangslager und die Konditionierungsanlage an einem Standort abseits des Endlagerstandorts; Abfälle werden von den Zwischenlagern in das Eingangslager transportiert. Von dort werden sie sukzessive an die Konditionierungsanlage ausgeliefert. Die fertigen Endlagergebinde werden anschließend zum Endlager transportiert, um einen kontinuierlichen Einlagerungsbetrieb zu ermöglichen.

Szenarium 10: Hier werden die Abfälle von den Zwischenlagern zunächst in die Konditionierungsanlage, und anschließend konditionierte Endlagergebinde in das für deren Aufbewahrung ausgelegte Eingangslager am Endlagerstandort transportiert, von wo sie später zur Einlagerung ans
Endlagerbergwerk weitergeleitet werden (siehe Kapitel 3.3.2).

Szenarien, bei denen sich das Eingangslager an einem eigenen, von Konditionierungsanlage und Endlager entfernten, Standort befindet, wurden bereits in Szenarium 8 betrachtet. Szenarien, bei denen sich das Eingangslager für TLB am Endlagerstandort befindet, die Konditionierungsanlage aber an einem eigenen Standort, werden hier nicht betrachtet, da dies die Anzahl der benötigten Transporte von hochradioaktiven Abfällen gegenüber den beiden dargestellten Optionen deutlich erhöhen würde. Der zusätzliche technische Aufwand wie auch der Genehmigungsaufwand sind ebenso wenig zu rechtfertigen wie das Risiko durch zusätzliche Transporte.



Tabelle 3-5:	Szenarium 9 & 10	Konditionierungsanlage	abseits des Endlagerstandorts
i abelle 5-5.	Szenanum 9 & ru	. Nondillomerungsamade	absells des chaladerstandonts

Szenarium	Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts, Eingangslager für TLB am gleichen Standort (Szenarium 9)	Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts, Eingangslager für ELB am Standort des Endlagers (Szenarium 10)	
Beschreibung	Konditionierungsanlage und Eingangslager für TLB befinden sich an einem Standort abseits des Endlagers.	Konditionierungsanlage befindet sich abseits des Endlagerstandorts. Die TLB werden aus den ZL dorthin gebracht. Nach der Konditionierung erfolgt der Transport der ELB zum Eingangslager (für ELB) am Endlagerstandort.	
Voraussetzung	Die Anforderungen an die Konditionierung sind entwickelt. Dies kann erst nach der S folgen.		
	Geeignete Fläche und Anschluss ans Sch Konditionierung ist ein eigenes Genehmig gungsverfahren für das Endlager durchzuf		
Transporte	Die Antransporte der TLB erfolgen direkt a	aus den Zwischenlagern.	
	Zusätzliche Transporte entstehen durch den Abtransport der ELB zum Endlagerstandort. Dafür sind je nach Auslegung des ELB ggf. Transferbehälter notwendig, die beispielsweise mehrfach genutzt werden können. Zusätzliche Transferbehälter sind für den Transport auf öffentlichen Straßen zu entwickeln und gemäß Verkehrsrecht zuzulassen. Der Hin- und Rücktransport der Transferbehälter bedeutet einen zusätzlichen logistischen Aufwand.		
Kosten	Zusätzliche Kosten entstehen für die Entwicklung des ELB/Transferbehälters für öffentliche Verkehrswege und für die zusätzlichen Transporte von beladenen ELB von der Konditionierungsanlage zum Endlager sowie für die entsprechenden Genehmigungsverfahren.		
	Zusätzliche Betriebskosten können entstehen, weil Synergien mit den Anlagen am Endlagerstandort nicht genutzt werden können (Bedarf an zusätzlicher Infrastruktur, Personal etc.).		
	Hinsichtlich der Baukosten ist eine Abschätzung schwierig. Ggf. könnten sie steigen, da Synergieeffekte nicht genutzt werden, ggf. aber auch sinken, da sich die verschiedenen Baumaßnahmen weniger beeinflussen.		
Weitere Aspekte	Die mit der Entsorgung verbundenen Lasten für die Bevölkerung werden auf mehrere Standorte verteilt. Es ist offen, ob das zu eher mehr oder eher weniger Akzeptabilität führt.		
Offene Fragen	Stehen die Anforderungen an die Entwicklung eines ELB (sowie ggf. Transferbehälters) für den Transport über öffentliche Straßen möglicherweise im Widerspruch zu den Anforderungen an einen ELB zur Einlagerung in ein Endlager?		
Konsequenzen für das Eingangsla- ger	Das Eingangslager ist für TLB ausgelegt entweder als zentrales Eingangslager oder als Pufferlager.	Da in diesem Szenarium kein Eingangs- lager vor dem Entsorgungsschritt Kondi- tionierung vorgesehen ist, steigt das Ri-	
	Es kann gleichzeitig für die Pufferlage- rung beladener ELB ausgelegt werden	siko einer Unterbrechung der Konditio- nierung im Fall von Problemen des Ab- transports aus den ZL. Ggf. sind Puffer- lagerflächen zu schaffen.	

Szenarium	Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts, Eingangslager für TLB am gleichen Standort (Szenarium 9)	Konditionierungsanlage abseits des Endlagerstandorts, Eingangslager für ELB am Standort des Endlagers (Szenarium 10)	
	und Lagerflächen für anzuliefernde ELB bzw. entleerte TLB bieten.	Das Eingangslager am Endlagerstandort ist für ELB ausgelegt und muss je nach Gestaltung des ELB zusätzliche Schutzaufgaben übernehmen. Alternativ kann die Lagerung in einem auch für die Zwischenlagerung ausgelegten Transferbehälter erfolgen.	
		Das Eingangslager kann in dieser Form nicht der Verstetigung der Konditionierung dienen. Stattdessen dient es der Verstetigung des Einlagerungsbetriebs.	
Konsequenzen für die Endlagerung	Ein für den Straßentransport ausgelegter ELB ist möglicherweise nicht optimal für die Einlagerung in ein Endlager.	Ein für den Straßentransport ausgelegter ELB ist möglicherweise nicht optimal für die Einlagerung in ein Endlager.	
	Reibungslose, regelmäßige Antransporte der ELB von der Konditionierung zum EL-Standort werden zur wichtigen Voraussetzung für den störungsfreien Einlagerungsbetrieb. Aus logistischen Gründen ist ein Pufferlager für ELB am Endlagerstandort sinnvoll. Die Kapazität dieses Pufferlagers sollte auf einen unterbrechungsfreien Einlagerungsbetrieb ausgelegt werden.	Mit dem Eingangslager am Endlager- standort ist kein weiteres Pufferlager er- forderlich.	

Quelle: eigene Darstellung

Szenarium 11: Nicht ausreichende Verfügbarkeit von Endlagerbehältern

Endlagerbehälter müssen entwickelt und produziert sowie über den Konditionierungszeitraum kontinuierlich bereitgestellt werden. In diesem Szenarium wird angenommen, dass Endlagerbehälter nicht, nicht in ausreichender Zahl oder nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen. Das hat Auswirkungen auf die Konditionierung und den Einlagerungsbetrieb des Endlagers.

Der kontinuierliche Einlagerungsbetrieb des Endlagers setzt voraus, dass immer eine ausreichende Anzahl konditionierter Endlagerbehälter zur Verfügung steht. Für die Konditionierungsanlage bedeutet dies, dass hier immer leere Endlagerbehälter vorgehalten werden müssen.

Im Vorfeld sind die Endlagerbehälter zu entwickeln und einem Zulassungsverfahren zu unterziehen. Endlagerbehälter sind technisch aufwändige Produkte, an die sehr hohe Anforderungen gestellt werden. Dies sind neben den Anforderungen aus dem Betrieb auch die Anforderungen der Rückholung und der Bergbarkeit über 500 Jahre.

Es gibt in Deutschland bzw. in Europa nur wenige Unternehmen, die in der Lage sind, Endlagerbehälter zu entwickeln und herzustellen. Es könnten Verzögerungen bei der Entwicklung auftreten, z. B. aufgrund der gestellten Anforderungen, auch, weil das endzulagernde Inventar sehr heterogen aufgebaut ist und ggf. unterschiedlicher Endlagerbehälter bedarf. Darüber hinaus besteht die



Möglichkeit, dass Schwierigkeiten bei der Produktion bzw. Lieferung von Rohmaterialien für Endlagerbehälter auftreten. Dies könnte die Folge beispielsweise einer Pandemie, globaler Wirtschaftskrise, Krieg, Naturkatastrophen oder der wirtschaftlichen Insolvenz des Fertigungsbetriebs sein.

Tabelle 3-6: Szenarium 11, nicht ausreichende Verfügbarkeit von Endlagerbehältern

Szenarium	Nicht ausreichende Verfügbarkeit von Endlagerbehältern (Szenarium 11)
Beschreibung	Über einen längeren Zeitraum können keine Endlagerbehälter bereitgestellt werden, die Konditionierung stockt.
Voraussetzung	Die Endlagerbehälter werden passend zum Endlagerkonzept entwickelt und bedarfsweise produziert. Angenommen werden nicht vorhersehbare Ursachen für Lieferengpässe oder fehlende Kapazitäten zur Optimierung des/der Behälterkonzepte.
Transporte	Keine zusätzlichen Transporte radioaktiver Abfälle.
Kosten	Kosten können entstehen durch den Aufbau neuer Lieferketten oder von Know-How für die Behälterentwicklung.
	Generell bedeutet jede Verzögerung in den Abläufen des Entsorgungsprozesses auch Kosten z. B. für die Vorhaltung von Personal und Anlagen.
Offene Fragen	Kann die Behälterentwicklung und -herstellung möglichst robust gestaltet werden durch einfache Konzepte und gut erhältliche Materialien? Sollten redundante Lieferketten und Hersteller vorgesehen werden?
Konsequenzen für das Eingangsla- ger	Längerfristige Verzögerungen bedeuten eine Verlängerung des Zwischenlagerbetriebs mit den daraus ggf. resultierenden Folgen aufgrund von Alterungseffekten.
Konsequenzen für die Konditionie- rung	Längerfristige Verzögerungen bedeuten eine Verlängerung des Betriebs des Eingangslagers mit den daraus ggf. resultierenden Folgen aufgrund von Alterungseffekten.
Konsequenzen für die Endlagerung	Bei längerfristiger Verzögerung der Konditionierung kommt der Einlagerungsbetrieb ggf. zum Erliegen.

Quelle: eigene Darstellung

Szenarium 12: Verzögerungen durch technische Schwierigkeiten bei der Konditionierung

In der Konditionierungsanlage treten Verzögerungen aufgrund technischer Schwierigkeiten beim Entladen oder den weiteren Handhabungsvorgängen auf. Angenommen werden erwartete und unerwartete Schwierigkeiten.

Durch Degradation des Abfallinventars während sehr langer Zwischenlagerung oder dem anschließenden Transport zur Konditionierungsanlage können sich abgebrannte Brennelemente insoweit verändern, dass eine Entladung der Brennelemente schwierig wird bzw. nur noch mit Beschädigungen möglich wäre. Beispielsweise könnten Tragkörbe, Brennelemente oder Brennstäbe beschädigt sein, letztere bis zum vollständigen Hüllrohrversagen, so dass Material vom Behälterboden aufgenommen werden muss.

Solche Beschädigungen könnten entweder beim Öffnen des TLB bereits vorliegen oder erst bei der Konditionierung entstehen. In der Folge können radioaktive Stoffe im TLB oder in der Heißen Zelle freigesetzt werden und zu Kontaminationen führen. Dekontaminierungsarbeiten könnten zu Verzögerungen bei den Konditionierungsabläufen führen. Es wird davon ausgegangen, dass geeignete technische Maßnahmen vorgesehen werden, um die Freisetzung zu kontrollieren bzw. in der Anlage zurückzuhalten.

Je nach Konditionierungskonzept könnten zusätzliche Zerlegearbeiten erforderlich werden, die dann aber auch das Risiko weiterer Schwierigkeiten bei der Handhabung bergen. Es ist nicht auszuschließen, dass sich das Abfallinventar beispielsweise im Tragkorb verklemmt bzw. die einzelnen Brennstäbe nicht einfach aus dem Brennelement "gezogen" werden können. Ggf. muss im Einzelfall eine möglicherweise individuelle Lösung für eine endlagergerechte Verpackung entwickelt werden.

Prinzipiell wird angenommen, dass die Konditionierungsanlage auch für schwierige Handhabungsvorgänge ausgelegt ist. Diesbezüglich könnten aber technische Anpassungen erforderlich werden, die zu Verzögerungen führen. Nicht auszuschließen sind unerwartete Schwierigkeiten, die beispielsweise umfangreiche Umplanungen der Anlagentechnik oder der Prozesse erfordern und in dieser Zeit Konditionierungskapazitäten blockieren.

Tabelle 3-7: Szenarium 12: Verzögerungen durch technische Schwierigkeiten bei der Konditionierung

Szenarium	Verzögerungen durch technische Schwierigkeiten bei der Konditionierung (Szenarium 12)
Beschreibung	Technische Schwierigkeiten treten beim Entladen bzw. bei der weiteren Handhabung auf. Es kommt zu Verzögerungen bei der Konditionierung.
Voraussetzung	Abhängig von den vorgesehenen Kapazitäten und Redundanzen der Konditionierungsanlage können Risiken hinsichtlich einer Verzögerung im Entsorgungsprozess reduziert werden, beispielsweise durch einen mehrstraßigen Ausbau.
Transporte	Keine zusätzlichen Transporte radioaktiver Abfälle.
Kosten	Generell bedeutet jede Verzögerung in den Abläufen des Entsorgungsprozesses auch Kosten z. B. für die Vorhaltung von Personal und Anlagen.
Weitere Aspekte	Zusätzliche Kosten können entstehen, wenn Anpassungen, Umplanungen oder die Entwicklung individueller Lösungen zur endlagergerechten Verpackung erforderlich sind. Technische Anpassungen von Anlage und Prozessen müssen von der Genehmigung abgedeckt werden. Ebenso müssen individuelle Lösungen der endlagergerechten Verpackung von der Genehmigung abgedeckt sein.
Offene Fragen	Könnten neben technischen Schwierigkeiten auch weitere Schwierigkeiten auftreten, die zu Verzögerungen führen wie beispielsweise die Erfassung charakteristischer Daten des Abfallinventars im Hinblick auf Rückholung und Bergung?
Konsequenzen für die Zwischenlage- rung	Die Verzögerung bei der Konditionierung führt zu einer Verlängerung des Zwischenlagerbetriebs.
Konsequenzen für das Eingangsla- ger	Analog zur Zwischenlagerung könnte sich auch die Betriebsdauer des Eingangslagers verlängern.
Konsequenzen für die Endlagerung	Wenn die Konditionierung von ELB ins Stocken gerät, kann das auch Auswirkungen auf den Einlagerungsbetrieb haben. Bei Fehlen einer ausreichenden Pufferung beladener ELB kann der Einlagerungsbetrieb zum Erliegen kommen.

Quelle: eigene Darstellung



3.3.4. Abweichungen vom Referenzszenarium im Zusammenhang mit dem Endlager

Für die Endlagerung sind verschiedene Konzepte möglich. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Art des Wirtsgesteins und, davon abhängig, dem jeweils zur Anwendung kommenden Sicherheitskonzept²². Dabei spielt das Vorgehen bei der Einlagerung konditionierter Endlagergebinde eine wesentliche Rolle zur Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Endlagersysteme und Sicherheitskonzepte auf vorausgehende Entsorgungsschritte. Wie in Kapitel 2.5.3 ausgeführt erfolgt die Einlagerung in Strecken oder vertikalen Bohrlöchern. Die Art der Einlagerung hat Auswirkungen auf die Anforderungen an Endlagerbehälter und die Notwendigkeit zur Verwendung innerbetrieblicher, ggf. auch außerbetrieblicher, Transportbehälter. In der folgenden Tabelle 3-8 sind die in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Endlageroptionen zusammengefasst und die sich daraus ergebende Dauer für den Einlagerungsbetrieb des Endlagers dargelegt.

Tabelle 3-8: Zusammenhang zwischen möglichen Endlageroptionen und Behälterart und -anzahl, Teufe des Endlagerbergwerks und Dauer der Einlagerung

	Behälterart	Behälter mit hoch- radioaktiven Ab- fällen ²³	Teufe Bergwerk, (Teufe Bohrlö- cher) [m]	Dauer Einlage- rung [Jahre gerun- det]
E1 Ton vertikal	nicht selbst abschirmend	14.442	700 (k.A.)	88
E2 Ton horizon- tal	selbst abschirmend	11.354	700	73
E3 Salz vertikal	nicht selbst abschirmend	11.495	900, (300)	73
E4 Salz horizon- tal	selbst abschirmend	7.017	810	51
E5 Kristallin ver- tikal	nicht selbst abschirmend	13.261	k.A.	82
E6 Kristallin ver- tikal	nicht selbst abschirmend	10.206	600	58

Quelle: eigene Darstellung, aus (Alfarra et al. 2020b), (Alfarra et al. 2020d), (Bertrams et al. 2020a), (Bertrams et al. 2020c), (Becker et al. 2020a), (Becker et al. 2020b)

²² siehe dazu § 10EndlSiAnfV (2020).

²³ Zu jeder Option kommen noch 530 CASTOR®-Behälter und 2.620 Gussbehältern Typ II in horizontalen Einlagerungskammern, so wie sie für das Endlager Konrad geplant wurden.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass die horizontale Einlagerung abgeschirmter Endlagergebinde für Ton und Salz kürzer dauert als die vertikale Lagerung von nichtabgeschirmten Endlagergebinden in Bohrlöchern, die von der Sohle einer Strecke im Bergwerk aus abgeteuft werden, verrohrt und nach vollständiger Verfüllung einzeln verschlossen werden müssen. Grund dafür ist die für horizontale Einlagerung jeweils geringere erforderliche Anzahl an Behältern. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass Streckenlagerung aufgrund der Verwendung abgeschirmter Behälter mit technisch geringerem Aufwand durchgeführt werden kann als Bohrlochlagerung. Auch der Aufwand für den qualifizierten Verschluss des Endlagerbergwerks bei horizontaler Einlagerung wird als geringer eingeschätzt, da z. B. der Verschluss der einzelnen Bohrlöcher entfällt.

Die in der Tabelle angegebene Zeitdauer für die verschiedenen Endlagerkonzepte orientiert sich ausschließlich an der Anzahl der einzulagernden Behälter – da horizontale Lagerung technisch weniger aufwändig ist, kann die Differenz der Einlagerungsdauer in der Praxis noch größer sein als angegeben. Die Typen der berücksichtigten ELB werden in den Kapiteln 2.5.3.1 bis 2.5.3.6 dargestellt. Unabhängig vom Behältertyp wird von einer Einlagerung von 200 ELB pro Jahr bei Einschicht-Betrieb des Endlagers ausgegangen. Wird im Dreischicht-Betrieb gearbeitet, kann die Einlagerung deutlich schneller vonstattengehen (siehe dazu auch Kapitel 2.3.3.1).

Die Verwendung abgeschirmter Behälter hat für den Betrieb viele Vorteile, verursacht aber auch höhere Herstellungskosten. Für die vertikale Einlagerung werden zwar weniger aufwändige, dafür im Vergleich zur horizontalen Lagerung eine höhere Anzahl von Behältern benötigt. Zusätzlich kommen Transferbehälter zum Einsatz, und die Beladeprozesse nach der Konditionierung erfordern für nichtabgeschirmte Behälter den Einsatz verschiedener Schleusen und damit potenzieller zusätzlicher Fehlerquellen.

Bei der Herleitung von Szenarien, die aufgrund von technischen Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Endlager eintreten könnten, werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage technisch einwandfrei funktioniert und in der gesamten Betriebszeit keine Betriebsstörungen auftreten, die einen Weiterbetrieb nicht zulassen.
- Voraussetzung für einen kontinuierlichen Einlagerungsbetrieb sind eine kontinuierliche oder kampagnenweise Konditionierung und rechtzeitige Anlieferung von Endlagergebinden.
- Alle Handhabungsvorgänge zur Einlagerung von Endlagergebinden sowie der qualifizierte Verschluss von Strecken und Schächten werden vor Errichtung des Endlagers im Rahmen der untertägigen Erkundung in Phase III des Standortauswahlverfahrens erfolgreich erprobt.
- Bauartzulassungen für Endlagerbehälter werden erteilt, nachdem die Nachweise für Sicherheit und Zuverlässigkeit aufgrund einer gründlichen Entwicklungs- und Erprobungsphase, beispielsweise hinsichtlich der Eigenschaften des Behältermaterials, bei der Konstruktion sowie bei Kaltund Heißerprobung erbracht wurden.
- Trotzdem werden Verzögerungen während der Errichtung und des Betriebs des Endlagers grundsätzlich für möglich gehalten, analog zum Bau anderer großer Infrastrukturanlagen.
- Das Endlager ist für die Aufnahme hochradioaktiver Stoffe ausgelegt. Die mögliche Einlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in einem separaten Bergwerk am selben Standort wird für den Entsorgungsschritt im Endlager nicht betrachtet.
- Eine mögliche Einlagerung geringer Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am selben Standort gemäß § 21 Abs. 3 EndlSiAnfV (2020) wird als Quelle für mögliche Störungen nicht



berücksichtigt. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass es sich dabei ausdrücklich um hochdruckkompaktierte Wiederaufarbeitungsabfälle in CSD-Kokillen handelt.

• Es wird die Möglichkeit einbezogen, dass eine Rückholung eingelagerter Endlagergebinde beschlossen und durchgeführt wird. Die Rückholung kann auf bestimmte Endlagergebinde beschränkt sein oder alle eingelagerten Behälter umfassen. Darüber hinaus kann die Rückholung während des Betriebes oder nach Einlagerung aller Gebinde angestoßen werden.

Aus diesen Annahmen lassen sich folgende Szenarien, die vom Referenzszenarium abweichen, ableiten:

- Szenarien aufgrund von Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers.
- Szenarien, die sich aufgrund technisch notwendiger Änderungen am Endlagerkonzept im laufenden Betrieb ergeben. Mögliche Ursachen sind neue Erkenntnisse zum Transport- oder Sorptionsverhalten verschiedener Radionuklide, die Nachbesserungen am Sicherheitskonzept notwendig machen, langfristige Lieferprobleme benötigter Komponenten, bspw. durch Rohstoffverknappung oder internationale wirtschaftliche Sanktionen gegen einen Lieferanten bzw. den Staat, aus dem geliefert wird. Ganz allgemein kann der Fortschritt von Wissenschaft und Technik immer Adaptionen und Nachbesserungen am Sicherheitskonzept oder der Auslegung des Endlagers notwendig machen.
- Szenarien ausgehend von der Entscheidung zur Rückholung der eingelagerten Abfälle.

Dem vorgeschaltet ist der Standortauswahlprozess. Entsprechend wird als erstes Szenarium ein Szenarium betrachtet, in dem von einem späteren Abschluss des Standortauswahlverfahrens ausgegangen wird als im Referenzszenarium angenommen.

Szenarium 13: Längere Dauer des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager

Die Standortauswahl dauert länger als vorgesehen. Der Standort wird nicht 2031, sondern erst einige Dekaden später festgelegt. Damit verschieben sich auch das Genehmigungsverfahren, Errichtung, Bau, Betrieb und Stilllegung des Endlagers.

Nach dem StandAG wird die Festlegung des Endlagerstandorts bis zum Jahr 2031 abgestrebt. Es gab bereits im Rahmen der Endlagerkommission Diskussionen darüber, dass dieser Zeitplan u. U. nicht einzuhalten ist. Diese Diskussion setzt sich bis heute fort. Das Szenarium eines Scheiterns des Standortauswahlverfahrens wird nicht betrachtet.

Tabelle 3-9: Szer	narium 13, Längere Dauer des Standortauswahlverfahrens
Szenarium	Längere Dauer des Standortauswahlverfahrens (Szenarium 13)
Beschreibung	Das Standortauswahlverfahren wird durchgeführt. Ein Endlagerstandort wird allerdings erst einige Dekaden nach 2031 festgelegt.
Voraussetzung	Die zur Standortauswahl notwendigen Arbeiten, insbesondere die übertägige und untertägige Erkundung, führen zu einem deutlich höheren Zeitbedarf als nach dem StandAG angestrebt
Transporte	Eine spätere Standortentscheidung hat keine Auswirkungen auf die Art und Anzahl der notwendigen Transporte von radioaktiven Abfällen. Allerdings verlängert sich ggf. der Abstand zwischen den letzten Transporten (Rückführung aus der WAA) und den Transporten zum Endlagerstandort mit Konsequenzen für die Verfügbarkeit von Technologie und Know-how.
Kosten	Kosten für das Standortauswahlverfahren und die begleitende Öffentlichkeitsbeteiligung erhöhen sich.
	Kosten für längere Zwischenlagerung und den ggf. daraus resultierenden Konsequenzen hinsichtlich Alterungseffekten.
Weitere Aspekte	Zu Beginn des Verfahrens erarbeitete Ergebnisse könnten aufgrund des Fortschritts von W+T infrage gestellt werden. Ggf. könnte die Akzeptabilität des Standortauswahlverfahrens schwieriger werden.
	Das Wissensmanagement muss über einen Zeitraum von mehreren Arbeitnehmergenerationen organisiert werden. Gleiches gilt für die Dokumentation von Daten, Entscheidungsprozessen und Ergebnissen.
Offene Fragen	Ist das Standortauswahlverfahren über einen Zeitraum von mehreren Dekaden als stabiler und vertrauensbildender Prozess durchführbar?
Konsequenzen für die Zwischenlagerung	Längere Zwischenlagerdauer, möglicherweise Notwendigkeit zur Ertüchtigung bestehender Lagergebäude oder zum Neubau von Zwischenlagern. Durch Alterungsprozesse unter Umständen aufwändigere Reparatur der Behälter notwendig
Konsequenzen für das Eingangslager	Das Eingangslager entsteht im Rahmen des Referenzszenarios deutlich später. Ggf. steigt die Wahrscheinlichkeit, das Eingangslager an einem anderen Ort umzusetzen. Dies würde dann deutlich länger betrieben werden.
Konsequenzen für die Konditionierungsan- lage	Die Entladung der TLB kann durch die längere Lagerzeit aufwändiger werden. Eine Anpassung der Konditionierungsanlage an die aufwändigere Entladung wäre die Folge.
Konsequenzen für die Endlagerung	Errichtung und Einlagerungsbetrieb können erst nach der Standortentscheidung beginnen. Sollten vor der Entwicklung von ELB schon Abfälle konditioniert werden müssen, könnten ggf. andere Behälter genutzt worden sein. Ist eine Umkonditionierung in den vorgesehenen ELB nicht möglich, muss das Einlage-

rungs- und Sicherheitskonzept des Endlagers daraufhin ausgelegt werden.

Quelle: eigene Darstellung



Szenarium 14: Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers

Bei der Errichtung des Endlagers kann es, wie bei allen großen Infrastrukturprojekten, aus verschiedenen Gründen zu Verzögerungen kommen. Daraus ergeben sich Auswirkungen auf vorgelagerte Entsorgungsschritte, die sich lediglich durch die Dauer der Verzögerung unterscheiden.

Tabelle 3-10: Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers

Szenarium	Die Errichtung des Endlagers verzögert sich (Szenarium 14)	
Beschreibung	Während der Errichtung des Endlagers kommt es zur Verzögerung. Der Grund oder die Gründe können behoben werden.	
Transporte	Ist das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt, verzögern sich Transporte von den Zwischenlagern ins Eingangslager.	
Kosten	Verzögerungen bei Errichtung des Endlagers werden zu zusätzlichen Betriebskosten sowohl beim Endlager selbst als auch bei den Einrichtungen vorgelagerter Entsorgungsschritte führen.	
Weitere Aspekte	Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers und resultierend längere Zwischenlagerzeiten können zu erhöhter Schädigung von Brennelementen durch Alterungsprozesse führen, bevor eine Konditionierung der Abfälle für die Endlagerung erfolgen kann.	
Konsequenzen für die Zwischenlagerung	Ist das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt, müssen die bestehenden Zwischenlager u. U. länger betrieben werden als geplant, mit allen sich daraus ergebenden Konsequenzen.	
Konsequenzen für das Eingangslager	Die Betriebsdauer des Eingangslagers verlängert sich im Fall von Verzögerungen bei der Errichtung des Endlagers. Abhängig von der Auslegung und geplanten Lebensdauer des Eingangslagers können Maßnahmen zu dessen Ertüchtigung notwendig werden.	
Konsequenzen für die Konditionierung	Für die Konditionierung ergeben sich keine Konsequenzen, unabhängig vom Standort der Konditionierungsanlage (siehe Kapitel 2.4.3) oder ihrer Stellung im Wegemanagement (siehe z. B. Kapitel 2.3.3).	

Quelle: eigene Darstellung

Szenarien 15 bis 18: Technisch notwendige Änderungen am Sicherheitskonzept bzw. Endlagersystem im laufenden Betrieb

Im laufenden Betrieb werden technische Anpassungen mit Relevanz für die Sicherheit des Endlagers notwendig. Durch diese Änderungen am Sicherheitskonzept werden wiederum weitere Bestandteile des Endlagersystems beeinflusst.

Technische Anpassungen an Systeme durch Erfahrungen im laufenden Betrieb führen, für sich allein genommen, nicht notwendigerweise zu weitreichenden Änderungen am jeweils zugrundeliegenden Konzept. Ein Endlager stellt insofern einen Sonderfall dar, als dass es im Hinblick auf Langzeitsicherheit den Anforderungen eines Mehrbarrierenkonzepts genügen muss. Diese Barrieren sollen, teilweise redundant, teilweise zeitlich aufeinanderfolgend oder additiv, den sicheren Einschluss der eingelagerten radioaktiven Stoffe gewährleisten. Entsprechend bestehen weitreichende Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Barrieren untereinander und hinsichtlich der Funktionen, die sie innerhalb des Sicherheitskonzepts erfüllen. Durch Beeinträchtigungen an einer der Barrieren können daher Anpassungen nicht nur des Sicherheitskonzepts, sondern des gesamten Endlagersystems WERA "Öko-Institut e.V.

nötig werden. Änderungen am Endlagersystem sind beispielsweise hinsichtlich der Materialversorgung denkbar: Die Lieferung benötigter Materialien (Beispiel: Bentonit) wird langfristig unterbrochen oder dauerhaft eingestellt, so dass eine Änderung des Sicherheitskonzepts notwendig wird. Hierbei geht es vor allem um Stoffe, die in der Bundesrepublik nicht oder nicht in der benötigten Qualität und Quantität verfügbar sind. Das können Werkstücke sein; am wahrscheinlichsten ist aber, dass ein solches Szenarium sich anhand von Rohstofflieferungen ergibt. Bentonit – ein Verwitterungsprodukt vulkanischer Aschen – ist ein natürlicher Rohstoff, der Eigenschaften besitzt, die man sich im Zusammenhang mit bestimmten Endlagerkonzepten zunutze macht. In Deutschland wird dieser Rohstoff aktuell nicht in ausreichender Menge und Qualität gewonnen. Bentonit ist nur ein Beispiel für einen Rohstoff, der bei Verwendung in einem Endlager mutmaßlich importiert werden müsste. Ein Konzept in Anlehnung an das schwedische KBS-3-Konzept wäre beispielsweise auf die Lieferung großer Mengen an Kupfer angewiesen.

Tabelle 3-11: Änderungen am Endlagersystem im laufenden Betrieb (I)

Szenarium	Anpassung des Endlagerbehälters während der Errichtung des Endla- gers (Szenarium 15)	Änderungen am Konzept für die Kammer- und Streckenverschlüsse im laufenden Einlagerungsbetrieb (Szenarium 16)
Beschreibung	Bei der Errichtung des Endlagerbergwerks treten Unterschiede zu den Ergebnissen der Erprobung oder weiteren Vorannahmen auf, die eine Anpassung des Behälterkonzepts erforderlich machen.	Während des Einlagerungsbetriebs zeigt sich, dass Verschlüsse von Einlagerungskammern oder -strecken nicht wie vorhergesehen hergestellt werden können oder die Verschlussbauwerke ihre Sicherheitsfunktion nicht erfüllen. Diese Möglichkeit schließt auch weitere sicherheitsrelevante geotechnische (Barriere-)bauwerke wie z.B. den Einschluss von Endlagerbehältern in Bentonit und dessen geplante Aufsättigung mit Wasser ein. Kann eine Barriere ihre Funktion nicht wie geplant erfüllen, kann daraus die Notwendigkeit einer Anpassung des Endlagerkonzepts erwachsen.
Voraussetzung	Ungewissheiten bei Erkundung	Neue wissenschaftliche Erkenntnisse, die bei Entwicklung des Sicherheits- konzepts und Erteilung der Genehmi- gung noch nicht vorlagen.
Transporte	Transporte von TLB zur Konditionie- rungsanlage oder konditionierter End- lagergebinde in das Eingangslager werden eingestellt.	Im Fall der Auslegung des Eingangs- lagers als Pufferlager müssen Trans- porte dorthin für die Zeit, in der der Einlagerungsbetrieb zum Erliegen kommt, unterbrochen werden.
Kosten	Abhängig vom Stand der Konditionie- rungsarbeiten u. U. erhebliche Kos- ten; ist noch nicht konditioniert wor- den, fallen Kosten durch Verzögerun- gen vorausgehender Arbeitsschritte	Je nach Fortschritt des Einlagerungs- betriebs können durch die Rückho- lung bereits eingelagerter Endlager- gebinde Kosten entstehen. Unter der Annahme, dass Einlagerungs-



Szenarium	Anpassung des Endlagerbehälters während der Errichtung des Endla- gers (Szenarium 15)	Änderungen am Konzept für die Kammer- und Streckenverschlüsse im laufenden Einlagerungsbetrieb (Szenarium 16)
	und längerem Betrieb bestehender Anlagen an.	kammern bzwstrecken direkt nach ihrer Befüllung zum restlichen Bergwerk hin verschlossen werden, kann davon ausgegangen werden, dass Schwierigkeiten bei der Errichtung geotechnischer Barrieren zu einem frühen Zeitpunkt während des Einlagerungsbetriebs erkannt werden.
Weitere Aspekte	Erforderliche Genehmigungsverfahren für Änderung der Behälter, u. U. sehr zeitaufwändig, kann zu Verzögerungen im Wegemanagement führen.	Ggf. erforderliche Genehmigungsver- fahren, u. U. sehr zeitaufwändig, kön- nen zu Verzögerungen im Wegema- nagement führen.
Konsequenzen für die Zwischenlagerung	U. U. längere Zwischenlagerung erforderlich; sollte die Konditionierung an den Zwischenlagerstandorten erfolgen, kann eine u. U. erforderliche Änderung an den Konditionierungsanlagen auch Änderungen am Zwischenlager nach sich ziehen (eher unwahrscheinlich).	Eine Unterbrechung des Einlage- rungsbetriebs zieht für den Fall, dass das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt ist, längere Betriebsdauern der Zwischenlager nach sich.
Konsequenzen für das Eingangslager	Abhängig von den unterschiedlichen Optionen für die Umsetzung eines Eingangslagers muss die Konfigura- tion des Lagers an geänderte ELB an- gepasst werden. Auf jeden Fall ist mit einer Verlängerung der Betriebsdauer des Eingangslagers zu rechnen.	Im Eingangslager müssen unter Umständen rückgeholte Endlagergebinde aufgenommen werden. Die Betriebsdauer des Eingangslagers verlängert sich im Fall einer Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs.
Konsequenzen für die Konditionierung	Die Konditionierung muss auf geänderte/angepasste ELB umgestellt werden. Bereits konditionierte Behälter müssen u. U. geöffnet und entladen werden, auf jeden Fall werden Arbeiten zur Anpassung an geänderte Anforderungen an ELB notwendig. Die Notwendigkeit von technischen Änderungen an der Konditionierungsanlage /den Konditionierungsanlagen ist nicht ausgeschlossen.	Auf die Konditionierung der Endlagergebinde haben Änderungen am Konzept oder die Umsetzung geotechnischer Bauwerke vordergründig keine Auswirkungen.

Quelle: eigene Darstellung

WERA "Öko-Institut e.V.

Tabelle 3-12: Änderungen am Endlagersystem im laufenden Betrieb (II)

Szenarium	Probleme bei der Materialversor- gung, Änderung des Sicherheits- konzepts (Szenarium 17)	Probleme bei Materialversorgung, Änderung des Endlagersystems und die Errichtung eines neuen Endla- gers notwendig (Szenarium 18)
Beschreibung	Ist das Endlagerkonzept abhängig von der Lieferung von Rohstoffen oder Bauteilen, die im Inland nicht oder nicht in ausreichender Quantität oder Qualität zur Verfügung stehen, kann eine Unterbrechung oder Einstellung der Lieferung zu einer Unterbrechung des Einlagerungsbetriebes führen oder auch eine Änderung des Endlagerkonzepts nötig machen.	Die Einstellung der Lieferung von Rohstoffen oder Bauteilen, von denen das Endlagerkonzept abhängig ist und die im Inland nicht oder nicht in ausreichender Quantität oder Qualität zur Verfügung stehen, führt zu einer Änderung des Endlagerkonzepts und der Errichtung eines neuen Endlagerbergwerks an einem anderen Standort. Abhängig von der Planung und Vorratshaltung kann das in Betrieb befindliche Endlager noch geordnet verschlossen werden, oder die eingelagerten Endlagergebinde müssen zurückgeholt werden.
Voraussetzung	Lieferverträge werden nicht bedient oder Rohstoffe oder Bauteile nicht in der benötigten Qualität geliefert. Die Einstellung von Lieferungen ist nur unter sehr außergewöhnlichen Umständen vorstellbar, bspw. Naturkatastrophen im Herkunftsland der Rohstoffe oder die Androhung ökonomischer oder militärischer Sanktionen durch Dritte bei Unterhalt von Handelsbeziehungen mit dem Herkunftsland oder Unternehmen des Lieferanten.	Lieferverträge werden nicht bedient oder Rohstoffe oder Bauteile nicht in der benötigten Qualität geliefert. Die Einstellung von Lieferungen ist nur unter sehr außergewöhnlichen Umständen vorstellbar, bspw. Naturkatastrophen im Herkunftsland der Rohstoffe oder die Androhung ökonomischer oder militärischer Sanktionen durch Dritte bei Unterhalt von Handelsbeziehungen mit dem Herkunftsland oder Unternehmen des Lieferanten.
Transporte	Im Fall der Auslegung des Eingangslagers als Pufferlager müssen Transporte dorthin für die Zeit, in der der Einlagerungsbetrieb zum Erliegen kommt, unterbrochen werden. Durch eine Änderung des Endlagerkonzepts können zusätzliche Transporte notwendig werden, wenn bereits konditionierte Abfälle - angepasst an das neue Konzept - umkonditioniert werden und dazu zu einer Konditionierungsanlage transportiert werden müssen, die sich nicht am Endlagerstandort befindet.	Transporte ins Eingangslager müssen unterbrochen werden. Der Transport sämtlicher Abfälle zu einem neuen Endlagerstandort bzw. Eingangslager wird notwendig, einschließlich möglicher zurückgeholter Endlagergebinde, sollte das bestehende Endlagerbergwerk nicht geordnet verschlossen werden können.
Kosten	Die Unterbrechung benötigter Lieferungen kann, abhängig von der Vorratshaltung am Endlagerstandort, Kosten verursachen, falls der Einlagerungsbetrieb unterbrochen werden muss. Eine dauerhafte Einstellung der	Die Einstellung benötigter Lieferungen und die Anpassung des Endlagerkon- zepts verursachen Kosten. Durch die Errichtung eines weiteren Endlager- bergwerks nach einem anderen Endla- gerkonzept, unter Umständen mit



Szenarium	Probleme bei der Materialversor- gung, Änderung des Sicherheits- konzepts (Szenarium 17)	Probleme bei Materialversorgung, Änderung des Endlagersystems und die Errichtung eines neuen Endla- gers notwendig (Szenarium 18)
	Lieferung benötigter Komponenten kann dazu führen, dass das Endlager- konzept angepasst werden muss, was mit Verzögerungen und zusätzlichen Kosten verbunden wäre.	einem vorgeschalteten neuerlichen Standortauswahlverfahren, ausgehend von den Erkenntnissen des vorherge- henden Verfahrens, ist mit erheblichen Kosten zu rechnen. Weitere Kosten können durch die möglicherweise not- wendige Rückholung bereits eingela- gerter Endlagergebinde entstehen.
Weitere Aspekte	Ggf. erforderliche Genehmigungsver- fahren, u. U. sehr zeitaufwändig, kann zu Verzögerungen im Wegemanage- ment führen.	Genehmigungsverfahren für neues Endlager
Konsequenzen für die Zwischenlagerung	Eine Unterbrechung des Einlage- rungsbetriebs zieht für den Fall, dass das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt ist, längere Betriebsdauern der Zwischenlager nach sich.	Eine Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs zieht für den Fall, dass das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt ist, längere Betriebsdauern der Zwischenlager nach sich. Durch die Errichtung eines neuen Endlagers ist mit einer deutlich längeren Verzögerung zu rechnen. Dadurch kann auch ein Neubau von Zwischenlagern notwendig werden.
Konsequenzen für das Eingangslager	Die Betriebsdauer des Eingangslagers verlängert sich im Fall einer Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs.	Die Betriebsdauer des Eingangslagers verlängert sich im Fall einer Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs. Ein Neubau des Eingangslagers als zentrales Zwischenlager, ggf. an einem neuen Standort, kann notwendig werden.
Konsequenzen für die Konditionierung	Die Konditionierung von Abfällen wird sich im Fall einer Unterbrechung des Einlagerungsbetriebs verzögern und die Betriebsdauer der Konditionierungsanlage dadurch verlängert. Sollte das verfolgte Endlagerkonzept aufgegeben werden, müssen bereits konditionierte Abfälle, angepasst an ein alternatives Endlagerkonzept, neu konditioniert werden. Die Konditionierungsanlage muss für die Behandlung der Abfälle zur Umsetzung eines geänderten Endlagerkonzepts u. U. umgebaut oder eine neue Anlage errichtet werden.	Bereits konditionierte Abfälle müssen, angepasst an ein alternatives Endlagerkonzept, neu konditioniert werden. Die Konditionierungsanlage muss für die Behandlung der Abfälle zur Umsetzung eines geänderten Endlagerkonzepts u. U. umgebaut oder, möglicherweise an einem anderen Standort, neu errichtet werden.

Quelle: eigene Darstellung

WERA "Oko-Institut e.V.

Szenarien 19 bis 21: Entscheidung zur Rückholung eingelagerter Abfälle

Während der Betriebsphase des Endlagers wird die Entscheidung getroffen, bereits eingelagerte Abfälle zurückzuholen. Die betroffenen Endlagergebinde müssen freigelegt und aus dem Endlager zurück an die Oberfläche geholt werden. Abhängig vom Zeitpunkt der Rückholung innerhalb des Einlagerungsbetriebes und dem Umfang der rückzuholenden Gebinde ergeben sich auch Konsequenzen für die der Endlagerung vorgelagerten Entsorgungsschritte.

Im Referenzszenarium wird angenommen, dass keine Entscheidung zur Rückholung erforderlich ist. Da die Möglichkeit zur Rückholung eingelagerter Abfallgebinde während der Betriebsphase Gegenstand der Endlagerauslegung ist, wird der Betreiber entsprechende Vorkehrungen treffen, um für den Fall einer solchen Entscheidung handlungsfähig zu sein.

Bollingerfehr et al. (2014) stellen ein Planungsschema aus den Schritten Entwicklung eines Rückholungskonzeptes, Nachweis der technischen Machbarkeit und Einbeziehung in Endlagerauslegung dar. Von Herold et al. (2018) werden technische Herausforderungen einer möglichen Rückholung aus Endlagern in Salz- und Tongesteinen identifiziert und technische Konzepte zur Lösung vorgeschlagen. So erfordern beispielsweise die Versatzentnahme bei vertikaler Bohrlochlagerung aber auch die Kühlung des Grubengebäudes während des Rückholungsbetriebes die Entwicklung und Erprobung neuer Konzepte. Die Autoren verdeutlichen, dass "die Auslegungsanforderung einer Rückholbarkeit die Endlagerauslegung im Ganzen" beeinflusst.

Hinsichtlich des Zeitbedarfs halten Herold et al. (2018) fest, dass "für die Dauer der Rückholung [...] in erster Näherung ein ähnlicher zeitlicher Aufwand wie für die Einlagerung beschrieben werden" kann. Darüber hinaus werden "für die Handhabung der Endlagerbehälter [...] ausreichende zentrale oder dezentrale Zwischenlagerkapazitäten, geeignete kerntechnische Anlagen zur Konditionierung der rückgeholten Abfälle, geeignete und ausreichende Endlagerbehälter für Zwischenlagerung und/oder Transport und ggf. auch entsprechende Transportkapazitäten benötigt".

Eine Entscheidung zur Rückholung, aber auch schon die Planung von Rückholbarkeit während der Betriebsphase, haben also gravierende Auswirkungen auf alle Komponenten des Endlagersystems; daher wird das Szenarium der Rückholung in WERA als Alternativszenarium betrachtet.

Die Konsequenzen einer Entscheidung, die eingelagerten Abfälle zurückzuholen, beschränken sich, wie oben dargestellt, nicht auf die Endlagerung, sondern betreffen auch vorgelagerte Entsorgungsschritte (siehe hierzu auch die Kapitel 2.3.3.4, 2.3.3.8 und 2.6). Diese Konsequenzen hängen ab von der Ursache oder Motivation für die Entscheidung zur Rückholung von Abfällen, vom Zeitpunkt der Rückholung sowie von der Menge der zurückzuholenden Endlagergebinde. Im Folgenden werden drei Szenarien unterschieden:

- Rückholung eines Teils der bereits eingelagerten Abfälle,
- Rückholung aller eingelagerten Abfälle während des Betriebes,
- Rückholung aller eingelagerten Abfälle vor Beginn der Stilllegung.



WERA **₩** Öko-Institut e.V.

Rückholung der eingelagerten Abfälle (I) Tabelle 3-13:

Szenarium	Rückholung eines Teils der bereits eingelagerten Abfälle (Szenarium 19)	Rückholung aller eingelagerten Ab- fälle während des Betriebes (Szena- rium 20)
Beschreibung	Während des Einlagerungsbetriebs wird entschieden, einen Teil der bereits eingelagerten Abfälle zurückzuholen. Gründe können beispielsweise auftretende Probleme mit der Eignung einer Abfallform, und damit der ersten Barriere des Systems, oder unvorhergesehene Inhomogenitäten im Wirtsgestein und damit eine Neubewertung der Eignung des Endlagerstandorts sein.	Während des Betriebes wird die Entscheidung getroffen, keine weiteren Abfälle einzulagern und alle bereits eingelagerten Abfälle zurückzuholen.
Voraussetzung	Entscheidung der zuständigen Behörde zur Rückholung unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der Maßnahme mit Blick auf eine mögliche radiologische Belastung von Umwelt und Bevölkerung (Rechtfertigungsgrundsatz gem. § 6 StrlSchG (2017)).	Entscheidung der zuständigen Behörde zur Rückholung unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der Maßnahme mit Blick auf eine mögliche radiologische Belastung von Umwelt und Bevölkerung (Rechtfertigungsgrundsatz gem. § 6 StrlSchG (2017)).
Transporte	U.U. Transporte zurückgeholter Abfälle zu einer Konditionierungsanlage.	Nach der Rückholung müssen die Abfälle, direkt oder zu einem späteren Zeitpunkt, zum Standort eines anderen Endlagers oder einer anderen Entsorgungsoption transportiert werden.
Kosten	Durch die Rückholung, dem damit verbundenen zeitlichen und personellen Aufwand und mögliche Maßnahmen zur Behandlung sowie u.U. erneuter Einlagerung rückgeholter Endlagergebinde entstehen zusätzliche Kosten.	Es fallen erhebliche Kosten an, insbesondere dann, wenn eine alternative Entsorgungslösung zu entwickeln und zu realisieren ist.
Weitere Aspekte	zu weiteren Aspekten und möglichen Konsequenzen der Rückholung siehe Kapitel 2.6.2	zu weiteren Aspekten und möglichen Konsequenzen der Rückholung siehe Kapitel 2.6.2
Konsequenzen für die Zwischen- lagerung	Im Fall notwendiger Konditionierungs- maßnahmen für zurückgeholte Abfälle oder einer Anpassung der Konditionie- rungsmaßnahmen für noch in Zwischen- lagern befindliche Abfälle kann es zu Verzögerungen bei der Leerung der Zwi- schenlager kommen.	Befinden sich zum Zeitpunkt der Rück- holungsentscheidung noch Abfälle in Zwischenlagern, wird sich deren Be- triebsdauer deutlich verlängern, mit allen Konsequenzen wie Ertüchtigung oder Neubau.
Konsequenzen für das Eingangs- lager	Zurückgeholte Abfälle müssen u. U. im Eingangslager gelagert werden. Durch Verzögerungen im Einlagerungsbetrieb kann eine längere Betriebsdauer des Eingangslagers notwendig werden. Das gilt insbesondere, wenn das Eingangsla- ger hinsichtlich seiner Lebensdauer nicht	Ist das Eingangslager als Pufferlager ausgelegt, müssen die rückgeholten Abfälle dort unter Umständen kurzfristig (wenige Jahre) zwischengelagert werden bis zum Transport in ein Zwischenlager, in das Eingangslager eines alternativen Endlagerbergwerks oder zum Standort einer alternativen Entsorgungslösung. Ist

Szenarium	Rückholung eines Teils der bereits eingelagerten Abfälle (Szenarium 19)	Rückholung aller eingelagerten Ab- fälle während des Betriebes (Szena- rium 20)
	dafür ausgelegt ist, auch als Rückhol- ungslager zur Verfügung zu stehen.	das Eingangslager als zentrales Zwischenlager ausgelegt, wird es zur Aufnahme rückgeholter Endlagergebinde genutzt werden. Entsprechend wird sich die Betriebsdauer verlängern, falls die Möglichkeit einer Nutzung als Rückholungslager, also zur Aufnahme rückgeholter Abfälle und deren anschließender Zwischenlagerung, nicht von vornherein geplant war.
Konsequenzen für die Konditio- nierung	Zurückgeholte Abfälle müssen u. U. erneut konditioniert werden. Sollte sich keine Konditionierungsanlage am Endlagerstandort befinden, kann die Errichtung einer Anlage notwendig werden.	Zurückgeholte Abfälle müssen u. U. erneut konditioniert oder für den späteren Transport umgeladen werden. Sollte sich keine Konditionierungsanlage am Endlagerstandort befinden, kann die Errichtung einer Anlage notwendig werden.

Quelle: eigene Darstellung



Tabelle 3-14: Rückholung der eingelagerten Abfälle (II)

Szenarium	Rückholung aller eingelagerten Abfälle vor Beginn der Stilllegung (Szenarium 21)
Beschreibung	Vor Beginn der Stilllegung des Endlagers wird die Entscheidung zur Rückholung aller eingelagerten Abfälle getroffen. Die Einlagerungskammern oder -strecken werden wieder eröffnet, alle Endlagergebinde zurückgeholt. Das Endlagerbergwerk wird aufgegeben. Mögliche Optionen zum anschließenden Umgang mit den hochradioaktiven Abfällen werden im Szenarium nicht betrachtet.
Voraussetzung	Entscheidung der zuständigen Behörde zur Rückholung unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der Maßnahme mit Blick auf eine mögliche radiologische Belastung von Umwelt und Bevölkerung (Rechtfertigungsgrundsatz gem. § 6 StrlSchG (2017).
Transporte	Transporte zu einem oder mehreren, u. U. erst zu errichtenden, Zwischen- oder Eingangslagern oder zum Standort einer alternativen Entsorgungslösung.
Kosten	Erhebliche Kosten durch den deutlich längeren Betrieb des Bergwerks und die weiteren Konsequenzen der Rückholung.
Weitere Aspekte	zu weiteren Aspekten und möglichen Konsequenzen der Rückholung siehe Kapitel 2.6.2.
Konsequenzen für die Zwischenlagerung	Die bestehenden Zwischenlager werden zum Zeitpunkt der Rückholung voraussichtlich nicht mehr in Betrieb sein. Keine Konsequenzen.
Konsequenzen für das Eingangslager	Das Eingangslager wird u. U. alle oder zumindest einen Teil der rückgeholten Abfälle bzw. Endlagergebinde aufnehmen müssen. Die Betriebsdauer wird sich deutlich verlängern, es sei denn, das Eingangslager wurde für die Nutzung als Rückholungslager und eine entsprechend längere Betriebsdauer ausgelegt.
Konsequenzen für die Konditionierung	Die zurückgeholten Abfälle müssen unter Umständen neu konditioniert oder verpackt werden, bevor weitere Entsorgungsschritte eingeleitet werden können. Die Verlängerung der Betriebsdauer einer am Endlagerstandort vorhandenen Konditionierungsanlage, deren Ertüchtigung, Umbau oder Neubau sind mögliche Optionen.

Quelle: eigene Darstellung

3.3.5. Plausibilitätsprüfung

Die in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.4 insgesamt entwickelten 21 alternativen Szenarien wurden einer kritischen Prüfung unterzogen, insbesondere hinsichtlich der Plausibilität des möglichen Eintretens. Im Ergebnis wurden fünf Szenarien als unplausibel verworfen, die im Rahmen der Analyse kombinierter Szenarien nicht weiter berücksichtigt wurden. Dies betrifft zum einen das Szenarium 3, das aus der Notwendigkeit zur Umverpackung in ELB während einer verlängerten Zwischenlagerung abgeleitet wurde.

Zum anderen wurden die Szenarien 15 bis 18, die sich mit technisch notwendigen Änderungen an Sicherheitskonzept und Endlagersystem im laufenden Betrieb befassen, als unplausibel verworfen. Im Folgenden werden die Überlegungen zur Plausibilität dargestellt.

Umverpackung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in alternative Behälter

Alternatives Szenarium 3: Umverpackung in ELB

Die Möglichkeit einer Umladung in einen ELB im Reparaturfall ist davon abhängig, dass Endlagerbehälter bereits zur Verfügung stehen. Mit der Produktion von ELB ist erst zu rechnen, wenn der Endlagerstandort per Bundesgesetz festgelegt wurde und das Endlager genehmigt ist. Die Heißen Zellen müssten für den Umgang mit ELB ausgelegt und genehmigt worden sein. Außerdem würden die Genehmigungsverfahren für die Lagerung der ELB in den Zwischenlagern voraussichtlich mehrere Jahre dauern. Nicht zuletzt müssten die ELB für den Transport ausgelegt und genehmigt worden sein. Da das Inventar eines TLB voraussichtlich auf mehrere ELB verteilt wird, wären deutlich mehr Behälter zum Endlagerstandort zu transportieren, was mit entsprechenden Risiken und Ressourcen verbunden ist. Letztlich entspricht dieses Szenarium der Option K4, die in Kapitel 2.4.3.4 beschrieben ist und dort als wenig plausibel bezeichnet wurde.

Es erscheint nicht schlüssig, dass die Konditionierungsanlage bis zur Genehmigung des Endlagers nicht auch bereits errichtet bzw. die Errichtung und Inbetriebnahme absehbar sind. Insofern ist das beschriebene alternative Szenarium nicht plausibel.

Technisch notwendige Änderungen am Sicherheitskonzept bzw. Endlagersystem im laufenden Betrieb

Das entwickelte Szenarium einer Änderung des Endlagerkonzepts während der Errichtung oder während des Betriebes aufgrund von Einstellung der Lieferung benötigter Materialien stellt ein Extremszenarium dar, das zur Veranschaulichung aufgenommen, dessen Eintreffen aber als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt wird. Die Ergebnisse der entsprechenden Plausibilitätsprüfung der Szenarien werden im Folgenden beschrieben.

Alternatives Szenarium 15: Anpassung des Endlagerbehälters während der Errichtung des Endlagers

Durch umfangreiche und von Gutachtern begleitete Prüfung der methodischen Ansätze und der Praktikabilität der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes, dessen Teil der Endlagerbehälter darstellt, vor der Entscheidung zur entsprechenden Planung und Errichtung des Endlagers kann angenommen werden, dass keine Änderung des Sicherheitskonzeptes notwendig werden wird. Außerdem wird es als unwahrscheinlich angesehen, dass es während des Endlagerbetriebes aufgrund von Lieferunterbrechungen oder –ausfällen von Materialien zu einer notwendigen Anpassung des Endlagerbehälterkonzeptes kommt. Nach bisherigem Wissensstand kommen dafür Materialien zum Einsatz, die weltweit in ausreichender Menge vorhanden sind, sodass beim Ausfall eines Lieferanten, der über einen Vertrag gebunden war, davon ausgegangen werden kann, dass Alternativen vorhanden sind. Insofern ist das beschriebene alternative Szenarium nicht plausibel.

Alternatives Szenarium 16: Änderungen am Konzept für die Kammer- und Streckenverschlüsse im laufenden Einlagerungsbetrieb

Es wird davon ausgegangen, dass im laufenden Betrieb des Endlagers über ggf. drei Jahrzehnte keine technischen Anpassungen mit Relevanz für die Sicherheit des Endlagers oder für die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Komponenten und Einrichtungen notwendig werden. Durch die umfangreiche und von Gutachtern begleitete Prüfung aller Komponenten vor dem Einsatz im Endlagerbetrieb werden technische und sicherheitstechnische Mängel ausgeschlossen und Schwachstellen erkannt und behoben. Die Auswahl von Materialien, die über die gesamte Betriebszeit erforderlich



sind, erfolgt auch unter dem Gesichtspunkt der mittelfristigen Verfügbarkeit in ausreichender Menge, z. B. Bentonit für das Buffermaterial der geotechnischen Barrieren. Insofern ist das beschriebene alternative Szenarium nicht plausibel.

Alternatives Szenarium 17: Probleme bei der Materialversorgung, Änderung des Sicherheitskonzepts

Durch umfangreiche und von Gutachtern begleitete Prüfung der methodischen Ansätze und der Praktikabilität der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes vor der Entscheidung zur entsprechenden Planung, Errichtung und Betrieb des Endlagers kann angenommen werden, dass keine Änderung des Sicherheitskonzeptes während des Baus und Betriebes erforderlich wird. Insofern werden auch mögliche Engpässe oder Unterbrechungen oder gar Wegfall von Materiallieferung keine Änderung des Sicherheitskonzeptes nach sich ziehen. Insofern ist das beschriebene alternative Szenarium nicht plausibel.

Alternatives Szenarium 18: Probleme bei der Materialversorgung, Änderung des Endlagersystems und die Errichtung eines neuen Endlagers notwendig

Wie schon bei den vorgenannten Szenarien beschrieben kann davon ausgegangen werden, dass im laufenden Betrieb des Endlagers über ggf. drei Jahrzehnte keine technischen Anpassungen mit Relevanz für die Sicherheit des Endlagers oder für die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Komponenten und Einrichtungen notwendig werden. Auch Ausfälle bei Materiallieferung können daran kaum etwas ändern. Es mag zu Verzögerungen kommen; aber Änderungen des gewählten und technischen Endlagersystems werden dadurch nicht ausgelöst. Insofern ist das beschriebene alternative Szenarium nicht plausibel.

Analyse kombinierter Szenarien

4.1. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ausgehend von den in Kapitel 2 dargestellten Optionen für die einzelnen Entsorgungsschritte und den in Kapitel 3 entwickelten Szenarien sowie dem Referenzszenarium werden im Folgenden zwei alternative Szenarien aus Kapitel 3 vertieft analysiert. Mit diesen Szenarien soll exemplarisch ein möglichst breites Spektrum möglicher zukünftiger Entwicklungen dargestellt und die Ableitung von Handlungsbedarfen entlang des Entsorgungsweges ermöglicht werden. Dazu werden die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen, deren Voraussetzungen sowie mögliche sich ergebende Konsequenzen dargestellt.

Aus den Handlungsoptionen ergeben sich in den beschriebenen Szenarien teils weitere Optionen der Ausgestaltung bzw. weitere Folge-Szenarien, die sich im weiteren Wegemanagement entwickeln können. Diese werden beschrieben und ihre Konsequenzen dargestellt. In den Folge-Szenarien werden Ereignisse dargestellt, die während der verlängerten Zwischenlagerung auftreten könnten und aus denen weiterer Handlungsbedarf entsteht.

Die in Kapitel 3 entwickelten Szenarien beschreiben jeweils Abweichungen vom Referenzszenarium innerhalb eines Entsorgungsschritts. Dargestellte Handlungsoptionen oder Lösungsansätze für auftretende Probleme zielen darauf, den geplanten Entsorgungsweg fortzusetzen, d. h. in das Referenzszenarium zurückzukehren. Die Auswahl der hier analysierten Szenarien hat das Ziel, eine möglichst große Bandbreite der in Kapitel 2 und 3 dargestellten Optionen und Szenarien einzubeziehen.

WERA "Oko-Institut e.V.

Außerdem müssen Gründe vorliegen, nach denen das Szenarium bzw. der Auslöser des Szenariums eintreten kann. Störfälle werden im Rahmen der Analyse nicht betrachtet.

In der folgenden Abbildung wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Analyse von Szenarien dargestellt.

Referenzszenarium

Alternativszenarium/Abweichung vom Referenzszenarium

Handlungsbedarf

Wissen über:
Handlungsoptionen
Voraussetzungen
Konsequenzen

Alternative Option zur Ausgestaltung des Entsorgungsschritts

Konsequenzen

Einfluss/Störung/Abweichung

Weiteres Wegemanagement inkl. folgende Entsorgungsschritte

Abbildung 4-1: Vorgehensweise bei der Entwicklung und Analyse von Szenarien

Quelle: eigene Darstellung

4.2. Szenarium Zeitverzögerung bei der Standortauswahl des Endlagers – Beschreibung und Analyse

Im Szenarium Zeitverzögerung bei der Standortauswahl des Endlagers besteht die initiale Abweichung vom Referenzszenarium in der Annahme, dass die Standortentscheidung für das Endlager deutlich später getroffen wird als gemäß §1 Abs. 5 StandAG angestrebt (siehe Szenarium 13 in Kapitel 3.3.4). Es wird vorausgesetzt, dass sich das Standortauswahlverfahren um mehr als ein Jahrzehnt verzögert. Auf mögliche Gründe wird hier nicht eingegangen. Das Szenarium wurde ausgewählt, da bereits in der Endlagerkommission über eine deutlich längere Dauer der Standortauswahl diskutiert wurde (Endlagerkommission 2016). Im Rahmen eines öffentlichen Fachgesprächs im Ausschuss für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz im Mai 2022 (Deutscher Bundestag 2022) stellten Vertreter der BGE und des BASE dar, dass das ganze Verfahren aufwändiger sei als geplant und es fraglich sei, ob die Pläne, nach denen bis 2031 der Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gefunden sein soll, sich halten ließen (NDR 2022). Aus dieser Verzögerung können sich relevante Fragestellungen für die Entsorgung ergeben.

Handlungsoptionen

Die Genehmigungen für den Betrieb der bestehenden Zwischenlager sind, wie in Kapitel 2.2.1 ausgeführt, befristet und laufen zwischen 2034 und 2047 aus. Daraus ergibt sich Entscheidungs- und



Handlungsbedarf für die Umsetzung verlängerter Zwischenlagerung. Folgende Handlungsoptionen stehen zur Verfügung:

- Verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten (Option ZL1, Kapitel 2.2.3.1)
- Bau eines zentralen Zwischenlagers (Option ZL2, Kapitel 2.2.3.2) und Überführung aller Abfälle. Dieses Lager kann nicht als Eingangslager am Endlagerstandort errichtet werden, da die Standortentscheidung zum Zeitpunkt der Entscheidung über verlängerte Zwischenlagerung noch nicht getroffen wurde.
- Konzentration auf wenige regionale Zwischenlager (Option ZL3, Kapitel 2.2.3.3) und Verteilung der Abfälle aus den bestehenden Lagern auf diese Standorte.

Wie in Kapitel 2.2.3 ausgeführt, gehen die betrachteten Optionen von Neugenehmigung bzw. Neubau von Zwischenlagern an den jeweiligen Standorten bzw. an neuen Standorten aus, nicht jedoch von einem Austausch der TLB. Die Option eines Nasslagers (siehe Option ZL4 in Kapitel 2.2.3.4) wird in diesem Szenarium nicht berücksichtigt. Die Errichtung und der Betrieb eines Nasslagers stellten eine so gravierende Änderung des bisher in Deutschland verfolgten Konzepts der trockenen Zwischenlagerung dar, dass diese Option als inkommensurabel zu den Optionen ZL1 bis ZL3 angesehen werden muss und deren Analyse nur im Rahmen eines eigenen Szenariums möglich ist.

Voraussetzungen

Damit die genannten Optionen zur Verfügung stehen, wenn der Handlungsbedarf formuliert wird, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Wird die verlängerte Zwischenlagerung an den bestehenden Standorten durchgeführt, müssen die Genehmigungen zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen verlängert werden. Für neu zu errichtenden Anlage (ZL2 und ZL3) ist zunächst zu klären, an welchem Standort die neue(n) Anlage(n) errichtet werden soll(en). Es wird davon ausgegangen, dass vor Festlegung eines Standorts für ein neues Zwischenlager Kriterien festgelegt werden, nach denen der Standort gewählt wird.

Konsequenzen

Nach (BMU 2020) kommt eine Verlängerung der Zwischenlagergenehmigungen einer Neugenehmigung gleich. Gemäß § 6 AtG kann eine Verlängerung von Genehmigungen nur nach vorheriger Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen. Die Voraussetzungen für eine Neugenehmigung sowie die Befristung der neuen Genehmigung oder mögliche weitere Genehmigungsverlängerungen werden zu definieren sein. Außerdem wäre es nach (ESK 2015a) sinnvoll, ein spezifisches Regelwerk für die verlängerte Zwischenlagerung unter Einbeziehung der für den Abtransport notwendigen Regelungen zu etablieren.

Um die Voraussetzungen für eine Neugenehmigung rechtzeitig umsetzen zu können, ist es notwendig, Forschung zu alterungsbedingten Veränderungen an ausgedienten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen während der trockenen Zwischenlagerung frühzeitig zu initiieren (siehe auch Kapitel 1.2.7.).

Im Bericht zur 7. Joint Convention (BMU 2020) ist festgehalten, dass "für eine Verlängerung der Zwischenlagerung [...] einerseits Erkenntnisse aus den ausgewerteten Betriebserfahrungen und den Inspektionen, wie sie aus der PSÜ vorliegen, zugrunde zu legen und andererseits hinreichend belastbare Daten zu den sicherheitstechnisch relevanten Komponenten und Werkstoffen notwendig" (siehe Kapitel 2.2) sind. Auch eine standortübergreifende Auswertung aller PSÜs der verschiedenen WERA "Oko-Institut e.V.

bestehenden Zwischenlager könnte zu wichtigen Erkenntnissen für die Definition von Kriterien führen.

Bei einer Entscheidung für die Option ZL2 oder ZL3 wären neue Zwischenlager zu errichten. Der Vorteil wäre, dass diese für eine entsprechend lange Lagerzeit ausgelegt werden könnten. So könnten beispielsweise Heiße Zellen zu Inspektions- und Reparaturzwecken integriert werden. Es müsste u. a. geprüft werden, ob das STEAG- bzw. WTI-Konzept, nach welchem die bestehenden Zwischenlager errichtet wurden, auch für wesentlich größer dimensionierte Lager geeignet ist. Sollten hier neue Gebäude-Konzepte entwickelt werden müssen, wäre dies in der Zeitplanung zu berücksichtigen. Bei Option ZL2 und ZL3 werden Transporte hochradioaktiver Abfälle von den derzeit betriebenen Zwischenlagerstandorten zu den Anlagen für die verlängerte Zwischenlagerung notwendig. Bei Option ZL3 wäre außerdem zu entscheiden, wie die Behälter auf die verschiedenen Zwischenlager aufgeteilt werden sollen. Nützlich wäre bei diesen Überlegungen, den späteren Abruf zum Endlagerstandort (bzw. zur Konditionierungsanlage) und die mit der Beladung von Endlagerbehältern verbundenen Anforderungen hinsichtlich der Auswahl der Brennelemente schon hier zu berücksichtigen, um hierfür optimale Transportchargen zusammenstellen zu können.

Mit der Umsetzung eines Konzepts zur verlängerten Zwischenlagerung gemäß Option ZL2 oder ZL3 werden einige Gründe zur Errichtung und Inbetriebnahme eines Eingangslagers in Form eines zentralen Zwischenlagers für alle 1.900 TLB (Option EG 2a, Kapitel 2.3.3.5) obsolet. Die Nutzung eines Pufferlagers am Endlagerstandort könnte dann sinnvoller erscheinen:

- Errichtung und Betrieb eines Pufferlagers für eine kleine Anzahl von TLB werden absehbar kostengünstiger sein,
- der technische Aufwand für Errichtung und Betrieb des Eingangslagers wird reduziert,
- der Flächenverbrauch am Endlagerstandort wird verringert,
- wie in Kapitel 1.2.3 ausgeführt, übernimmt eine Standortgemeinde mit einer kerntechnischen Anlage ein negatives Gut und damit auch eine gesellschaftliche Last. Mit dem Verzicht auf ein zentrales Zwischenlager als Eingangslager kann diese Last ein Stück weit gemindert werden.

Aufgrund geänderter Gefährdungsbewertung bzw. neuer Erkenntnisse zu den Auswirkungen möglicher zivilisatorischer Einwirkungen auf ein Zwischenlager gab es bereits die Notwendigkeit der sicherungstechnischen Nachrüstungen (siehe Kapitel 2.2.1). Es ist nicht auszuschließen, dass auch in Zukunft solche Nachrüstungen für Zwischenlager notwendig werden. Daraus können sich weitere Konsequenzen ergeben.

Werden alle oder viele der bestehenden Standorte beibehalten, ist die Aufgabe der atomrechtlichen Aufsicht weiterhin auf mehrere Bundesländer verteilt. Fachpersonal mit fundiertem Wissen über kerntechnische Anlagen, Strahlenschutz und Atomrecht wird daher auch in jeder atomrechtlichen Aufsichtsbehörde sowie der Genehmigungsbehörde des Bundes benötigt. Um den Wissens- und Kompetenzerhalt trotz des Atomausstiegs zu sichern, werden gezielte Maßnahmen zur Personalgewinnung und -schulung benötigt werden.



Das Szenarium der Zeitverzögerung bei der Standortauswahl des Endlagers wird grundsätzlich als wahrscheinlich angesehen. Um abschätzen zu können, welche Zeiträume für die längerfristige Zwischenlagerung notwendig werden könnten und welche Option der längerfristigen Zwischenlagerung am geeignetsten für diese Zeiträume ist (z. B. aufgrund von Alterungsaspekten der TLB und des Inventars), ist es notwendig, eine auf begründeten realistischen Annahmen basierende Analyse der voraussichtlichen Dauer der einzelnen Verfahrensschritte des StandAV durchzuführen. Da die längerfristige Zwischenlagerung faktisch erst endet, wenn die hochradioaktiven Abfälle in Endlagerbehälter verpackt sind bzw. ins Endlager eingelagert sind, ist darüber hinaus eine Analyse der voraussichtlichen Dauer der folgenden Entsorgungsschritte (Planung, Genehmigung, Errichtung, Betrieb von Eingangslager, Konditionierung, Endlagerung inkl. der notwendigen Transporte) notwendig.

Mögliche Folge-Szenarien

Der weitere Prozess der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle kann für die Option ZL1 ablaufen wie im Referenzszenarium in Kapitel 3.2. dargestellt. Für die Optionen ZL2 und ZL3 sind die Wechselwirkungen mit anderen Entsorgungsschritten in den Kapiteln 2.2.3.2 und 2.2.3.3 dargestellt.

Es sind jedoch Folge-Szenarien denkbar, aus denen während der verlängerten Zwischenlagerung Handlungsbedarf entsteht – unabhängig davon, ob für die verlängerte Zwischenlagerung Option ZL1, ZL2 oder ZL3 zum Einsatz kommen:

- a) Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckelbarriere
- b) Schädigung des Abfallinventars

Die Szenarien werden im Folgenden ausgeführt.

a) Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckelbarriere

Während der verlängerten Zwischenlagerung kann es zum Versagen der Deckeldichtungen von TLB kommen. Wie in Kapitel 1.2.6.1 ausgeführt, kann in den Zwischenlagern die Sekundärdeckelbarriere ersetzt werden. Sollte die Primärdeckeldichtung versagen, kann ein Fügedeckel aufgeschweißt werden, um das Doppeldeckeldichtsystem wieder herzustellen.

Bislang gab es in Deutschland keinen Fall, bei dem das Aufbringen eines Fügedeckels bzw. das Wechseln der Sekundardeckeldichtung notwendig gewesen wäre (BASE 2020c). Grundsätzlich kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass bei sehr langen Zwischenlagerzeiten nach einem Reparaturfall der Primärdeckelbarriere bei aufgeschweißtem Fügedeckel auch die Sekundärdeckelbarriere ihre spezifikationsgerechte Dichtheit einbüßt. In den Zwischenlagergenehmigungen von 2003 wurde das gleichzeitige Versagen beider Behälterbarrieren für den beantragten Lagerzeitraum im Rahmen der erhobenen Einwendungen gewürdigt (Bundesamt für Strahlenschutz 2003). Dabei wurde dieser Fall als auszuschließen beurteilt. Für den Fall der verlängerten Zwischenlagerung wird dieses Szenarium im Folgenden analysiert.

Es wird in diesem Szenarium davon ausgegangen, dass das Konzept der spezifikationsgerechten Dichtheit von zwei Barrieren während der verlängerten Zwischenlagerung aufrechterhalten wird. Versagt eine Sekundärdeckeldichtung bei aufgeschweißtem Fügedeckel, besteht Handlungsbedarf. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass nach einem erfolgreichen Austausch der Deckeldichtungen der TLB wieder die notwendige Dichtheit erlangt, um weiter zur verlängerten Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle verwendet zu werden.

Handlungsoptionen

Der betroffene TLB muss zur Reparatur der Dichtungen vollständig geöffnet werden. Die Öffnung von TLB zu Reparaturzwecken ist in den Szenarien 1 und 2 in Kapitel 3.3.1 dargestellt. Der Austausch der Primärdeckelbarriere ist nur in der abschirmenden Umgebung einer Heißen Zelle bzw. in den benachbarten Kernkraftwerken der Standortzwischenlager möglich. Die letzten drei Kernkraftwerke – Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 – werden zeitnah den Betrieb einstellen. Andere Kernkraftwerke werden oder wurden bereits zurückgebaut. Die Anzahl von Einrichtungen zur Öffnung beladener TLB und zur Handhabung der darin befindlichen Abfälle wird in absehbarer Zeit weiter abnehmen und schließlich wird keine geeignete Anlage mehr zur Verfügung stehen.

Alternativen zur Öffnung betroffener TLB und dem Austausch der Dichtungen stehen bei einer Schädigung beider Deckeldichtungen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zur Verfügung. Diese Handlungsoption kann, wie in Szenarium 1 und 2 (Kapitel 3.3.1) ausgeführt, unterschiedlich ausgestaltet werden

Voraussetzungen

Im Rahmen einer Entscheidung für verlängerte Zwischenlagerung müssen die bestehenden Reparaturkonzepte überarbeitet werden, um eine Reparatur der Primärdeckelbarriere vorzusehen und eine grundsätzliche Vorgehensweise für den Reparaturfall der Sekundärdeckelbarriere bei aufgeschweißtem Fügedeckel zu entwickeln, zu qualifizieren und zu genehmigen. Unter anderen müssen benötigte Ersatzteile wie Dichtungen und Schrauben in ausreichender Menge vorgehalten werden oder die kurzfristige Verfügbarkeit sichergestellt sein.

Wesentliche Voraussetzung für die Reparatur der Sekundärdeckeldichtung bei defekter Primärdeckeldichtung ist u. a. die Verfügbarkeit einer abschirmenden Umgebung, in der die fernhantierte Öffnung, die Reparatur und der erneute Verschluss des TLB möglich sind. Daher müssen zu diesem Zweck eine oder mehrere Heiße Zellen zur Verfügung stehen.

Der Bau Heißer Zellen an einem oder mehreren, möglicherweise allen, Zwischenlagerstandorten als Teil des Konzepts zur verlängerten Zwischenlagerung ist die wesentliche Voraussetzung für den Tausch der Deckeldichtungen von TLB.

Sollten Heiße Zellen nicht an allen Standorten verlängerter Zwischenlagerung eingerichtet werden, muss darüber hinaus eine Möglichkeit zum Transport von TLB mit aufgeschweißtem Fügedeckel und defekten Primär- und Sekundärdeckeln geschaffen werden (siehe Szenarium 2 in Kapitel 3.3.1). Dazu müssten z. B. TLB für den Transport mit aufgeschweißtem Fügedeckel qualifiziert und genehmigt werden. Die Entfernung des Fügedeckels für den Transport ist im Fall zweier defekter Deckeldichtungen nicht möglich, da in diesem Fall eine Freisetzung radioaktiver Stoffe zu besorgen wäre. Alternativ ist die Konstruktion und Zulassung eines abschirmenden Transportbehälters vorstellbar, der einen gesamten TLB aufnehmen kann. Ob eine solche Konstruktion, insbesondere hinsichtlich des Gewichts und der Handhabbarkeit, technisch umsetzbar ist, kann im Rahmen des Forschungsprojekts WERA nicht bewertet werden.

Ist ein Transport von TLB mit defekter Sekundärdeckeldichtung sowie aufgeschweißtem Fügedeckel technisch nicht sicher durchführbar bzw. nicht genehmigungsfähig, muss an jedem Zwischenlagerstandort eine Heiße Zelle errichtet werden, um Reparaturen an Behältern vornehmen zu können. Die Möglichkeit, eine mobile Heiße Zelle zu entwickeln und bei Bedarf an verschiedenen Standorten zum Einsatz zu bringen, wird in Kapitel 3.3.1 diskutiert und hier daher nicht weiter betrachtet.



Alternativ könnten TLB, deren Primärdeckel die spezifikationsgerechte Dichtheit verlieren, an einen Zwischenlagerstandort mit integrierter Heißer Zelle transportiert, dort repariert und weiter gelagert werden. Wäre dann bei diesen Behältern zu einem späteren Zeitpunkt die Sekundärbarriere zu wechseln, könnte auch hierfür die Heiße Zelle genutzt werden.

Konsequenzen

Sollte nur an ausgewählten Zwischenlagerstandorten oder einem einzigen Standort eine Heiße Zelle errichtet werden, werden zusätzliche Transporte hochradioaktiver Abfälle notwendig. Sollten dagegen an allen Standorten verlängerter Zwischenlagerung Heiße Zellen vorgesehen und gebaut werden, könnten defekte Primärdeckeldichtungen direkt an jedem Standort ersetzt werden.

Sollte es nur einen Zwischenlagerstandort geben, der mit einer Heißen Zelle ausgestattet ist, könnten die reparierten TLB dort gelagert werden - es könnte so der weitere Transport vermieden werden. Dies erfordert eine entsprechende Genehmigung für die Lagerung dieser reparierten TLB. Außerdem wäre dafür Sorge zu tragen, dass das entsprechende Zwischenlager eine ausreichende Kapazität für die Zwischenlagerung der reparierten TLB vorhält. Ggf. wäre rechtzeitig die Erweiterung der Lagerkapazität zu planen.

Der Bau von Heißen Zellen an den Zwischenlagerstandorten hat auch Auswirkungen auf den Rückbau dieser Anlagen. Voraussichtlich würde eine Heiße Zelle den Rückbau zeitlich verzögern. Außerdem können beim Rückbau zusätzliche schwach- und mittelradioaktive Abfälle im Rahmen der Dekontamination sowie unter Umständen hochradioaktive Abfälle durch aktivierte Materialien im Inneren der Heißen Zelle anfallen.

Sollten sich durch die Reparatur Änderungen am Behälter ergeben, so wäre dies für die Annahmebedingungen des Eingangslagers zu berücksichtigen. Auch die Konditionierungsanlage müsste an Änderungen am Behälter angepasst sein.

Das Szenarium der Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckeldichtung wird kurzfristig nicht als wahrscheinlich betrachtet. Je länger aber die Zwischenlagerung dauert, desto wahrscheinlicher wird das Szenarium. Es wird zum Zeitpunkt des Endes der Genehmigungen der bestehenden Zwischenlager eine Entscheidung zu treffen sein, wie mit dem Risiko der Schädigung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdeckeldichtung umzugehen ist. Notwendig, um eine Entscheidung treffen zu können, sind zum einen die Forschungsergebnisse zur Alterung der Dichtsystems der TLB. Zum anderen bedarf es einer begründeten und realistischen Abschätzung der Dauer der Standortauswahl des Endlagers und der darauffolgenden Entsorgungsschritte bis zur Einlagerung ins Endlager, um die Dauer der Zwischenlagerung und damit mögliche Schädigungen der TLB abschätzen zu können.

b) Schädigung des Abfallinventars

Während der verlängerten Zwischenlagerung kann es durch Alterungsprozesse zu Schädigungen des Abfallinventars kommen. Hier sind nur die Brennelemente in den TLB zu betrachten, da die Abfälle in den Glaskokillen in eine Glasmatrix eingeschlossen sind und der 5 mm dicke Edelstahlmantel eine weitere Barriere zur Rückhaltung bildet. Aktueller Forschungsbedarf hinsichtlich des Nachweises der Einhaltung der Schutzziele für die verlängerte Zwischenlagerung wird für Glaskokillen nicht gesehen (BGZ 2022). Im Sicherheitskonzept der TLB stellen die Brennstabhüllrohre die primäre Barriere gegen ein unkontrolliertes Verbreiten radioaktiver Stoffe in das Behälterinnere dar und sie sichern, dass der Brennstoff in einer immer gleichen geometrischen Anordnung verbleibt (BGZ 2022). Weitere Ausführungen zur Alterung von Brennelementen finden sich in Kapitel 1.2.7.

Für die verlängerte Zwischenlagerung in den Optionen ZL1 bis ZL3 wird es bei auftretender Schädigung des Abfallinventars keinen Unterschied machen, welche Option der Zwischenlagerung gewählt wird. Die Schäden könnten ggf. dazu führen, dass die Schutzziele der Zwischenlagerung als solche nicht mehr eingehalten werden können. Der Handlungsbedarf für die beschriebenen Zwischenlageroptionen wird daher nicht differenziert. Allerdings können Transportschäden von bereits vorgeschädigten Brennelementen nach längerer Lagerzeit derzeit nicht ausgeschlossen werden. Da in den Optionen ZL2 und ZL3 zusätzliche Transporte stattfinden, kann sich hier das Risiko von Transportschäden erhöhen. Auch für das Eingangslager kann sich Handlungsbedarf ergeben, da hier, wie im Zwischenlager, die Brennstabhüllrohre zum Sicherheitskonzept der TLB gehören.

Handlungsbedarf kann sich auch für die Konditionierungsanlage ergeben. Die verschiedenen Optionen für die Konditionierungsanlage werden in Kapitel 2.4.3 betrachtet. Die Konditionierungsanlage muss an mögliche Schwierigkeiten durch altersbedingt veränderte Abfälle angepasst sein. Für das Szenarium wird davon ausgegangen, dass sich das Eingangslager und die Konditionierungsanlage am Endlagerstandort befinden.

Bezüglich der Entwicklung des Abfallinventars werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird national und international kontinuierlich zur Veränderung ausgedienter Brennelemente und verglaster hochradioaktiver Abfälle während verlängerter trockener Zwischenlagerung geforscht. Dadurch werden die Erkenntnisse zur Degradation von Abfallformen in den nächsten 10 Jahren stark zunehmen.
- Durch diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden Veränderungen des Abfallinventars in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Abbrand usw. gut vorhersagbar werden.
- Aufgrund der physikalischen und chemischen Unterschiede der Brennelementtypen wie beispielsweise unterschiedlichen Abbränden und unterschiedlicher Zwischenlagerzeit werden nicht alle Brennelemente gleichzeitig Schäden aufweisen.
- In Verfahren zur Neugenehmigung von Zwischenlagern werden Nachweise zur zu erwartenden Degradation von Brennelementen und Spaltproduktkokillen und deren möglichen Folgen zu erbringen sein.

Handlungsoptionen

Sollten die Schädigungen des Abfallinventars dazu führen, dass die Schutzziele der Zwischenlagerung (und ggf. auch die des Eingangslagers) und/oder dass die Transportanforderungen nicht mehr eingehalten werden können, sind Möglichkeiten zu entwickeln, deren Einhaltung wieder herzustellen. So könnten beispielsweise beschädigte Brennelemente in einer Heißen Zelle (siehe hierzu Kapitel a) in Kapitel 4.2) in Köcher verpackt werden und in einem dafür geeigneten TLB weiter zwischengelagert werden.

Sollten die Schäden Auswirkungen auf das Dichtsystem der TLB haben, so könnten diese in Heißen Zellen behoben werden. Es wird hierfür auf Abschnitt a) dieses Unterkapitels verwiesen.

Für den Abtransport der TLB wird – bis auf den oben genannten Fall – kein Handlungsbedarf gesehen, wenn einzelne Brennelemente geschädigt sind, solange die Transportvoraussetzungen erfüllt werden und mindestens ein Deckel des TLB die spezifizierte Dichtigkeit aufweist.

Für die Konditionierungsanlage sind Probleme mit der Handhabung durch beschädigte Brennelemente denkbar. In Kapitel 3.3.3 sind hierzu Szenarien zu Schwierigkeiten beim Entladen, Zerlegen und Verpacken der Brennelemente beschrieben (Szenarien 15 und 16).



Um mit beschädigen Brennelementen und den daraus ggf. resultierenden Schwierigkeiten im Rahmen der Konditionierung umgehen zu können, können zusätzliche Straßen, d. h. Behandlungskapazitäten in der Konditionierungsanlage, für TLB geschaffen werden, für deren Entladung sowie die anschließende Konditionierung der enthaltenen Abfälle eine Sonderlösung erforderlich ist.

Die direkte Einlagerung der TLB ins Endlager wird im Forschungsprojekt WERA nicht weiter betrachtet.

Voraussetzungen

Führen Schäden am Abfallinventar dazu, dass die Schutzziele der Zwischenlagerung nicht mehr eingehalten werden oder die TLB nicht transportiert werden können, könnten für defekte Brennelemente die derzeit bereits eingesetzten, dicht verschlossenen Defektstabköcher genutzt werden (GNS Gesellschaft für Nuklear Service mbH o.D.). Die Köcher müssten für die Zeitdauer der verlängerten Zwischenlagerung qualifiziert werden. Voraussetzung ist außerdem die Reparaturmöglichkeit in einer Heißen Zelle. Bezüglich der Voraussetzungen für Heiße Zellen wird auf Kapitel 4.2. verwiesen.

Die Konditionierungsanlage muss an mögliche Schwierigkeiten durch altersbedingt veränderte Abfälle angepasst sein. Technische Möglichkeiten zur Entladung, Zerlegung und Verpackung beschädigter Brennelemente müssen vorhanden sein. Möglicherweise werden auch TLB angeliefert, die bereits im Zwischenlager repariert wurden und die beispielsweise einen Fügedeckel aufweisen (siehe hierzu Kapitel a) in Kapitel 4.2.). Auch hierfür muss Vorsorge getroffen werden.

Konsequenzen

Im Fall der verlängerten Zwischenlagerung müssen bei der Planung der Konditionierungsanlage Schädigungen durch Degradation des Abfallinventars und sich daraus ergebende mögliche Konsequenzen für die Konditionierung berücksichtigt werden. Grundlage für Entscheidungen in diesem Zusammenhang sind Erkenntnisse aus der Forschung zur alterungsbedingten Veränderung des Abfallinventars während trockener Zwischenlagerung. Auch internationale Erfahrungen aus Schweden, Finnland und der Schweiz dürften bis zum Zeitpunkt, an dem die Konditionierung in Deutschland konzipiert und geplant wird, zur Verfügung stehen. Wichtig ist, dass diese Prozesse kontinuierlich verfolgt werden, damit das erforderliche Wissen für die Planung der Konditionierungsanlage später zur Verfügung steht. Die Konditionierungsanlage wird voraussichtlich in der letzten Phase des StandAV geplant werden müssen. Dann muss entschieden werden, auf welche Weise die Anlage zur Entladung und endlagergerechten Konditionierung geschädigter Abfallformen technisch auszulegen ist.

Es kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass die Konditionierungsanlage im Fall des Auftretens von gänzlich unerwarteter Degradation nach der Errichtung technisch angepasst werden muss. Je nach Ausmaß der Degradation des Abfallinventars kann dies zur Folge haben, dass die Konditionierung länger dauert als geplant. Verzögerungen bei der Konditionierung könnten, wenn hier schwerwiegende Probleme beim Entladen/Zerlegen/Verpacken auftreten und auch die Pufferung durch das Eingangslager nicht ausreicht, den Einlagerungsbetrieb verzögern. Für die Zwischenlagerung und das Eingangslager wiederum ist nur bei schwerwiegenden Problemen bei der Konditionierung mit einer längeren Betriebszeit und den damit verbundenen Konsequenzen zu rechnen. Eine längere Zwischenlagerdauer kann mit fortschreitender Schädigung des Abfallinventars einhergehen. Dieser Effekt könnte die oben beschriebenen möglichen Folgen noch verstärken.

Sollte sich nach Inbetriebnahme der Konditionierungsanlage herausstellen, dass aufgrund einer systematischen progressiven Degradation eine beschleunigte oder vorgezogene Konditionierung eines Teils oder aller Abfälle notwendig wird, müsste zunächst bewertet werden, welche TLB mit welchem Abfallinventar am stärksten von Degradation betroffen sein können und in welcher Reihenfolge folglich konditioniert werden sollte. Hierdurch ergeben sich Auswirkungen auf die Transportlogistik. Außerdem ist diese Vorgehensweise bestimmend für die Leerung der Zwischenlager. Darüber hinaus wären in diesem Fall Lagerungsmöglichkeiten für konditionierte Endlagerbehälter zu schaffen, da durch eine forcierte Konditionierung Endlagergebinde schneller als vorgesehen bereitgestellt würden und vor der Einlagerung zwischengelagert werden müssten (siehe hierzu Kapitel 2.3.3).

Sollten die TLB innen stark kontaminiert sein, muss ggf. für eine technisch aufwändigere Dekontaminierung entladener TLB ein höherer Zeitbedarf eingeplant werden.

Auch die Endlagerbehälter (ELB) werden im Laufe des StandAV entwickelt werden, sie sind Teil des Endlagerkonzepts. Es sollte geklärt werden, inwieweit defekte Brennelemente Auswirkungen auf die Ausgestaltung der Endlagerbehälter haben werden. Unter Umständen müssen Volumen und Masse des jeweils pro ELB aufzunehmenden Abfalls aus beschädigten Brennelementen gegenüber Volumen und Masse intakter Brennelemente pro Endlagerbehälter aus physikalischen und chemischen Gründen geringer sein. Dadurch könnte ggf. die Anzahl der benötigten Endlagerbehälter steigen. Ob und wenn ja welche Auswirkungen auf das Sicherheitskonzept und die Auslegung des Endlagers zu berücksichtigen wären, wäre zu prüfen.

Ob – und wenn ja in welchem Maße – eine Schädigung des Abfallinventars möglich ist, lässt sich im Forschungsprojekt WERA nicht beantworten. Für die verlängerte Zwischenlagerung wird diese Frage für die Neugenehmigungen insofern eine Rolle spielen, als dass die Einhaltung der Schutzziele der Zwischenlagerung und der Transportvoraussetzungen hier nachgewiesen werden müssen. Für die Planung der Konditionierungsanlage und der Endlagerbehälter (voraussichtlich am Ende des StandAV) wird das Wissen über mögliche Schäden des Abfallinventars relevant sein. Es ist zu klären, ob Auswirkungen durch Schäden am Abfallinventar auf die Anzahl/das Design der Endlagerbehälter und somit auf das Endlagerkonzept möglich sind.

4.3. Szenarium Verteilung der Oberflächenanlagen auf mehrere Standorte - Beschreibung und Analyse

In diesem Kapitel wird das Szenarium beschrieben, dass nicht alle kerntechnischen Anlagen am Endlagerstandort errichtet werden, sondern vielmehr in dessen Peripherie angesiedelt sind. Für das Szenarium wird davon ausgegangen, dass der Endlagerstandort wie im StandAG vorgesehen bis zum Jahr 2031 festgelegt wird.

Das Szenarium wurde ausgewählt, da dieses beispielsweise beim zukünftigen französischen HLW-Endlagerprojekt Cigeo bereits geplant wird: dort sollen die übertägigen Anlagen auf zwei Gebiete (Rampen- und Schachtbereiche) aufgeteilt werden, die einige Kilometer voneinander entfernt liegen (Andra o.D.). Der Handlungsbedarf für eine solche Entscheidung in Deutschland kann beispielsweise aus der mangelnden Flächenverfügbarkeit am Endlagerstandort (wie beim Logistikzentrum für das Endlager Konrad (BGZ o.D.b)) oder einer "möglichst gerechte[n] Verteilung der Lasten und Pflichten" (Endlagerkommission 2016) resultieren.

Die Tagesanlagen eines Endlagers werden in Kapitel 2.5.2 beschrieben. Außerdem benötigt ein Endlagerstandort infrastrukturelle Anschlüsse, er muss also über einen schwerlasttauglichen Straßenanschluss sowie einen Gleisanschluss verfügen.



Handlungsoptionen

Folgende Handlungsoptionen werden hier diskutiert

- Das Eingangslager wird an einem eigenen Standort errichtet (nicht am Endlagerstandort).
- Die Konditionierungsanlage wird an einem eigenen Standort errichtet (nicht am Endlagerstandort).
- Eingangslager und Konditionierungsanlage werden an einem eigenen Standort errichtet (nicht am Endlagerstandort).

Voraussetzungen für alle betrachteten Handlungsoptionen

Sollen die kerntechnischen Anlagen wie das Eingangslager und/oder die Konditionierungsanlage nicht am Endlagerstandort errichtet werden, so ist zu klären, ob ein Auswahlprozess für den Standort nach definierten Kriterien für die Anlagen für notwendig erachtet wird (beispielsweise aus politischen Gründen). Derzeit ist ein Auswahlprozess für einen Standort für solche Anlagen gesetzlich nicht vorgeschrieben.

Konsequenzen für alle betrachteten Handlungsoptionen

Da das Eingangslager/die Konditionierungsanlage in den betrachteten Handlungsoptionen in der Nähe des Endlagerstandorts sein soll, kann der Auswahlprozess für den Standort für diese Anlagen erst beginnen, wenn der Standort für das Endlager per Bundesgesetz festgelegt wurde. Um Zeitverzögerungen zu vermeiden, wäre es sinnvoll, bereits in weiter fortgeschrittenen Phasen des StandAG auch die Frage der Positionierung der Oberflächenanlagen genauer zu untersuchen und eine Entscheidung mit vorzubereiten und diese nach Möglichkeit zusammen mit der Standortentscheidung für das Endlager zu fällen.

Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass ein Auswahlprozess für den Standort für das Eingangslager bzw. die Konditionierungsanlage andere Entsorgungsschritte verzögert. So ist denkbar, dass durch einen "lange" andauernden Auswahlprozess für das Eingangslager/die Konditionierungsanlage die Zwischenlagerstandorte nicht zügig geleert werden können, sich die Zwischenlagerdauer verlängert und auch Konditionierung und Beginn des Einlagerungsbetriebs des Endlagers verzögern können – mit allen möglichen Konsequenzen, die eine Zeitverzögerung mit sich bringen kann.

Für ein Eingangslager bzw. eine Konditionierungsanlage, die sich nicht am Endlagerstandort befindet, sind zusätzliche Transporte zum Endlagerstandort notwendig. Außerdem können Synergien mit anderen Anlagen am Endlagerstandort nicht genutzt werden. Dies erzeugt voraussichtlich, wie in Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 dargestellt, höhere Betriebskosten.

4.3.1. Eingangslager liegt nicht am Endlagerstandort

Für das Szenarium wird davon ausgegangen, dass das Eingangslager nicht am Endlagerstandort, sondern vielmehr in der näheren Umgebung des Endlagerstandorts errichtet wird. Es wird weiter angenommen, dass, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, die Konditionierungsanlage am Endlagerstandort errichtet wird.

WERA "Oko-Institut e.V.

Endlagerstandort

Konditionierungsanlage

Transport TLB aus den ZL

Abbildung 4-2: Eingangslager liegt nicht am Endlagerstandort

Quelle: eigene Darstellung

Voraussetzungen

Grundsätzlich ergeben sich für das Szenarium zwei Optionen der Ausgestaltung. Das Eingangslager kann, wie in Kapitel 2.3 beschrieben,

- als Pufferlager, um die Konditionierung oder Endlagerung zu verstetigen, oder
- als Zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle

genutzt werden und damit zugleich die Zwischenlagerstandorte entlasten und schließlich obsolet machen.

Befindet sich das Eingangslager nicht am Endlagerstandort, macht die Funktion als Pufferlager für die Konditionierung keinen Sinn, da für die Verstetigung der Konditionierung die TLB zunächst von den Zwischenlagerstandorten zum Eingangslager und dann zur Konditionierungsanlage am Endlagerstandort transportiert werden müssten. Ein Eingangslager als Pufferlager wird hier daher nicht weiter diskutiert.

Das Eingangslager kann bei notwendiger Rückholung eingelagerter hochradioaktiver Abfälle für die Dauer der Betriebsphase dazu dienen, zurückgeholte Endlagergebinde für einen begrenzten Zeitraum aufzunehmen, d. h. die Rückholung zu puffern. Läge es nicht am Endlagerstandort, wären die rückgeholten ELB zu transportieren.

Für eine Funktion als Zentrales Zwischenlager (siehe auch Kapitel 2.2.3.2) übernimmt das Eingangslager auch die Aufgabe vergleichbar einem Bereitstellungslager, wie es beispielsweise für das Endlager Konrad projektiert wird. Der Standort für das Eingangslager könnte erst mit der Festlegung des Endlagerstandorts beschlossen werden. Wenn der Standort für das Eingangslager früher



beschlossen würde, läge es ggf. nicht in der Nähe des Endlagerstandorts. Diese Möglichkeit wird hier daher nicht diskutiert.

Konsequenzen

Bei der Planung des Eingangslagers könnten alle Anforderungen an eine verlängerte Zwischenlagerung in einem solchen Lager berücksichtigt werden. Es müsste ggf. auch eine Heiße Zelle für Reparaturen vorgesehen werden (siehe hierzu auch die möglichen Folge-Szenarien in Kapitel 4.2). Diese wäre zusätzlich zur Konditionierungsanlage, die am Endlagerstandort verortet wäre, zu errichten und zu betreiben, was mit zusätzlichen radiologischen Emissionen, zusätzlichen Risikobetrachtungen beim potenziellen Umgang mit radioaktiven Stoffen in der Heißen Zelle und zusätzlichen Kosten verbunden wäre. Die Transportlogistik der TLB von den 16 Zwischenlagern zu einem infrastrukturell gut angebundenen Eingangslager wäre möglicherweise vorteilhaft gegenüber einem Endlagerstandort (der nach geologischen, nicht nach infrastrukturellen Kriterien ausgewählt wird), der weniger gut angebunden ist.

Bezüglich der Kapazität des Eingangslagers kann zunächst von ca. 1.900 Stellplätzen für alle TLB ausgegangen werden. Im Detail wäre aber zu prüfen, welchen Zeitraum der Transport aller TLB von den Standortzwischenlagern zum Eingangslager in Anspruch nimmt und wie viele TLB in diesem Zeitraum wiederum aus dem Eingangslager zur Konditionierungsanlage am Endlagerstandort abtransportiert werden können. Aus diesem Delta kann dann, mit notwendigem Sicherheitspuffer für Verzögerungen, die tatsächlich notwendige Kapazität berechnet werden. Ein Unterschied zu einem Eingangslager am Endlagerstandort ergibt sich daraus aber nicht.

Befindet sich das Eingangslager nicht am Endlagerstandort, sind zusätzlich zu den Transporten von den Zwischenlagern zum Eingangslager alle TLB vom Eingangslager zum Endlagerstandort zu transportieren. Alle für die Transporte notwendigen Tätigkeiten (z. B. Transportgenehmigungen, Abfertigung zum Transport, Verladung auf Transportfahrzeuge, Sicherung der Transportstrecke, Annahme usw.) wären zweifach auszuführen. Der damit verbundene Aufwand und die Risiken müssen berücksichtigt werden.

Ein Eingangslager, das sich nicht am Endlagerstandort befindet, kann nicht die Funktion der Verstetigung der Konditionierung übernehmen. Der kontinuierliche Betrieb der Konditionierung wäre vielmehr von den regelmäßigen Transporten der TLB aus dem Eingangslager abhängig. Sollte es zu Verzögerungen bei der Anlieferung von TLB zur Konditionierung kommen, könnte die Konditionierung stocken und damit der Einlagerungsbetrieb des Endlagers unterbrochen werden. Um die Abhängigkeit von den Transporten zu entkoppeln, wäre ein Pufferlager für TLB, das an die Konditionierungsanlage am Endlagerstandort angeschlossen ist, notwendig. Das zusätzliche Pufferlager am Endlagerstandort wäre mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Soll das Eingangslager potenziell auch als Lager für die Abfälle der ggf. notwendigen Rückholung genutzt werden können, wären Aufwand und Risiken für den Transport der rückgeholten Abfälle zu berücksichtigen.

Im Forschungsprojekt WERA konnten keine relevanten Vorteile für ein Eingangslager, das nach Festlegung des Endlagerstandorts in dessen Nähe errichtet wird, identifiziert werden. Demgegenüber steht allerdings eine Reihe identifizierter Nachteile. Dass rückgeholte ELB zu einem vom Endlagerstandort entfernten Lager gebracht werden, wird für eher unwahrscheinlich gehalten. Eine Entscheidung über die Verortung und möglichen Funktionen des Eingangslagers wird erst in der letzten Phase des StandAVs zu treffen sein.

WERA "Öko-Institut e.V.

4.3.2. Konditionierungsanlage liegt nicht am Endlagerstandort

Für das Szenarium wird davon ausgegangen, dass die Konditionierungsanlage nicht am Endlagerstandort errichtet, sondern vielmehr in der näheren Umgebung des Endlagerstandorts errichtet wird (siehe Kapitel 2.4.3.3). Gründe dafür werden in Kapitel 3.3.3 genannt.

Es wird außerdem angenommen, dass, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, das Eingangslager am Endlagerstandort errichtet wird. Das Eingangslager dient in diesem Fall der Pufferlagerung von ELB zur Verstetigung der Einlagerung ins Endlager (siehe auch Kapitel 2.3.3.2). Die TLB werden aus den Zwischenlagern zur Konditionierungsanlage transportiert. Nach der Konditionierung erfolgt der Transport der ELB zum Eingangslager (für ELB) am Endlagerstandort.

Endlagerstandort

Transport ELB

Eingangslager für
ELB

Rücktransport
Transferbehälter

Abbildung 4-3: Konditionierungsanlage liegt nicht am Endlagerstandort

Quelle: eigene Darstellung

Voraussetzungen

Die Konditionierungsanlage dient dazu, die dort angelieferten hochradioaktiven Abfälle in endlagergerechte Behälter zu verpacken und Endlagergebinde zu erzeugen, die die Annahmebedingungen des Endlagers erfüllen. Es liegen geeignete Flächen für die Konditionierungsanlage vor, ebenso kann die Anlage an die bestehende Infrastruktur (Schienen- und Straßennetz) angeschlossen werden.

Für die Konditionierungsanlage ist ein eigenes Genehmigungsverfahren unabhängig vom Verfahren für das Endlager durchzuführen.

Es wurden geeignete Endlagerbehälter entwickelt, die auch für den Transport geeignet sind. Grundsätzlich sind abgeschirmte und nichtabgeschirmte ELB denkbar.



Konsequenzen

Da in diesem Szenarium kein zentrales Zwischenlager, wie im Napro vorgesehen, zur Verfügung steht, verlängert sich die Zwischenlagerung - mit den in Kapitel 4.2 genannten möglichen Konsequenzen.

Die Konditionierung ist von den reibungslosen, konstanten Transporten der TLB aus den bundesweit verteilten Zwischenlagern abhängig. Sollte es zu Verzögerungen bei der Anlieferung von TLB kommen, könnte dies Verzögerungen bei der Konditionierung mit sich bringen. Im worst-case sind auch Verzögerungen beim Einlagerungsbetrieb des Endlagers denkbar. Außerdem bringt eine Verzögerung der Konditionierung eine Verlängerung der Zwischenlagerzeit mit sich. Um diese Abhängigkeit zu vermeiden, ist es sinnvoll, ein Pufferlager für TLB an die Konditionierungsanlage anzuschließen und so die Verstetigung der Konditionierung sicher zu stellen.

Beim Transport der TLB von den Zwischenlagern zur Konditionierung könnten mehr Transporte notwendig werden, da zur erforderlichen Zusammenstellung verschiedener Brennelemente in den ELB ggf. TLB aus verschiedenen Zwischenlagern benötigt werden und die Transportkampagnen kleiner werden. Dies hängt nicht zuletzt auch von der Kapazität des Pufferlagers ab.

Sollten die beladenen ELB aus logistischen Gründen nicht direkt aus der Konditionierungsanlage abtransportiert werden können, könnte es durch einen Stau von beladenen ELB ggf. zur Unterbrechung der Konditionierung kommen. Um dies zu vermeiden, sollten an der Konditionierungsanlage Pufferflächen für beladene ELB vorgesehen werden.

Die in der Konditionierungsanlage beladenen ELB müssen nach der Konditionierung zum Endlager-Standort transportiert werden. Dazu müssen die ELB entweder abgeschirmt sein oder es kommen nichtabgeschirmte ELB zu Einsatz. Grundsätzlich wird die Auslegung der ELB hauptsächlich durch das Sicherheitskonzept des Endlagers bestimmt. Für den Transport zum Endlagerstandort müssen die ELB zusätzlich als Transportbehälter qualifiziert sein:

- Sind die ELB abgeschirmt, setzt dies eine massivere Konstruktion der Behälter bei gleichzeitig geringem Inventar voraus. Dies kann ggf. dazu führen, dass sich die Anzahl der benötigten ELB gegenüber den nichtabgeschirmten Behältern erhöht. Ob und wenn ja welche Auswirkungen auf Sicherheitskonzept und Auslegung des Endlagers zu berücksichtigen wären, wäre zu prüfen. Möglicherweise könnte sich durch die höhere Anzahl der Zeitbedarf für eine ggf. notwendige Rückholung erhöhen.
- Für nichtabgeschirmte ELB sind Transferbehälter für den Transport notwendig. Diese sind für den Transport auf öffentlichen Straßen zu entwickeln und gemäß Verkehrsrecht zuzulassen. Sie müssen immer wieder zum Standort der Konditionierungsanlage zurücktransportiert werden, was zusätzlichen logistischen Aufwand bedeutet.

Das Eingangslager für ELB am Endlagerstandort verstetigt die Einlagerung des Endlagerbetriebs. Es muss entsprechend für abgeschirmte bzw. nichtabgeschirmte ELB ausgelegt werden.

Insgesamt wird deutlich, dass dieses Szenarium eher Nachteile als Vorteile mit sich bringt. Es wird daher als unwahrscheinlich bewertet.

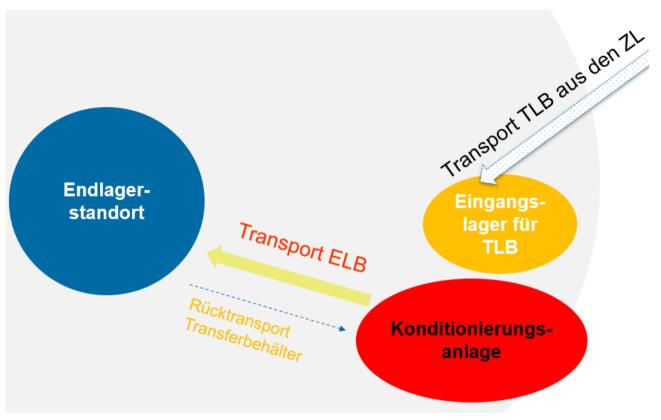
4.3.3. Eingangslager und Konditionierungsanlage liegen nicht am Endlagerstandort

In dieser Handlungsoption wird davon ausgegangen, dass sowohl die Konditionierungsanlage als auch das Eingangslager nicht am Endlagerstandort errichtet werden. Vielmehr werden beide WERA

WERA

Anlagen gemeinsam an einem Standort in der näheren Umgebung des Endlagerstandorts errichtet. Die Handlungsoption wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 4-4: Konditionierungsanlage und Eingangslager liegen nicht am Endlagerstandort



Quelle: eigene Darstellung

Voraussetzungen

Für das Eingangslager ergeben sich zwei Optionen der Ausgestaltung. So kann das Eingangslager zum einen als Pufferlager zur Verstetigung der Konditionierung dienen. Zum andern kann es als Zentrales Zwischenlager für alle hochradioaktiven Abfälle ausgelegt werden. Die Anlage könnte für beide Optionen der Ausgestaltung mit entsprechendem Aufwand auch so ausgestaltet werden, dass sie für die Rückholung zur Verfügung stehen könnte.

Für die Konditionierungsanlage kommen die in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Optionen K1 und K2 – Konditionierungsanlage und Eingangslager sind eine Anlage mit zwei Funktionen bzw. sind zwei getrennte Anlagen – in Frage.

Es ist zu klären, an welchem Standort abseits des Endlagerstandorts die neue(n) Anlage(n) errichtet werden soll(en). Es wird davon ausgegangen, dass vor Festlegung eines Standorts Kriterien festgelegt werden, nach denen der Standort gewählt wird. Der Standort kann erst festgelegt werden, wenn auch der Standort für das Endlager per Bundesgesetz festgelegt wurde.

Wird das Eingangslager als ein Zentrales Zwischenlager errichtet, müssen – je nachdem, wie schnell die Zwischenlager geräumt werden können – möglicherweise dennoch die Genehmigungen einzelner derzeit bestehender Zwischenlager zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen erneuert werden.



Konsequenzen

Die Konsequenzen der Ausführung der Konditionierungsanlage als eine gemeinsame Anlage mit dem Eingangslager bzw. als vom Eingangslager getrennte Anlage werden in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Grundsätzlich denkbar wären in dieser Handlungsoption beide Ausführungen gleichermaßen. Aus technischer, ökonomischer und administrativer Sicht wäre eine gemeinsame Anlage wahrscheinlich vorteilhafter. Die Gründe hierfür sind in Kapitel 2.4.3 beschrieben.

Der wesentliche Unterschied, den die Ausgestaltung des Eingangslagers als Pufferlager bzw. Zentrales Zwischenlager in dieser Handlungsoption mit sich bringt, ist, dass ein Eingangslager als Zentrales Zwischenlager die frühzeitige Räumung der Zwischenlagerstandorte ermöglichen würde, während ein Eingangslager als Pufferlager dies nicht ermöglicht.

Beim Transport der TLB von den Zwischenlagern zu einem Eingangslager, das als Pufferlager ausgeführt ist, könnten mehr Transporte notwendig werden, da zur erforderlichen Zusammenstellung verschiedener Brennelemente in den ELB ggf. TLB aus verschiedenen Zwischenlagern benötigt werden und die Transportkampagnen dadurch kleiner werden. Ob das Eingangslager als Pufferlager oder Zentrales Zwischenlager ausgeführt ist, macht für die Transportlogistik zwischen dem Standort von Eingangslager und Konditionierungsanlage und dem Endlagerstandort keinen Unterschied.

Sollten die beladenen ELB aus logistischen Gründen nicht direkt aus der Konditionierungsanlage abtransportiert werden können, könnte es durch einen Stau von beladenen ELB ggf. zur Unterbrechung der Konditionierung kommen. Um dies zu vermeiden, sollten an der Konditionierungsanlage Pufferflächen für beladene ELB vorgesehen werden.

Die in der Konditionierungsanlage beladenen ELB müssen nach der Konditionierung zum Endlager-Standort transportiert werden, siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.3.2. Eine Unterbrechung der Transporte der ELB zum Endlagerstandort kann die Einlagerung am Endlagerstandort zum Stillstand bringen. Auswirkungen auf die Einlagerungsdauer können nicht ausgeschlossen werden. Daher wäre am Endlagerstandort ein Pufferlager für ELB zur Verstetigung der Einlagerung in das Endlager notwendig.

Soll das Eingangslager potenziell auch als Lager für die Abfälle der ggf. notwendigen Rückholung genutzt werden können, wären Aufwand und Risiken für den Transport der rückgeholten Abfälle zu berücksichtigen.

Wenn Eingangslager und Konditionierungsanlage nicht am Endlagerstandort verortet sind, müssen die konditionierten ELB transportiert werden. Dies ist zum einen mit zusätzlichem Aufwand verbunden und zum anderen müssen die Endlagerbehälter beispielsweise für den Transport qualifiziert und zugelassen werden. Eine Entscheidung über die Verortung und möglichen Funktionen der beiden Anlagen wird erst in der letzten Phase des StandAVs zu treffen sein.

Literaturverzeichnis

Alfarra, A.; Becker, D.-A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K. et al. (2020a): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit einer überlagernden Tonformation (GRS - 576), August 2020.

- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Liu, W.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K. et al. (2020b): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit (GRS-572). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A. et al. (2020c): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit bei einer höheren Auslegungstemperatur (GRS-573). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Alfarra, A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A. et al. (2020d): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit (GRS 571). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Alt, S.; Kallenbach, B.; Neles, J. (2018): Gutachterliche Stellungnahme zu wichtigen sicherheitstechnischen Aspekten der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle Revision 01. Öko-Institut, 23.01.2018.
- Andra (o.D.): Cigeo's facilities and operation, Project siting and facilities overview, Andra. Online verfügbar unter https://international.andra.fr/projects/cigeo/cigeos-facilities-and-operation/project-siting-and-facilities-overview, zuletzt aktualisiert am 25.05.2022.
- Arbeitsgemeinschaft Schacht KONRAD e.V.: Atommüllkonferenz- über uns. Online verfügbar unter http://www.atommuellkonferenz.de/ueber-uns/, zuletzt geprüft am 07.03.2022.
- AtG (2021): Deutscher Bundestag. Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz), AtG, Fassung vom Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15.07.1985 (BGBI. I S. 1565).
- Atommüllkonferenz (2018): Positionspapier "Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle", 05.11.2018, zuletzt geprüft am 14.01.2020.
- BASE Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2020a): Bauweise Zwischenlager. Konstruktion der Zwischenlager. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/DE/the-men/ne/zwischenlager/bauweise zwl/bauweise-zwl node.html, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- BASE Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2020b): Nationales Entsorgungsprogramm. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/napro/napro_node.html.
- BASE Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2020c): Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle, Sicherheit bis zur Endlagerung. Berlin, Februar 2020.
- BASE Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (2020d): Zwischenlagerung / Transport. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/transporte/einfuehrung/einfuehrung_node.html.

Becker, D.-A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A. et al. (2020a): Berichtsentwurf zu Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1), Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. Braunschweig, 30.04.2020.

- Becker, D.-A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A. et al. (2020b): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (GRS-574). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Becker, D.-A.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Frenzel, B.; Krumpholz, M.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E. et al. (2020c): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit Einschluss der Radionuklide durch technische und geotechnische Barrieren (GRS-577). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Fahland, S.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Hammer, J.; Kindlein, J.; Liu, W.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S. et al. (2020a): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen (GRS-568). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Fahland, S.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Hammer, J.; Kindlein, J.; Liu, W.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S. et al. (2020b): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen mit einer höheren Auslegungstemperatur (GRS-570). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Eickemeier, R.; Fahland, S.; Flügge, J.; Frenzel, B.; Hammer, J.; Kindlein, J.; Liu, W.; Maßmann, J.; Mayer, K.-M.; Mönig, J.; Mrugalla, S. et al. (2020c): RESUS, Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in steil lagernden Salzformationen (GRS-569). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- Bertrams, N.; Herold, P.; Herold, M.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Prignitz, S.; Kuate, E. (2017): Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland, Abschlussbericht, September 2017.
- Bevard, B. B.; Mertyurek, U.; Belles, R.; Scaglione, J. M. (2015): BWR Spent Nuclear Fuel Integrity Research and Development Survey for UKABWR Spent Fuel Interim Storage (Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), ORNL/TM-2015/696), 2015.
- BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2021a): Grundlegende Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle, 31.03.2021.
- BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2021b): Tagesanlagen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle, 29.01.2021. Online verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_up-load/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/20210129_Tagesanlagen_eines_Endlagers_fuer_hochradioaktive_Abfaelle_barrierefrei.pdf.
- BGZ Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (2022): Zwischenlagerung weitergedacht. Das Forschungsprogramm der BGZ, 2022. Online verfügbar unter https://bgz.de/wp-content/uplo-ads/2022/05/Das-Forschungsprogramm-der-BGZ.pdf, zuletzt geprüft am 24.05.2022.

BGZ - Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (o.D.a): Alle Behälter lassen sich zum Endlager abtransportieren, o.D. Online verfügbar unter https://rueckfuehrung.bgz.de/, zuletzt geprüft am 14.06.2022.

- BGZ Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (o.D.b): Das Logistikzentrum für das Endlager Konrad. Online verfügbar unter https://bgz.de/logistikzentrum-konrad/, zuletzt geprüft am 02.05.2022.
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Bericht der Bundesregierung für die siebte Überprüfungskonferenz im Mai 2021 zur Erfüllung des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Referat S III 3, 53048 Bonn (Hg.). Bonn, August 2020. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/download/bericht-der-bundesregierung-fuer-diesiebte-ueberpruefungskonferenz-im-mai-2021, zuletzt geprüft am 27.04.2022.
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021): Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2019 und Prognose), Januar 2021.
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 30.09.2010.
- BMU (2013): Bekanntmachung zu der Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) (SEWD-Richtlinie Zwischenlager) vom 4. Februar 2013. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_76_SEWD_RL_Zwischenlager.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm) August 2015, August 2015.
- BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Sicherung der Zwischenlager und Hintergründe der erforderlichen Nachrüstung, BMU. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/zwischenlagerung/sicherung-der-zwischenlager-und-hintergruende-der-erforderlichen-nachruestung/.
- BMUV (2021): Neue Lösung für Rücknahme radioaktiver Abfälle aus Frankreich. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/meldung/neue-loesung-fuer-ruecknahme-radioaktiver-abfaelle-ausfrankreich.
- Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Lerch, C.; Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (GRS 272). Köln, Juli 2011. Online verfügbar unter http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-272 neu.pdf.
- Bollingerfehr, W.; Herold, P.; Dörr, S.; Filbert, W. (2014): Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht (TEC-21-2013-AB), Februar 2014.
- Brohmann, B.; Kallenbach-Herbert, B.; Schütte, S.; Ewen, C.; Horelt, M.-A.; Mbah, M. (2018): Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Endlagersuche: Herausforderungen eines generationenübergreifenden, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens, Literaturreview und aktualisiertes Forschungsdesign Zwischenbericht zum AP 1. Darmstadt, Karlsruhe, unveröffentlicht, 23.10.2018.
- Bundesamt für Strahlenschutz (2003): Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standort-Zwischenlager in Philippsburg der EnBW Kraftwerke AG, 19.12.2003.
- Deutscher Bundestag (2022): Öffentliches Fachgespräch mit den Gremien zur Endlagersuche. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/ausschuesse/a16_umwelt/anhoerungen/893030-893030.

- Ellinger, A.; Geupel, S.; Gewehr, K.; Gmal, B.; Hannstein, V.; Hummelsheim, K.; Kilger, R.; Wagner, M.; Schmidt, G.; Spieth-Achtnich, A. (2010): Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und verglastem HAW (GRS A 3597). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH. Köln, April 2010.
- EnBW (2019): Was kostete das gesamte Projekt? Online verfügbar unter https://www.enbw.com/castortransport/fragen-und-antworten-zum-castor-transport/transportkosten.html, zuletzt aktualisiert am 19.11.2019.
- Endlagerkommission Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): ABSCHLUSS-BERICHT der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2016.
- EndlSiAnfV (2020): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, EndlSiAnfV.
- Engelmann, H. J.; Filbert, W.; Heda, M.; Hedemann, W.; Hubert, R.; Neydak, J. (1995): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, 1995, 1995.
- ESK Entsorgungskommission (2013): Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern, Revidierte Fassung vom 10.06.2013, 10.06.2013.
- ESK Entsorgungskommission (2014): Rückführung verglaster Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im europäischen Ausland–Aufbewahrung der verglasten Abfälle in Standortzwischenlagern aufgrund der Änderung des Atomgesetzes am 01.01.2014 (§ 9a Absatz 2a AtG), 30.10.2014.
- ESK Entsorgungskommission (2015a): Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, 29.10.2015.
- ESK Entsorgungskommission (2015b): Empfehlung Leitlinie zum sicheren Betrieb eines Endlagers für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, 10.12.2015.
- ESK Entsorgungskommission (2017): Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, 20.01.2017. Online verfügbar unter https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/epanlage1esk53hpred20170120.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2022.
- ESK Entsorgungskommission (2022): ESK-Leitlinien zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen und zum technischen Alterungsmanagement für Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, 03.03.2022. Online verfügbar unter https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Empfehlung_LL-Durchfuehrung_PSU-ZL_ESK96_03032022.pdf.
- EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (2020): Heiße Zelle im Estral? Fragen und Antworten. Online verfügbar unter https://www.ewn-gmbh.de/fileadmin/user_upload/EWN/Projekte/ESTRAL/Dokumente/Heisse_Zelle_im_ESTRAL_Web.pdf, zuletzt geprüft am 02.06.2022.
- EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (o.D.): ESTRAL -Unser Zwischenlager für Castor-Behälter. Online verfügbar unter https://www.ewn-gmbh.de/projekte/estral/, zuletzt geprüft am 29.09.2019.
- Filbert, W.; Bollingerfehr, W.; Heda, M.; Lerch, C.; Niehues, N.; Pöhler, M.; Schulz, J.; Schwarz, T.; Toussaint, M.; Wehrmann, J. (2010): Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report. DBE TECHNOLOGY GmbH (Hg.), Juni 2010.
- Framatome ANP GmbH (o.D.): Separates Brennelement-Nasslager im Kernkraftwerk Gösgen-Däniken, o.D. Online verfügbar unter https://www.kkg.ch/upload/cms/user/ArevaNasslager-KKG.pdf.

Geupel, S.; Hummelsheim, K.; Keßen, S.; Kilger, R.; Rowold, F.; Neles, J., Spieth-Achtnich, A.; Völzke, H.; Wolf, D. (2015): Sicherheitstechnische Fragen der längerfristigen Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und verglaster hochradioaktiver Abfälle, Abschlussbericht des Vorhabens 3612R03300. GRS gGmbH, Öko-Institut e. V., BAM, TÜV Nord Ensys, 2015.

- GNS (2006): 10. CASTOR-Transport im Zwischenlager Gorleben eingetroffen. Online verfügbar unter https://www.gns.de/language=de/taps=14930/15613.
- GNS Gesellschaft für Nuklear Service mbH (o.D.): Integriertes Köchersystem GNS IQ®. Online verfügbar unter https://www.gns.de/language=de/29872/koecher-gns-iq.
- Government Offices of Sweden, Ministry of the Environment (2020): Sweden's seventh national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, 2020.
- Graf, R., Dr. Brammer, K.-J., Filbert, W. (2015): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern ein umsetzbares technisches Konzept -. GNS Gesellschaft für Nuklear Service mbH, DBE Technology GmbH, 2015.
- Hassel, T.; Köhler, A.; Kurt, Ö. S. (Hg.) (2019): Das ENCON-Behälterkonzept Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich (ENTRIA-Arbeitsbericht-16). Hannover, 2019.
- Hassel, T.; Leusmann, T.; Metz, V. (2021): Miteinander verzahnt Prozessschritte, Haltepunkte und Steuermöglichkeiten auf dem Entsorgungspfad vom Zwischen- zum Tiefenlager. TRAN-SENS-Arbeitstreffen. Veranstalter: Forschungsvorhaben TRANSENS: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland, 15.03.2021.
- Herold, P.; Prignitz, S.; Simo, E.; Filbert, W.; Bertrams, N. (2018): Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (BGE TEC 2018-11), September 2018.
- Hummelsheim, K.; Rowold, F.; Kaufholz, P.; Behler, M.; Neles, J.; Spieth-Achtnich, A.; Völzke, H.; Spykmann, G. (2018): Neue Entwicklungen bei der längerfristigen trockenen Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und verglasten hochradioaktiven Abfällen. GRS gGmbH; Öko-Institut e. V.,; BAM; TÜV Nord Ensys, September 2018.
- IAEA (2009): Classification of radioactive waste (IAEA Safety standards series, GSG-1). Vienna: IAEA.
- IAEA (2019): Demonstrating performance of spent fuel and related storage system components during very long term storage, Final report of a coordinated research project (IAEA-TECDOC, 1878). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Jobmann, M.; Becker, D.-A.; Hammer, J.; Jahn, S.; Lommerzheim, A.; Müller-Hoeppe, N.; Noseck, U.; Krone, J.; Weber, J. R.; Weitkamp, A.; Wolf, J. (2016): Projekt CHRISTA, Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (TEC-20-2016-AB). Peine, 24.10.2016.
- Kallenbach-Herbert, B.; Brohmann, B.; Küppers, C.; Schütte, S.; Spieth-Achtnich, A. (2016): Auswertung verschiedener Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung im Umfeld kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, 2016.
- Köhler, A. (2017): Interventionstechniken für Zwischenlagerbehälter. In: Köhnke, D.; Reichardt, M. und Semper, F. (Hg.): Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Wiesbaden: Springer (Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft), S. 51–70.

- Köhnke, D.; Reichardt, M.; Semper, F. (Hg.) (2017): Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle, Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft). Wiesbaden: Springer. Online verfügbar unter http://www.springer.com/.
- Kukkola, T. (2012): Encapsulation Plant Design 2012 (Working Report, 2012-49). Fortum Power and Heat Oy, Dezember 2012.
- Mönig, J.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Fahland, S.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Müller-Hoeppe, N.; Reinhold, K.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, E.; Thiedau, J.; Weber, J. R. et al. (2020): RESUS, Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG (GRS-567). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig, August 2020.
- NAGRA (2011): Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung, Genereller Bericht (Technischer Bericht, 11-01). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Dezember 2011.
- NAGRA (2020): Arbeitsbericht NAB 20-14, Verpackungsanlage hochaktiver Abfälle: Vor- und Nachteile verschiedener Standortvarianten, Juni 2020, zuletzt geprüft am 07.07.2022.
- NDR Norddeutscher Rundfunk (2022): Suche nach Atommüll-Endlager dauert wohl länger als geplant. Online verfügbar unter https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/braunschweig_harz_goettingen/Suche-nach-Atommuell-Endlager-dauert-wohl-laenger-als-geplant,endlagersuche208.html, zuletzt geprüft am 25.05.2022.
- OECD NEA (Hg.) (2017): The Safety of Long-Term Interim Storage Facilities in NEA Member Countries;, 2017. Online verfügbar unter https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2017/csni-r2017-4.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2021.
- Ornot, L. (2013): Passive Kühlsysteme am Beispiel der Kühlung abgebrannter Brennelemente. Areva, 15.10.2013. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/wket/ressourcen/dateien/lehre/lections/45.ket kern/06 Ornot.pdf?lang=de.
- Pöhler, M.; Amelung, P.; Bollingerfehr, W.; Engelhardt, H. J.; Filbert, W.; Tholen, M. (2010): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine, Juni 2010.
- Röhlig, K.-J.; Chaudry, S.; Plischke, E. (2019): ENTRIA Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek Der TU Clausthal. Röhlig, K.-J.; Chaudry, S. und Plischke, E. (Hg.), 2019.
- Röhlig, K.-J.; Walther, C.; Bach, F.-W.; Brunnengräber, A.; Budelmann, H.; Chaudry, S.; Eckhardt, A.; Geckeis, H.; Grunwald, A.; Hassel, T.; Hocke, P.; Lux, K.-H.; Mengel, K. et al. (2014): Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. ENTRIA Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Hannover, 30.04.2014.
- StandAG (2017): Deutscher Bundestag. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBI. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBI. I S. 2808) geändert worden ist, StandAG.
- Steinhoff, M.; Kallenbach-Herbert, B.; Claus, M.; Englert, M.; Küppers, C.; Küppers, P.; Schulze F.; Spieth-Achtnich. A.; Beuth, T.; Faß, T.; Larue, P.; Meyering, H.; Weiß, D. (2015): Strategische Umweltprüfung zum Nationalen Entsorgungsprogramm; Umweltbericht für die Öffentlichkeitsbeteiligung. Öko-Insitiut e.V.; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, 20.07.2015. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/nationales_entsorgungsprogramm_sup_umweltbericht_bf.pdf.

StrlSchG (2017): Deutscher Bundestag. Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG), StrlSchG, Fassung vom "Strahlenschutzgesetz vom 27.06.2017 (BGBI. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 03.01.2022 (BGBI. I S. 15) geändert worden ist".

- Stuke, M. (2021): Forschungsaktivitäten der BGZ auf dem Gebiet der Brennelemente. Fachforum Zwischenlagerung. Veranstalter: Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ), 16.11.2021.
- Tietze, J. (2020): Standortauswahlverfahren Endlagerbehälterentwicklung. Infoveranstaltung KoBrA. BGE. Berlin, 19.02.2020.
- TÜV Nord EnSys TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co. KG; Öko-Institut Öko-Institut e. V. (2015): Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaster Abfälle (K-MAT 44), Oktober 2015.
- U.S. NRC U.S. Nuclear Regulatory Commission (2014): Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, 2014.
- wikipedia (2020): Atommülltransporte in Deutschland. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Atomm%C3%BClltransporte_in_Deutschland, zuletzt aktualisiert am 20.05.2020, zuletzt geprüft am 09.07.2020.
- Wolf, J.; Behlau, J.; Beuth, T.; Bracke, G.; Bube, C.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Hammer, J.; Keller, S.; Kienzler, B.; Klinge, H.; Jürgen Krone; Lommerzheim, A. et al. (2012): FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation (GRS 283). GRS (Hg.), Juni 2012.
- Zeiger, T.; Gastl, C.; Töpfer, F.; Witte, S.; Reichel, K.; Bunzmann, C. (2017): Wissenschaftlichtechnische und rechtliche Aspekte für Genehmigungsverfahren nach § 6 AtG zur Aufbewahrung bestrahlter Kernbrennstoffe über 40 Jahre hinaus. In: Köhnke, D.; Reichardt, M. und Semper, F. (Hg.): Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Wiesbaden: Springer (Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft), S. 173–186.
- Zwicky, H.-U. (2018): SCIP IV Technical Description, DRAFT AS A BASIS FOR DISCUSSION (STUDSVIK/N-18/027; STUDSVIK-SCIP IV-220). STUDSVIK NUCLEAR AB, 31.01.2018. Online verfügbar unter https://www.studsvik.com/contentassets/e6724b7f468c4660aead7070fc424737/scip-iv-technical-description-public.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2021.