



ENTRIA-Arbeitsbericht-12

„Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle“

Transversalprojekt
Interdisziplinäre Risikoforschung
Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung

**Anne Eckhardt mit Beiträgen von
Wolfgang Neumann und Jürgen Kreuzsch**

Kontakt

Dr. Anne Eckhardt
risicare GmbH
Bühlstraße 19
CH-8125 Zollikerberg
anne.eckhardt@risicare.ch

Dipl.-Geol. Jürgen Kreusch
Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann
intac GmbH i.L., Hannover

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA-Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offen zu legen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch. Die Beiträge geben allein die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter dem Kennzeichen **15S9082 A bis E** gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

Eckhardt, Anne (2018): Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle. Zürich, ENTRIA-Arbeitsbericht-12

ISSN (Online): 2367-3540

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Einordnung.....	1
1.2. Vorgehen	2
1.3. Danksagung.....	4
2. Zeitliche Entwicklung der Referenzmodelle	6
2.1. Unmittelbare Zukunft Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung	8
2.2. Nähere Zukunft ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung	17
2.3. Mittlere Zukunft ca. Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungslösung	33
2.4. Weitere Zukunft ca. Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungslösung	47
2.5. Ferne Zukunft ca. Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungslösung	57
2.6. Fernere Zukunft ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungslösung	70
2.7. Sehr ferne Zukunft ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungslösung	76

2.8.	Sehr weit entfernte Zukunft ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungslösung.....	80
3.	Ungewissheiten	84
3.1.	Unmittelbare Zukunft Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung.....	86
3.2.	Nähere Zukunft ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung.....	103
3.3.	Mittlere Zukunft ca. Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungslösung.....	116
3.4.	Weitere Zukunft ca. Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungslösung.....	130
3.5.	Ferne Zukunft ca. Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungslösung.....	143
3.6.	Fernere Zukunft ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungslösung.....	158
3.7.	Sehr ferne Zukunft ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungslösung.....	167
3.8.	Sehr weit entfernte Zukunft ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungslösung.....	172
4.	Kalkulierbare Risiken	177
4.1.	Unmittelbare Zukunft Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung.....	178
4.2.	Nähere Zukunft ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung.....	188

- 4.3. Mittlere Zukunft ca. Jahr 30 bis 55
nach Start der Entsorgungslösung199
- 4.4. Weitere Zukunft ca. Jahr 55 bis 90
nach Start der Entsorgungslösung212
- 4.5. Ferne Zukunft ca. Jahr 90 bis Jahr 200
nach Start der Entsorgungslösung223
- 4.6. Fernere Zukunft ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000
nach Start der Entsorgungslösung232
- 4.7. Sehr ferne Zukunft ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000
nach Start der Entsorgungslösung235
- 4.8. Sehr weit entfernte Zukunft ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre
nach Start der Entsorgungslösung236
- 5. Gesamtbeurteilung 237**
 - 5.1. Verfahren237
 - 5.2. Ergebnisse238
- 6. Literaturverzeichnis i**
- 7. Glossarvii**
- 8. Abkürzungsverzeichnisxii**

1. Einführung

1.1. Einordnung

Im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ bei ENTRIA wurde für die *Entsorgungsoptionen*

- Endlagerung,
- Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und
- Oberflächenlagerung

eine umfassende vergleichende Risikobewertung vorgenommen.

Die *umfassende Risikobewertung* basiert auf dem ENTRIA-Arbeitsbericht-01 "Darstellung von Entsorgungsoptionen" (Appel et al., 2015) und dem ENTRIA-Arbeitsbericht-05 "Risikoansichten" (Marti, 2016) sowie dem Buch „Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“ (Eckhardt & Rippe, 2016).

Die Ergebnisse der umfassenden Risikobewertung sind in vier ENTRIA-Arbeitsberichten dargestellt. Ein Bericht ist den radiologischen Risiken im Normalbetrieb und aufgrund von Störfällen gewidmet, ein Bericht den Risiken aufgrund schwerwiegender Einwirkungen von außen und ein Bericht der Bewertung der Langzeitsicherheit anhand von Sicherheitsfunktionen und Robustheit. Im vorliegenden Bericht wird eine Bewertung nach Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken vorgenommen.

1.2. Vorgehen

Im Verlauf erster Arbeiten zur vergleichenden Risikobewertung hatte sich gezeigt, dass die bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen konkretisiert werden müssen, um aussagekräftige Vergleiche zu ermöglichen. Dazu wurden *Referenzmodelle* entwickelt. Die Referenzmodelle sind standortunabhängig angelegt und spezifisch für die Wirtsgesteine Salz und Ton. Sie zeichnen sich durch ihren „generischen“ Charakter aus, sind aber soweit ausgearbeitet, wie es für differenziertere vergleichende Bewertung notwendig ist. Im Verlauf von ENTRIA fand zwischen verschiedenen Arbeitspaketen ein Abstimmungsprozess zu den Referenzmodellen statt. Dabei wurde unter anderem festgehalten, dass alle Referenzmodelle die heute geltenden Genehmigungsanforderungen im Prinzip erfüllen müssen. Festgehalten wurde auch, dass die Oberflächenlagerung für einen Zeitraum von bis zu ca. 200 Jahren konzipiert werden soll. Welcher Weg danach zur weiteren Entsorgung der Abfälle eingeschlagen wird, bleibt offen.

Da die Referenzmodelle für die Wirtsgesteine Salz und Ton entwickelt wurden, wird das Wirtsgestein Kristallin im Folgenden nicht eingehender behandelt, sondern nur gelegentlich als mögliches weiteres Wirtsgestein angesprochen.

Im vorliegenden Arbeitsbericht wird für die beiden Optionen im tiefen Untergrund der Oberbegriff „Tiefenlager“ verwendet. Zu den Tiefenlagern zählt also sowohl das Endlager als auch das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Alle Aussagen zu Entsorgungsoptionen im vorliegenden Bericht beziehen sich auf die entsprechenden Referenzmodelle.

Eine Analyse der Risikolandschaft und der Risikoansichten (Marti, 2016) im Umfeld der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle, die im Rahmen des

Arbeitspakets „Interdisziplinäre Risikoforschung“ vorgenommen wurde, deutete darauf hin, dass beim Diskurs zur Sicherheit der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle nicht nur den Risiken, sondern auch den Ungewissheiten eine wesentliche Rolle zukommt. Daher wurde das Verhältnis von *Risiken und Ungewissheiten* bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle im Rahmen von ENTRIA näher ausgeleuchtet (Eckhardt & Rippe, 2016).

Als *Ungewissheit* wird ein Mangel an Information zur Ausgangslage oder zu künftigen Entwicklungen bezeichnet, der die Einschätzung eines Risikos erschwert. Ungewissheiten betreffen beispielweise Parameter und Prozesse, die eine Entsorgungsoption aus technisch-naturwissenschaftlicher Perspektive charakterisieren. Sie betreffen aber auch zukünftige Veränderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die Akzeptanz einer Entsorgungsoption durch wichtige Akteure und mögliche neue wissenschaftliche Erkenntnisse und technische Entwicklungen während der Planung und Umsetzung einer Entsorgungsoption.

Die Planung und Umsetzung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle sind von solchen Ungewissheiten deshalb besonders betroffen, weil sie über lange Zeiträume erfolgen. Nach dem Verschluss eines Tiefen- oder Endlagers soll diese Anlage entsprechend den geltenden Vorgaben in Deutschland (BMU, 2010) über etwa 1 Million Jahre in der Lage sein, ihre Schutzwirkung zu entfalten.

Zum rationalen Umgang mit ungewissen Entwicklungen in der Zukunft dient das Konzept des Risikos. Von *Risiko* wird gesprochen, wenn ein Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten oder nicht eintreten kann. Ein kalkulierbares Risiko liegt vor, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens abgeschätzt werden können. Ungewissheit über künftige Entwicklungen ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass überhaupt von Risiken gesprochen wird. Gleichzeitig kann auch die Einschätzung von Risiken mit Ungewissheiten behaf-

tet sein, was sich in der Unterscheidung von verschiedenen Typen von Risiken, darunter den kalkulierbaren Risiken, niederschlägt.

Der Bewertung der bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten liegt ein systematisches Raster zugrunde, das wichtige Einflüsse auf Risiken und Ungewissheiten abbildet, die sich mit einer Entsorgungsoption verbinden. Die vergleichende Bewertung der Referenzmodelle nach Risiken und Ungewissheiten wurde verbal-argumentativ vorgenommen. Gelegentlichen inhaltlichen Überschneidungen zwischen den betrachteten Entwicklungen und Aktivitäten im Zusammenhang mit den jeweiligen Entsorgungsoptionen wird bei der abschließenden Gesamtbewertung („Abwägung“) Rechnung getragen.

Die Bewertung konzentriert sich auf Ungewissheiten und Risiken, die *Personen* betreffen. Als mögliche Schäden werden Todesfälle sowie Beeinträchtigungen der physischen und psychosozialen Gesundheit berücksichtigt.

Im vorliegenden Arbeitsbericht ist zunächst der *Gegenstand der Bewertung* dargestellt. Dabei werden die Referenzmodelle und die zu ihnen gehörigen Aktivitäten in ihrem zeitlichen Ablauf, also Entsorgungspfade, beschrieben. Anschließend werden die *Bewertungen* nach Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken dargelegt, und zum Schluss wird eine Gesamtbetrachtung vorgenommen.

1.3. Danksagung

Im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA haben Dr. Volker Metz, Institut für Nukleare Entsorgung des Karlsruher Instituts für Technologie, und Dipl.-Ing. Dennis Köhnke, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig ein Review des vorliegenden Arbeitsberichts vorge-

nommen. Wir danken Volker Metz und Dennis Köhnke für ihre wertvollen inhaltlichen Anregungen und Hinweise.

2. Zeitliche Entwicklung der Referenzmodelle

Bei der Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Entsorgungsoptionen wird Bezug auf die Referenzmodelle genommen, die bei ENTRIA für die Entsorgungsoptionen „Endlagerung“, „Einlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit“ und „Oberflächenlagerung“ konzipiert wurden. Die „Einlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit“ wird im Folgenden als „Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit“ bezeichnet.

Da die Referenzmodelle bei ENTRIA laufend weiterentwickelt wurden, lassen sich Abweichungen zwischen dem letzten Stand der Referenzmodelle bei ENTRIA und den der vergleichenden Risikobewertung zugrundeliegenden Referenzmodellen nicht ganz ausschließen. Insbesondere wurde die Option Oberflächenlagerung bei ENTRIA schließlich nicht mehr als eigenständige Option behandelt, sondern als Langfristzwischenlagerung, die einer späteren Tiefenlagerung vorgelagert ist. Wir betrachten die Oberflächenlagerung dagegen wie ursprünglich bei ENTRIA vorgesehen als eigenständige Entsorgungsoption, die darauf abzielt, anschließend einen unter Umständen innovativen, heute noch unbekanntem Entsorgungspfad einzuschlagen. Diese Option zielt vor allem darauf ab, Zeit zu gewinnen, um eine Entsorgungslösung zu entwickeln, die im Vergleich zu den heute erreichbaren Entsorgungslösungen eindeutige Vorteile aufweist.

Die vergleichende Risikobewertung der Referenzmodelle erfolgt anhand von zeitlich gestaffelten Entwicklungsschritten. Die Ergebnisse der Bewertung werden in der im Rahmen von ENTRIA entwickelten „Risikokarte“ entlang eines Zeitstrahls dargestellt. Die Entwicklung der drei Referenz-

modelle wurde dabei in charakteristische Phasen unterteilt, die bei allen Entsorgungsoptionen ungefähr synchron verlaufen. Bei der Beschreibung dieser Phasen wird davon ausgegangen, dass die Entwicklung der Entsorgungsoption weitgehend so erfolgt, wie sie heute geplant ist. Es werden aber auch alternative Entwicklungspfade (Verlaufsvarianten) erwogen, insbesondere die Rückholung oder Bergung der Abfälle.

Die Beschreibung der Phasen erfolgt weitgehend generisch, also losgelöst von spezifischen aktuellen Rahmenbedingungen und möglichen Standorten für eine Entsorgungsanlage. Grundsätzlich sollte es daher für die Beschreibung keine Rolle spielen, ob die Entsorgungslösung heute, in 10 Jahren oder 50 Jahren eingeleitet wird. Da sich die Art und Weise, wie eine Entsorgungslösung angegangen wird und deren Rahmenbedingungen im Lauf der Zeit verändern, erfolgt die Beschreibung der Phasen jedoch auf der Basis der heute vorherrschenden Werthaltungen, des geltenden Rechts, der gegenwärtig verfügbaren Technologien, der heute angewendeten Verfahren etc. Bei der Beschreibung der Phasen wird zudem gelegentlich angesprochen, wie sie verlaufen würden, wenn die Entsorgungslösung umgehend, d.h. im Jahr 2017, in dem die hier beschriebene Bewertung abgeschlossen wurde, in die Wege geleitet worden wäre.

Überlegungen zu Veränderungen der Rahmenbedingungen, unter denen eine Entsorgungsoption vorangetrieben wird, werden unter dem Titel „Allgemeine Entwicklungen“ dargestellt. Deren Auswirkungen auf Ungewissheiten und kalkulierbare Risiken werden in den Kapiteln 3 und 4 reflektiert. Im folgenden Kapitel werden die Schritte auf den Entsorgungspfad, die die Grundlage für die vergleichende Risikobewertung bilden, beschrieben.

2.1. Unmittelbare Zukunft

Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung

2.1.1. Wichtigste Schritte

- Entscheidung für eine Entsorgungsoption
- Konzept für das Standortauswahlverfahren

2.1.2. Dauer der vorliegenden Phase

Ein Entsorgungspfad startet mit der Entscheidung für eine Entsorgungsoption und der Entwicklung eines Konzepts für das Standortauswahlverfahren. In Deutschland wurde nach Abschluss der Arbeit der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) davon ausgegangen, dass die Standortauswahl für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit im Jahr 2017 eingeleitet werden kann. In der Schweiz, die ein Standortauswahlverfahren für ein geologisches Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit durchführt, das dem in Deutschland vorgesehenen Verfahren gleicht, vergingen zwischen der Einigung auf eine Entsorgungsoption (EKRA, 2000) und der Publikation des Konzepts für das Standortauswahlverfahren (BFE, 2008) acht Jahre. Das Standortauswahlverfahren startete im gleichen Jahr, in dem das Konzept publiziert worden war.

Tiefenlager. In Deutschland kann für ein Tiefenlager auf dem Standortauswahlgesetz sowie unter anderem auf den Arbeiten des AkEnd (AkEnd, 2002) aufgebaut werden. Zudem liegen international bereits Arbeiten zu Standortauswahlverfahren und Erfahrungen mit Standortauswahlverfahren vor.

Soll jedoch bei einem Tiefenlager in einer Vielzahl potentieller Wirtsgesteine gesucht werden, in Salz, Tongestein (Ton/Tonstein) und ggf. auch Kristallin, bedingt dies entsprechend differenzierte Vorarbeiten. Das Kon-

zept eines Tiefenlagers sieht je nach Wirtsgestein unterschiedlich aus. Für die verschiedenen Wirtsgesteine müssen jeweils geeignete Sicherheits- und Einlagerungskonzepte entwickelt und festgelegt werden.

Zwischen der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind beim Standortauswahlverfahren Unterschiede zu erwarten. Diese Unterschiede gehen vor allem auf den zusätzlichen Raumbedarf des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit zurück.

Zudem muss das Standortauswahlverfahren auch den spezifischen politischen, strukturellen etc. Rahmenbedingungen, unter denen es auf den Weg gebracht wird, Rechnung tragen.

Oberflächenlager. Wird die Entscheidung für ein Oberflächenlager gefällt, müssen spezifische Anforderungen an die Sicherheit und den Standortauswahlprozess eines solchen Lagers formuliert werden. Zudem ist festzulegen, über welchen Zeitraum das Oberflächenlager betrieben werden soll.

Für ein Oberflächenlager, dessen Betriebszeit 100 Jahre übersteigen soll, sind international kaum Vorbilder vorhanden. Auch mit der systematischen Auswahl von Standorten für zentrale Zwischenlager existieren nur wenige Erfahrungen, auf die für das Verfahren zur Standortauswahl für ein Oberflächenlager zurückgegriffen werden könnte. Die Oberflächenlagerung bei ENTRIA ist auf wesentlich längere Betriebsdauern als die Zwischenlagerung ausgerichtet und stellt daher andere Anforderungen, unter anderem an das Sicherheitskonzept, als eine auf wenige Jahrzehnte befristete Lagerung.

Die Einigung auf den genauen Ablauf des Verfahrens einschließlich der Öffentlichkeitsbeteiligung wird daher voraussichtlich ebenso viel Zeit in Anspruch nehmen wie bei den Tiefenlagern.

Wir gehen davon aus, dass für die vorliegende Phase sowohl für die Tiefenlageroptionen als auch für die Oberflächenlageroption etwa zehn Jahre zu veranschlagen sind.

2.1.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Als „Inventar“ werden im Folgenden sowohl die Radionuklide als auch die Abfallmatrix und die Behälter bezeichnet.

Die zu entsorgenden hoch radioaktiven Abfälle sind vollständig oder zum überwiegenden Teil bereits in der Vergangenheit produziert worden und werden in der vorliegenden Phase nass oder trocken zwischengelagert. Sowohl die Aktivität als auch die Radiotoxizität und die Wärmeentwicklung der Abfälle sind sehr hoch.

Gesellschaft. Wenn die Entscheidung gefallen ist, eine Entsorgungslösung herbeizuführen und einen bestimmten Entsorgungspfad zu beschreiten, lassen sich die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen der darauffolgenden zehn Jahre meistens einigermaßen einschätzen. Vielfach kann davon ausgegangen werden, dass sich Entwicklungen und Trends fortsetzen, die sich zu Beginn der Phase bereits abgezeichnet haben. Neue Entwicklungen und Trends benötigen im Allgemeinen eine Anlaufzeit von mehreren Jahren, bevor sie ihre Wirkung breit entfalten. Es lässt sich aber auch nicht gänzlich ausschließen, dass es zu unerwarteten Umbrüchen kommt, zum Beispiel aufgrund gesellschaftlicher Konflikte, die sich auf der Basis bereits schwelender Differenzen schnell ausbreiten und vertiefen.

Allgemeine Bedrohungslage. Aktuell ist die Bedrohungslage schwer einschätzbar und auch die Entwicklungen der kommenden zehn Jahre lassen sich nur schwer absehen. Das sicherheitspolitische Umfeld Deutschlands befindet sich in einem Wandel, der sowohl durch neuartige Gefährdungen als auch durch eine neuartige Dichte und Gleichzeitigkeit von Bedrohungen gekennzeichnet ist (Bundesregierung, 2016, S. 15). Globalisierung und

(digitale) Vernetzung fördern ein breites Spektrum von Risiken, das von Epidemien über Terrorismus bis zu Cyberangriffen reicht. Transnationale Terrororganisationen und Netzwerke profitieren von instabilen politischen Situationen, indem sie sich in den entsprechenden Ländern Rückzugs- und Herrschaftsräume verschaffen. Macht verschiebt sich sowohl innerhalb der Staatengemeinschaft als auch zwischen Staaten und nichtstaatlichen Akteuren. Die Europäische Union steht vor der Herausforderung, ihren inneren Zusammenhalt zu bewahren. Hybride Bedrohungen verbinden unterschiedliche zivile und militärische Mittel und Instrumente, um Gemeinschaften subversiv zu untergraben. Die Grenzen zwischen Krieg und Frieden verschwimmen (Bundesregierung, 2016, S. 28f).

Auf die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle wirkt sich dieser Wandel potentiell vielfältig aus. Denkbar ist zum Beispiel, dass ein Anschlag, bei dem ein Zusammenhang mit radioaktiven Abfällen erkennbar wird – etwa ein Anschlag mit einer schmutzigen Bombe –, das gesellschaftliche Bedürfnis nach einer schnellen und/oder hochgradig sicheren Entsorgungsförderung fördert. Denkbar ist aber auch, dass akute schwerwiegende Bedrohungen einer Gemeinschaft Ressourcen von der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle abziehen.

Innere Konflikte, die die Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle betreffen, können aus heutiger Sicht am besten durch ein transparentes, nachvollziehbares Vorgehen vermieden werden, das wichtige gesellschaftliche Gruppen und insbesondere die von der Entsorgung direkt Betroffenen einbezieht. Ein entsprechender Weg soll in Deutschland in den kommenden Jahren mit der weiteren Umsetzung des Standortauswahlgesetzes und der Empfehlungen der Endlagerkommission besprochen werden.

Allgemeine Verletzlichkeit. Der politische Wille, die Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle an die Hand zu nehmen, scheint gegenwärtig in Deutschland höher zu sein als es in der Vergangenheit oft der Fall war. Mit dem Standortauswahlgesetz und der Arbeit der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wurden wichtige erste Schritte für eine Ent-

sorgungslösung unternommen. Die Dynamik dieses Prozesses dürfte dazu beitragen, dass sich Interessenkonflikte und gesellschaftlicher Dissens besser lösen lassen als dies in der Vergangenheit der Fall war. Trotzdem wird es anspruchsvoll sein, die teils tiefen Gräben, die sich zwischen verschiedenen Akteuren gebildet haben, zu überbrücken. Die Entscheidung für eine Entsorgungsoption und das Konzept für ein Standortauswahlverfahren sind weiterhin anfällig für Blockaden.

Verletzlichkeit der Zwischenlager. Nach dem schweren Reaktorunfall von Fukushima wurden die Zwischenlager in Deutschland einem Stresstest im Hinblick auf ihre Robustheit gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse unterzogen. Die Entsorgungskommission (ESK), die den Bericht verfasste, hielt fest, dass im Stresstest keine Defizite in den Auslegungsanforderungen der betrachteten Anlagen und Einrichtungen ersichtlich geworden seien. Aufgrund der unterstellten auslegungsüberschreitenden Lastfälle sei kein Versagen von Komponenten oder Maßnahmen zu befürchten, das zu einem sprunghaften Anstieg der radiologischen Auswirkungen außerhalb der Anlage führen könne (Entsorgungskommission, 2013, S. 195f.). Die ESK spricht sich aber auch dafür aus, die Zwischenlagerung auf den „unbedingt notwendigen Zeitraum“ bis zur Überführung der Abfälle in eine dauerhaft sichere Entsorgungsanlage zu begrenzen (Entsorgungskommission, 2015, S. 3). Ein Fragezeichen hinter die Sicherheit der Zwischenlager setzt das Urteil des Oberverwaltungsgerichts Schleswig, das dem Standortzwischenlager Brunsbüttel die Genehmigung mit der Begründung entzog, die Risikoermittlung und -bewertung für dieses Lager wiesen Defizite auf (SH, 2013).

Biosphäre. Ungewissheiten zur Entwicklung der Biosphäre wirken sich in vor allem in zweifacher Hinsicht auf die Risiken aus, mit der eine Entsorgungsoption für Personen verbunden ist: Veränderungen der Biosphäre können den Entsorgungspfad beeinflussen, zum Beispiel, wenn sich der mögliche Standort eines Tiefenlagers neu als wertvoller Lebensraum er-

weist und daher Widerstand gegen die Entsorgungsanlage erwächst. Veränderungen, die Menschen an ihrer eigenen biologischen Konstitution vornehmen, können auf mittlere und längere Frist zudem dazu führen, dass die Auswirkungen von Radioaktivität neu eingeschätzt werden und entsprechende Anpassungen am Entsorgungspfad vorgenommen werden.

In der vorliegenden Phase ist der Standort der geplanten Entsorgungsanlage noch nicht bekannt. Daher ist auch unbekannt, welche biologischen Lebensgemeinschaften dort bestehen. Generell werden für die kommenden zehn Jahre keine weitreichenden Veränderungen der Biosphäre in Deutschland erwartet. Lokal können sich Lebensgemeinschaften aber auch innerhalb von zehn Jahren deutlich verändern, zum Beispiel aufgrund neuer Nutzungsformen durch den Menschen oder im Fall einer schnellen und weitgehend ungehinderten Ausbreitung invasiver Neobiota.

Geologisches Umfeld. In der vorliegenden Phase ist das geologische Umfeld der geplanten Entsorgungsanlage, das insbesondere für die Tiefenlager von Bedeutung ist, noch nicht bekannt. Die meisten natürlichen Veränderungen im tieferen Untergrund verlaufen ausgesprochen langsam. Ausnahmen wie Erdbeben und Vulkanismus sind in Deutschland nur sehr eingeschränkt relevant. Sie wurden bei der Konzeption der in dieser Phase bereits bestehenden Entsorgungsanlagen in Betracht gezogen und werden auch bei der Entscheidung für eine Entsorgungsoption und der Konzeption eines Standortauswahlverfahrens berücksichtigt.

2.1.4. Vorgesehene Entwicklung von Tiefen- und Oberflächenlagerprojekten

Planung und Verfahren. Für die weiteren Entsorgungsschritte werden bei allen Entsorgungsoptionen in der vorliegenden Phase Planungen und stufengerechte regulatorische Vorgaben geschaffen bzw. den aktuellen

Rahmenbedingungen angepasst. Im Vordergrund steht dabei voraussichtlich das Standortauswahlverfahren, das zu Beginn der folgenden Phase anlaufen soll und daher in der laufenden Phase genauer konzipiert und zu dem zwischen verschiedenen Stakeholdern Einigung erzielt werden muss. Für das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sowie für das Oberflächenlager muss zudem ein Sicherheitskonzept entwickelt werden, das die notwendige Akzeptanz findet und in verbindliche Vorgaben für die Projektanten umgesetzt wird. Werden bei den Tiefenlagern verschiedene Wirtsgesteine in Betracht gezogen – aus heutiger Perspektive Salz, Ton/Tonstein sowie ggf. auch Kristallin – müssen für diese Wirtsgesteine spezifischere Sicherheits- und Einlagerungskonzepte erarbeitet werden.

Forschung und Entwicklung. Wenn eine gut informierte politische Entscheidung zur Wahl der Entsorgungsoption getroffen werden soll, sind als Grundlage dafür spezielle Forschungsaktivitäten angezeigt, die verschiedene Entsorgungsoptionen konkretisieren und eine vergleichende Bewertung ermöglichen. Dabei müssen sowohl natur- und ingenieurwissenschaftliche als auch sozial- und geisteswissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und interdisziplinär zusammengeführt werden. In den Jahren 2013 bis 2017 wurden solche Untersuchungen im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA durchgeführt. Falls künftig die Wahl der zu verfolgenden Entsorgungsoption noch einmal zur Debatte stehen sollte, könnten Arbeiten, die bei ENTRIA stattgefunden haben, vertieft und ggf. auch mit gezielten weiteren Untersuchungen ergänzt werden.

Auch die Ausgestaltung des Standortauswahlverfahrens sollte mit Forschungsvorhaben vorbereitet und durch Forschung begleitet werden. Da ein Standortauswahlverfahren stark in die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die politischen und zivilgesellschaftlichen Strukturen der jeweiligen Nation eingebunden ist und auch spezifische kulturelle Rahmenbedingungen zu berücksichtigen sind, kann nicht ohne weiteres auf internationale Erfahrungen zurückgegriffen werden.

Generell sind zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle weiterhin Forschung und Entwicklung erforderlich, um die Umsetzung der gewählten Entsorgungsoption zu gewährleisten. Dies gilt insbesondere, falls eine Option gewählt wird, die in Deutschland bisher nicht vertiefter untersucht wurde, wie die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit oder die Oberflächenlagerung.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Sofern der Weg zu einer Entsorgungslösung umgehend besprochen wird, sind in Deutschland noch Kernkraftwerke in Betrieb. Daher werden hoch radioaktive Abfälle weiterhin in Nasslager verbracht und später in Transport- und Lagerbehälter verpackt, um trocken gelagert zu werden. Neben den zentralen Zwischenlagern in Gorleben, Ahaus und dem Zwischenlager Nord werden an den Standorten von Kraftwerken und Forschungsreaktoren dezentrale Zwischenlager genutzt. In vier dieser dezentralen Zwischenlager sollen auch die verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung eingelagert werden, die noch aus Großbritannien und Frankreich nach Deutschland zurückgeführt werden (AtG, 2016; BMUB, 2015).

Bauliche Aktivitäten. In dieser Phase sind keine größeren baulichen Aktivitäten vorgesehen, die in direktem Zusammenhang mit der Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle stehen.

Betrieb der Entsorgungsanlage. In dieser Phase sind weder ein Tiefen- noch ein Oberflächenlager für hoch radioaktive Abfälle in Betrieb.

Verlaufsvarianten. Aus heutiger Sicht ist mit einer gewissen Variabilität bei der Dauer dieser Phase zu rechnen. Interessenkonflikte können die Entscheidung für eine Entsorgungsoption und die konzeptionelle Entwicklung des Standortauswahlverfahrens verzögern und im Extremfall dazu führen, dass beide scheitern. Wenn in Gesellschaft und Politik jedoch Einigkeit darüber besteht, dass die Entsorgung zügig angegangen werden

soll und einzelne Parteien dafür auch Kompromisse eingehen müssen, kann die Phase voraussichtlich auf wenige Jahre verkürzt werden.

Ein Verzicht auf das Standortauswahlverfahren in der nachfolgenden Phase ist denkbar, wenn sich eher überraschend eine gänzlich neue, vielversprechende Entsorgungsoption auf tun sollte. Eine solche Option würde alle drei bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen obsolet machen. In den kommenden Jahren könnte dies aus heutiger Sicht in Deutschland am ehesten für die tiefe Bohrlochlagerung zutreffen.

Die Lagerung in ca. 5'000 m tiefen Bohrlöchern ist wie die Endlagerung oder die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit eine Variante der geologischen Tiefenlagerung. Aufgrund langjähriger Erfahrungen mit zahlreichen Tiefbohrungen kann ausreichende Betriebssicherheit bei der Erstellung der Bohrungen gewährleistet werden. Bei der Einlagerung können die Anforderungen des Strahlenschutzes aller Voraussicht nach eingehalten werden. Aufgrund des großen Abstands der Abfälle von der Biosphäre und der mächtigen Deckschichten ist ein hohes Maß an Langzeitsicherheit zu erwarten. Nach Verfüllung der Bohrung kann die Rückholbarkeit der Abfälle allerdings aus heutiger Sicht nicht mehr gewährleistet werden. Zur Option „Tiefe Bohrlochlagerung“ besteht noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf (GRS, 2016).

Denkbar ist auch, dass sich in der Gesellschaft ein weitgehender Konsens herausbildet, aus Gründen der schnellen Entsorgung auf ein differenziertes Standortauswahlverfahren zu verzichten. Dies könnte etwa der Fall sein, wenn sich die sicherheitspolitische Situation rasch verschärft.

Falls es zu gesellschaftlichen Veränderungen oder neuen Erkenntnissen kommen sollte, die die ursprüngliche Planung infrage stellen, können die Entscheidung für eine Entsorgungsoption und das Konzept für die Standortauswahl in dieser Phase noch entsprechend angepasst werden, ohne dass die Ergebnisse eines aufwendigen Standortauswahlprozesses überdacht werden oder neu errichtete Entsorgungsanlagen aufgegeben werden müssten. Ein Kurswechsel würde allerdings voraussichtlich zu zeitlichen Verzögerungen bei der Entsorgung führen und dazu, dass Investiti-

onen, die bereits in der Vergangenheit getätigt wurden, keinen Nutzen mehr bringen.

2.2. Nähere Zukunft

ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung

2.2.1. Wichtigste Schritte

- Standortauswahl
- Eignungsnachweis am gewählten Standort
- Genehmigungsverfahren, Bau und Inbetriebnahme der Entsorgungsanlage (nur Oberflächenlager)

2.2.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. In dieser Phase wird mit einem Auswahlverfahren nach einem geeigneten Standort für das Tiefenlager gesucht. Potentiell geeignete Standorte werden über- und untertägig erkundet. Am letztlich ausgewählten Standort wird ein Eignungsnachweis erbracht.

In Deutschland wird davon ausgegangen, dass zwischen dem Beginn der Standortauswahl und der Festlegung des Standorts ca. 15 Jahre vergehen (BMUB, 2015). Der gesamte Standortauswahlprozess, einschließlich der erforderlichen über- und untertägigen Erkundungen, soll 2017 beginnen und 2031 abgeschlossen sein (StandAG, 2013; GNS, 2016).

Diese Zeitspanne wird allerdings vielfach als zu optimistisch beurteilt. Beim Tiefenlager Schacht Konrad für schwach- und mittelaktive Abfälle beanspruchte allein das Plangenehmigungsverfahren zwischen 1982 und 2007 insgesamt 25 Jahre (Riemann & Köhnke, 2016). In einer aktuellen Experteneinschätzung wird mit einer Dauer von 42 Jahren bis zum Abschluss des Standortauswahlverfahrens für ein Tiefenlager gerechnet (Thomauske, 2016). Anhand der bisherigen Erfahrungen in der Schweiz ist

davon auszugehen, dass die vorliegende Phase bei einem Tiefenlager im günstigen Fall 20 Jahre dauern wird (BFE, 2014).

Die Aufbewahrungsgenehmigungen der deutschen Zwischenlager beginnen in der vorliegenden Phase, auszulaufen. Zudem ist anzunehmen, dass die bestehenden Zwischenlager dann nicht mehr dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen werden. Wir gehen daher davon aus, dass bei den Tiefenlageroptionen in der vorliegenden Phase fünf neue regionale Zwischenlager geplant werden, die etwa im Jahr 25 nach Start der Entsorgungslösung in Betrieb gehen sollen. Mit den regionalen Zwischenlagern werden die Lasten, die sich mit dem Bau und Betrieb eines Zwischenlagers verbinden, auf mehrere Standorte verteilt und die erforderlichen Transporte geringgehalten. Aus heutiger Sicht scheint es plausibel, dass die regionalen Zwischenlager an Standorten heute bereits in Betrieb stehender Zwischenlager errichtet werden. Gründe dafür liegen unter anderem darin, dass an diesen Standorten bereits kompetentes Personal vorhanden ist und die Akzeptanz für eine kerntechnische Anlage höher sein dürfte als an anderen Standorten. Es ist jedoch auch denkbar, dass neue Standorte gewählt werden. Aus Gerechtigkeitserwägungen heraus würden damit die Standorte entlastet, die bis dahin die mit der Zwischenlagerung verbundenen Risiken getragen haben.

Oberflächenlager. In den Niederlanden befindet sich mit dem HABOG ein Oberflächenlager für hoch radioaktive Abfälle in Betrieb, in dem die Abfälle für mindestens 100 Jahre sicher aufbewahrt werden sollen. Zwischen den ersten konzeptionellen Arbeiten an diesem Projekt und der Eröffnung des Lagers im Jahr 2003 vergingen 16 Jahre (Kastelein & Codée, 2005, S. 174).

Ende 2034 läuft die erste Aufbewahrungsgenehmigung eines zentralen deutschen Zwischenlagers, des Zwischenlagers Gorleben, für die betrachteten Abfälle aus. Daher besteht aus heutiger Sicht ein Anreiz, etwa zu dieser Zeit eine langfristig sichere Entsorgungsanlage in Betrieb nehmen

zu können (Chaudry, 2015). Im Zwischenlager Ahaus wird ein Behälter bereits 2032 die genehmigten 40 Jahre erreichen (Köhnke, 2017).

Es ist denkbar, dass beim Oberflächenlager darauf hingearbeitet würde, mit der Einlagerung so frühzeitig zu beginnen, dass möglichst wenige Konflikte mit auslaufenden Aufbewahrungsgenehmigungen auftreten.

Die Auswahl eines Standorts für ein Oberflächenlager kann schneller erfolgen als die Auswahl eines Standorts für ein Tiefenlager. Auf die geologischen Voraussetzungen muss – mit Ausnahme der Eignung des Baugrundes und einiger Gefährdungen, zum Beispiel durch Erdbeben – kaum Rücksicht genommen werden, und es sind keine aufwendigen Erkundungsarbeiten im Untergrund erforderlich. Wir gehen daher davon aus, dass ein Oberflächenlager im gleichen Zeitraum, in dem die Standortauswahl und -festlegung für ein Tiefenlager erfolgen, bis zur Inbetriebnahme entwickelt werden kann.

Beim Oberflächenlager sind somit sowohl das Standortauswahl- als auch die Genehmigungsverfahren (Bau- und Betriebsgenehmigung) sowie Bau und Eröffnung des Lagers in dieser Phase inbegriffen.

2.2.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Sowohl die Aktivität als auch die Radiotoxizität und die Wärmeentwicklung der hoch radioaktiven Abfälle sind sehr ausgeprägt.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase lassen sich aus heutiger Perspektive zwar nicht vorhersehen, aber doch noch einschätzen, wobei Ungewissheiten verbleiben.

Tiefgreifende gesellschaftliche Umbrüche sind nicht auszuschließen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher Umbrüche in Deutschland wird aus heutiger Sicht als gering eingeschätzt, weil die demokratische Grundordnung gut verankert ist, die Einbindung in die Europäische Union bilaterale Konflikte mit benachbarten Staaten entschärft und auch die Voraussetzungen für grundsätzliche wirtschaftliche Stabilität nach wie vor eher

günstig erscheinen. Die Bedrohungslage im Hinblick auf weitreichende kriminelle Aktivitäten, terroristische oder kriegerische Ereignisse ist aus aktueller Perspektive jedoch komplex und das sicherheitspolitische Umfeld konfliktbeladen (vgl. 2.1.4). Diese Situation könnte sich in die Zukunft hinein fortsetzen und ggf. verstärken.

Technologische Entwicklungen, die heute noch nicht absehbar sind, können die Rahmenbedingungen für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle verändern. Rückblickend vergingen beispielsweise zwischen der beginnenden Kommerzialisierung des Internets und dessen weitreichendem Einfluss auf den gesellschaftlichen Umgang mit Informationen nur etwa 20 bis 25 Jahre. Daher ist es denkbar, dass sich die technologischen Voraussetzungen 20 bis 30 Jahre nachdem ein Entsorgungspfad beschritten wurde, von den heute bekannten maßgeblich unterscheiden.

Biosphäre. Die biologischen Lebensgemeinschaften beim Standort einer Entsorgungsanlage werden sich im Verlauf dieser Phase evtl. verändern, zum Beispiel aufgrund neuer Formen der Landwirtschaft, klimatischer Veränderungen oder der Ausbreitung von Neophyten.

Weiterentwickelte biomedizinische Erkenntnisse und Techniken werden voraussichtlich gezielt eingesetzt, um die biologische Konstitution von Menschen zu verändern, zum Beispiel, um durch genetische Veränderungen an menschlichen Zellen Krankheiten vorzubeugen. Die Erkenntnisse zur Krankheitsentstehung und die Behandlungsmöglichkeiten für Krankheiten, vor allem Krebserkrankungen, werden sich weiterentwickeln. Dies könnte unter anderem zu veränderten Anforderungen an den Strahlenschutz bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle führen.

Geologisches Umfeld. An den Standorten für ein Tiefen- oder Oberflächenlager sind keine wesentlichen Veränderungen des geologischen Umfelds zu erwarten. Dies gilt, sofern die Standorte raumplanerisch bis in den Untergrund hinein wirksam gesichert werden konnten, so dass sie nicht wesentlich durch menschliche Einwirkungen beeinflusst werden. Zudem ge-

hen wir davon aus, dass die Erkundung des Untergrunds für ein Tiefenlager so vorgenommen wird, dass das geologische Umfeld des Lagers kaum geschädigt wird.

2.2.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlagerprojekte

Planung und Verfahren. Das Standortauswahlverfahren wird mit zunehmendem Fortschreiten des Prozesses weiter konkretisiert. Dabei sind Unterschiede zwischen der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit zu erwarten, die vor allem auf den zusätzlichen Raumbedarf des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit zurückgehen. Für Fragestellungen, die sich während des Verfahrens ergeben, zum Beispiel zu spezifischen Aspekten der Sicherheit oder zu Kompensationszahlungen für die betroffenen Anwohner, Gemeinden und Regionen, müssen Lösungen entwickelt werden. Dadurch sind sowohl die Behörden, die das Standortauswahlverfahren beaufsichtigen und begleiten, als auch die Institutionen, die die Standortauswahl durchführen, gefordert.

Konzeptionelle Arbeiten zur Entwicklung der Tiefenlagerprojekte werden fortgeführt und die Genehmigungsverfahren werden vorbereitet. Gleichzeitig müssen die regulatorischen Vorgaben weiterentwickelt und dem aktuellen Stand der Kenntnisse und dem Fortschreiten der Entsorgungslösung angepasst werden.

Der Prozess der Standortauswahl beinhaltet aus heutiger Sicht einen intensiven gesellschaftlichen Diskurs. Zahlreiche öffentliche Veranstaltungen finden statt. Der Dialog zwischen den Stakeholdern, bei dem unter anderem auch sicherheitsbezogene Fragen erörtert werden, erfordert erhebliche Ressourcen bei allen Beteiligten.

Der Weiterbetrieb der Zwischenlager wird ebenfalls planerische und regulatorische Arbeiten erforderlich machen. So müssen ggf. auslaufende Genehmigungen neu beantragt sowie wesentliche Instandhaltungsmaßnahmen

men und Nachrüstungen der bestehenden Zwischenlager geplant und genehmigt werden.

Wir gehen davon aus, dass zu Beginn der vorliegenden Phase die Entscheidung gefällt wird, fünf neue zentrale Zwischenlager in Deutschland zu bauen, die dem in dieser Phase aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Standorte dieser Zwischenlager sind über Deutschland verteilt und liegen nahe bei den Standorten früherer Kernkraftwerke bzw. Zwischenlager. Die Entscheidungen für die Standorte erfolgen in einem politischen Prozess mit partizipativen Elementen. Angesichts der gesellschaftlich wahrgenommenen Dringlichkeit neuer Anlagen und der begrenzten Betriebsdauer der Zwischenlager gehen wir davon aus, dass der Standortauswahlprozess in einem Zeitrahmen von einigen Jahren zum Abschluss gebracht werden kann. In den auf die Entscheidung zur Errichtung von fünf neuen Zwischenlagern folgenden 15 Jahren sind intensive Vorbereitungsarbeiten erforderlich, die beispielsweise die Genehmigungsverfahren und die Planung der Bauvorhaben betreffen. Genehmigungen werden auch für den Transport der hoch radioaktiven Abfälle von den älteren in die neuen Zwischenlager erforderlich sein.

Da es sich beim Bau der Zwischenlager um größere Projekte handelt, sind im Rahmen von Planungen und Verfahren vielfältige Aspekte zu beachten, die den Arbeitsschutz betreffen, den Schutz von Anwohnern und den Schutz der Umwelt.

Die Stilllegung und der Rückbau der älteren Zwischenlager erfordern ebenfalls vorbereitende Planung und Genehmigungsverfahren an mehreren Standorten in Deutschland.

Forschung und Entwicklung. Die Forschung und die Entwicklung zur Tiefenlagerung werden fortgeführt. Da die Realisierung eines Tiefenlagers näher rückt, werden zunehmend Techniken, die für die Tiefenlagerung benötigt werden, in Forschungsinstituten, Felslabors und bei Unternehmen erprobt.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stellt höhere Anforderungen an Forschung und Entwicklung als die Endlagerung, da intensiver sowohl zum Monitoring sowie auch zur Rückholbarkeit gearbeitet werden muss.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Wenn der Entsorgungspfad rasch beschritten wird, werden zu Beginn dieser Phase noch hoch radioaktive Abfälle aus den Nasslagern bei den Kernkraftwerken in Transport- und Lagerbehälter verpackt (BMUB, 2015).

Voraussichtlich werden gelegentlich Abfälle im Verlauf der Phase umverpackt, zum Beispiel, weil unklare Befunde oder Schäden an den Transport- und Lagerbehältern aufgetreten sind oder um genauere Untersuchungen am Inhalt der Transport- und Lagerbehälter vornehmen zu können. Genauere Untersuchungen am Inhalt von Transport- und Lagerbehältern sind unter anderem erforderlich, um die aktuell in Paragraph 19a des Atomgesetzes geforderte zehnjährliche periodische Sicherheitsüberprüfung (AtG, 2016) oder andere zu diesem Zeitpunkt erforderliche Sicherheitsnachweise zu unterstützen.

Während des Standortauswahlverfahrens für die Tiefenlager werden die bestehenden Zwischenlager zunächst weiter betrieben. Gegenwärtig ist geplant, die „technischen Voraussetzungen“ dafür zu schaffen, dass die bestehenden Zwischenlager länger als ursprünglich geplant betrieben werden können (BMUB, 2015). Unter ethischen und ingenieurwissenschaftlichen Gesichtspunkten spricht allerdings vor allem das Bestreben nach Vorsorge angesichts ungewisser künftiger Entwicklungen dafür, die hoch radioaktiven Abfälle in explizit auf Dauer angelegten Zwischenlagern sicher aufzubewahren, bevor sie später in ein Tiefenlager verbracht werden (Riemann & Köhnke, 2016). Die Endlagerkommission sprach die Möglichkeit an, ein zentrales Zwischenlager am für die Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle vorgesehenen Standort zu errichten (Endlagerkommission, 2016, S. 104), der allerdings erst gegen Ende der vorliegenden Phase bekannt sein wird. Wir gehen deshalb alternativ davon aus, dass in

der betrachteten Phase fünf regionale neue Zwischenlager in Deutschland geplant, genehmigt, errichtet und nach 15 Jahren, also um das Jahr 25 nach Start der Entsorgungslösung, in Betrieb genommen werden. Anschließend müssen die Abfälle von den bisherigen Standorten zu den neuen Zwischenlagern transportiert und dort eingelagert werden.

Bauliche Aktivitäten. In dieser Phase sind keine größeren baulichen Aktivitäten vorgesehen, die in direktem Zusammenhang mit der Errichtung eines Tiefenlagers stehen. Die untertägige Erkundung potentiell geeigneter Standorte setzt nach heutiger Einschätzung Sondierbohrungen voraus.

Zudem ist es wahrscheinlich, dass in der laufenden Phase neue Felslabors errichtet werden – dies vor allem, um Untersuchungen zu den Wirtsgesteinen Tongestein sowie ggf. Kristallin vorzunehmen, die in Deutschland bisher nicht eingehender untersucht wurden.

Vor allem müssen jedoch im Zusammenhang mit der Tiefenlagerung die erwähnten fünf regionalen Zwischenlager errichtet werden. Wir gehen davon aus, dass die Sicherheitsanforderungen an die Auslegung der Zwischenlager in der vorliegenden Phase mindestens jenen entsprechen, die heute an ein Zwischenlager gestellt würden. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass höhere Anforderungen einzuhalten sind. Die höheren Sicherheitsanforderungen schlagen sich tendenziell auch in einem größeren Aufwand beim Bau der Anlagen nieder. Es ist jedoch vorstellbar, dass neue technische Entwicklungen das Bauen in der vorliegenden Phase sicherer und effizienter gestalten als es heute der Fall ist.

Nach der Inbetriebnahme der neuen Zwischenlager werden die vorher bestehenden Zwischenlager rückgebaut.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Das Tiefenlager ist noch nicht in Betrieb. Der Betrieb der Zwischenlager wird unter „Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung“ behandelt.

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Im ungünstigen Fall führt das Standortauswahlverfahren in den möglichen Standortregionen und an

den in Frage kommenden Standorten zu Widerständen. In den Standortregionen und an Orten, wo wesentliche Entscheidungen zur Standortauswahl gefällt werden, sind daher Protestaktionen möglich. Diese Protestaktionen können unter anderem zu Personenschäden führen und stellen daher ein Sicherungsrisiko dar. Unter Personenschäden verstehen wir sowohl Beeinträchtigungen der physischen als auch der psychosozialen Gesundheit.

Die Bedrohung durch Veränderungen der sicherheitspolitischen Lage ist aus heutiger Sicht nicht absehbar. Möglicherweise werden sich einige der für die vorangehende Phase beschriebenen Entwicklungen weiterhin als relevant erweisen und neue Bedrohungen hinzutreten.

Auch technologische Entwicklungen, die die Bedrohungslage beeinflussen, lassen sich heute nur schwer einschätzen. Relevante technologische Entwicklungen können zum Beispiel den Flugzeugbau betreffen, etwa den zunehmenden Einsatz von Großraumflugzeugen mit Einfluss auf das Risiko durch Flugzeugabsturz auf ein Zwischenlager oder die zunehmende Verwendung unbemannter Luftfahrzeuge mit Einfluss auf das Risiko terroristischer Anschläge.

Die Bedrohung durch Naturgefahren könnte sich aufgrund des Klimawandels in der vorliegenden Phase bereits merklich verändern. Bei der Standortauswahl, die nicht nur die untertägigen, sondern auch die über-tägigen Teile der Entsorgungsanlage betrifft, müsste dann voraussichtlich vor allem einer aktualisierten Einschätzung der Hochwassergefährdung und von extremen meteorologischen Ereignissen Rechnung getragen werden.

Tiefenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Zwischenlager, die bereits beim Start der Entsorgungslösung in Betrieb waren, müssen in dieser Phase teilweise weiterhin genutzt werden. Die Sicherheit der alten Anlagen ist wesentlich davon abhängig, dass ausreichende Ressourcen für den Betrieb, den Unterhalt und die Nachrüstung zur Verfügung stehen und ge-

eignete Voraussetzungen für eine gute Sicherheitskultur geschaffen werden.

Ein ergebnisoffenes Standortauswahlverfahren ist auch bei guter Konzeption, Planung und Durchführung anfällig für Verzögerungen. So können etwa neue wissenschaftliche Erkenntnisse dazu führen, dass zusätzliche Überprüfungen durchgeführt werden müssen, oder neu zutage tretende Interessenkonflikte erfordern zeitaufwendige Diskurse und Moderation.

Verlaufsvarianten. Denkbar ist, dass die gegenwärtig bestehenden Zwischenlager bis zur Inbetriebnahme der Tiefenlager weiter genutzt und nicht durch neue regionale Anlagen abgelöst werden. Diese Laufvariante bringt vordergründig einige Vorteile mit sich: Die kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten, die mit dem Bau der neuen regionalen Zwischenlager einhergehen, können vermieden werden, ebenso wie die kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten, die sich mit dem Rückbau der älteren Zwischenlager verbinden und dem Transport der Abfälle von den älteren in die neuen Zwischenlager. Auf neue Zwischenlager zu verzichten bedeutet jedoch auch, auf die Chance einer Zwischenlagerung zu verzichten, die auf mittlere Dauer ein höheres Sicherheitsniveau gewährleistet als zuvor. Zudem ist damit zu rechnen, dass nicht nur die Errichtung neuer Zwischenlager, sondern auch das Verbleiben der Abfälle in älteren Anlagen auf Widerstand in der Politik und der Zivilgesellschaft treffen wird.

Ggf. muss in einer späten Phase des Standortauswahlverfahrens für ein Tiefenlager auf ein früheres Stadium zurückgesprungen werden, weil

- neue Erkenntnisse gewonnen wurden, die den bisherigen Verlauf des Verfahrens infrage stellen,
- sich einer oder mehrere der gewählten Standorte bei näherer Untersuchung als doch nicht geeignet herausstellen oder
- das Vertrauen der Bevölkerung in das Verfahren bzw. die verfahrenslleitenden Organe nicht mehr gewährleistet ist.

Falls sich im Verlauf des Standortauswahlverfahrens neue Entsorgungsoptionen auftun, die auf breiten gesellschaftlichen Rückhalt treffen oder von starken Interessengruppen forciert werden, wird unter Umständen statt der Tiefenlagerung eine andere Entsorgungslösung weiterverfolgt. Denkbar ist aber auch, dass im Verlauf der vorliegenden Phase Anpassungen am Konzept der Tiefenlager vorgenommen werden, die auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse, den technischen Fortschritt oder gesellschaftliche Anforderungen zurückgehen. Wenn es beispielsweise technisch möglich würde, ein aussagekräftiges und zuverlässiges Monitoring auf größere Distanzen vorzunehmen, ist anzunehmen, dass das Konzept der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit entsprechend angepasst würde. Evtl. könnte dann auf die im Referenzmodell vorgesehene Monitoringsohle im Wirtsgestein verzichtet werden, um die Integrität des Wirtsgesteinskörpers möglichst gut zu erhalten.

2.2.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

Planung und Verfahren. Viele Verfahrensschritte laufen beim Oberflächenlager voraussichtlich in kürzerer Zeit ab als bei den Tiefenlagern. Da bei der Standortauswahl besser auf gesellschaftliche Präferenzen Rücksicht genommen werden kann und die Erkundung sowie der Bau unter technischen Gesichtspunkten (keine Arbeiten im tieferen Untergrund erforderlich) einfacher sind, sind Planung und Verfahren wahrscheinlich weniger aufwendig als bei der Tiefenlagerung.

Die regulatorischen Vorgaben müssen während der laufenden Phase weiterentwickelt und dem aktuellen Stand der Kenntnisse angepasst werden. Das Standortauswahlverfahren wird mit zunehmendem Fortschreiten des Prozesses weiter konkretisiert. Für Fragestellungen, die sich während des Verfahrens ergeben, zum Beispiel zu spezifischen Aspekten der Sicherheit oder zu Kompensationszahlungen, müssen Lösungen entwickelt werden. Dadurch sind sowohl die Behörden, die das Standortauswahlverfahren

beaufsichtigen und begleiten, als auch Institutionen, die die Standortauswahl durchführen, gefordert.

Der Prozess der Standortauswahl erfordert aus heutiger Sicht einen intensiven gesellschaftlichen Diskurs. Zahlreiche öffentliche Veranstaltungen finden statt. Der Dialog zwischen den Stakeholdern bindet erhebliche Ressourcen.

Konzeptionelle Arbeiten zur Entwicklung des Oberflächenlagers müssen durchgeführt werden, insbesondere auch zur Konkretisierung des Sicherheitskonzepts. Genehmigungsverfahren für die Entsorgungsanlage müssen mit entsprechenden Anträgen vorbereitet und eine Beurteilung der eingereichten Unterlagen vorgenommen werden. Dabei sind auch Mitspracherechte der betroffenen Bevölkerung zu berücksichtigen. Im Rahmen der Genehmigungsverfahren wird auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung vorgenommen. Vor der Inbetriebnahme des Lagers muss eine Kalterprobung für wichtige Prozesse, die im Lager ablaufen sollen, durchgeführt werden.

Da es sich beim Bau des Oberflächenlagers um ein Großprojekt handelt, sind vielfältige Aspekte zu beachten, die den Arbeitsschutz betreffen, den Schutz von Anwohnern und den Schutz der Umwelt. Der Kommunikation mit der betroffenen und der interessierten Bevölkerung kommt erhebliche Bedeutung zu.

Bevor das Oberflächenlager in der folgenden Phase den Einlagerungsbetrieb aufnimmt, muss eine Betriebsgenehmigung beantragt und bewilligt werden.

Während des Baus und im Vorfeld der Inbetriebnahme des Oberflächenlagers werden voraussichtlich zahlreiche Besucher aus dem In- und Ausland das Oberflächenlager besichtigen.

Die Stilllegung und der Rückbau der Zwischenlager, die in der nachfolgenden Phase erfolgen, werden voraussichtlich gegen Ende der vorliegenden Phase planerisch vorbereitet.

Forschung und Entwicklung. Vor dem Bau und der Inbetriebnahme des Oberflächenlagers sind intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Gegen Ende dieser Phase werden sich diese Aktivitäten voraussichtlich auf andere Gebiete verlagern, zum Beispiel Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Behälterkomponenten. Die Sicherheit des Lagers muss periodisch überprüft und ggf. neueren Erkenntnissen und Entwicklungen angepasst werden. Gleichzeitig muss die Fachkompetenz erhalten werden, die notwendig ist, um das Lager zu betreiben und den weiteren Entsorgungspfad zu planen. Dazu ist ein ausgewogenes Zusammenwirken von Aus- und Weiterbildungsangeboten sowie Forschung erforderlich.

Da die Techniken, die bei der Errichtung des Lagers zum Einsatz kamen, im Verlauf von dessen Betriebsdauer veralten werden, muss frühzeitig ein Konzept entwickelt werden, um Komponenten des Lagers zu ersetzen bzw. langfristig genügend Ersatzteile vorzuhalten. Das langfristige Vorhalten von Ersatzteilen eignet sich allerdings nur dann, wenn die Materialalterung keine wesentliche Rolle spielt.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Auch wenn der Entsorgungspfad bereits 2017 beschritten wird, sind zu Beginn dieser Phase voraussichtlich alle hoch radioaktiven Abfälle bereits in Transport- und Lagerbehälter verpackt (BMUB, 2015).

Ggf. werden einzelne Abfälle im Verlauf der Phase umverpackt, zum Beispiel, weil Schäden an den Transport- und Lagerbehältern aufgetreten sind, oder um genauere Untersuchungen am Inhalt der Transport- und Lagerbehälter vornehmen zu können. Genauere Untersuchungen am Inhalt von Transport- und Lagerbehältern sind auch erforderlich, um die periodischen Sicherheitsnachweise zu unterstützen.

Während der vorliegenden Phase werden die bestehenden Zwischenlager weiter betrieben. Es ist geplant, die „technischen Voraussetzungen“ dafür zu schaffen, dass die bestehenden Zwischenlager länger als ursprünglich geplant betrieben werden können (BMUB, 2015). Dass in dieser Phase

neue Zwischenlager errichtet und Abfälle umgelagert werden, ist mit der Perspektive auf ein Oberflächenlager unwahrscheinlich. Die Umsetzung neuer Zwischenlager dürfte einen ähnlichen Zeitraum beanspruchen wie diejenige des Oberflächenlagers selbst.

Bauliche Aktivitäten. Der Bau des Oberflächenlagers ist ein anspruchsvolles Großprojekt. Neben Lagerhallen umfasst das Oberflächenlager auch eine Heiße Zelle mit Konditionierungseinrichtungen, um potentiell beschädigte Brennelemente reparieren, kapseln etc. zu können (Reichardt, 2016, S. 1f.).

Es werden Vorkehrungen getroffen, um die Abfälle bei Bedarf aus den bestehenden Lagerbehältern umzulagern, zum Beispiel, wenn sich ein Behälter als defekt erweisen sollte.

Aus Sicherheitsgründen weist das Lager einen modularen Aufbau auf (Reichardt, 2016, S. 1f.). Dies bedeutet, dass die Abfallbehälter auf mehrere, aneinander angrenzende und zusammenhängende Bauwerke am Standort verteilt werden. In Bezug auf Einwirkungen von außen ist das Bauwerk Oberflächenlager redundant zu den Behältern ausgelegt.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Das Oberflächenlager ist in dieser Phase noch nicht in Betrieb.

Der Betrieb der Zwischenlager wird unter „Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung“ angesprochen.

Oberflächenlager-spezifische Bedrohungslage. Das Standortauswahlverfahren und der Bau des Oberflächenlagers können regional und lokal zu Widerständen führen. Es ist daher damit zu rechnen, dass es während des Standortauswahlverfahrens in den Standortregionen und an Orten, wo wesentliche Entscheidungen zur Standortauswahl gefällt werden, zu Protesten kommt. Diese Proteste könnten unter anderem mit Personenschäden einhergehen und stellen daher ein Sicherheitsrisiko dar.

Die Bedrohung durch Veränderungen der sicherheitspolitischen Lage ist aus heutiger Sicht nicht vorhersehbar. Möglicherweise werden sich einige der für die vorangehende Phase beschriebenen Entwicklungen weiterhin als relevant erweisen, möglicherweise auch neue Bedrohungen auftreten. Die Bedrohung durch Naturgefahren könnte sich aufgrund des Klimawandels bereits merklich verändern. Bei der Standortauswahl und der Auslegung des Oberflächenlagers müsste dann voraussichtlich vor allem einer aktualisierten Einschätzung der Hochwassergefährdung und von extremen meteorologischen Ereignissen Rechnung getragen werden. Relevante technologische Entwicklungen können zum Beispiel den Flugzeugbau betreffen, etwa bei zunehmendem Einsatz von Großraumflugzeugen mit Einfluss auf das Risiko durch Flugzeugabsturz auf eine Entsorgungsanlage oder zunehmender Verwendung unbemannter Luftfahrzeuge mit Einfluss auf das Risiko eines terroristischen Anschlags.

Oberflächenlager-spezifische Verletzlichkeit. Ein ergebnisoffenes Standortauswahlverfahren ist auch bei guter Konzeption, Planung und Durchführung anfällig für Verzögerungen, zum Beispiel aufgrund von neu gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die Anpassungen nahelegen, oder aufgrund von tiefgreifenden Interessenkonflikten.

Die Finanzierung des Baus eines Oberflächenlagers erfordert weniger Ressourcen und ist aus heutiger Sicht mit weniger Ungewissheiten behaftet als die Finanzierung des Baus eines Tiefenlagers. Allerdings müssen die zur Realisierung der Entsorgungsanlage erforderlichen Mittel in einem kürzeren Zeitraum zur Verfügung gestellt werden als bei den Tiefenlagern. Die Abschätzung der Kosten ist einfacher als bei Tiefenlagern, weil international bereits viele Erfahrungen mit dem Bau von Zwischenlagern vorliegen und der Bau des Oberflächenlagers in einem überschaubaren Zeitraum an die Hand genommen werden kann. Dennoch ist beim Großprojekt Oberflächenlager davon auszugehen, dass es zu Verzögerungen kommen kann, zum Beispiel aufgrund von unerwarteten externen Ereignissen, aufgrund von Einsparungen und Protesten, aufgrund von Liefereng-

pässen oder Mängeln bei der Qualitätssicherung, und der vorgesehene Kostenrahmen überschritten wird.

Verlaufsvarianten. Falls sich im Verlauf des Standortauswahlverfahrens neue Entsorgungsoptionen auftun, die auf breiten gesellschaftlichen Rückhalt treffen oder von starken Interessengruppen forciert werden, wird unter Umständen statt der Oberflächenlagerung eine andere Entsorgungslösung weiterverfolgt. So ist etwa denkbar, dass in einer gesellschaftlichen Krisensituation die Abfälle in ein Lager unter Tage, ggf. oberflächennah, verbracht werden sollen, um sie besser als in einem Oberflächenlager gegen Einwirkungen von außen abzusichern.

Ist das Oberflächenlager erst einmal betriebsbereit, besteht die Gefahr, dass angesichts der geplanten langen Betriebsdauer von ca. 200 Jahren, die Aktivitäten, die den weiteren Entsorgungspfad betreffen, vernachlässigt werden. Nebenwirkungen einer solchen Entwicklung können unter anderem der Verlust an Fachkompetenz im Bereich der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle sein, oder Ressourcen, die für den weiteren Entsorgungspfad zurückgestellt wurden, werden – zunächst vorübergehend – für andere Zwecke gebraucht und anschließend nicht mehr für die Entsorgung zur Verfügung gestellt.

2.3. Mittlere Zukunft

ca. Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungslösung

2.3.1. Wichtigste Schritte

- Bau der Entsorgungsanlage (Tiefenlager)
- Einlagerung der Abfälle und Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

2.3.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. In Deutschland ist vorgesehen, dass der Bau eines Endlagers etwa 25 Jahre beanspruchen wird. In dieser Zeitspanne ist allerdings auch die Erkundung als Voraussetzung für die Genehmigungsverfahren und sind die Genehmigungsverfahren selbst inbegriffen, die zu Beginn der hier vorliegenden Phase bereits abgeschlossen sein sollten. Im Nationalen Entsorgungsprogramm ist festgehalten, dass das derzeit geplante Endlager für wärmentwickelnde Abfälle 2050 in Betrieb gehen soll (BMUB, 2015).

Die Errichtung eines Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wird voraussichtlich mehr Zeit beanspruchen als die Errichtung eines Endlagers, da die Anlage komplexer ist und mehr Hohlräume aufgefahren werden müssen.

Für den Bau eines Tiefenlagers, einschließlich der damit verbundenen Erkundungen und Vorarbeiten unter Tage, wird in Finnland, Frankreich und Schweden von ca. 20 Jahren ausgegangen (Nagra, 2015b). In der Schweiz, die allerdings ein verhältnismäßig komplexes Tiefenlagerkonzept mit einem Haupt- und einem Pilotlager sowie Testbereichen verfolgt, werden etwa 30 Jahre nach dem Baubeginn eines Felslabors am gewählten Standort der Entsorgungsanlage veranschlagt (Nagra, 2014).

Da große Bauvorhaben erfahrungsgemäß oft mit Verzögerungen verbunden sind und bei untertägigen Bauwerken auch überraschende geologische Befunde auftreten können, die Anpassungen in der Planung erfor-

dern, gehen wir von einem Zeitrahmen von 25 Jahren für den Bau des Tiefenlagers aus.

Oberflächenlager. Im gleichen Zeitraum, in dem ein Tiefenlager gebaut wird, finden bei der Oberflächenlagerung die Transporte der radioaktiven Abfälle aus den Zwischenlagern zum Oberflächenlager und die Einlagerung ins Oberflächenlager statt. Die Einlagerung aller hoch radioaktiven Abfälle, die einschließlich der hier angenommenen Kapselung der Brennelemente voraussichtlich etwa 20 Jahre beanspruchen wird, geht dann in den auf Dauer angelegten Lagerbetrieb über.

2.3.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Sowohl die Aktivität als auch die Radiotoxizität und die Wärmeentwicklung der hoch radioaktiven Abfälle sind noch sehr ausgeprägt.

Gesellschaft. Das Spektrum möglicher Entwicklungen wird häufig mit zwei Extremszenarien umschrieben:

Günstiges Extremszenario	Ungünstiges Extremszenario
Politische Stabilität	Politische Instabilität
Politischer Wille, die Entsorgung durchzuführen	Politischer Unwille oder Desinteresse, die Entsorgung durchzuführen
Weitgehender gesellschaftlicher Konsens in Fragen, die die Entsorgung betreffen	Tiefgreifender gesellschaftlicher Dissens in Fragen, die die Entsorgung betreffen
Expansion oder Hochkonjunktur und volkswirtschaftliche Stabilität	Rezession und/oder instabile volkswirtschaftliche Verhältnisse
Hohe Verfügbarkeit von personellen, materiellen und finanziellen Ressourcen	Mangel an personellen, materiellen und finanziellen Ressourcen
Wissenschaftliche und technische Entwicklungen, die eine einfache und sichere Ent-	Verlust an Wissen und technischen Fähigkeiten im Bereich der Entsorgung hoch

Günstiges Extremszenario	Ungünstiges Extremszenario
sorgung begünstigen	radioaktiver Abfälle

Daneben sind weitere, anders gelagerte Szenarien denkbar, die die gewählte Entsorgungslösung ebenfalls entscheidend beeinflussen könnten. Beispiele sind

- Grundlegender gesellschaftlicher Wertewandel
- Entwicklung fundamental neuer Techniken bis zur Anwendungsreife, die zur Nutzung oder Unschädlichmachung der Abfälle dienen
- Entwicklung neuer verbreiteter Nutzungsformen des tiefen Untergrunds, die veränderte Anforderungen an ein Tiefenlager begründen oder die Tiefenlagerung in Frage stellen

Die Entsorgungslösung auf der Grundlage der heutigen gesellschaftlichen Verhältnisse vor auszudenken, ist daher lediglich ein Notbehelf, der getroffen werden muss, weil sich die Verhältnisse, die nach 30 bis 55 oder mehr Jahren in der Zukunft bestehen, gegenwärtig noch nicht einschätzen lassen. Bei der Umsetzung einer Entsorgungslösung kommt der schrittweisen Konkretisierung und Anpassung an die jeweils aktuellen Rahmenbedingungen große Bedeutung zu (Eckhardt & Rippe, 2016).

Biosphäre. Die Biosphäre in Deutschland und speziell am Standort der Entsorgungsanlagen wird sich im Verlauf dieser Phase voraussichtlich aufgrund des Klimawandels verändern. Schwer vorhersehbar ist, ob und wie auch andere Einwirkungen des Menschen die Biosphäre beeinflussen, zum Beispiel neue Formen der Raumnutzung. Daneben könnten natürliche Ereignisse und Entwicklungen zu Veränderungen in der Biosphäre beitragen, etwa Epidemien, die Menschen, Tiere oder Pflanzen betreffen. Neue biomedizinische Erkenntnisse und Techniken werden wahrscheinlich zunehmend von Menschen genutzt werden, um ihre eigene biologische Konstitution zu verändern.

Geologisches Umfeld. An den Standorten für ein Tiefen- oder Oberflächenlager sind in dieser Phase keine wesentlichen Veränderungen des geologischen Umfelds aufgrund natürlicher Ursachen zu erwarten. Die Nutzung des Untergrunds durch den Menschen kann jedoch zu Veränderungen führen, sofern diesen nicht wirksam begegnet wird, zum Beispiel durch raumplanerische Sicherung. Denkbar sind beispielsweise Veränderungen in den Grundwasserströmen, in der Zusammensetzung des Grundwassers oder im unterirdischen Temperaturhaushalt aufgrund geothermischer Nutzungen des Untergrunds (vgl. etwa Griebler et al., 2015).

2.3.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlager

Planung und Verfahren. Für den Bau eines Tiefenlagers ist heute von Beginn an gemäß Standortwahlgesetz und Atomgesetz eine atomrechtliche Genehmigung einzuholen. Sobald sich die Eignung des Standorts bestätigt hat und mit dem Bau von Einlagerungsstrecken und einer Heißen Zelle im Rahmen der Oberflächenanlagen begonnen werden soll, ist eine nukleare Betriebsgenehmigung erforderlich.

Während dem Bau eines Tiefenlagers wird weiter an der Konkretisierung technischer Lösungen für den Betrieb des Lagers gearbeitet. Darunter fallen zum Beispiel Vorkehrungen und Abläufe, die mit dem Monitoring in Zusammenhang stehen. Monitoring ist bei beiden Formen des Tiefenlagers geplant. Das Endlager wird allerdings nur bis zum endgültigen Verschluss überwacht, der bald nach Beendigung der Einlagerung erfolgen soll. Anschließend wird beim Endlager lediglich ein Umweltmonitoring in Betracht gezogen. Die Überwachung des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit soll dagegen auch dann noch weitergeführt werden, wenn bereits alle Abfälle im Tiefenlager eingelagert worden sind. Planung, Regulierung und Verfahren betreffen auch die Rückholbarkeit, deren Machbarkeit spätestens in dieser Phase nachgewiesen werden muss.

Da es sich beim Bau des Tiefenlagers und der zugehörigen Oberflächenanlagen um ein Großprojekt handelt, sind im Rahmen von Planungen und Verfahren vielfältige Aspekte zu beachten, die den Arbeitsschutz betreffen, den Schutz von Anwohnern und den Schutz der Umwelt.

Der Kommunikation mit der betroffenen und der interessierten Bevölkerung kommt erhebliche Bedeutung zu. Während der Bauphase ist im Umfeld der Baustelle mit interessierten Besuchern aus dem In- und Ausland zu rechnen.

Forschung und Entwicklung. Spätestens in dieser Phase müssen die für die Einlagerung in ein Tiefenlager erforderlichen Geräte und Einrichtungen konzipiert und mit deren Konstruktion begonnen werden. Zudem werden Anforderungen an die Qualitätssicherung definiert und Verfahren zur Qualitätssicherung erprobt.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stellt weiterhin höhere Anforderungen an Forschung und Entwicklung als die Endlagerung, da intensiver zum Monitoring gearbeitet werden muss und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Rückholung erforderlich sind.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Während das Tiefenlager errichtet wird, müssen die hoch radioaktiven Abfälle weiterhin zwischengelagert werden. Ggf. werden einzelne Abfälle umverpackt, zum Beispiel, weil Schäden an den Transport- und Lagerbehältern aufgetreten sind, um genauere Untersuchungen am Inhalt der Transport- und Lagerbehälter vornehmen zu können oder um einen Beitrag zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung der Zwischenlager zu leisten.

Wir gehen davon aus, dass die in der vorangegangenen Phase neu errichteten regionalen Zwischenlager im stabilen Betrieb stehen, so dass nun keine Transporte von radioaktiven Abfällen zwischen verschiedenen Zwischenlagern mehr erforderlich sind. Die bestehenden Zwischenlager wer-

den sicherheitsgerichtet betrieben, unterhalten und ihre Sicherheit dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend periodisch verbessert.

Bauliche Aktivitäten. Die Phase beginnt mit der vertieften untertägigen Erkundung des Standorts. Wahrscheinlich wird, nachdem der Wirtsgesteinskörper erreicht wurde, zunächst ein Erkundungsbergwerk errichtet, in dem Versuche zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle durchgeführt werden und die der provisorischen Sicherheitsanalyse zugrundeliegenden Parameter, Prozesse und Modelle überprüft werden können. Anschließend beginnt der Bau der Einlagerungsstrecken. Mehrere parallel aufgefahrenen Strecken bilden ein Einlagerungsfeld.

Noch während der baulichen Arbeiten am Tiefenlager, die auf der Errichtungsgenehmigung basieren, wird die Genehmigung für den Betrieb des Lagers mit hoch radioaktiven Abfällen eingeholt. In der nachfolgenden Phase wird sich ein Teil der Bauarbeiten zeitlich mit dem beginnenden Einlagerungsbetrieb überschneiden.

Der Bau eines Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist aufwendiger als der Bau eines Endlagers. Dem Referenzmodell bei ENTRIA (Stahlmann et al., 2015) zufolge ist ca. 50 m über der Einlagerungssohle eine Sohle für das Monitoring vorzusehen. Auf der Monitoringsohle werden über den Einlagerungsfeldern die Monitoringstrecken aufgefahren und aus den Monitoringstrecken Bohrlöcher für Messgeräte abgeteuft.

Neben dem untertägigen Teil des Tiefenlagers muss auch der übertägige Teil errichtet werden. Das Eingangslager eines Endlagers weist voraussichtlich eine Heiße Zelle auf, die vor allem dazu dient, Abfälle von den Transport- und Lagerbehältern in die Endlagerbehälter umzuladen und eventuell hierfür zu konditionieren, aber auch beispielsweise dazu, Kontrollen an Endlagerbehältern vorzunehmen. Bei ENTRIA steht die Nutzung der im Rahmen dieser Forschungsplattform entwickelten ENCON-Behälter (ENTRIA-Container) im Vordergrund. Wir gehen modellhaft von POL-LUX®-10-Behältern aus, die für die Endlagerung in Steinsalz entwickelt

wurden (Pönitz, 2017). Für diese Behälter nehmen wir eine Zerlegung der Brennelemente in Brennstäbe und deren Einbüschung an.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist die Heiße Zelle außerdem notwendig, um ggf. auf Ergebnisse des Monitorings reagieren zu können, die vom Erwarteten abweichen und letztlich die Entscheidung zur Rückholung auslösen könnten.

Falls ein zentrales Zwischenlager am für die Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle vorgesehenen Standort errichtet würde (Endlagerkommission, 2016, S. 104), müsste der Bau dieses Zwischenlagers zeitlich weitgehend parallel zu den ersten baulichen Arbeiten am Tiefenlager erfolgen, weil er voraussetzt, dass der geplante Standort des Tiefenlagers bereits bekannt ist und mit hoher Wahrscheinlichkeit für das Tiefenlager genutzt werden wird. Wenn jedoch, wie von uns vorausgesetzt, in der vorangehenden Phase fünf neue regionale Zwischenlager errichtet wurden, ist es unwahrscheinlich, dass noch einmal ein zentrales Zwischenlager am Standort des Tiefenlagers errichtet wird – es sei denn, dass dieses Zwischenlager auch nach der Einlagerung der Abfälle in das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit noch für den Fall zur Verfügung stehen soll, dass ein erheblicher Teil der Abfälle rückgeholt wird.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Das Tiefenlager ist noch nicht in Betrieb. In den bereits aufgefahrenen Teilen des Lagers wird jedoch bereits eine Kalterprobung der Einlagerungsvorgänge unter Tage vorgenommen. Im Erkundungsbergwerk könnten wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt und weitere Techniken erprobt werden, zum Beispiel solche, die beim Monitoring zum Einsatz kommen sollen.

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Entscheidend für die Akzeptanz, die das Tiefenlager in der Bauphase sowohl in der breiten Bevölkerung als auch in der Standortregion der Entsorgungsanlage findet, sind aus heutiger Sicht vor allem der Verlauf des Standortauswahlverfahrens, bauliche

Arbeiten, die mit möglichst geringen Belastungen für die betroffene Bevölkerung einhergehen, und ein gut funktionierender, konstruktiver Dialog mit der betroffenen Bevölkerung vor und während des Baus. Wenn diese Voraussetzungen nicht gegeben sind, kann die Errichtung des Tiefenlagers zu Widerständen führen, die dann vor allem die Standortregion betreffen dürften. In diesem Fall ist damit zu rechnen, dass es während der Bauphase am Standort des Tiefenlagers und möglicherweise auch an Orten, wo wesentliche Entscheidungen zum Bau des Lagers gefällt werden, zu Personenschäden kommt, also Sicherungsrisiken bestehen und Risiken, die mit negativen psychosozialen Auswirkungen einhergehen.

Die Bedrohung durch Veränderungen der sicherheitspolitischen Lage und der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen auf die Bedrohungslage in der vorliegenden Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht mehr einschätzen.

Die Gefährdungslage aufgrund von Naturgefahren könnte Veränderungen unterliegen, die aus gegenwärtiger Perspektive vor allem auf den Klimawandel zurückgehen dürften. Diesen Veränderungen muss bei der Baugenehmigung und während der Bauphase Rechnung getragen werden.

Tiefenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Finanzierung des Baus eines Tiefenlagers ist mit größeren Ungewissheiten behaftet.

Die Abschätzung der Kosten ist aus heutiger Sicht schwierig, weil international nur wenige Erfahrungen mit dem Bau von Tiefenlagern vorliegen, insbesondere zur Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Ggf. kann in dieser Phase in Deutschland aber nicht mehr nur auf Erfahrungen aus Schweden und Finnland mit der Endlagerung im kristallinen Gestein, sondern auch auf Erfahrungen aus Frankreich, der Schweiz sowie evtl. weiteren europäischen Ländern mit der Tiefenlagerung in Tongestein zurückgegriffen werden.

Vorhersagen der Kostenentwicklung über mehrere Jahrzehnte sind mit größeren Ungewissheiten verbunden (Entsorgungskommission, 2015, S. 15). Ungewissheiten können beispielsweise die Verhältnisse am gewählten

Standort betreffen, insbesondere die genauen geologischen Verhältnisse. Während des Tiefenlagerbaus kann es daher zu Verzögerungen, Kostenüberschreitungen und Finanzierungsproblemen kommen.

Verlaufsvarianten. Neue technische Entwicklungen, zum Beispiel im Bereich der Bauroboter, und der politische Wille, die Entsorgung schnell abzuschließen, könnten dazu führen, dass sich der Bau eines Tiefenlagers beschleunigt.

Anhaltender gesellschaftlicher Widerstand gegen das Tiefenlager, finanzielle Probleme (vgl. „Spezifische Verletzlichkeit“) oder unerwartete technische Herausforderungen können dazu führen, dass sich der Bau des Lagers verzögert oder nicht zu Ende geführt wird.

Sollte sich im Verlauf der untertägigen Arbeiten herausstellen, dass der Standort entgegen den Erwartungen nicht für ein Tiefenlager geeignet ist, muss der Bau abgebrochen werden. Das Standortauswahlverfahren ist wiederaufzunehmen, und es muss auf einen der anderen bereits früher identifizierten Standorte zurückgegriffen werden. Falls bei den untertägigen Arbeiten grundsätzlich neue Erkenntnisse gewonnen worden sind, die etwa die Eignung des Wirtsgesteins betreffen, muss ggf. ein großer Teil des Standortauswahlverfahrens neu aufgerollt werden. Dadurch entstehen größere zeitliche Verzögerungen. Für die dann erforderliche verlängerte Zwischenlagerung müssen Lösungen gesucht werden, die in Bezug auf die Sicherheit befriedigend sind.

Denkbar ist aber auch, dass der Bau eines Tiefenlagers nicht erfolgt oder abgebrochen wird, zum Beispiel, weil neue Erkenntnisse zur Behandlung radioaktiver Abfälle vorliegen, weil sich die Nutzung des tiefen Untergrunds erheblich verändert hat oder weil Betroffene erfolgreich gegen das Projekt vorgehen, beispielsweise mit rechtlichen Klagen.

2.3.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

Planung und Verfahren. Für die Transporte der hoch radioaktiven Abfälle aus den Zwischenlagern in das Oberflächenlager müssen Genehmigungen

beantragt und erteilt werden. Zudem muss spätestens in der vorliegenden Phase entschieden werden, aus welchem Zwischenlager oder welchen Zwischenlagern die Abfälle zuerst in das Oberflächenlager verbracht werden sollen und welches Zwischenlager als letztes geschlossen wird.

Für das Oberflächenlager selbst stehen in dieser Phase wahrscheinlich keine umfassenden Genehmigungen mehr an. Es ist jedoch denkbar, dass für den Bau und Betrieb weiterer Module des Oberflächenlagers jeweils eigene Genehmigungen eingeholt werden müssen. Zudem ist vorstellbar, dass im Verlauf der Phase spezifische Anlagenänderungen geplant und bewilligt werden, die beispielsweise Verbesserungen der betrieblichen Abläufe oder der Sicherheit dienen. Evtl. müssen auch Genehmigungen, die zunächst befristet erteilt wurden, verlängert oder erneuert werden. Die Kommunikation mit der betroffenen Bevölkerung und der interessierten Öffentlichkeit dürfte während des beginnenden Langzeitbetriebs weiterhin eine wesentliche Rolle spielen.

Die Stilllegung und der Rückbau der Zwischenlager erfordern vorbereitende Planung und Genehmigungsverfahren an mehreren Standorten in Deutschland.

Die Ablösung des Oberflächenlagers durch eine neue Entsorgungsanlage oder durch ein neues Verfahren, mit dem die Abfälle unschädlich(er) gemacht werden können, liegt während dieser Phase plangemäß zeitlich noch in weiterer Ferne. Ein verantwortungsvoller Umgang mit der Oberflächenlagerung setzt jedoch voraus, dass der weitere Entsorgungspfad frühzeitig konzipiert wird. Daher wäre es angebracht und ist es möglich, dass in dieser Phase bereits erste Planungsarbeiten im Hinblick auf die Folgelösung initiiert werden.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung werden, wenn auch wahrscheinlich in reduziertem Umfang, weiter betrieben. Die Sicherheit des Lagers muss periodisch überprüft und ggf. neueren Erkenntnissen und Entwicklungen angepasst werden. Gleichzeitig muss die Fachkompetenz erhalten werden, die notwendig ist, um das Lager zu betreiben und

den weiteren Entsorgungspfad zu planen. Die baulichen und technischen Komponenten müssen so bewirtschaftet werden, dass eine periodische Erneuerung gemäß aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik oder mindestens ein langfristiger Rückgriff auf die ursprünglich verwendeten und vorgesehenen Bau- und Ersatzteile möglich ist, ohne dass deren Funktion durch Alterungsprozesse beeinträchtigt ist. Dies gilt explizit auch für die Lagerbehälter.

Wenn bei der Konzeption des neuen Entsorgungspfads nicht vor allem auf Wissen und Erfahrung aus dem Ausland aufgebaut werden soll, ist eine Strategie zu Forschung, zur Entwicklung und zum Kompetenzerhalt im Bereich der nuklearen Entsorgung erforderlich, die wirksam umgesetzt wird.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Zu Beginn dieser Phase werden die Abfälle aus den Zwischenlagern in das Oberflächenlager transportiert. Die Zahl der Transporte hoch radioaktiver Materialien nimmt also vorübergehend stark zu. Wir gehen davon aus, dass die Langzeitlagerung an der Oberfläche in einem einzigen zentralen Oberflächenlager in Deutschland erfolgt. Die Zahl der erforderlichen Transporte und die Transportdistanzen werden dadurch voraussichtlich höher sein als es bei mehreren regionalen Oberflächenlagern der Fall wäre.

Heute kann nicht abschließend geklärt werden, ob die Abfälle für die Langzeitlagerung an der Oberfläche in neue Behälter verpackt werden, die ggf. auch für eine anschließende Endlagerung optimiert sind. Eine solche Umverpackung setzt eine Heiße Zelle im Oberflächenlager voraus. Bei ENTRIA wurde diskutiert, dass die Brennelemente bald nach der Anlieferung im Oberflächenlager gekapselt und in neue Lagerbehälter umgeladen werden könnten. Bei der Kapselung wird jedes Leichtwasserreaktor-Brennelement mit einer Büchse gekapselt, ohne es vorher zu zerlegen. Die Kapsel besteht typischerweise aus einem metallischen Werkstoff, ist mit einem Schutzgas gefüllt und gasdicht verschweißt. Nach ca. 100 Jahren sollen die Abfälle dann wieder in neue Lagerbehälter verbracht werden,

da nicht nur die Abfälle und die Abfallmatrix selbst, sondern auch die Behälter Belastungen durch Neutronen- und Gammastrahlung sowie Wärme ausgesetzt sind und altern. Die neuen Lagerbehälter können dann ggf. bereits für den anschließenden Entsorgungsschritt, zum Beispiel die Endlagerung, optimiert werden.

Während ein immer größerer Anteil der Abfälle in das Oberflächenlager verbracht wird, läuft die Zwischenlagerung aus.

Bauliche Aktivitäten. Die modulare Bauweise des Oberflächenlagers führt voraussichtlich dazu, dass parallel zur Einlagerung in die ersten Module weiterhin Teile des Lagers errichtet werden.

Während dem Betrieb des Oberflächenlagers finden zudem wohl immer wieder bauliche Aktivitäten in begrenztem Umfang statt, zum Beispiel bauliche Instandhaltungsarbeiten.

Während dem Einlagerungs- und Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers werden die zuvor genutzten Zwischenlager gestaffelt rückgebaut.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Bei ENTRIA wird davon ausgegangen, dass die Langzeitlagerung an der Oberfläche als Trockenlagerung konzipiert ist. Die Lagerung erfolgt unseren Annahmen zufolge in einem zentralen Oberflächenlager. Im Vergleich zu vielen dezentralen Lagern ist diese Lösung effizienter. Kompetenz- und Ressourcenerhalt vereinfachen sich (vgl. Chaudry, 2015).

Während des Einlagerungsbetriebs werden die radioaktiven Abfälle in das Oberflächenlager verbracht. Die eingehenden Transport- und Zwischenlagerbehälter müssen kontrolliert, die Abfälle gekapselt und in Langzeitlagerbehälter umgeladen werden.

Der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers umfasst vor allem Aktivitäten zur Sicherung der Abfälle und zur Kernmaterialüberwachung, zur Beobachtung des Verhaltens der Abfälle, der Behälter und der Anlage, zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung der Anlage und zu deren Instandhaltung. Zudem ist zu erwarten, dass von Zeit zu Zeit Nachrüstungen an der

Anlage vorgenommen werden, um sie auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu halten. Der geplante modulare Aufbau des Oberflächenlagers erleichtert umfangreichere Instandsetzungs- und Nachrüstungsarbeiten und kann auch die radiologische Belastung von Personen bei diesen Arbeiten reduzieren, wenn die Abfälle bei Bedarf in ein anderes Modul umgelagert werden können.

Oberflächenlager-spezifische Bedrohungslage. Die sicherheitspolitischen und technologischen Entwicklungen, die die Bedrohungslage in dieser Phase prägen, sind aus heutiger Sicht nicht mehr abschätzbar.

Wenn die Akzeptanz des Oberflächenlagers in der breiten Bevölkerung und am Standort des Lagers gering ist, werden wahrscheinlich vor allem die ersten Einlagerungen auf erheblichen Widerstand treffen. Blockaden sind auch an den Standorten der Zwischenlager und auf den Transportstrecken denkbar. Ein planmäßiger und weitgehend störungsfreier Betrieb des Oberflächenlagers, der von einem konstruktiven Dialog mit der betroffenen Bevölkerung begleitet ist, wird sich dagegen voraussichtlich positiv auf die Akzeptanz auswirken, insbesondere auch in der Standortregion.

Eine gute Akzeptanz geht im Allgemeinen mit geringeren Sicherungsrisiken einher. Wenn die direkt betroffene Bevölkerung mit dem Lager einverstanden ist oder dessen Betrieb sogar unterstützt, sind nach heutiger Erfahrung auch weniger Proteste von indirekt Betroffenen zu erwarten, die mit Schäden an Personen verbunden sein können.

Oberflächenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Finanzierung des Betriebs eines Oberflächenlagers ist aus heutiger Sicht mit weniger Ungewissheiten behaftet als die Finanzierung des Baus eines Tiefenlagers. Die Abschätzung der Kosten ist einfacher als bei Tiefenlagern, weil international bereits viele Erfahrungen mit dem Betrieb von Zwischenlagern vorliegen. Im Fall des niederländischen HABOG sind zudem Erfahrungen mit dem Betrieb eines Oberflächenlagers vorhanden, das speziell für den Langzeit-

betrieb konzipiert wurde – auch wenn sich diese Erfahrungen nicht ohne Weiteres auf ein Oberflächenlager für eine Vielzahl von ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren übertragen lassen.

Verlaufsvarianten. Sollte sich während des Einlagerungsbetriebs zeigen, dass die Abfälle aus Sicherheitsgründen schnell rückgeholt werden müssen, könnten die zu Beginn der vorliegenden Phase noch bestehenden Zwischenlager genutzt werden, um die Abfälle provisorisch unterzubringen, bis eine neue Entsorgungslösung zur Verfügung steht. Wenn sich während des Langzeitbetriebs zeigt, dass eine schnelle Rückholung aus Sicherheitsgründen erforderlich ist, bleibt die Frage offen, wo die Abfälle dann untergebracht werden sollen. Der geplante modulare Aufbau der Anlage würde es immerhin ermöglichen, das Oberflächenlager bei Bedarf abschnittsweise instandzusetzen oder nachzurüsten.

2.4. Weitere Zukunft

ca. Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungslösung

2.4.1. Wichtigste Schritte

- Einlagerung der Abfälle (Tiefenlager)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

2.4.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. Bei ENTRIA wird davon ausgegangen, dass Brennelemente nach dem Entladen aus einem Kernkraftwerk bis zum Beginn der Einlagerung mindestens 40 Jahre zwischengelagert werden müssen (Chaudry, 2015). Aus heutiger Perspektive können daher die Brennelemente, die 2022 nach Beendigung der Kernenergienutzung in Deutschland entladen werden, frühestens 2062 in ein Tiefenlager verbracht werden. Voraussichtlich werden diese Abfälle aber erst ein bis drei Jahrzehnte später in das Tiefenlager eingelagert.

Der Zeitbedarf für die Einlagerung ist bei den Tiefenlagern abhängig vom gewählten Lagerkonzept (BMUB, 2015). In Deutschland wird derzeit verbreitet ein Zeitrahmen von 40 Jahren angenommen. In der Schweiz wird mit einer Einlagerungsdauer von 30 Jahren gerechnet (Nagra, 2014). Allerdings ist das einzulagernde Abfallvolumen in der Schweiz auch deutlich kleiner als in Deutschland. Für den vorliegenden Vergleich der Entsorgungsoptionen gehen wir von einem Zeitrahmen von 35 Jahren für die Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in ein Tiefenlager aus.

Parallel zur Einlagerung wird gegen Ende der Phase beim Endlager die Entscheidung zum Verschluss des Lagers vorbereitet. Für diese (politische) Entscheidung ist aus heutiger Sicht mit einer Vorbereitungsphase von einigen Jahren zu rechnen.

Oberflächenlager. Das Oberflächenlager befindet sich in der laufenden Phase im Langzeitbetrieb. Der Bau des Lagers ist abgeschlossen, und alle Abfälle sind eingelagert. Die erste reguläre Umverpackung in neue Behälter findet erst nach Ablauf der vorliegenden Phase statt.

2.4.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Sowohl die Aktivität als auch die Radiotoxizität und die Wärmeentwicklung der hoch radioaktiven Abfälle sind immer noch sehr ausgeprägt.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase einzuschätzen, ist aus heutiger Perspektive nicht mehr möglich. Gesellschaftliche Stabilität, Prosperität und wissenschaftlich-technischer Fortschritt auf der einen Seite sowie eine tiefgreifende gesellschaftliche Krisensituation auf der anderen Seite stellen wahrscheinlich nach wie vor zwei umhüllende Szenarien der gesellschaftlichen Entwicklung dar.

Biosphäre. In der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage können gegenüber dem heutigen Zustand deutliche Veränderungen eingetreten sein. Diese Veränderungen gehen voraussichtlich vorwiegend direkt und indirekt auf menschliche Aktivitäten zurück. Die Menschheit wird wahrscheinlich weiter Einfluss auf ihre eigene biologische Entwicklung nehmen.

Geologisches Umfeld. An den Standorten für ein Tiefen- oder Oberflächenlager sind in dieser Phase keine wesentlichen Veränderungen des geologischen Umfelds aufgrund natürlicher Einwirkungen zu erwarten. Menschliche Einwirkungen können sich jedoch auf das geologische Umfeld auswirken, sofern keine Veränderungssperre ausgesprochen und wirksam wurde oder andere Schutzmaßnahmen für das geologische Umfeld des Tiefenlagers ergriffen wurden.

2.4.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlager

Planung und Verfahren. Für die Transporte der hoch radioaktiven Abfälle aus den Zwischenlagern in ein Tiefenlager und die Einlagerung der Abfälle in das Tiefenlager müssen Genehmigungen beantragt und erteilt werden. Bei beiden Tiefenlageroptionen, insbesondere aber bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, müssen zudem weitere Entscheidungen zur Durchführung des Monitorings des Lagers getroffen und während des Verlaufs der Phase dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung angepasst werden. Wahrscheinlich setzen die Entscheidungen zum Monitoring entsprechende behördliche Verfahren voraus. Während der gesamten Einlagerung dürfte der Kommunikation mit und unter Stakeholdern große Bedeutung zukommen.

Beim Endlager muss im Verlauf der vorliegenden Phase aus heutiger Sicht die Genehmigung zum Verschluss des Lagers vorbereitet werden. Evtl. ist auch eine politische Entscheidung erforderlich, um den Verschluss des Lagers einzuleiten. Daher ist genau zu klären, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit die Entscheidung getroffen werden kann, das Lager endgültig zu verschließen. Aus heutiger Sicht ist zu erwarten, dass die Entscheidung zum Verschluss des Endlagers noch einmal mit einem erheblichen Bedarf an Informationsaustausch und Diskussionen zwischen allen relevanten Stakeholdern einhergehen wird.

Während der Einlagerung in die Tiefenlager werden die Zwischenlager nach und nach rückgebaut. Auch dafür sind Planung und Verfahren erforderlich.

Forschung und Entwicklung. Falls es keinen aktuellen Anlass gibt, an der Sicherheit des Endlagers zu zweifeln, wird die Entsorgungsforschung im Verlauf dieser Phase voraussichtlich stark reduziert werden. Schwerpunkte liegen wahrscheinlich beim Verschluss des Lagers, dem evtl. nachfolgenden Umweltmonitoring sowie bei Fragen der Langzeitdokumentation und der Longterm Stewardship.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stellt weiterhin höhere Anforderungen an Forschung und Entwicklung als das Endlager. Während des in der anschließenden Phase nachfolgenden Monitoringzeitraums müssen aus heutiger Sicht Erkenntnisse aus dem bereits erfolgten Monitoring, internationale Erfahrungen und Ergebnisse der internationalen Forschung aufgenommen werden. Die Vorkehrungen zum Monitoring sind bereits im Verlauf der vorliegenden Phase neuen Entwicklungen anzupassen, und die mit dem Monitoring gewonnenen Informationen müssen ausgewertet und beurteilt werden. Zudem muss bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit auch dem längerfristigen Kompetenzerhalt höhere Aufmerksamkeit geschenkt werden als bei der Endlagerung, da für Monitoring und Rückholbarkeit noch über Jahrzehnte hinweg ausreichendes Fachwissen und Erfahrung benötigt werden.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Die Abfälle, die in das Tiefenlager eingelagert werden sollen, werden nach und nach von den Zwischenlagern zum Standort des Tiefenlagers transportiert. Die Intensität der Transporte von hoch radioaktiven Abfällen nimmt in dieser Phase also deutlich zu.

Während der Einlagerung in das Tiefenlager werden die Zwischenlager schrittweise rückgebaut. Am Standort der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wird im Rahmen der Oberflächenanlagen ein Zwischenlager konzipiert und errichtet, um die Abfälle bei Bedarf wieder sicher aus dem Tiefenlager auslagern zu können. Die Heiße Zelle, die für die Einlagerung errichtet wurde, wird vermutlich später auch für dieses Zwischenlager genutzt werden.

Bauliche Arbeiten. Parallel zur Einlagerung in das Tiefenlager werden weitere Einlagerungstrecken aufgefahren. Der Bau des Tiefenlagers und der Einlagerungsbetrieb finden über einen längeren Zeitraum nebeneinander statt.

Voraussichtlich werden die meisten Einlagerungsstrecken schon verfüllt, während noch Behälter in weitere Einlagerungsstrecken eingebracht werden. Ist die Einlagerung in eine Strecke abgeschlossen, wird das Verschlussbauwerk für die Einlagerungsstrecke erstellt. Ist die Einlagerung in ein Einlagerungsfeld abgeschlossen, wird der Zugang zum Einlagerungsfeld verschlossen.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bleibt der Zugang zum Einlagerungsfeld nach Beendigung der Einlagerung möglicherweise offen, die Einlagerungsstrecken sind dann jedoch verschlossen. Die Bohrungen für das Monitoring werden erst dann abgeteuft, wenn die entsprechende Einlagerungsstrecke verschlossen wurde.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Im Annahmehbereich des übertägigen Eingangslagers findet eine Eingangskontrolle statt. Noch nicht kontrollierte Behälter werden in einem Eingangslager untergebracht. Bevor die hochradioaktiven Abfälle konditioniert, in Endlagerbehälter eingebracht und diese Behälter im Tiefenlager konditioniert eingelagert werden, werden sie voraussichtlich in einem Pufferlager zwischengelagert. Falls nach der Konditionierung keine sofortige Einlagerung erfolgen kann, müssen die Abfälle zweimal ins Pufferlager verbracht werden: Nach der Eingangskontrolle und nach der Konditionierung.

Die Umverpackung aus den Transport- und Zwischenlagerbehältern in die Endlagerbehälter findet voraussichtlich am Standort des Tiefenlagers in einer Oberflächenanlage statt. Diese kerntechnische Anlage ist für die Umverpackung ausgelegt und verfügt über mindestens eine speziell geschützte Umladezelle sowie evtl. über weitere Heiße Zellen, in denen sich Untersuchungen vornehmen lassen. In der Umladezelle müssen unter anderem die Brennelemente für die Umverpackung zerlegt werden. Da die Endlagerbehälter weniger radioaktive Abfälle aufnehmen können als die Transport- und Zwischenlagerbehälter, werden durch die zentrale Umverpackung am Tiefenlagerstandort Transporte eingespart (Nagra,

2012). Um eine gute Wärmeverteilung in den Endlagerbehältern zu erreichen, müssen voraussichtlich Brennelemente aus verschiedenen Transport- und Endlagerbehältern kombiniert in einen Endlagerbehälter umgeladen werden. Die Oberflächenanlage benötigt daher mehrere Umladestationen (Nagra, 2016) oder neuartige Umladestationen, die für die Öffnung mehrerer Transport- und Lagerbehälter ausgelegt sind (Köhnke, 2017).

Zwischen der Eingangskontrolle und der Einlagerung in die Einlagerungsstrecken werden die Behälter wahrscheinlich mehrfach auf verschiedene Transportsysteme umgeladen werden müssen. Ein wesentlicher Schritt ist dabei die Verbringung nach unter Tage.

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Die sicherheitspolitischen und technologischen Entwicklungen, die die Bedrohungslage in dieser Phase prägen, sind aus heutiger Sicht nicht mehr abschätzbar.

Entscheidend für die Akzeptanz des Tiefenlagers in der Standortregion während der Betriebsphase sind aus heutiger Sicht ein weitgehend störungsfreier Betrieb der Entsorgungsanlage und ein konstruktiver Dialog mit der betroffenen Bevölkerung und weiteren Anspruchsgruppen.

Tiefenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Finanzierung des Betriebs eines Tiefenlagers ist mit größeren Ungewissheiten behaftet. Die Abschätzung der Kosten ist gegenwärtig schwierig, weil international nur wenige Erfahrungen mit dem Betrieb von Tiefenlagern vorliegen und letztlich jede Anlage aufgrund der spezifischen nationalen Anforderungen, der Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins etc. einen Einzelfall darstellt. Die Kostenentwicklung über mehrere Jahrzehnte vorherzusehen, ist anspruchsvoll, und Prognosen sind mit größeren Ungewissheiten behaftet.

Aus heutiger Sicht ist mit Ungewissheiten zu rechnen, die den Ablauf der Betriebsphase betreffen. Störfälle könnten beispielsweise dazu führen, dass an der technischen Ausrüstung des Lagers Nachbesserungen vorgenommen werden müssen, die Einlagerungsprozesse neu überdacht wer-

den und es zu Verzögerungen bei der Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle kommt. Grundsätzlich sind Finanzierungsschwierigkeiten während der Einlagerung möglich, die beispielsweise auf unerwartete neue Erkenntnisse und Verzögerungen bei den geplanten Abläufen zurückgehen. Zudem könnte sich die Rekrutierung der im Einlagerungsbetrieb erforderlichen fachlich kompetenten Personen als problematisch erweisen, da die Nutzung der Kernenergie in Deutschland in der laufenden Phase bereits länger zurückliegt.

Verlaufsvarianten. Die Rückholung der Abfälle ist bereits während des Einlagerungsbetriebs bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit einfacher möglich als beim Endlager. Dies ist darin begründet, dass bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit die Möglichkeit einer Rückholung von Anfang an mitbedacht wurde, die Entsorgungsanlage entsprechend konzipiert worden ist und auch bereits technische Einrichtungen zur Verfügung stehen, die für die Rückholung benötigt werden. Zudem werden die Zugänge zu den Einlagerungstrecken voraussichtlich länger offengehalten als bei einem Endlager.

Sollte sich während des Einlagerungsbetriebs zeigen, dass die Abfälle aus Sicherheitsgründen schnell rückgeholt werden müssen, könnten zu Beginn der vorliegenden Phase die noch bestehenden Zwischenlager genutzt werden, um die Abfälle provisorisch unterzubringen, bis eine neue Entsorgungslösung zur Verfügung steht. Wenn sich später zeigen sollte, dass eine schnelle Rückholung aller Abfälle aus Sicherheitsgründen erforderlich ist, bleibt die Frage offen, wo die Abfälle dann untergebracht werden sollen. Das Zwischenlager am Standort des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sollte grundsätzlich in der Lage sein, das gesamte Inventar aufzunehmen. Da die Rückholung einen längeren Zeitraum beanspruchen wird, reicht jedoch unter Umständen auch eine Lagerkapazität aus, die den beginnenden Rückholungsbetrieb abdeckt. Weitere Lagerkapazität kann dann während dem Prozess der Rück-

holung zugebaut werden. Beim Endlager, wo eine mögliche Rückholung nicht einkalkuliert wird, steht ein solches Zwischenlager nicht zur Verfügung.

Unerwartete Ereignisse und mangelnde Ressourcen (vgl. „Spezifische Verletzlichkeit“) können dazu führen, dass sich die Einlagerung verzögert oder im Extremfall ausgesetzt werden muss.

2.4.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

Planung und Verfahren. Beim Oberflächenlager stehen in dieser Phase keine umfassenden Genehmigungen mehr an. Evtl. werden im Verlauf der Phase Anlagenänderungen geplant und bewilligt, die beispielsweise Verbesserungen der betrieblichen Abläufe oder der Sicherheit dienen. Evtl. müssen auch Genehmigungen, die befristet erteilt wurden, verlängert oder erneuert werden.

Die Kommunikation mit verschiedenen Anspruchsgruppen spielt während des Langzeitbetriebs voraussichtlich weiterhin eine wichtige Rolle.

Die Ablösung des Oberflächenlagers durch eine andere Entsorgungsanlage oder durch ein neues Verfahren, mit dem die Abfälle unschädlich(er) gemacht werden können, rücken während dieser Phase zeitlich näher. Der weitere Entsorgungspfad muss daher vorbedacht und erste Vorkehrungen zu dessen Umsetzung müssen vorbereitet werden. Bis der weitere Entsorgungspfad beschritten werden muss, verbleiben allerdings, wenn das Oberflächenlager wie geplant betrieben werden kann, noch ungefähr 100 Jahre.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung werden fortgesetzt. Die Sicherheit des Lagers muss periodisch überprüft und ggf. neuen Erkenntnissen und Entwicklungen angepasst werden. Gleichzeitig ist es wesentlich, die Fachkompetenz zu erhalten, die notwendig ist, um das Lager zu betreiben und den weiteren Entsorgungspfad zu planen.

Die Konzeption des neuen Entsorgungspfads muss durch eine Entsorgungsstrategie und Maßnahmen zu Forschung, Entwicklung und Kompetenzerhalt begleitet werden.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle ist in dieser Phase beendet.

Bauliche Aktivitäten. Es ist damit zu rechnen, dass während dem Betrieb des Oberflächenlagers immer wieder bauliche Aktivitäten an der Entsorgungsanlage stattfinden, vor allem Instandhaltungsarbeiten und Nachrüstungen.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Der Langzeitbetrieb umfasst Aktivitäten zur Sicherung der Abfälle und zur Kernmaterialüberwachung, zur Beobachtung des Verhaltens der Abfälle, der Behälter und der Anlage, zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung der Anlage und zur Instandhaltung des Lagers sowie der Behälter. Zudem ist zu erwarten, dass von Zeit zu Zeit Anpassungen an der Anlage vorgenommen werden, um sie sicherheitstechnisch auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu halten. Evtl. werden auch Abfälle in neue Behälter umverpackt und Untersuchungen an Abfallbehältern und deren Inhalt vorgenommen.

Oberflächenlager-spezifische Bedrohungslage. Die sicherheitspolitischen und technologischen Entwicklungen, die die Bedrohungslage in dieser Phase prägen, sind aus heutiger Sicht nicht mehr abschätzbar.

Entscheidend für die Akzeptanz des Oberflächenlagers in der Standortregion während der Betriebsphase sind aus heutiger Sicht ein weitgehend störungsfreier Betrieb und ein gut funktionierender, konstruktiver Dialog mit der betroffenen Bevölkerung und weiteren Anspruchsgruppen.

Oberflächenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Finanzierung des Betriebs eines Oberflächenlagers stellt aus heutiger Sicht geringere Anforderungen als die Finanzierung des anspruchsvolleren Betriebs eines Tiefenlagers.

Die Abschätzung der Kosten ist einfacher als bei Tiefenlagern, weil international bereits Erfahrungen mit dem Betrieb von Zwischenlagern sowie im Fall des niederländischen HABOG auch Erfahrungen mit dem Betrieb eines speziellen, auf eine lange Betriebszeit angelegten Oberflächenlagers vorliegen. Die Abschätzung der Kosten und entsprechende frühzeitige Rückstellungen sind allerdings schwierig, da die Kostenentwicklung über längere Zeiträume aufgrund von Ungewissheiten über gesellschaftliche Entwicklungen nicht genau vorhersehbar ist.

Die Rekrutierung der zum Betrieb des Lagers erforderlichen kompetenten Personen kann sich als schwierig erweisen, wenn in der vorangehenden Phase keine ausreichenden Maßnahmen zur Kompetenzerhaltung ergriffen wurden oder das Oberflächenlager nicht als attraktiver Arbeitsplatz wahrgenommen wird.

Verlaufsvarianten. Verschiedene Gründe können dazu führen, dass der Betrieb des Oberflächenlagers früher als geplant beendet wird:

- Das Oberflächenlager wird als nicht ausreichend sicher eingestuft, zum Beispiel im Fall eines Krieges.
- Der Betrieb des Oberflächenlagers hat sich nicht bewährt, was sich etwa an häufigen Betriebsstörungen zeigt oder baulichen Mängeln.
- Die Finanzierung der Oberflächenlagerung kann nicht mehr sichergestellt werden, oder die Gesellschaft ist nicht mehr bereit, längerfristig in den Betrieb eines Oberflächenlagers zu investieren.
- Es finden sich keine kompetenten Fachleute mehr, um das Oberflächenlager zu betreiben und den Betrieb zu beaufsichtigen.
- Für die Abfälle steht ein neuer Entsorgungspfad zur Verfügung, der zügig beschritten werden soll.
- Die Abfälle sollen neu genutzt werden.

Die Rückholung der Abfälle aus einem Oberflächenlager ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich. Im Fall einer Rückholung müssen

aber andere geeignete Entsorgungs- oder Nutzungsmöglichkeiten für die Abfälle zur Verfügung stehen.

2.5. Ferne Zukunft

ca. Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungslösung

2.5.1. Wichtigste Schritte

- Verschluss des Tiefenlagers und Rückbau der Oberflächenanlagen (Endlager)
- Monitoring, Verschluss und Rückbau der Oberflächenanlagen (Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

2.5.2. Dauer der vorliegenden Phase

Endlager. Das Endlager wird zu Beginn dieser Phase verschlossen. Die Entscheidung, das Endlager zu verschließen, wurde bereits am Ende der vorangegangenen Phase vorbereitet und gefällt.

Der vollständige Verschluss der untertägigen Anlage dürfte einige Jahre beanspruchen. Die schweizerische Nagra rechnet mit etwa 5 Jahren für den endgültigen Verschluss (Nagra, 2014).

Parallel zum Verschluss beginnt der Rückbau der obertägigen Anlage. Die Stilllegung der obertägigen Anlage wird aus heutiger Sicht etwa zehn Jahre benötigen. Aufgrund bautechnischer Fortschritte ist aber auch ein kürzerer Zeitraum für die Stilllegung denkbar.

Mit dem Verschluss ist der aktive Betrieb des Endlagers beendet. Die weiteren Aktivitäten zur Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle, die im Endlager aufbewahrt sind, beschränken sich im Wesentlichen auf die Langzeitdokumentation sowie ggf. auf ein Monitoringprogramm, das vor allem aus einem Umweltmonitoring besteht.

Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Künftige Generationen sollen darüber entscheiden, wie lange das Monitoring bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit weitergeführt wird. In der Schweiz ist die Dauer der sogenannten Beobachtungsphase daher offen. Es wird jedoch vielfach aus pragmatischen Gründen damit gerechnet, dass die Beobachtungsphase etwa 50 Jahre beanspruchen wird (Nagra, 2014). Im schweizerischen Stilllegungs- und Entsorgungsfonds werden entsprechend Rücklagen für einen 50 Jahre andauernden Beobachtungszeitraum gebildet. Je nach Wirtsgestein zeigen sich auch Grenzen für die Offenhaltung, die durch das Gestein selbst oder den Ausbau des Lagers bedingt sind.

Während dem Monitoringzeitraum werden die Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit weiter betrieben. An der Erdoberfläche bleibt ein großer Teil der Entsorgungsanlage bestehen und muss betriebsbereit gehalten werden. Dazu gehören insbesondere auch ein Lager, in das Abfallbehälter nach der Rückholung eingebracht werden können, und eine Heiße Zelle, in der sich Abfallbehälter und deren Inhalt untersuchen und umladen lassen (vgl. 2.4.4).

Der Monitoringzeitraum endet mit dem Verschluss des Lagers. Die entsprechende Genehmigung, die aus heutiger Sicht wahrscheinlich eine politische Entscheidung voraussetzt, muss gründlich vorbereitet werden. Der Verschluss selbst erfordert zunächst den Rückbau von Infrastrukturen in der untertägigen Anlage. Anschließend müssen die untertägigen Anlagenteile, die bisher offengehalten wurden, verfüllt und schließlich der Eingang zum Tiefenlager verschlossen werden. Teils während, teils nach dem Verschluss werden die übertägigen Anlagen rückgebaut. Da der Verschluss eines Tiefenlagers, das unter anderem über eine Monitoringsohle verfügt, aufwendiger ist als der Verschluss eines Endlagers, rechnen wir damit, dass zwischen der Entscheidung zum Verschluss und dem endgültigen Verschluss der untertägigen Entsorgungsanlage etwa zehn Jahre vergehen werden. Dabei gehen wir von den heutigen Voraussetzungen

aus. In der fernen Zukunft könnte dieser Schritt auch einen deutlich kürzeren oder längeren Zeitraum beanspruchen.

Gesamthhaft betrachtet ist die Dauer dieser Phase bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sehr unbestimmt.

Oberflächenlager. Das Oberflächenlager ist auf eine Betriebszeit von 150 bis 200 Jahren ausgelegt. Daher befindet es sich in dieser Phase voraussichtlich weiterhin im Langzeitbetrieb, der gegen Ende dieser Phase ausläuft. Nach ca. 100 Jahren Betriebsdauer werden die Abfälle voraussichtlich in neue Lagerbehälter umgeladen, die im günstigen Fall bereits für den weiteren Entsorgungspfad optimiert sind.

2.5.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Sowohl die Aktivität als auch die Radiotoxizität und die Wärmeentwicklung der hoch radioaktiven Abfälle sind noch ausgeprägt.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase heute einzuschätzen, ist nicht möglich.

Biosphäre. In der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage können gegenüber dem heutigen Zustand deutliche Veränderungen eingetreten sein. Die biologische Konstitution von Menschen könnte in verschiedenen Merkmalen von dem heute zu Erwartenden abweichen.

Geologisches Umfeld. An den Standorten für ein Tiefen- oder Oberflächenlager sind keine wesentlichen Veränderungen des geologischen Umfelds aufgrund natürlicher Einwirkungen zu erwarten. Menschliche Einwirkungen können jedoch zu Veränderungen des geologischen Umfelds geführt haben oder führen.

2.5.4. Vorgesehene Entwicklung des Endlagers

Planung und Verfahren. Nach dem Verschluss des Endlagers, der Genehmigung der Stilllegung und der Stilllegung der zugehörigen Oberflächenanlagen wird vermutlich eine politische Entscheidung erforderlich sein, mit der die Entsorgungsanlage aus der aktiven Bewirtschaftung entlassen wird. Gleichzeitig müssen Entscheidungen zum weiteren Vorgehen getroffen werden, zum Beispiel zum noch geforderten Monitoringprogramm oder zur langfristigen Dokumentation.

Diese Entscheidungen können, sofern die Entwicklung des Endlagers zuvor plangemäß verlaufen ist, voraussichtlich ohne erheblichen Zeitdruck und im Dialog mit allen relevanten Stakeholdern gefällt werden.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung zur Endlagerung können in dieser Phase eingestellt werden, sofern sich keine dringenden neuen Fragestellungen ergeben und keine akuten Probleme auftreten. Evtl. finden noch einige Aktivitäten statt, die auf die Longterm Stewardship abzielen. Weitere Forschungsthemen könnten die Markierung des Lagers oder die Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung sein.

Generell sind Forschung und Entwicklung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle weiterhin denkbar. So könnten nach wie vor hoch radioaktive Abfälle anfallen, für die eine künftige Entsorgungsoption gesucht werden soll. Evtl. besteht auch der Wille, die ursprünglich endgelagerten Abfälle künftig doch wieder einer anderen Behandlung bzw. einem anderen Entsorgungspfad zuzuführen.

Bauliche Aktivitäten. Zu Beginn der vorliegenden Phase werden die Infrastruktureinbauten im Endlager – beispielsweise Lüftungs- und Beleuchtungsanlagen, Verkehrswege und Anlagen zur Verkehrssteuerung sowie Vorkehrungen für das Monitoring während dem Einlagerungsbetrieb und den Brandschutz – ganz oder zumindest überwiegend rückgebaut und die Zugangsbauwerke verschlossen. Mit dem Rückbau der Anlagen an der Erdoberfläche wird begonnen.

Wie die Verschlussbauwerke eines Endlagers auszugestalten sind, ist gegenwärtig noch Gegenstand näherer Abklärungen (vgl. zum Beispiel Basler & Hofmann, 2012, S. 14). Bei der Stilllegung der Oberflächenanlagen kann auf internationale Erfahrungen mit dem Rückbau von Oberflächenanlagen anderer Endlager und mit dem Rückbau von Zwischenlagern zurückgegriffen werden. Vorstellbar ist, dass ein Teil der Oberflächenanlagen des Endlagers als Denkmal erhalten bleibt und in einer Einrichtung am Standort des Endlagers weiterhin Informationen über die Anlage erhältlich sind.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Die untertägigen Bereiche des Endlagers sind – mit Ausnahme von etwa fünf Jahren zu Beginn der vorliegenden Phase – bereits vollständig verschlossen. Auch die übertägigen Teile des Lages, vor allem das Eingangslager, werden nach voraussichtlich etwa zehn Jahren vollständig außer Betrieb genommen und rückgebaut worden sein.

Danach finden an der Erdoberfläche wohl noch ein Umweltmonitoring und evtl. ein weitergehendes Messprogramm statt. Die noch verbleibenden Aktivitäten zur Entsorgung konzentrieren sich auf die Langzeitdokumentation zum Endlager sowie ggf. auf weitere Aspekte der Longterm Stewardship.

Endlager-spezifische Bedrohungslage. Die Bedrohung aufgrund der sicherheitspolitischen Lage sowie der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen und von Menschen verursachter Veränderungen der Natur auf die Bedrohungslage in dieser Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht mehr einschätzen.

Die Entscheidung, das Endlager endgültig zu verschließen, könnte noch einmal zu gesellschaftlichen Kontroversen führen. Möglicherweise entwickelt sich der Standort des Endlagers zu einem Ort von symbolischer Bedeutung und wird damit längerfristig immer wieder zum Schauplatz von Auseinandersetzungen. Denkbar ist aber auch, dass die lange zurücklie-

gende Nutzung der Kernenergie kaum noch Aufmerksamkeit findet, wenn das Endlager verschlossen wird.

Endlager-spezifische Verletzlichkeit. Aus heutiger Sicht ist es durchaus möglich, dass die Finanzierung der abschließenden Entsorgungsschritte Verschluss und Stilllegung mit Schwierigkeiten verbunden sein wird. Das Endlager ist so konzipiert, dass es nach dem Verschluss des untertägigen Lagers und dem Rückbau der Oberflächenanlagen keine wesentlichen personellen und materiellen Ressourcen mehr erfordert. Deshalb kann damit gerechnet werden, dass die gesellschaftliche Bereitschaft auch im Fall von Ressourcenproblemen hoch ist, das Endlager zu verschließen, nachdem der viel aufwendigere Bau und Betrieb bereits beendet worden sind.

Sobald das Endlager verschlossen ist, nimmt seine Verletzlichkeit gegenüber Einwirkungen von außen aus heutiger Sicht ganz erheblich ab.

Verlaufsvarianten. Nach dem Verschluss des Endlagers ist eine Bergung der Abfälle nach wie vor möglich. Ursache dafür könnten Sicherheitsmängel beim Endlager sein, die sich erst spät gezeigt haben. Zudem ist es möglich, dass in dieser Phase ein neuer, alternativer Entsorgungspfad beschritten wird. Dies ist vorstellbar, wenn eine Entsorgungsoption zur Verfügung steht, die im Vergleich zur Endlagerung deutliche Vorteile aufweist. Die Abfälle könnten auch aus dem Lager rückgeholt werden, um sie einer anderen Verwendung zuzuführen. Die Bergung ist aus heutiger Sicht allerdings aufwendig und deshalb nur dann zu erwarten, wenn die Gründe, die für eine Bergung sprechen, gewichtig sind und die Abwägung von Chancen und Risiken deutlich zugunsten der Chancen ausfällt.

2.5.5. Vorgesehene Entwicklung des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit

Planung und Verfahren. Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wird das Monitoring während des Monitoringzeitraums voraussichtlich periodisch dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung angepasst werden. Entscheidungen zur Anpassung des Monitorings setzen aus gegenwärtiger Perspektive entsprechende behördliche Verfahren voraus. Möglicherweise werden auch Anpassungen vorgenommen, die die Rückholung betreffen. Schließlich muss entschieden werden, den Monitoringzeitraum zu beenden. Angesichts der Tragweite dieser Entscheidung ist dazu voraussichtlich ein politischer Beschluss erforderlich. Die genauen Anforderungen an den Verschluss und die Stilllegung der Oberflächenanlagen werden aus heutiger Sicht in einer oder mehreren Genehmigungen festgehalten. Darin ist beispielsweise auch dargelegt, inwieweit die technischen Installationen für Monitoring und Rückholbarkeit vor dem Verschluss der untertägigen Anlagenteile rückgebaut werden oder wann und wie die Bohrungen, die aus der Monitoringsohle abgeteuft wurden, verfüllt sollen. Schließlich muss das Tiefenlager aus der aktiven Bewirtschaftung entlassen werden, und es sind Entscheidungen zum weiteren Vorgehen zu treffen, insbesondere zur Longterm Stewardship.

Aus heutiger Sicht scheint es plausibel, dass diese Entscheidungen noch einmal zu einem hohen Bedarf an Kommunikation zwischen Stakeholdern führen.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung sind während des Monitoringzeitraums weiterhin erforderlich, um das Monitoring sowie ggf. die zur Rückholung vorgesehenen Techniken auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu halten oder technisch weiter zu entwickeln. Es müssen zudem dauernde Anstrengungen unternommen werden, um den für Monitoring und Rückholbarkeit erforderlichen Kompetenzerhalt

zu gewährleisten und sicher zu stellen, dass die erforderlichen Techniken, Instrumente und andere Ressourcen weiter verfügbar sind.

Als Teil der Monitoringaktivitäten könnte vorgesehen werden, auch außerhalb des Tiefenlagers nach wie vor an Fragen der Entsorgung zu forschen und aktiv zu arbeiten, beispielsweise an Hochschulinstituten und in Felslabors, und den internationalen Austausch in der Entsorgungsforschung zu fördern.

Bauliche Aktivitäten. Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind bauliche Instandhaltungsarbeiten während des Monitoringzeitraums erforderlich. Untertägige Anlagenteile müssen stabilisiert und funktionstüchtig erhalten, Einbauten erneuert werden etc. Wie der Verschluss des Tiefenlagers genau erfolgt und wie die Verschlussbauwerke auszugestaltet sind, muss noch geklärt werden. Bei der Stilllegung der übertägigen Anlage kann auf internationale Erfahrungen mit dem Rückbau von Oberflächenanlagen anderer Tiefenlager und mit dem Rückbau von Zwischenlagern zurückgegriffen werden. Denkbar ist, dass ein Teil der Oberflächenanlagen über den Verschluss hinaus erhalten bleibt, zum Beispiel als Informationszentrum.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Während der vorliegenden Phase finden Messungen und Beobachtungen statt, die dem Monitoring des Lagers dienen. Aus heutiger Sicht muss dieses Monitoring wesentlich unter Tage von der Monitoringsohle aus erfolgen. Dazu werden die Zugangsbauwerke und die Monitoringstrecken offengehalten. Zudem werden auch die Infrastrukturräume der Einlagerungssohle offen und in Betrieb gehalten, unter anderem, um die Bereitschaft zur Rückholung zu wahren.

Nach dem endgültigen Verschluss beschränken sich die weiteren Aktivitäten auf ein mögliches Monitoring von der Erdoberfläche aus (Umweltmonitoring, evtl. Messprogramm) und die Longterm Stewardship, insbesondere die Langzeitdokumentation zum Tiefenlager.

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Die Bedrohung aufgrund der sicherheitspolitischen Lage sowie der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen und von Menschen verursachter Veränderungen der Natur auf die Bedrohungslage in dieser Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht mehr einschätzen.

Die Entscheidung, den Monitoringzeitraum zu beenden, die untertägigen Anlagenteile zu verschließen und die übertägigen Anlagenteile, vor allem das Eingangslager, stillzulegen, könnte noch einmal zu gesellschaftlichen Kontroversen führen. Denkbar ist aber auch, dass die gesellschaftliche Aufmerksamkeit für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle lange nach Beendigung der Kernenergienutzung stark nachgelassen hat.

Tiefenlager-spezifische Verletzlichkeit. Im Vergleich zum Endlager bleibt das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit länger zugänglich. Dies gilt sowohl für die Monitoringsohle als auch für die Infrastrukturräume in der Einlagerungssohle. Die Verletzlichkeit dieser Option gegenüber Einwirkungen Dritter, Naturereignissen etc. ist daher in der vorliegenden Phase deutlich größer als beim Endlager. Falls es zu einer generell intensiven Nutzung des tiefen Untergrunds kommen sollte, wäre allerdings auch das Endlager stärker als heute vorgesehen exponiert. Die Finanzierung des Monitoringzeitraums und der Außerbetriebnahme der Entsorgungsanlage könnten sich – etliche Jahrzehnte nach Beendigung der Kernenergienutzung in Deutschland – als ausgesprochen schwierig erweisen. Fraglich ist, ob zu dieser Zeit immer noch Mittel aus den ursprünglichen Rückstellungen verfügbar sind. Fraglich ist auch, ob ausreichende personelle Ressourcen mobilisiert werden können – aus Deutschland oder aus anderen Ländern, die die Kernenergie nach wie vor nutzen bzw. über Erfahrungen mit der Tiefenlagerung verfügen. Die Abschätzung der Kosten für den Monitoringzeitraum bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist anspruchsvoll, weil international bisher keine entsprechenden Erfahrungen vorliegen.

Verlaufsvarianten. Generell ist es möglich, dass in dieser Phase ein neuer, alternativer Entsorgungspfad beschritten wird. Dies ist denkbar, wenn eine Entsorgungsoption zur Verfügung steht, die im Vergleich zur Tiefenlagerung derart deutliche Vorteile aufweist, dass diese Vorteile die Belastungen durch die Rückholung aufwiegen. Es ist aber auch denkbar, wenn sich bei der Tiefenlagerung klare Sicherheitsmängel zeigen. Zudem wäre es möglich, dass die Abfälle aus dem Lager rückgeholt werden, um sie einer anderen Verwendung zuzuführen. Dieser Pfad wird voraussichtlich bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit eher beschritten als beim Endlager, weil die Rückholbarkeit dort von vornherein mit eingeplant war und daher einfacher zu realisieren ist. Generell ist damit zu rechnen, dass im Fall einer Rückholung oder Bergung die zu erzielenden Vorteile gegenüber den Belastungen abgewogen werden. Wenn die Finanzierung des Monitoringzeitraums nicht gesichert ist oder es an personellen Ressourcen fehlt, um das Monitoring kompetent durchzuführen, ist es vorstellbar, dass das Monitoring vorzeitig abgebrochen und die untertägige Anlage verschlossen wird. Denkbar ist jedoch auch, dass das Monitoring verlängert wird, beispielsweise um zusätzliche Abklärungen durchzuführen oder weil sich gezeigt hat, dass das Monitoring wesentlich ist, um das Vertrauen in die Sicherheit der Anlage langfristig zu erhalten.

2.5.6. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

Planung und Verfahren. Beim Oberflächenlager sind im Verlauf dieser Phase wahrscheinlich Genehmigungen erforderlich, um Änderungen an der Anlage vorzunehmen und die Abfälle nach ca. 100 Betriebsjahren in neue Behälter umzuverpacken. Evtl. muss die Betriebsgenehmigung des Lagers verlängert werden, wenn diese ursprünglich nur befristet erteilt worden ist.

Für die Zeit nach Ablauf der Betriebsdauer des Oberflächenlagers werden die Außerbetriebnahme und der Rückbau dieser Anlage vorbereitet.

Die Einleitung des dann nachfolgenden Entsorgungspfads wird voraussichtlich mit einem hohen Aufwand für Planung, Regulierung und Genehmigungsverfahren verbunden sein.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle werden fortgeführt. Die Sicherheit des Lagers muss periodisch überprüft und ggf. neueren Erkenntnissen und Entwicklungen angepasst werden. Gleichzeitig muss die Fachkompetenz erhalten werden, die notwendig ist, um das Lager zu betreiben und den weiteren Entsorgungspfad zu planen, und es muss gewährleistet sein, dass die erforderlichen Ersatzteile und weitere Ressourcen, die beim Langzeitbetrieb benötigt werden, nach wie vor zur Verfügung stehen.

Gegen Ende der vorliegenden Phase soll ein neuer Entsorgungspfad beschritten werden. Forschung und Entwicklung müssen daher rechtzeitig im Verlauf dieser Phase intensiviert werden. Für den weiteren Entsorgungspfad müssen verlässliche und aussagekräftige Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung stehen, und die gewählte Lösung muss bis zur Genehmigungsreife entwickelt werden.

Bauliche Aktivitäten. Es ist damit zu rechnen, dass während dem Betrieb des Oberflächenlagers immer wieder bauliche Aktivitäten stattfinden, zum Beispiel Instandhaltungsarbeiten. Zudem können in dieser Phase bereits bauliche Aktivitäten einsetzen, die mit dem weiteren Entsorgungspfad im Zusammenhang stehen.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Der Langzeitbetrieb umfasst vor allem Aktivitäten zur Sicherung der Abfälle und zur Kernmaterialüberwachung, zur Beobachtung des Verhaltens der Abfälle, der Behälter und der Anlage, zur systematischen Sicherheitsüberprüfung und zur Instandhaltung des Lagers sowie der Behälter. Zudem ist zu erwarten, dass von Zeit zu Zeit Nachrüstungen an der Anlage vorgenommen werden, um sie sicherheitstechnisch auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu hal-

ten. Nach Ablauf von etwa 100 Jahren Betriebsdauer werden die Abfälle genauer inspiziert und bei Bedarf in neue oder instandgesetzte Behälter umverpackt.

Oberflächenlager-spezifische Bedrohungslage. Die Bedrohung aufgrund der sicherheitspolitischen Lage sowie der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen und von Menschen verursachter Veränderungen der Natur auf die Bedrohungslage in dieser Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht mehr einschätzen.

Entscheidend für die Akzeptanz des Oberflächenlagers in der Standortregion während der Betriebsphase sind aus heutiger Sicht ein weitgehend störungsfreier Betrieb und ein funktionierender, konstruktiver Dialog mit der betroffenen Bevölkerung und weiteren Anspruchsgruppen. Die Entscheidung für einen neuen Entsorgungspfad könnte zu gesellschaftlichen Kontroversen und daraus resultierenden Sicherungsrisiken sowie Risiken, die mit psychosozialen Auswirkungen verbunden sind, führen.

Oberflächenlager-spezifische Verletzlichkeit. Die Finanzierbarkeit des Betriebs eines Oberflächenlagers aus Rückstellungen ist schwer einschätzbar, weil die Kostenentwicklung über einen Zeitraum von bis zu 200 Jahren nicht vorhersehbar ist. Zudem müssen in dieser Phase voraussichtlich erhebliche Ressourcen für die Entwicklung und beginnende Umsetzung des weiteren Entsorgungspfads aufgebracht werden. Ob die Gesellschaft in 200 Jahren gewillt ist, diese Ressourcen aufzubringen, und über die entsprechenden Möglichkeiten verfügt, ist aus heutiger Sicht vollkommen offen.

Verlaufsvarianten. Nach wie vor können verschiedene Gründe dazu führen, dass der Betrieb des Oberflächenlagers früher als geplant beendet wird:

- Das Oberflächenlager wird als nicht ausreichend sicher eingestuft, zum Beispiel im Fall eines Kriegs.

- Der Betrieb des Oberflächenlagers hat sich nicht bewährt, was sich etwa an häufigen Betriebsstörungen zeigt oder baulichen Mängeln.
- Die Finanzierung der Oberflächenlagerung kann nicht mehr sichergestellt werden, oder die Gesellschaft ist nicht mehr bereit, längerfristig in den Betrieb eines Oberflächenlagers zu investieren.
- Es finden sich keine kompetenten Fachleute mehr, um das Oberflächenlager zu betreiben und den Betrieb zu beaufsichtigen.
- Für die Abfälle steht ein neuer Entsorgungspfad zur Verfügung, der zügig beschritten werden soll.
- Die Abfälle sollen neu genutzt werden.

Falls die Gesellschaft neue, sicherere Wege der Abfallentsorgung beschreiten kann und will, dürfte sich die Oberflächenlagerung im Nachhinein als besonders geeignete Option erweisen, da sich die Abfälle leicht überwachen und rückholen lassen. Falls Ressourcen fehlen, um das Oberflächenlager dauerhaft sicher zu betreiben, könnte diese Entsorgungsoption in der vorliegenden Phase mit großen Risiken für Menschen und Umwelt einhergehen, weil die Sicherheit des Lagers wesentlich stärker als bei den Tiefenlagern auf funktionierenden aktiven Maßnahmen beruht und seine Robustheit gegenüber äußeren Einwirkungen geringer ist als bei den Tiefenlagern.

2.6. Fernere Zukunft

ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungslösung

2.6.1. Wichtigste Schritte

- Longterm Stewardship (Tiefenlager)
- Rückbau und neuer Entsorgungspfad (Oberflächenlager)

2.6.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. Die Dauer dieser Phase wird vor allem durch die erwarteten Entwicklungen der technischen Barrieren bestimmt. Die aktuellen Sicherheitsanforderungen in Deutschland fordern, dass die Abfallbehälter bis zu 500 Jahre nach dem Verschluss eines Endlagers handhabbar sein sollen, um eine Bergung zu erlauben (BMU 2010, S. 18). Die tatsächliche Entwicklung der Lagerbehälter ist sowohl von der Art der Behälter als auch vom Endlagerkonzept und vom Wirtsgestein abhängig. Oftmals wird davon ausgegangen, dass die Behälter bis zu einem Zeitraum von ca. 1'000 Jahren intakt sind und daher in dieser Phase noch keine Radionuklide in das Wirtsgestein vordringen. Falls dennoch Radionuklide aus den Behältern austreten, soll der Versatz das Eindringen der Nuklide ins Wirtsgestein verhindern. Die Wärmeleistung der Abfälle nimmt im Zeitraum bis 1'000 Jahre nach Start der Entsorgungslösung stark ab.

Oberflächenlager. Zu Beginn der laufenden Phase steht das Oberflächenlager eventuell noch für einige Jahre in Betrieb. Zum weiteren Verlauf der Entsorgung, nachdem das Oberflächenlager außer Betrieb genommen wurde, sind keine Aussagen möglich.

2.6.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die Strahlung der Radionuklide mit einer Halbwertszeit von einigen Jahrzehnten klingt merklich ab. Die Aktivität, d.h. die mittlere Anzahl der Atomkerne, die pro Sekunde radioaktiv zerfallen, beträgt am Ende dieser Phase etwa 1% der Aktivität bei Einlagerungsende und 1/100'000 der Aktivität, die ein Brennelement kurz nach seiner Entladung aus dem Reaktor aufweist. Radionuklide mit langer Halbwertszeit beginnen, die Aktivität zu dominieren (Nagra, 2015a, S. 13; Müller-Lyda & Rübel, 2008, S. 14f.). Die Radiotoxizität, die die biologische Wirkung der Strahlung beschreibt, nimmt jedoch deutlich langsamer ab als die Aktivität und ist weiterhin hoch. Angaben zur Abfallmatrix und den Behältern finden sich weiter unten im Abschnitt „Technische Barrieren“.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase einzuschätzen, ist nicht möglich.

Biosphäre. In der Biosphäre und bei der biologischen Konstitution von Menschen können gegenüber dem heutigen Zustand wesentliche Veränderungen eingetreten sein.

Geologisches Umfeld. An den Standorten für ein Tiefen- oder Oberflächenlager sind keine erheblichen Veränderungen des tieferen geologischen Untergrunds aufgrund natürlicher Einwirkungen zu erwarten. Veränderungen könnten jedoch durch menschliche Einwirkungen verursacht werden.

2.6.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlager

Planung und Verfahren. Aus heutiger Sicht sind in diesem Bereich keine wesentlichen Vorgänge mehr zu erwarten. Evtl. wird vereinzelt noch die

Longterm Stewardship thematisiert, zum Beispiel, wenn sich Veränderungen bei den zuständigen Institutionen ergeben.

Forschung und Entwicklung. Die Tiefenlager sind verschlossen. Forschung und Entwicklung zu den beiden bei ENTRIA behandelten Tiefenlageroptionen sind daher nicht mehr erforderlich. Evtl. wird die Longterm Stewardship von Tiefenlagern noch gelegentlich in Forschungsprojekte einbezogen.

Bauliche Aktivitäten. In den Tiefenlagern finden keine baulichen Aktivitäten mehr statt. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Sicherheit der Tiefenlager nicht durch bauliche Aktivitäten im tiefen Untergrund beeinträchtigt wird.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Sowohl beim Endlager als auch bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit finden keine betrieblichen Aktivitäten mehr statt.

Technische Barrieren. Nach heutiger Einschätzung werden die Radionuklide zumindest in großen Teilen dieser Phase durch Abfallmatrix und Behälter eingeschlossen (Müller-Lyda & Rübel, 2008, S. 3f.). Die in den Sicherheitsanforderungen festgelegte Bergbarkeit über 500 Jahre bedingt, dass die Behälter über diesen Zeitraum weitgehend intakt bleiben.

Die Ausbreitung von Radionukliden, die ggf. aus den Lagerbehältern austreten, wird durch den Versatz verlangsamt. Im Tonstein gilt dies vor allem aufgrund der Sorption von Radionukliden im Versatzmaterial Bentonit. Daneben ist die Begrenzung von Lösungsbewegungen im Versatzmaterial wichtig. In Salz kann das Versatzmaterial Salzgrus Radionuklide dagegen kaum binden. Die Bedeutung des Versatzes konzentriert sich auf die Begrenzung von Lösungsbewegungen. Salzgrus hat seine einschlusswirksamen Eigenschaften gegen Ende der vorliegenden Phase ganz entwickelt. Bentonit benötigt bis zu einigen Tausend Jahren, um voll einschlusswirksam zu sein.

Auch die Abdichtung der Einlagerungsstrecke spielt eine wichtige Rolle für die Rückhaltung der Radionuklide in einem Tiefenlager. Bentonit, der in Tonstein zur Abdichtung verwendet wird, sorbiert Radionuklide und begrenzt Lösungsbewegungen. Salzgrus, aus dem die Abdichtung in Salzvorkommen besteht, wirkt dagegen kaum sorbierend für Radionuklide. Ähnliches gilt für die Schachtverschlüsse in beiden Wirtsgesteinsarten.

Bei der Korrosion von Lagerbehältern aus Stahl bilden sich Gase. Gasproduktion kann in Tiefenlagern zu Überdrücken führen, wenn die Gastransportkapazität der technischen und natürlichen Barrieren im Vergleich zur Gasbildungsrate nicht ausreicht. Ungünstig auf die Sicherheit eines Tiefenlagers würde sich vor allem die Bildung von Makrorissen im Wirtsgestein auswirken. Sie muss daher in den Sicherheitsanalysen ausgeschlossen werden können (ENSI / AGNEB, 2015, S. 37f).

Allerdings beeinflussen Gase, die bei der Korrosion der Lagerbehälter freigesetzt werden, die Radionuklidrückhaltung auch positiv. Die deutsche Reaktor-Sicherheitskommission befasste sich eingehender mit der Gasbildung in einem Endlager. Sie hielt fest, dass vor allem die Bildung von Wasserstoff und Kohlendioxid zu erwarten ist. Zusätzlich können Kohlenwasserstoffe wie Methan, Schwefelwasserstoff und Spaltgase auftreten, und im Endlager befinden sich Luft sowie ggf. auch gasförmiges Wasser. Günstig auf die Radionuklidrückhaltung wirkt sich vor allem der entstehende Wasserstoff aus (RSK, 2005). Die Korrosionsprodukte von Tiefenlagerbehältern halten zudem potentiell verschiedene langlebige Radionuklide zurück (Metz et al., 2012).

Falls es nicht nur zu unwahrscheinlichen, sondern zu zuvor gänzlich unerwarteten Entwicklungen der technischen Barrieren kommen sollte, bietet die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Rückholbarkeit nach wie vor bessere Möglichkeiten als die Endlagerung, um auf diese Entwicklungen zu reagieren, zum Beispiel durch Rückholung und Reparatur von Behältern. Zwar ist das Monitoring im Tiefenlager auch bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit in dieser Phase abgeschlossen. Sowohl beim Endlager als bei der Tiefenlagerung mit Vor-

kehrungen für Rückholbarkeit und Monitoring könnten Erfahrungen mit Tiefenlagern im Ausland oder neue Forschungsergebnisse jedoch Hinweise darauf geben, dass unerwartete Entwicklungen möglich sind. Wenn entsprechende Hinweise auftreten, muss über das weitere Vorgehen entschieden werden. Diese Entscheidung dürfte vor dem Hintergrund unvollständigen Wissens und der erheblichen Kostenfolgen, die eine Untersuchung sowie eventuelle Sanierung des Lagers nach sich zieht, sehr anspruchsvoll sein.

Geologische Barrieren. Falls keine unerwarteten gesellschaftlichen Veränderungen eintreten, die den tiefen Untergrund betreffen, werden die Abfälle in dieser Phase vor allem durch schnell wirkende technische Barrieren und die geologischen Barrieren gesichert.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (vgl. Glossar) soll die Verbreitung von Radionukliden im Salz für den Zeitraum bis 1 Million Jahre vollständig verhindern („vollständiger Einschluss“) bzw. im Tonstein dafür sorgen, dass nur sehr geringe Mengen an Radionukliden den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen („sicherer Einschluss“).

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Zur Bedrohungslage sind aus heutiger Sicht keine Aussagen mehr möglich.

Verlaufsvarianten. Zu Verlaufsvarianten sind aus heutiger Sicht keine Aussagen mehr möglich. Eine mögliche Bergung wird sich bei der Endlagerung voraussichtlich zumindest zum Beginn der Phase immer noch schwieriger gestalten als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, da letztere für eine Rückholung konzipiert wurde.

2.6.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

Wenn Oberflächenlager und Behälter bis zum Beginn dieser Phase gut unterhalten wurden und keine tiefgreifenden Veränderungen bei den externen Bedrohungen für das Lager aufgetreten sind, kann angenommen werden, dass die Sicherheitsbarrieren bis zum Betriebsende intakt bleiben und die Abfälle so aufbewahrt werden, dass eine ausreichende, im günstigen Fall zunehmende Sicherheit von Menschen und Umwelt gewährleistet ist. Eine robuste Gestaltung des Oberflächenlagers bietet einen gewissen Schutz gegen Entwicklungen, die aus heutiger Sicht ungewiss sind. Diese Gestaltung wird jedoch höchstens noch zu Beginn der fernerer Zukunft wirksam, denn für die Abfälle, die sich im Oberflächenlager befinden, muss spätestens nach ca. 200 Jahren ein neuer Entsorgungspfad gefunden und beschritten werden. Wie dieser Entsorgungspfad aussieht, ist aus heutiger Sicht vollkommen offen. Über den weiteren Entsorgungspfad bei der Option Oberflächenlager lässt sich daher nach Ablauf der vorgesehenen Betriebsdauer keine Aussage mehr machen. Verhältnismäßig sicher erscheint lediglich, dass das Oberflächenlager in dieser Phase rückgebaut werden muss. Bei der Suche nach einer weiterführenden Entsorgungslösung kann berücksichtigt werden, dass Aktivität und Wärmeentwicklung der Abfälle bereits zum Teil abgeklungen sind.

Aussagen über Planung und Verfahren, Forschung und Entwicklung, bauliche und betriebliche Aktivitäten und die Bedrohungslage sind nicht möglich, da sich die gesellschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen bis zum Beginn dieser Phase und im Verlauf der Phase grundlegend verändert haben können. Welche Ressourcen für die Umsetzung des weiteren Entsorgungspfads aufgebracht werden müssen und wie der weitere Entsorgungspfad umgesetzt wird, ist aus heutiger Sicht nicht vorhersehbar. Über die weitere Finanzierung der Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle ist gegenwärtig nichts bekannt.

2.7. Sehr ferne Zukunft

ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungslösung

2.7.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

2.7.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. In dieser Phase verlagert sich die Rückhaltung der Radionuklide von den technischen Barrieren in Richtung der natürlichen Barrieren. Je nach Ausgestaltung der Entsorgungsoption gehen Radionuklide bereits in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich über. Von besonderer Relevanz für die Sicherheit der Entsorgung sind dabei die langlebigen und mobilen Radionuklide. Es ist damit zu rechnen, dass beim Wirtsgestein Salz im Zeitraum bis eine Million Jahre alle Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich verbleiben. Bei Tonstein verlassen nur geringe Mengen an Radionukliden den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Oberflächenlager. Zum weiteren Verlauf der Entsorgung nach der Außerbetriebnahme und Stilllegung des Oberflächenlagers sind keine Aussagen möglich.

2.7.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die Radiotoxizität der Abfälle klingt weiter ab. Sie wird jetzt von Radionukliden mit langer Halbwertszeit dominiert. Angaben zur Abfallmatrix und den Behältern finden sich weiter unten im Abschnitt „Technische Barrieren“.

Die hoch radioaktiven Abfälle geben immer weniger Wärme an ihre Umgebung ab. Nach etwa 10'000 Jahren haben sie die natürliche Temperatur des Gesteins erreicht, das sie im Tiefenlager umgibt.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase sind nicht vorhersehbar.

Biosphäre. Der Zustand der Biosphäre und die biologische Konstitution der Menschheit in der vorliegenden Phase sind heute unbekannt.

Geologisches Umfeld. Ein Standort für ein Tiefenlager kann gegenwärtig nur dann bewilligt werden, wenn für die vorliegende Phase keine tiefgreifenden Veränderungen des geologischen Umfelds aufgrund natürlicher Einwirkungen plausibel sind. Menschliche Einwirkungen oder Einwirkungen nachmenschlicher Lebensformen auf das Lager lassen sich nicht ausschließen. Mit welchen Einwirkungen in dieser Phase zu rechnen ist, kann gegenwärtig nicht vorhergesehen werden.

2.7.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlager

Planung und Verfahren. Aus heutiger Sicht sind für diese Phase keine Vorgänge vorgesehen.

Forschung und Entwicklung. Die Tiefenlager machen, wenn ihre Entwicklung wie gegenwärtig geplant erfolgt, keine Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung erforderlich. Wenn Menschen oder nachmenschliche Personen dort leben, wo einst die Tiefenlager errichtet wurden, sollte jedoch sichergestellt sein, dass diese Personen weiterhin über Informationen und Wissen zu der entsprechenden Anlage verfügen.

Bauliche Aktivitäten. Für diese Phase sind aus heutiger Perspektive keine baulichen Aktivitäten vorgesehen. Es ist jedoch weiterhin sicherzustellen,

dass die Sicherheit der Tiefenlager nicht durch andere bauliche Aktivitäten im tiefen Untergrund beeinträchtigt wird.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Betriebliche Aktivitäten in den Tiefenlagern sind für diese Phase nicht geplant.

Technische Barrieren. Für den Einschluss der Radionuklide spielen die Lagerbehälter nach wie vor eine Rolle.

Im Verlauf der vorliegenden Phase ist jedoch damit zu rechnen, dass die Lagerbehälter durch Korrosion in Gegenwart von Wasser oder Salzlösungen und den Gebirgsdruck bzw. bei korrosiv schon stark vorgeschädigten Behältern den Quelldruck des Verfüllmaterials Bentonit Schäden erleiden. Beschädigungen am Behälter führen dazu, dass Wasser zur Abfallmatrix zutreten kann. Aus der Abfallmatrix und aus den Behältern werden Radionuklide freigesetzt (Müller-Lyda & Rübél, 2008, S. 4f.).

Der Versatz, die Abdichtung der Einlagerungsstrecken, der Schachtverschluss und der einschlusswirksame Gebirgsbereich begrenzen den Radionuklidtransport durch Lösungsbewegungen. Bei einem Tiefenlager in Tongestein wirken sowohl die technischen Barrieren aus Bentonit als auch das Wirtsgestein selbst zusätzlich sorbierend auf Radionuklide. Allerdings entfaltet der Bentonitversatz erst im Verlauf der vorliegenden Phase seine volle Einschlusswirksamkeit, während dies bei Salzgrus bereits am Anfang der vorliegenden Phase der Fall sein soll.

Bei manchen Typen von Lagerbehältern ist mit Gasentwicklung aufgrund von Korrosion zu rechnen.

Geologische Barrieren. Falls das geologische Umfeld vom Menschen weitgehend ungestört bleibt, lassen sich seine Entwicklungen über 10'000 Jahre mit einer gewissen Verlässlichkeit voraussagen. Menschliche Eingriffe in den tiefen Untergrund sind für diese Phase nicht einschätzbar.

Tiefenlager-spezifische Bedrohungslage. Zur Bedrohungslage sind heute keine Aussagen möglich.

Verlaufsvarianten. Zu Verlaufsvarianten sind heute keine Aussagen möglich.

2.7.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

In der Nachfolge des Oberflächenlagers wurde aus heutiger Sicht in dieser Phase ein neuer Entsorgungspfad beschritten. Wie dieser Entsorgungspfad aussieht, ist unbekannt.

2.8. Sehr weit entfernte Zukunft

ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungslösung

2.8.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

2.8.2. Dauer der vorliegenden Phase

Tiefenlager. In der vorliegenden Phase verlieren die Behälter ihre Relevanz für die Sicherheit des Lagers. Radionuklide aus Abfällen, die in geologischen Tiefenlagern eingeschlossen waren, verteilen sich im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Damit werden die heute geltenden Sicherheitsanforderungen (BMUB, 2010) für den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre erfüllt. Im Wirtsgestein Salz ist zu erwarten, dass ein vollständiger Einschluss erreicht wird, bei dem alle Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich verbleiben. Im Wirtsgestein Tonstein wird mit einem sicheren Einschluss gerechnet, bei dem nur sehr geringe Mengen an Radionukliden den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen.

Oberflächenlager. Zum weiteren Verlauf der Entsorgung nach Beendigung der Oberflächenlagerung sind keine Aussagen möglich.

2.8.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die Radiotoxizität der Abfälle ist stark abgeklungen und geht langsam weiter zurück. Sie wird von Radionukliden mit langer Halbwertszeit dominiert. Angaben zur Abfallmatrix und den Behältern finden sich im Abschnitt „Technische Barrieren“.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase sind nicht vorhersehbar.

Biosphäre. Der Zustand der Biosphäre und die biologische Konstitution der Menschheit in der vorliegenden Phase sind heute unbekannt.

Die dauerhafte Trennung zwischen den Vorfahren von Menschen und Schimpansen liegt etwa 5 Mio. Jahre zurück, die Gattung Homo ist 2 bis 3 Mio. Jahre alt, der moderne Mensch bildete sich vor etwa 200'000 Jahren heraus. Die menschliche Evolution setzt sich in die Zukunft hinein fort, so dass in den kommenden Jahrzehntausenden und Jahrhunderttausenden mit Veränderungen in der biologischen Konstitution des Menschen zu rechnen wäre – auch wenn die Menschheit selbst keinen Einfluss auf ihre Konstitution nähme. Aus heutiger Sicht ist es jedoch wahrscheinlich, dass sich die Biologie des Menschen am stärksten durch Eingriffe verändert, die Menschen selbst an ihrer biologischen Beschaffenheit vornehmen. Zur Frage, ob in der vorliegenden Phase weiterhin Menschen existieren oder nachmenschlichen Lebensformen, die sich wesentlich von ihren Vorfahren, den Menschen unterscheiden, können heute keine Angaben gemacht werden.

Geologisches Umfeld. Ein Standort für ein Tiefenlager kann gegenwärtig nur dann bewilligt werden, wenn in dieser Phase keine tiefgreifenden Veränderungen des geologischen Umfelds aufgrund natürlicher Einwirkungen plausibel sind. Um dies nachzuweisen wird vor allem von Erkenntnissen zu vergangenen Entwicklungen auf künftige Verläufe geschlossen. Einwirkungen von Menschen oder nachmenschlichen Lebensformen sind möglich und können für diese Phase nicht vorhergesehen werden.

2.8.4. Vorgesehene Entwicklung der Tiefenlager

Planung und Verfahren. Aus heutiger Sicht sind für diese Phase keine Vorgänge vorgesehen.

Forschung und Entwicklung. Die Tiefenlager machen, wenn ihre Entwicklung wie gegenwärtig geplant erfolgt, keine Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung erforderlich.

Bauliche Aktivitäten. Für diese Phase sind aus heutiger Perspektive keine baulichen Aktivitäten vorgesehen. Es ist jedoch weiterhin sicherzustellen, dass die Sicherheit der Tiefenlager nicht durch andere bauliche Aktivitäten im tiefen Untergrund beeinträchtigt wird.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Betriebliche Aktivitäten in den Tiefenlagern sind für diese Phase nicht geplant.

Technische Barrieren. Die Behälter sind voraussichtlich beschädigt und haben ihre Relevanz für die Rückhaltung der Radionuklide weitgehend verloren. Die Bedeutung des Streckenversatzes und der Abdichtung der Einlagerungsstrecke für die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers nimmt dagegen zu Beginn der vorliegenden Phase zu. Der Schachtverschluss und die Abdichtung der Tiefenlager verlieren unter Umständen ihre Bedeutung für die Sicherheit des Lagers. Dies ist zum Beispiel aufgrund kaltzeitlicher Änderungen im Deckgebirge möglich.

Die Gasentwicklung in den Tiefenlagern, die vor allem auf Korrosion der Lagerbehälter zurückgeht, ist abhängig vom Flüssigkeitsangebot. Bei unbegrenztem Lösungsangebot, wie es für Tonstein angenommen werden kann, kommt sie nach etwa 300'000 Jahren zum Erliegen. Bei begrenztem Lösungsangebot, wie es im Salinargebirge zu erwarten ist, endet die Gasbildung bereits nach etwa 20'000 Jahren. Nachdem die korrosionsbedingte Gasbildung abgeschlossen ist, reduzieren sich die Gasvolumenströme wieder (Lux et al., 2017). Wenn die Endlagerbehälter ihre Barrierenwirkung verlieren, treten Radionuklide aus den Lagerbehältern in den Streckenversatz über und gelangen von dort in den Wirtsgesteinskörper.

Wirtsgestein. In der vorliegenden Phase übernimmt der einschlusswirksame Gebirgsbereich die Funktion der maßgeblichen Sicherheitsbarriere, die die Radionuklidfreisetzung begrenzt. Ohne Eingriffe von Menschen oder nachmenschlichen Personen ist aus heutiger Sicht mit generell geringen Veränderungen im näheren Umfeld des Lagers, das heißt im Wirtsgesteinskörper, zu rechnen. Es sind jedoch Entwicklungen vorstellbar, die den Wirtsgesteinskörper stärker berühren, vor allem die Entwicklung sehr tiefer Rinnen im Gelände durch Eisüberfahrung, die zu Auflockerungszonen im überdeckenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen kann.

Weiteres geologisches Umfeld. Ein Zeitraum von einer Million Jahren gilt in der Geologie als überschaubarer Zeitraum, der einigermaßen zuverlässige Prognosen erlaubt. Erkenntnisse zu vergangenen Ereignissen und Entwicklungen ermöglichen es, Einschätzungen zu Hebungen oder Senkungen, Erosion, Kalt- und Warmzeiten, seltenen schweren Erdbeben und anderen Naturereignissen, die das geologische Umfeld des Lagers betreffen, zu machen. Die Ungewissheiten der Prognosen nehmen allerdings mit zunehmender Dauer der Entsorgung zu. Heutige Prognosen setzen voraus, dass das geologische Umfeld nicht wesentlich von Menschen oder nachmenschlichen Lebensformen beeinflusst wird. Entsprechende Entwicklungen sind nicht vorhersehbar.

2.8.5. Vorgesehene Entwicklung des Oberflächenlagers

In der Nachfolge des Oberflächenlagers wurde ein neuer Entsorgungspfad beschritten. Wie dieser Entsorgungspfad aussieht, ist nicht bekannt.

3. Ungewissheiten

Ungewissheiten sind bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle vor allem deshalb von Bedeutung, weil der Entsorgungspfad über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren oder länger führt. Dieser Zeitraum ist – gemessen an gesellschaftlichen Entwicklungen – ungewöhnlich groß.

Ungewissheiten lassen sich in „unbekannte Bekannte“, „bekannte Unbekannte“ und „unbekannte Unbekannte“ differenzieren (Eckhardt & Rippe, 2016, S. 57f.).

Einer vergleichenden Untersuchung und Bewertung der Entsorgungsoptionen sind nur „*bekannte Unbekannte*“ direkt zugänglich. Bekannte Unbekannte liegen vor, wenn die Personen, die die Untersuchung und Bewertung vornehmen, wissen, dass sie gewisse Tatsachen nicht wissen. Eine bekannte Unbekannte bei den Tiefenlageroptionen sind beispielsweise die genauen Eigenschaften des Wirtsgesteinskörpers, in dem ein Tiefenlager realisiert wird. Die Informationen zur Beschaffenheit des Wirtsgesteinskörpers werden im Verlauf des Standortauswahlverfahrens und des Baus des Tiefenlagers immer mehr konkretisiert und vertieft. Zu Beginn eines Entsorgungspfades sind die Informationen aber notwendigerweise noch unvollständig.

„*Unbekannte Bekannte*“ sind eigentlich bekannte Tatsachen und vorhersehbare Entwicklungen, die nicht zur Kenntnis genommen werden. Beim Vergleich von Entsorgungsoptionen können unbekannte Bekannte zum Beispiel durch Peer Reviews oder kritische Korreferate von fachkompetenten Personen, die jedoch mit dem eigentlichen Kernthema nicht näher vertraut sind, in bekannte Bekannte oder bekannte Unbekannte umgewandelt werden. Bei der vorliegenden vergleichenden Risikobewertung wurden unbekannte Bekannte durch Einbezug eines breiten Spektrums an

Informationsquellen, durch Korreferate innerhalb des interdisziplinär zusammengesetzten Projektteams und durch zwei Reviews von Experten, die in anderen Teams bei ENTRIA mitgewirkt haben (vgl. Danksagung), reduziert.

„*Unbekannte Unbekannte*“ sind nicht bekannte Tatsachen und unvorhersehbare Entwicklungen. Beim Vergleich von Entsorgungsoptionen bleiben unbekannte Unbekannte zwangsläufig unberücksichtigt.

Bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle ist im Allgemeinen ein schrittweises Vorgehen vorgesehen, das eine zunehmende Konkretisierung der Entsorgungsoption auf der Grundlage des jeweils aktuellen Wissens, des Standes der Technik und der spezifischen Rahmenbedingungen erlaubt. Viele Ungewissheiten, die heute bestehen, werden sich im Verlauf dieses schrittweisen Vorgehens vermindern lassen. Wie der Abbau von Ungewissheiten verlaufen wird, ist aber aus heutiger Sicht ebenfalls mit Ungewissheiten behaftet. Daher werden die bekannten Unbekannten, die sich mit den untersuchten Entsorgungsoptionen verbinden, bei der vergleichenden Risikobewertung der Entsorgungsoptionen aus der *heutigen Perspektive* betrachtet.

Eine Option wird umso *besser beurteilt*, je geringer die mit ihr verbundenen Ungewissheiten sind. Ein hohes Maß an Ungewissheiten kann dazu führen, dass sich die kalkulierbaren Risiken nicht mehr einschätzen lassen (vgl. Kapitel 4).

Für die *vergleichende Bewertung* der Entsorgungsoptionen wurde ein strukturiertes Verfahren gewählt. Dabei wird ein Outranking der Entsorgungsoptionen vorgenommen. Die Entsorgungsoptionen werden also anhand der Bewertung der Ungewissheiten in eine Rangfolge gebracht. Diese Rangfolge spiegelt wieder, wie die Entsorgungsoptionen im Vergleich untereinander abschneiden, sagt jedoch nichts über das absolute

Maß an Ungewissheiten aus. Aufgrund mangelnder quantitativer Informationen zu den weitgehend generischen Referenzmodellen und der Breite der vorgenommenen Bewertung, vor allem aber aufgrund methodischer Schwierigkeiten bei der Einschätzung gesellschaftlich bedingter Ungewissheiten erfolgt der Vergleich verbal-argumentativ. Zunächst werden die risikorelevanten Ungewissheiten für Einflüsse, Entwicklungen und Aktivitäten in der jeweils untersuchten Phase für die drei untersuchten Entsorgungsoptionen gegeneinander abgewogen. Zum Abschluss der Untersuchung einer Phase werden dann die Teilergebnisse zusammengeführt. Das Ergebnis dieser zusammenfassenden Abwägung fließt in die Risikokarte ein, in der die Resultate der umfassenden Risikobewertung dargestellt sind (vgl. Kapitel 5).

3.1. Unmittelbare Zukunft

Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung

3.1.1. Wichtigste Schritte

- Entscheidung für eine Entsorgungsoption
- Konzept für das Standortauswahlverfahren

3.1.2. Dauer der vorliegenden Phase

Reife der gewählten Entsorgungsoption. Die Entscheidung für eine Entsorgungsoption setzt idealerweise voraus, dass die Entscheidungsträger über eine fundierte und differenzierte Vorstellung darüber verfügen, was unter der jeweiligen Option zu verstehen ist und welche weiteren Optionen zur Auswahl stehen.

Am ausgereiftesten ist heute sowohl in Deutschland als auch international für die dauerhafte Entsorgung das Konzept der Endlagerung. Dieses Konzept wird in vielen Ländern bevorzugt verfolgt und konkretisiert. In Finn-

land und Schweden ist die Realisierung eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle bereits fortgeschritten.

Zur Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit existiert sowohl in verschiedenen Ländern als auch innerhalb Deutschlands derzeit ein breites Spektrum unterschiedlicher Vorstellungen und Modelle.

Die auf einen Langzeitbetrieb über 100 Jahre oder mehr angelegte Oberflächen- bzw. Zwischenlagerung wird international in den Niederlanden und in Frankreich praktiziert. Zudem kann auf Konzepte und Erfahrungen aus der Zwischenlagerung zurückgegriffen werden. Die Option Oberflächenlagerung müsste für Deutschland allerdings zunächst noch konkretisiert werden.

Bei der Entscheidung für ein Endlager kann also auf ein bereits weitgehend ausgereiftes Konzept für diese Entsorgungsoption zurückgegriffen werden. Eine solche Entscheidung wäre daher wohl ohne größere Verzögerungen möglich. Vor der fundierten Entscheidung für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit oder ein Oberflächenlager müssten diese beiden Optionen noch weiter konkretisiert werden, unter anderem durch die Entwicklung eines spezifischen Sicherheitskonzepts.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Reife der Entsorgungsoption zurückgehen, sind bei der Endlagerung am geringsten.

Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption. Zustimmung in der breiten Bevölkerung und der Politik findet in Deutschland gegenwärtig offenbar vor allem die Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen bergwerksähnlichen Anlagen mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Eine solche Option wird von der Endlagerkommission angedeutet und versucht, eine Brücke zwischen den Befürwortern und den Gegnern der

Endlagerung zu schlagen, die in Deutschland jeweils etwa die Hälfte der Bevölkerung ausmachen (TNS opinion, 2008, Anhang QB7.3).

Auch in anderen Ländern werden ähnliche Optionen bevorzugt, beispielsweise in Frankreich und der Schweiz. Je mehr gesellschaftlichen Rückhalt eine Option findet, umso mehr ist damit zu rechnen, dass die Phase vor dem Beginn eines Standortauswahlverfahrens wie geplant verläuft und nicht übermäßig Zeit beansprucht. Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase werden reduziert.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz der Entsorgungsoption zurückgehen, dürften daher bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am geringsten sein.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die sich auf die Akzeptanz der Entsorgungsoption zurückführen lassen, sind derzeit bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am geringsten.

Einfachheit des Konzepts für ein Standortauswahlverfahren. Wir gehen davon aus, dass das Standortauswahlverfahren vom Primat der Sicherheit geleitet wird.

Bei den Tiefenlagern muss das Verfahren stark auf die Langzeitsicherheit ausgerichtet sein, die vor allem Anforderungen an die geologischen Verhältnisse am Standort der Entsorgungsanlage mit sich bringt. Beim Oberflächenlager ist die Sicherheit über sehr lange Zeiträume von untergeordneter Bedeutung, da hier nur mit einer Betriebsdauer von ca. 200 Jahren gerechnet wird.

Sowohl bei den Tiefenlagern, an deren Standorten über Jahrzehnte hinweg auch Oberflächenanlagen betrieben werden, als auch beim Oberflächenlager sind Anforderungen an die Sicherheit für die Entsorgungsanlagen über Tage zu stellen. Diese Anforderungen sind beim Oberflächenla-

ger anspruchsvoller zu formulieren als bei den Oberflächenanlagen des Endlagers, da das Oberflächenlager über einen längeren Zeitraum betrieben wird. Beim Tiefenlager mit Vorkehrungen zum Monitoring und Rückholbarkeit ist zu erwarten, dass zumindest ein Teil der Oberflächenanlagen über ebenfalls längere Zeiträume in Betrieb bleibt, um die Rückholung zu ermöglichen.

Dem Primat der Sicherheit nachgeordnet werden voraussichtlich Kriterien sein, die Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit betreffen.

Die Formulierung solcher Kriterien, die über längere Zeiträume hinweg Bestand haben sollen, dürfte bei allen Entsorgungsoptionen anspruchsvoll sein. Sie gestaltet sich wahrscheinlich beim Oberflächenlager schwieriger als bei den Tiefenlagern, da beim Oberflächenlager die Rolle des Standorts für die Sicherheit des Lagers deutlich weniger von Bedeutung ist als bei den Tiefenlagern. Daher wird das gesellschaftliche Interesse an den Kriterien zu Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit beim Oberflächenlager voraussichtlich größer sein als bei den Tiefenlagern. Andererseits ist aber auch denkbar, dass beim Oberflächenlager letztlich ein einfaches, vor allem auf dem Prinzip der Freiwilligkeit basierendes Standortauswahlverfahren zum Erfolg führt.

Beim Endlager ist die Konzeption des Standortauswahlverfahrens etwas weniger anspruchsvoll als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Die geplante Anlage folgt einem überschaubareren Konzept. Sie stellt geringere Anforderungen an die Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers, und es muss beim Standortauswahlverfahren nicht auf gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Bedürfnisse an das Monitoring und die Rückholbarkeit Rücksicht genommen werden. Die dadurch bedingten Unterschiede dürften jedoch im Vergleich zu den Ungewissheiten über die konkrete Ausgestaltung der Standortauswahlverfahren für die drei untersuchten Entsorgungsoptionen vernachlässigbar sein.

Aus heutiger Sicht lässt sich nicht entscheiden, ob das Standortauswahlverfahren für ein Tiefenlager oder für ein Oberflächenlager einfacher gestaltet sein wird. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die darauf zurückgehen, wie komplex und kompliziert das Verfahren ist, unterscheiden sich daher bei den untersuchten Optionen nicht.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der Einfachheit des gewählten Standortauswahlverfahrens in Zusammenhang stehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Optionen nicht deutlich.

Akzeptanz des Konzepts für ein Standortauswahlverfahren. Die Entwicklung des Standortauswahlverfahrens wird voraussichtlich dann in einem kurzen und überschaubaren Zeitraum stattfinden können, wenn die Grundzüge des Standortauswahlverfahrens auf hohe Akzeptanz bei der Mehrzahl der Stakeholder treffen.

Bei der Konzeption der Standortauswahlverfahren für ein Tiefenlager steht das Primat der Sicherheit voraussichtlich im Vordergrund (siehe oben). Im Auswahlverfahren wird auf sicherheitsbezogene Kriterien Bezug genommen, die vor allem auf die Langzeitsicherheit ausgerichtet sind und die geologischen Verhältnisse am Standort betreffen. Für solche Kriterien liegen in Deutschland bereits Vorschläge vor. Gleichzeitig existieren auch internationale Vorbilder für derartige Kriterien. Kriterien, die sozioökonomische oder ökologische Auswirkungen einer Entsorgungsanlage am Standort betreffen, sind zwar ebenfalls von Bedeutung, aber den sicherheitsgerichteten Kriterien nachgeordnet.

Bei einem Oberflächenlager dagegen muss unter dem Primat der Sicherheit kaum auf die geologischen Verhältnisse am Standort Rücksicht genommen werden. Vielen Sicherheitsanforderungen, die etwa den Schutz gegen Überflutung oder Flugzeugabsturz betreffen, kann durch bauliche Maßnahmen Rechnung getragen werden. Daher ist es möglich, dass vor

allem das Prinzip der Freiwilligkeit bei dieser Option stärker zum Tragen kommt als bei den Standortauswahlverfahren für Tiefenlager. So ist es etwa denkbar, dass die Mehrheit der Anwohner am Standort einer bestehenden Kernanlage der Errichtung eines zentralen Oberflächenlagers am gleichen Standort zustimmen würden, das den aktuellen Sicherheitsanforderungen entspricht und die Schaffung neuer, auf Dauer sicherer Arbeitsplätze mit sich bringt. Entsprechende Erfahrungen wurden in Schweden bei der Suche nach dem Standort für ein geologisches Tiefenlager gemacht, der dort anders als in Deutschland nur bedingt an die Beschaffenheit des geologischen Untergrunds gebunden ist.

Die Möglichkeit, dem Prinzip der Freiwilligkeit zu folgen, kann die Konzeption eines Standortauswahlverfahrens erleichtern. Es ist aber auch denkbar, dass bei der Konzeption des Standortauswahlverfahrens für das Oberflächenlager kompliziertere Interessenabwägungen ins Spiel kommen als bei den Tiefenlagern, weil die Sicherheit bei der Standortauswahl keine dominierende Rolle spielen muss. Die Ergebnisse solcher Interessenabwägungen können je nach den Werthaltungen der Entscheidungsträger unterschiedlich ausfallen und daher auch für langwierige Kontroversen über das „richtige“ Standortauswahlverfahren sorgen.

Die Konzeption eines Standortauswahlverfahrens ist deshalb aus heutiger Sicht bei allen drei untersuchten Entsorgungsoptionen mit ähnlich großen Herausforderungen verbunden. Daher unterscheiden sich die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz des Konzepts für das Standortauswahlverfahren zurückzuführen sind, nicht deutlich.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz des Standortauswahlverfahrens zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Optionen nicht deutlich.

Verfügbarkeit von Ressourcen. Debatten zur Verfügbarkeit und Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen können die politischen Prozesse, die zur Entscheidung für eine Entsorgungsoption und zur Standortauswahl erforderlich sind, verzögern.

Fällt die Entscheidung für die Option Oberflächenlager, so bedeutet dies, dass die Ressourcen für vorbereitende Arbeiten und den Bau des Lagers innerhalb eines verhältnismäßig kurzen Zeitraums zur Verfügung stehen müssen. Für die vorbereitenden Arbeiten und den Bau eines Oberflächenlagers werden allerdings weniger finanzielle Ressourcen benötigt als für den Bau eines Tiefenlagers. Die erforderlichen Kompetenzen dürften aufgrund der zeitlichen Nähe zum Auslaufen der Kernenergienutzung in Deutschland noch einfacher verfügbar sein als beim Bau eines Tiefenlagers, der erst deutlich später erfolgen kann. Daher ist beim Oberflächenlager kaum damit zu rechnen, dass sich die Entscheidung für diese Option und für ein entsprechendes Standortauswahlverfahren aufgrund von Ressourcenproblemen verzögert. Wird der Weg zur Oberflächenlagerung beschritten, ist allerdings auch darauf zu achten, dass frühzeitig ausreichende Ressourcen für den weiteren Entsorgungspfad nach der Außerbetriebnahme des Oberflächenlagers zurückgestellt werden.

Bei den Tiefenlagern werden mehr Ressourcen für den späteren Bau und Betrieb der Entsorgungsanlage benötigt als beim Oberflächenlager. Allerdings steht auch mehr Zeit zur Verfügung, um bei Bedarf noch zusätzliche finanzielle Mittel für die Entsorgungsanlage zurückzustellen. Wenn grundlegende Schwierigkeiten auftreten sollten, die erforderlichen finanziellen Ressourcen für ein Tiefenlager zu beschaffen, würden diese wohl eine verlängerte Zwischenlagerung begünstigen. Die bestehenden Zwischenlager müssten dann über mehrere Jahrzehnte hinweg immer wieder instandgesetzt und nachgerüstet werden. Ein solches Vorgehen würde dem Grundsatz, kommenden Generationen keine unnötigen Belastungen aufzuerlegen, widersprechen. Unerwartete Entwicklungen könnten dazu führen, dass letztlich keine Entsorgungslösung zustande kommt, die heutigen Sicherheitsanforderungen entspricht.

Der personelle, materielle und finanzielle Ressourcenbedarf ist bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als bei der Endlagerung. Am günstigsten schneidet das Oberflächenlager ab, bei dem die Ungewissheiten, die sich aufgrund von Fragen zur Ressourcenverfügbarkeit zur Dauer der vorliegenden Phase ergeben, am geringsten sind.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Verfügbarkeit von Ressourcen zurückgehen, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Fazit 3.1.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase unterscheiden sich bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen nicht wesentlich.

3.1.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung des Inventars zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich die Inhalte der Transport- und Zwischenlagerbehälter im Lauf der Zeit verändern, zum Beispiel aufgrund von Materialalterungsvorgängen. Auch Teile der Behälter können Veränderungen unterliegen, die sich auf die Sicherheit auswirken. Solche Entwicklungen sind gegenwärtig Gegenstand internationaler Forschungsprojekte. Es bleiben Ungewissheiten zur Entwicklung der Behälter und ihres Inhaltes, die sich jedoch aufgrund der geringen zeitlichen Dauer dieser Phase in Grenzen halten dürften. Die Auswirkungen der Ungewissheiten auf die Risiken, die sich mit der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle verbinden, unterscheiden sich bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen nicht, da sich das Inventar bei allen Optionen gleichermaßen weiterhin in den bestehenden Zwischenlagern befindet.

Zwischen den drei Entsorgungsoptionen besteht hinsichtlich der Ungewissheiten zur Entwicklung des Inventars in der vorliegenden Phase kein Unterschied.

Gesellschaft. Bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen ist denkbar, dass es zu Schwierigkeiten und Verzögerungen bei der Wahl der Entsorgungsoption und der Konzeption des Standortauswahlverfahrens kommt, etwa weil andere gesellschaftliche Anforderungen dringlicher erscheinen oder weil sich politische Differenzen auftun, die schwer zu überbrücken sind. Es ist aber auch vorstellbar, dass eine sichere Entsorgungslösung plötzlich als sehr dringend erscheint – etwa aufgrund einer akuten Bedrohungslage.

Im letzteren Fall, in dem dringend eine Entsorgungslösung benötigt wird, stünde wahrscheinlich keine der Entsorgungsoptionen im Vordergrund, die bei ENTRIA behandelt werden, sondern es würde eine neue Zwischenlösung gesucht, zum Beispiel die vorübergehende Einlagerung in bestehenden bergwerksähnlichen Anlagen oder im oberflächennahen Untergrund.

Ungewissheiten, die gesellschaftliche Entwicklungen betreffen, sind in der vorliegenden Phase für alle untersuchten Entsorgungsoptionen gleichermaßen von Bedeutung.

Biosphäre. Ungewissheiten zur Beschaffenheit und Entwicklung der Biosphäre sind in dieser Phase bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen von untergeordneter Bedeutung. Falls sich relevante neue Entwicklungstendenzen abzeichnen sollten, könnten diese bei der Konzeption des Standortauswahlverfahrens berücksichtigt werden.

Zwischen den drei Entsorgungsoptionen besteht hinsichtlich von Ungewissheiten zu Entwicklungen der Biosphäre in der vorliegenden Phase kein Unterschied.

Geologisches Umfeld. In dieser Phase ist das geologische Umfeld der geplanten Entsorgungsanlage, das insbesondere für die Tiefenlager von Bedeutung ist, noch nicht bekannt. Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Geosphäre müssen bei der Konzeption der Standortauswahlverfahren für Tiefenlager berücksichtigt und im Verlauf der vorliegenden Phase durch gezielte Untersuchungen und Forschungsarbeiten vermindert werden. Aufgrund der höheren Komplexität der Anlage stehen sie bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker im Vordergrund als bei der Endlagerung.

Ungewissheiten, die die geologischen Verhältnisse betreffen, sind in der vorliegenden Phase vor allem für die Tiefenlager von Bedeutung und dort für das Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker als für die Endlagerung.

Fazit 3.1.3: Die drei untersuchten Entsorgungsoptionen unterscheiden sich in der betrachteten Phase nicht wesentlich in Bezug auf Ungewissheiten, die mit allgemeinen Entwicklungen verbunden sind.

3.1.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren – Akzeptanz der Option. Es ist damit zu rechnen, dass die Auswahl der Entsorgungsoption und die Konzeption des Standortauswahlverfahrens umso reibungsloser verlaufen, je größer der gesellschaftliche Konsens zur gewählten Entsorgungsoption und zu den Anforderungen an ein entsprechendes faires und fundiertes Standortauswahlverfahren ist.

Die Endlagerung wird in Deutschland von politischen Entscheidungsträgern bereits seit längerem als Entsorgungsoption erwogen. Dass die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sinnvoll ist, wird allerdings von großen Teilen der deutschen Bevölkerung angezweifelt (TNS opinion, 2008, S. 35).

Die Ergebnisse der Endlagerkommission, die Präferenzen für die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit zeigt, fand politischen und gesellschaftlichen Rückhalt. Dies deutet darauf hin, dass die Skepsis gegenüber der Endlagerung durch Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit vermindert werden kann. Entsprechende Erfahrungen wurden um das Jahr 2000 auch bereits in der Schweiz gemacht.

Die Oberflächenlagerung stellt ein Konzept dar, das in Deutschland noch nicht eingehender diskutiert und entwickelt wurde. Anders als bei der Zwischenlagerung, die bereits für einige Jahrzehnte konzipiert und umgesetzt wurde, ist das Oberflächenlager auf eine Betriebsdauer von bis zu 200 Jahren ausgelegt. In gesellschaftlichen Diskussionen wird die Oberflächenlagerung häufig dann favorisiert, wenn Zweifel daran bestehen, ob sich eine Tiefenlagerung in den kommenden Jahrzehnten sicher umsetzen lässt und die Hoffnung auf bessere technische Entsorgungslösungen in der Zukunft hoch gewichtet wird.

Da der gesellschaftliche Konsens für die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten ist, ist davon auszugehen, dass der Verlauf von Verfahren, die mit dieser Option in Verbindung stehen, mit den geringsten Ungewissheiten verbunden ist.

Bei Planung und Verfahren sind die Ungewissheiten, die auf mangelnde Akzeptanz einer Entsorgungsoption zurückgehen, aus aktueller Sicht für die vorliegende Phase bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am geringsten.

Planung und Verfahren – Konzepte und Vorgaben. Das Konzept und die Regelungen für ein Endlager sind in Deutschland und international bereits weit entwickelt. Auch zum Standortauswahlverfahren für ein Endlager existieren Grundlagen in Deutschland, zum Beispiel die Arbeiten des A-kEnd. Internationale Vorbilder für Standortauswahlverfahren finden sich unter anderem in Schweden und in der Schweiz. Allerdings ist die Zahl dieser Vorbilder überschaubar. In Schweden wird im Kristallingestein ein anderes Tiefenlagerkonzept verfolgt als mit der möglichen Tiefenlagerung in Salz oder Ton/Tonstein in Deutschland. In der Schweiz sind die politischen Voraussetzungen andere als in Deutschland. Daher lassen sich die internationalen Erfahrungen mit der Standortauswahl nur bedingt auf Deutschland übertragen. Generell dürften aber die Ungewissheiten, die sich in der vorliegenden Phase mit dem Vorgehen bei Planung und Verfahren verbinden, bei der Endlagerung am geringsten ausfallen.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind mehr neue konzeptionelle und regulatorische Fragen zu klären als bei der Endlagerung. Daher sind die Ungewissheiten, die sich mit dieser Option verbinden, größer als bei der Endlagerung.

Die Option Oberflächenlager wurde bisher in Deutschland nicht eingehender diskutiert. Bei der Entscheidung für diese Option und deren Ausgestaltung kann nur auf wenige Projekte, zum Beispiel das Vertikalprojekt Oberflächenlagerung bei ENTRIA (Köhnke et al., 2017a), und ähnlich gelagerte internationale Vorhaben und Anlagen wie das HABOG in den Niederlanden oder die Erweiterungsbauten in La Hague (Köhnke et al., 2017b) Bezug genommen werden. Bei der Standortauswahl für ein Oberflächenlager lässt sich in beschränktem Ausmaß auf bisherigen Erfahrungen mit der Standortfindung für Zwischenlager aufbauen, aus denen sowohl im positiven als auch im negativen Sinn Lehren gezogen werden können.

Da für die Endlagerung national und international bereits die meisten Vorarbeiten geleistet wurden, werden die Ungewissheiten, die sich mit

dieser Option verbinden, als geringer beurteilt als bei den anderen beiden untersuchten Entsorgungsoptionen.

Bei Planung und Verfahren sind die Ungewissheiten, die sich mit der Konzeption der gewählten Entsorgungsoption und des entsprechenden Standortauswahlverfahrens verbinden, aus aktueller Sicht für die betrachtete Phase bei der Endlagerung am geringsten.

Forschung und Entwicklung. Forschung und Entwicklung für ein Endlager werden in Deutschland schon seit Jahrzehnten betrieben. Bei der Forschung und Entwicklung zur Entsorgungsoption Endlager und während der Konzeption des Standortauswahlverfahrens kann daher wesentlich auf bereits bestehenden Arbeiten und Projekten aufgebaut werden. Da bisher vor allem von einem Endlager in Salz ausgegangen wurde, setzt der vermehrte Einbezug der Wirtsgesteine Tonstein sowie ggf. auch Kristallin allerdings zusätzliche Forschungsaktivitäten, unter anderem in Felslabors, voraus.

Im Bereich des Monitorings und der Rückholbarkeit sind zusätzliche Forschungsaktivitäten erforderlich, da die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bisher in Deutschland nicht eingehender verfolgt wurde. Es kann jedoch auf gewisse internationale Erfahrungen zurückgegriffen werden, weil Monitoring und Rückholbarkeit auch in anderen Ländern thematisiert werden, zum Beispiel in Frankreich und in der Schweiz.

Ein auf eine lange Betriebszeit angelegtes Oberflächenlager stellt in Deutschland ebenfalls ein neues Konzept dar, das intensivere Forschung und Entwicklung erfordert. International existiert vor allem ein Vorbild mit dem HABOG in den Niederlanden, das sich allerdings nur bedingt auf die Anforderungen in Deutschland übertragen lässt. Teilweise lässt sich bei der auf lange Betriebszeiten angelegten Oberflächenlagerung auch auf Erfahrungen aus der Zwischenlagerung von hoch radioaktiven Abfällen aufbauen.

Als Grundlage für eine gut informierte und mit entsprechend verminder-ten Ungewissheiten verbundene Auswahl der Entsorgungsoption wären über einen begrenzten Zeitraum gezielte Forschungsaktivitäten wünschenswert, mit denen Ungewissheiten über die beste Entsorgungsoption weiter reduziert werden können. Auch die Konzeption des Standortauswahlverfahrens sollte durch wissenschaftliche Untersuchungen begleitet werden, die dazu beitragen, dass das Standortauswahlverfahren unter ethischen, rechtlichen, natur- und ingenieurwissenschaftlichen sowie sozialwissenschaftlichen Gesichtspunkten dem aktuellen Stand der Erkenntnisse entspricht.

Da für die Endlagerung national und international bereits die meisten Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, werden die Ungewissheiten, die sich mit dieser Option verbinden, als geringer beurteilt als bei den anderen beiden untersuchten Entsorgungsoptionen.

Die Ungewissheiten, die sich mit Forschung und Entwicklung in der vorliegenden Phase verbinden, sind heute bei der Endlagerung am geringsten.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Die Ungewissheiten bei Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle sind aus heutiger Perspektive in der laufenden Phase gering, weil mit diesen Prozessen bereits langjährige Erfahrungen bestehen. Die verschiedenen Entsorgungsoptionen unterscheiden sich nicht voneinander, da in allen Fällen gleichermaßen Abfälle verpackt und zwischengelagert werden müssen.

Ungewissheiten in Bezug auf natürliche und technische Entwicklungen, zum Beispiel zur Alterung der Zwischenlagerbauten, zur Alterung der Transport- und Zwischenlagerbehälter und von deren Inhalten wurden teilweise bereits unter „Inventar“ angesprochen. Angesichts des überschaubaren zeitlichen Rahmens dieser Phase dürften sich die Ungewiss-

heiten in Grenzen halten. Sie unterscheiden sich zwischen den Entsorgungsoptionen nicht.

Die Ungewissheiten, die Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung betreffen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Aktuell ist die Bedrohungslage in Deutschland, wie in 2.1.3 angedeutet, komplex. Entwicklungen der kommenden Jahre vorherzusehen, ist daher nur schwer möglich. Zu potentiellen Angriffen von terroristischen Gruppierungen und Einzeltätern auf Transporte, Zwischenlager und Forschungseinrichtungen bestehen erhebliche Ungewissheiten. Zu den möglichen Einzeltätern zählen unter anderem Innentäter, die sich im Vorfeld eines Anschlags nur schwer identifizieren lassen.

Extreme Entwicklungen der Bedrohungslage begünstigen voraussichtlich keine der bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen. Es ist vielmehr – wie schon weiter oben ausgeführt – damit zu rechnen, dass eine Zwischenlösung in Form der verlängerten Zwischenlagerung oder einer provisorischen Verbringung der Abfälle in ein bestehendes Bergwerk oder ein oberflächennahes Lager gewählt würde. Die Entsorgungsoptionen Endlager, Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und Oberflächenlagerung unterscheiden sich daher nicht wesentlich in Bezug auf Ungewissheiten, die die Bedrohungslage in der Phase der Entscheidung für eine Entsorgungsoption und der Konzeption des Standortauswahlverfahrens betreffen.

Die Ungewissheiten, die Sicherung und Kernmaterialüberwachung betreffen, unterscheiden sich bei den untersuchten Referenzmodellen nicht.

Verlaufsvarianten. Interessenkonflikte können die Entscheidung für eine Entsorgungsoption und die konzeptionelle Entwicklung des Standortaus-

wahlverfahrens verzögern und zu Kompromissen führen, die nicht primär sicherheitsgerichtet sind. Im Extremfall scheitern sowohl die Entscheidung für eine Entsorgungsoption als auch die Einigung auf ein Konzept für das Standortauswahlverfahren. Im günstigen Fall, in sich dem alle beteiligten Akteure für sicherheitsgerichtete Entscheidungen einsetzen und ggf. bereit sind, eigene Interessen zurückzustellen, sollte es dagegen möglich sein, dass fachlich fundierte und breit akzeptierte Entscheidungen innerhalb weniger Jahre zustande kommen.

Unerwartete Entwicklungen könnten auch dazu führen, dass der bereits beschrittene Entsorgungspfad zugunsten eines neuen Weges verlassen wird. Dieser Weg kann zum Beispiel in einer alternativen Entsorgungsoption bestehen wie der Entsorgung in tiefen Bohrlöchern.

Zwischen den Entsorgungsoptionen, die bei ENTRIA untersucht werden, bestehen in Bezug auf mögliche Verlaufsvarianten keine wesentlichen Unterschiede, die die Ungewissheiten betreffen.

Die Ungewissheiten, die auf Verlaufsvarianten zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Fazit 3.1.4: Die Ungewissheiten, die mit vorbereitenden Aktivitäten zur Umsetzung der drei Entsorgungsoptionen verbunden sind, sind in der betrachteten Phase bei der Endlagerung am geringsten, da bei der Endlagerung am stärksten auf bereits bestehenden Grundlagen, die in Deutschland und international entwickelt wurden, aufgebaut werden kann.

3.1.5. Abwägung

In der Phase der Entscheidung für eine Entsorgungsoption und der Konzeption des Standortauswahlverfahrens weisen vor allem die beiden Tiefenlageroptionen Vorteile auf, die Ungewissheiten vermindern:

- Zur Entsorgungsoption Endlagerung und zur Standortauswahl für ein Endlager wurden in Deutschland und international bereits wesentliche Vorarbeiten geleistet und damit Ungewissheiten reduziert.
- Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit findet gegenwärtig in Deutschland die größte Akzeptanz. Dadurch werden Ungewissheiten vermindert, die auf Konflikte zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen zurückgehen.

Aus unserer Sicht sind die Vorteile, die für die Endlagerung und die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sprechen, etwa gleich zu gewichten.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten, die sich mit der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit verbinden, geringer als jene, die die Oberflächenlagerung betreffen.

3.2. Nähere Zukunft

ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung

3.2.1. Wichtigste Schritte

- Standortauswahl
- Eignungsnachweis am gewählten Standort
- Genehmigungsverfahren, Bau und Inbetriebnahme der Entsorgungsanlage (nur Oberflächenlager)

3.2.2. Dauer der vorliegenden Phase

Reife der gewählten Entsorgungsoption. Im Verlauf des Standortauswahlverfahrens wird die gewählte Entsorgungsoption weiter konkretisiert, und es werden Vorbereitungen für die nachfolgenden Genehmigungsverfahren für eine Entsorgungsanlage getroffen.

Wir gehen davon aus, dass in der vorliegenden Phase bei der Endlagerung weniger umfangreiche Vorbereitungsarbeiten als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit erforderlich sind, da das Konzept der Endlagerung einfacher ist als jenes der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Zudem kann auch in der laufenden Phase bei der Endlagerung voraussichtlich noch von mehr nationalen und internationalen Vorarbeiten profitiert werden als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Das Konzept der Oberflächenlagerung wurde in der vorangegangenen Phase auf einen ähnlichen Stand wie die Konzepte für die Endlagerung und die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit gebracht. Angesichts der Tatsache, dass das Oberflächenlager in der vorliegenden Phase bis zur Inbetriebnahme umgesetzt werden soll, verbleiben aber viele Ungewissheiten dazu, ob die Realisierung des Oberflächenlagers im geplanten Zeitrahmen möglich sein wird. Wenn sich

zeigt, dass noch offene Fragen bestehen, ist die Zeit, die zur Beantwortung dieser Fragen zur Verfügung steht, beim Oberflächenlager knapp bemessen.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Reife der Entsorgungsoption zurückgehen, sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption. Zustimmung in der breiten Bevölkerung und der Politik findet heute vor allem die Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen bergwerksähnlichen Anlagen mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit (vgl. 3.1.2). Diese Situation kann sich in den kommenden drei Jahrzehnten verändern. Rückblickend wird zum Beispiel erkennbar, dass vor ca. zwanzig Jahren – zumindest unter Spezialisten und Entscheidungsträgern – international die Endlagerung bevorzugt wurde (EKRA, 2000, S. 2), während heute in einigen Ländern Monitoring und Rückholbarkeit als wesentliche Elemente der Tiefenlagerung betrachtet werden. Welche der untersuchten Entsorgungsoptionen in der vorliegenden Phase die größte Akzeptanz in der breiten Öffentlichkeit sowie an möglichen Standorten einer Entsorgungsanlage finden wird oder ob eine ganz andere Entsorgungsoption im Vordergrund steht, lässt sich aus heutiger Perspektive nicht vorhersehen. Bei den Auswirkungen der Akzeptanz auf die Dauer der vorliegenden Phase zeigen sich daher gegenwärtig keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei untersuchten Entsorgungsoptionen.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz der Entsorgungsoption zurückgehen, unterscheiden sich aus heutiger Sicht nicht.

Akzeptanz der Verfahren. Die Durchführung des Standortauswahlverfahrens wird voraussichtlich dann in einem kurzen und überschaubaren Zeitraum stattfinden können, wenn dieses Verfahren auf hohe Akzeptanz bei den Stakeholdern trifft.

Bei einem Oberflächenlager muss, wie bereits unter 3.1.2 ausgeführt, anders als bei den Tiefenlagern kaum auf die geologischen Verhältnisse am Standort Rücksicht genommen werden. Daher kann im Idealfall dem Prinzip der Freiwilligkeit am besten Rechnung getragen und auf die Akzeptanz der Betroffenen im Vergleich zu den anderen beiden Entsorgungsoptionen am meisten Rücksicht genommen werden. Da das Primat der Sicherheit das Standortauswahlverfahren weniger prägen dürfte als bei den Tiefenlagern, können anspruchsvolle Interessenabwägungen im ungünstigen Fall jedoch auch zu erheblichen Verzögerungen beim Standortauswahlverfahren führen.

Beim Oberflächenlager müssen in der vorliegenden Phase zudem mehr Verfahrensschritte durchlaufen werden als bei den Tiefenlagern. Dadurch ist das Potential für Ereignisse, Prozesse und Entscheidungen, die die Akzeptanz in der breiten Bevölkerung und am Standort des Lagers beeinträchtigen, größer als bei den Tiefenlagern.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz von Verfahren zurückgehen, werden daher bei der Oberflächenlagerung als besonders groß eingestuft. Zwischen den beiden Tiefenlageroptionen dürften sich keine wesentlichen Unterschiede zeigen, da Monitoring und Rückholbarkeit keine erheblichen Auswirkungen auf den Verlauf des vor allem auf die Langzeitsicherheit ausgerichteten Standortauswahlverfahrens haben dürften.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz der Verfahren zurückgehen, unterscheiden sich aus heutiger Sicht bei den beiden Tiefenlageroptionen nicht wesentlich und sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Durchführung der Verfahren. In der vorliegenden Phase müssen bei der Oberflächenlagerung mehrere wichtige Verfahrensschritte abgeschlossen und Entscheidungen gefällt werden. Ein Standort wird ausgewählt, und eines oder mehrere Genehmigungsverfahren werden durchlaufen. Die Anlage wird gebaut und in Betrieb genommen. Sollte es bei einem oder mehreren dieser Schritte zu Verzögerungen kommen, so kann sich die Dauer des Verfahrens dadurch verlängern. Verzögerungen sind zum Beispiel denkbar, weil Zweifel an der Arbeit der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden bestehen, weil neuen Gefährdungen Rechnung getragen werden muss oder weil bei der Bauausführung Mängel festgestellt wurden. Bei der Oberflächenlagerung ist die vorliegende Phase daher besonders anfällig für Verzögerungen.

Verzögerungen sind auch bei der Standortauswahl und beim Eignungsnachweis des Standorts für ein Tiefenlager möglich. Ereignisse wie unerwartete Ergebnisse geologischer Untersuchungen oder Mängel bei der behördlichen Begutachtung eingereicherter Unterlagen können auch hier dazu führen, dass das Verfahren mehr Zeit beansprucht als geplant. Besonders einschneidend wäre es, wenn sich der aufwendig ausgewählte Standort für ein Tiefenlager erst gegen Ende des Verfahrens als ungeeignet erweisen sollte. Falls das Vertrauen von Bevölkerung und Politik in das Standortauswahlverfahren nach wie vor intakt ist, könnte in einem solchen Fall allerdings auf einen der zuvor im Verfahren bestimmten „zweitbesten“ Standorte zurückgegriffen werden.

Angesichts der vielfältigen Verfahrensschritte, die beim Oberflächenlager durchlaufen werden müssen, stufen wir das Potential für Verzögerungen bei dieser Entsorgungsoption als besonders hoch ein. Die beiden Tiefenlageroptionen unterscheiden sich in diesem Aspekt nicht wesentlich.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Durchführung der Verfahren zurückgehen, unterscheiden sich aus heutiger Sicht bei den beiden Tiefenlageroptionen nicht wesentlich und sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Verfügbarkeit von Ressourcen. Der personelle, materielle und finanzielle Ressourcenbedarf ist in der vorliegenden Phase bei den Tiefenlagern groß, weil hier fünf neue regionale Zwischenlager realisiert werden müssen. Die Realisierung dieser Zwischenlager dürfte allerdings nicht entscheidend dafür sein, ob das Standortauswahlverfahren wie geplant durchgeführt werden kann. Im Fall knapper Ressourcen würde voraussichtlich primär weiter in das Standortauswahlverfahren für ein Tiefenlager investiert, und die Realisierung der neuen Zwischenlager würde zugunsten von Nachrüstungen der bestehenden Zwischenlager verzögert oder zurückgestellt.

Der Einfluss der Verfügbarkeit von Ressourcen auf die Dauer der vorliegenden Phase ist daher bei der Oberflächenlagerung am größten, wo vor allem der Bau des Lagers in die vorliegende Phase fällt.

Zwischen der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bestehen nach unserer Einschätzung während der Standortauswahl keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf Ungewissheiten, die sich auf die Dauer des Verfahrens auswirken.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Verfügbarkeit von Ressourcen zurückgehen, unterscheiden sich aus heutiger Sicht bei den beiden Tiefenlageroptionen nicht wesentlich und sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Fazit 3.2.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit geringer als bei der Oberflächenlagerung.

3.2.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung des Inventars zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Ungewissheiten verbinden sich noch vor allem mit der Entwicklung Ab-

fallmatrix und der Entwicklung der Transport- und Zwischenlagerbehälter. Bis zur vorliegenden Phase können Forschungsprojekte, die in der Gegenwart initiiert wurden, zum Abbau dieser Ungewissheiten geführt haben.

In der laufenden Phase befinden sich die Abfälle bei allen Optionen zunächst noch in den bestehenden Zwischenlagern. Bei den Tiefenlagern müssen jedoch bereits die Transporte in fünf neue regionale Zwischenlager vorbereitet und vorgenommen werden, was entsprechende Informationen über den Zustand des Inventars voraussetzt. Ungewissheiten wirken sich daher unmittelbar auf die Risiken aus.

Beim Oberflächenlager sind Vorbereitungsarbeiten für die Transporte in das Oberflächenlager selbst und die dortige Umverpackung in Lagerbehälter erforderlich.

Ungewissheiten zur Entwicklung des Inventars bestehen bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen und wirken sich in der vorliegenden Phase bei den Tiefenlageroptionen am stärksten aus.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase lassen sich aus heutiger Perspektive nur mit Ungenauigkeiten einschätzen. Vermutlich werden sich etliche Tendenzen, die sich heute abzeichnen, in diese Phase hinein fortsetzen. Tiefgreifende Umbrüche sind aber nicht auszuschließen.

Beim Oberflächenlager müssen in der vorliegenden Phase die meisten Verfahrensschritte durchlaufen werden, und der Bedarf an personellen, finanziellen und materiellen Ressourcen ist am größten. Im Fall einer gesellschaftlichen Krise dürfte sich daher der Weg zum Oberflächenlager als besonders störungsanfällig erweisen, während zwischen den beiden Tiefenlageroptionen keine wesentlichen Unterschiede bestehen.

Die Endlagerung und die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind in der vorliegenden Phase weniger anfällig für Ungewissheiten, die aus gesellschaftlichen Entwicklungen resultieren, als die Oberflächenlagerung.

Biosphäre. Ungewissheiten zur Beschaffenheit und Entwicklung der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage bestehen bei den Tiefenlageroptionen vor allem deshalb, weil der definitive Standort erst am Ende der vorliegenden Phase bekannt ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass potentielle Standorte bereits früh im Verfahren auch in Bezug auf die dort bestehenden Lebensgemeinschaften charakterisiert werden und die Entwicklung der Lebensgemeinschaften aktiv verfolgt wird. Beim Oberflächenlager wird die Biosphäre am Standort durch die Errichtung der Anlage beeinflusst. Neben geplanten Veränderungen, die sich sowohl negativ als auch positiv auf die Anwohner der Anlage auswirken können, ist damit zu rechnen, dass ungeplante Veränderungen auftreten können. Auch neue Anforderungen an den Strahlenschutz aufgrund von Erkenntnissen und Ergebnissen zur entsprechenden Verletzlichkeit von Menschen und anderen Lebewesen (vgl. 2.2.3) würden sich beim Oberflächenlager am stärksten auswirken, da bei der Realisierung des Lagers auf diese Anforderungen konkret Rücksicht genommen werden muss. Die Tiefenlager befinden sich zur gleichen Zeit erst in der Planungsphase, so dass sich Anpassungen voraussichtlich noch mit geringerem Aufwand vornehmen lassen.

Die Oberflächenlagerung weist in der vorliegenden Phase die größten Ungewissheiten, die aus Veränderungen der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage resultieren, auf.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Geosphäre müssen vor allem während des Standortauswahlverfahrens für Tiefenlager berücksichtigt und während diesem Verfahren durch gezielte Untersuchungen und Forschungsarbeiten vermindert werden. Aufgrund der höheren Komplexität der Anlage stehen sie bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker im Vordergrund als bei der Endlagerung.

Bei der Oberflächenlagerung spielen Ungewissheiten zur Beschaffenheit des geologischen Umfelds in der vorliegenden Phase voraussichtlich keine erhebliche Rolle. Dies gilt insbesondere nach Abschluss des Standortauswahlverfahrens und der Standortgenehmigung.

Ungewissheiten, die das geologische Umfeld betreffen, sind für die Oberflächenlagerung von geringerer Bedeutung als für Endlagerung und vor allem auch für die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Fazit 3.2.3: Ungewissheiten, die mit allgemeinen Entwicklungen verbunden sind, wirken sich bei der Endlagerung und Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit in der betrachteten Phase weniger stark aus als bei der Oberflächenlagerung.

3.2.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Das Standortauswahlverfahren für eine Entsorgungsoption ist generell ergebnisoffen und zwangsläufig mit vielen Ungewissheiten verbunden. Diese Ungewissheiten werden zum Teil bewusst in Kauf genommen, um sich schrittweise und unter Einbezug neuer Erkenntnisse einer möglichst guten Lösung anzunähern.

Ob sich die Auswahl eines Standorts für ein Oberflächenlager einfacher oder komplexer und anspruchsvoller als die Auswahl eines Standorts für

ein Tiefenlager gestaltet, lässt sich aus heutiger Sicht kaum beurteilen (vgl. 3.1.2).

Viele Planungs- und Genehmigungsprozesse können bei einem Oberflächenlager schneller ablaufen als bei einem Tiefenlager. Dadurch vermindern sich Ungewissheiten im Vergleich zur Tiefenlagerung. Dies betrifft vor allem Ungewissheiten in Bezug auf Entwicklungen der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen aber auch auf Veränderungen, die technische und natürliche Voraussetzungen der Entsorgung betreffen. Für die Tiefenlager muss in der vorliegenden Phase allerdings lediglich das Standortauswahlverfahren durchlaufen werden, während beim Oberflächenlager von der Standortauswahl bis zur Betriebsgenehmigung mehrere wichtige Verfahren durchzuführen sind.

Im Zusammenhang mit den Tiefenlageroptionen müssen jedoch fünf neue Zwischenlager geplant und genehmigt sowie die Stilllegung der bestehenden Zwischenlager vorbereitet werden, was mit größeren Ungewissheiten verbunden sein dürfte, als die Verfahren für ein einziges zentrales Oberflächenlager zu durchlaufen.

Planung und Verfahren sind bei allen drei untersuchten Entsorgungsoptionen mit großen Ungewissheiten verbunden. Aus heutiger Perspektive lässt sich nicht einschätzen, welche Option am günstigsten abschneidet.

Forschung und Entwicklung. Wenn die Entsorgungslösung im Jahr 2017 gestartet wurde, kann beim Endlager voraussichtlich auch in der vorliegenden Phase noch auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgebaut werden, die vor 2017 geleistet wurden. Aufwendiger und mit mehr Ungewissheiten verbunden ist nach wie vor die Forschung und Entwicklung zu Monitoring und Rückholbarkeit. Monitoring und Rückholbarkeit müssen nicht nur unter naturwissenschaftlich-technischen Aspekten optimiert, sondern auch so ausgestaltet werden, dass sie gesellschaftlichen Anforderungen und Bedürfnissen Rechnung tragen.

Wenn die Wirtsgesteine Salz, Ton/Tonstein sowie ggf. Kristallin für ein Tiefenlager in Betracht gezogen werden, werden in der vorliegenden Phase voraussichtlich intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Tiefenlagerung in mehreren Felslabors in Deutschland und international durchgeführt. Im Zusammenhang mit den Tiefenlagern sind in der vorliegenden Phase auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, die den fünf neuen Zwischenlagern zugutekommen.

Beim Oberflächenlager ist vor allem zu Beginn der vorliegenden Phase mit intensiven Aktivitäten im Bereich von Forschung und Entwicklung zu rechnen, die unter anderem bautechnische Aspekte betreffen. Mit den Genehmigungen und dem Bau des Lagers lässt der Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Verlauf der Phase allmählich nach. Gewisse Forschungs- und Entwicklungsarbeiten müssen jedoch auch über das Ende der vorliegenden Phase hinweg durchgeführt werden, zum Beispiel zur Langzeitstabilität der Behälter.

Die Ungewissheiten, die sich mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verbinden, sind aus heutiger Sicht bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung größer als bei der Oberflächenlagerung.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Bei allen Entsorgungsoptionen muss in dieser Phase die Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle fortgeführt werden.

Bei den Tiefenlagern sind der auslaufende Betrieb der alten Zwischenlager und die Inbetriebnahme der neuen regionalen Zwischenlager voraussichtlich mit deutlich größeren Ungewissheiten verbunden als der auslaufende Betrieb der alten Zwischenlager im Fall der Oberflächenlagerung.

Bei den Tiefenlageroptionen wird im Verlauf der vorliegenden Phase das gesamte Inventar an hoch radioaktiven Abfällen von den bestehenden Zwischenlagern in neue Zwischenlager überführt. Die Ungewissheiten, die

sich mit Zwischenlagerung und Transporten verbinden, sind daher deutlich größer als bei der Oberflächenlagerung.

Die Ungewissheiten, die sich mit Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung verbinden, sind aus heutiger Sicht bei der Oberflächenlagerung geringer als bei den Tiefenlageroptionen.

Bauliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlagern finden in dieser Phase noch keine Aktivitäten zum Bau des Lagers statt. Voraussichtlich werden im Zusammenhang mit dem Standortauswahlverfahren Sondierbohrungen durchgeführt. Die Durchführung von Sondierbohrungen befindet sich bereits heute generell auf einem hohen sicherheitstechnischen Niveau. In 20 bis 30 Jahren werden die Ungewissheiten voraussichtlich noch geringer ausfallen als heute. Grund dafür sind vor allem technische Weiterentwicklungen und Erfahrungen, die zwischenzeitlich mit Bohrungen gesammelt wurden. Wesentliche bauliche Aktivitäten sind jedoch im Zusammenhang mit der Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle erforderlich. Während das Standortauswahlverfahren für die Tiefenlager durchgeführt wird, werden fünf neue zentrale Zwischenlager errichtet. Zudem ist es möglich, dass der Bau neuer Felslabors im Verlauf dieser Phase mit Ungewissheiten verbunden sein wird, die zum Beispiel auf noch unbekannte Eigenschaften des geologischen Untergrunds zurückgehen.

Beim Bau des Oberflächenlagers kann teilweise auf nationale und internationale Erfahrungen mit Zwischenlagern zurückgegriffen werden. Die mit dem Bau verbundenen Ungewissheiten, die die einzusetzenden Techniken betreffen, halten sich daher nach heutiger Einschätzung in Grenzen, obwohl es sich bei dem Oberflächenlager um ein in Deutschland neuartiges Projekt handelt.

Bei allen Entsorgungsoptionen sind in dieser Phase Unterhalts- und evtl. auch Nachrüstungsmaßnahmen an den Zwischenlagern erforderlich, die bereits 2017 in Betrieb standen. Diese Unterhaltsmaßnahmen könnten

ggf. für einen begrenzten Zeitraum ausgesetzt, aber nicht auf Dauer unterlassen werden, ohne dass es zu Einbußen bei Sicherheit und Sicherung kommt.

Wir beurteilen die Ungewissheiten, die sich mit dem Bau von fünf neuen regionalen Zwischenlagern verbinden ähnlich wie jene, die mit dem Bau des neuartigen zentralen Oberflächenlagers in Verbindung stehen.

Bei den Ungewissheiten im Zusammenhang mit baulichen Aktivitäten zeichnet sich kein wesentlicher Unterschied zwischen den Entsorgungsoptionen ab.

Betriebliche Aktivitäten. In der vorliegenden Phase sind weder ein Tiefen- noch ein Oberflächenlager in Betrieb.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit betrieblichen Aktivitäten unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Ungewissheiten betreffen voraussichtlich vor allem Sicherungsrisiken für die Zwischenlager, die aus mangelnder Akzeptanz in der breiten und direkt betroffenen Bevölkerung, terroristischen Angriffen und Angriffen von Einzeltätern, darunter möglichen Innentätern, resultieren. Die größten Ungewissheiten zu diesen Risiken bestehen bei den Tiefenlageroptionen, weil sich aus heutiger Sicht schlecht einschätzen lässt, wie die neuen Zwischenlager in der Bevölkerung aufgenommen werden und ob die erforderlichen Transporte zwischen den alten und den neuen Zwischenlagern als Anlass für Angriffe genutzt werden.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endla-

gerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Fazit 3.2.4: Ungewissheiten, die mit den auf dem Entsorgungspfad erforderlichen Aktivitäten verbunden sind, wirken sich in der vorliegenden Phase bei der Oberflächenlagerung weniger stark aus als bei den Tiefenlageroptionen.

3.2.5. Abwägung

Beim Oberflächenlager sind in der vorliegenden Phase mehrere wichtige Verfahrensschritte zu durchlaufen, die jeweils auch einen erheblichen Einsatz von Ressourcen voraussetzen. Daher bestehen beim Oberflächenlager viele Ungewissheiten, die den Verlauf der vorliegenden Phase und die mit dieser Phase verbundenen Risiken betreffen.

Das Standortauswahlverfahren für die Tiefenlager ist mit weniger Ungewissheiten verbunden. Zum einen kann hier bereits auf vielfältige Vorarbeiten und Erfahrungen aufgebaut werden. Zum anderen ist die vorliegende Phase so angelegt, dass genügend Zeit zur Verfügung steht, um ein mehrstufiges Standortauswahlverfahren durchzuführen und dabei schrittweise Ungewissheiten zu reduzieren. Aufwendig und mit größeren Ungewissheiten verbunden ist jedoch der Ersatz der bestehenden Zwischenlager durch neue zentrale Zwischenlager, der angesichts der langen Zeitspanne, die bis zur Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in ein Tiefenlager verstreicht, notwendig erscheint.

In der vorliegenden Phase bestehen zu allen drei Entsorgungsoptionen erhebliche Ungewissheiten. Aus heutiger Perspektive lässt sich nicht einschätzen, welche Option am günstigsten abschneidet.

3.3. Mittlere Zukunft

ca. Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungslösung

3.3.1. Wichtigste Schritte

- Bau der Entsorgungsanlage (Tiefenlager)
- Einlagerung der Abfälle und Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

3.3.2. Dauer der vorliegenden Phase

Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption. Welche der drei untersuchten Entsorgungsoptionen in der vorliegenden Phase aufgrund grundsätzlicher Überlegungen zum besten Entsorgungspfad die größte Akzeptanz finden wird, lässt sich heute nicht vorhersagen. Möglicherweise stehen in der laufenden Phase zusätzliche neue Entsorgungsoptionen im Vordergrund der Aufmerksamkeit von Fachleuten, Politik und interessierter Öffentlichkeit.

Falls das Oberflächenlager seinen Betrieb wie geplant aufnehmen kann und sich die Bedrohungslage nicht wesentlich verändert, ist anzunehmen, dass das Oberflächenlager in der vorliegenden Phase die größte Akzeptanz finden wird. Die Anlage ist zu Beginn der Phase bereits betriebsbereit, befindet sich auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik und erfordert – anders als die Tiefenlageroptionen – keinen außergewöhnlich hohen Einsatz von Ressourcen für den Bau der Entsorgungsanlage mehr.

Welche der beiden Tiefenlageroptionen in der vorliegenden Phase die größere Akzeptanz finden wird, lässt sich aus heutiger Perspektive nicht entscheiden. Gegenwärtig deutet vieles darauf hin, dass die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit gesellschaftlich besser akzeptiert wird als die Endlagerung. Sollte sich diese Situation in der vorliegenden Phase zugunsten der Endlagerung verschieben, könnte das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit

zumindest zu Beginn der Phase wohl noch auf ein Endlager reduziert werden. Später wäre die Reduktion eines zweisöhligen auf ein einsöhliges Bergwerk mit höheren Anforderungen verbunden und würde wohl auch Fragen zur Sicherheit der „nachgebesserten“ Anlage aufwerfen.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Akzeptanz der Entsorgungsoption zurückgehen, dürften aus heutiger Sicht bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ausfallen.

Akzeptanz und Durchführung der Verfahren. Bei den beiden Tiefenlageroptionen stehen im Verlauf der Bauphase Entscheidungen zum konkreten weiteren Verlauf der baulichen Arbeiten über und unter Tage an. Diese Entscheidungen können durch unerwartete Befunde erschwert und verzögert werden, zum Beispiel, wenn sich das Wirtsgestein lokal nicht so wie erwartet verhalten sollte. Das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit birgt mehr Ungewissheiten als die Endlagerung, da die Anlage sowohl über als auch unter Tage komplexer ist und mehr Raum im geologischen Untergrund beansprucht.

Bei den Tiefenlagern wird sich voraussichtlich der Einbezug betroffener gesellschaftlicher Gruppen in die Entscheidungsfindung, zum Beispiel zur konkreten Ausgestaltung des Monitorings während der Bauphase, positiv auf die Akzeptanz der Verfahren auswirken, die während der vorliegenden Phase durchzuführen sind. Eine hohe Belastung der Bevölkerung, die in der Umgebung der Baustelle lebt, zum Beispiel durch Emissionen oder Störfälle, wird die Akzeptanz dagegen negativ beeinflussen.

Beim Oberflächenlager spielen Ungewissheiten, die sich mit der Akzeptanz und Durchführung von Verfahren verbinden, in der vorliegenden Phase wahrscheinlich eine geringere Rolle als bei den Tiefenlagern, da viele wichtige Verfahren bereits in der vorangegangenen Phase abgeschlossen wurden. Wichtige Entscheidungen betreffen vor allem die

schrittweise Inbetriebnahme des Lagers, Transporte zum Lager sowie den Ausbau der Entsorgungsanlage um weitere Module. Falls die Entsorgungsoption Oberflächenlagerung gesellschaftlich gut akzeptiert wird (vgl. vorangehender Abschnitt), werden diese Entscheidungen voraussichtlich wenig Aufmerksamkeit in der interessierten Öffentlichkeit erfahren und ebenfalls auf gute Akzeptanz treffen.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf Akzeptanz und Durchführung von Verfahren zurückgehen, dürften aus heutiger Sicht bei der Oberflächenlagerung geringer sein als bei den beiden Tiefenlageroptionen.

Verfügbarkeit von Ressourcen. Der Bau eines Tiefenlagers setzt erhebliche Ressourcen voraus – sowohl finanzieller und materieller Art als auch personelle Ressourcen, Kompetenzen und Erfahrung. Für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit gilt dies noch in höherem Maß als für ein Endlager, weil diese Anlage komplexer ist und mehr Hohlräume aufzufahren sind. Zudem müssen in der vorliegenden Phase bei den Tiefenlageroptionen weiterhin der Betrieb, der Unterhalt und Nachrüstungen der Zwischenlager gewährleistet sein. Ausreichende Ressourcen stehen nur zur Verfügung, wenn geeignete gesellschaftliche Rahmenbedingungen vorhanden sind. Die gesellschaftliche Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten ist jedoch mit erheblichen Ungewissheiten verbunden. Bei der Tiefenlagerung ist daher in hohem Maß ungewiss, wie sich die Verfügbarkeit von Ressourcen auf die Dauer der Bauphase auswirkt.

Beim Oberflächenlager werden in der vorliegenden Phase zunächst viele Ressourcen für die Transporte der Abfälle zum Oberflächenlager, den Einlagerungsbetrieb und den Rückbau der Zwischenlager benötigt. Anschließend geht das Oberflächenlager in einen Langzeitbetrieb über, der voraussichtlich nur Instandhaltungsarbeiten und ggf. einzelne Nachrüstun-

gen erfordert. Über die gesamte Phase betrachtet, erfordert der Betrieb des Oberflächenlagers daher deutlich weniger Ressourcen als die Errichtung eines Tiefenlagers und ist daher auch mit weniger Ungewissheiten behaftet, die auf die Verfügbarkeit von Ressourcen zurückzuführen sind.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf die Verfügbarkeit von Ressourcen zurückgehen, fallen aus heutiger Sicht bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung aus und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Neue Nutzungsformen der Geosphäre. Verschiedene Gründe könnten dazu führen, dass Menschen in der vorliegenden Phase zunehmend Aktivitäten in den Untergrund verlegen: Raum kann intensiver genutzt werden, klimatischen Extremen kann ausgewichen werden, neue energetische und stoffliche Ressourcen lassen sich erschließen, Energieträger können im Untergrund zwischengelagert werden, unerwünschte Stoffe wie Kohlendioxid lassen sich im Untergrund entsorgen. Falls sich menschliche Aktivitäten mehr und mehr in die Geosphäre hinein bewegen sollten, wird sich dies voraussichtlich auch in einem erheblichen Fortschritt der Technologien niederschlagen, die zur Nutzung des Untergrunds entwickelt werden. In diesem Fall könnte sich der Bau eines Tiefenlagers effizienter gestalten als dies aus heutiger Perspektive der Fall ist und ggf. deutlich beschleunigen. Evtl. würde die zunehmende Nutzung des Untergrunds aber auch dazu führen, dass von den bei ENTRIA untersuchten Tiefenlageroptionen Abstand genommen und eine andere Entsorgungslösung gesucht wird. Beim Oberflächenlager würde ggf. darüber nachgedacht, den Betrieb des Lagers frühzeitig zu beenden und die Entsorgungsanlage unter Tage zu verlegen, wenn sich der Bau eines Tiefenlagers erheblich vereinfacht und kostengünstiger gestalten lässt. Die Auswirkungen auf die Dauer der vor-

liegenden Phase sind bei allen drei untersuchten Entsorgungsoptionen gleichermaßen ungewiss.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die auf neue Nutzungen des geologischen Untergrunds zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Fazit 3.3.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

3.3.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung des Inventars zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Ungewissheiten verbinden sich vor allem mit der Entwicklung der Abfallmatrix und der Entwicklung der Transport- und Zwischenlagerbehälter. Zwischen den beiden Tiefenlageroptionen besteht in dieser Hinsicht kein Unterschied. Bei diesen beiden Optionen wurden in der vorangegangenen Phase wahrscheinlich im Hinblick auf die Transporte zu den neuen Zwischenlagern und die Einlagerung in die neue Zwischenlagerung durch gezielte Untersuchungen Ungewissheiten abgebaut.

Beim Oberflächenlager dagegen sind Ungewissheiten in der vorliegenden Phase von höherer Relevanz, weil sie Risiken betreffen, die mit den Transporten, vor allem aber der Umverpackung der hoch radioaktiven Abfälle in Zusammenhang stehen. Im Verlauf der Phase werden die Kapselung von Brennelementen – oder eine andere Maßnahme zur Gewährleistung der Handhabbarkeit der Brennelemente – und die Umverpackung der Abfälle dann jedoch dazu beitragen, dass sich Ungewissheiten, die mit Entwicklungen der Behälter und von deren Inhalt in Verbindung stehen, vermindern – vor allem, weil Kapselung und Umverpackung Anlass bieten, den Zustand der Abfälle zu überprüfen und genauer zu untersuchen.

Nach der Umverpackung sollten die Ungewissheiten zum Zustand der Behälter und von deren Inhalt geringer ausfallen als beim weiteren Verbleib der Abfälle in den Transport- und Zwischenlagerbehältern, wie dies in der vorliegenden Phase bei der Tiefenlagerung noch der Fall ist.

Die Ungewissheiten, die die Entwicklung des Inventars der Entsorgungsanlage betreffen, sind über die gesamte Phase betrachtet bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen ähnlich.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase lassen sich aus heutiger Perspektive kaum noch einschätzen. Die Tiefenlager stellen in der vorliegenden Phase die höchsten Anforderungen an Ressourcen (siehe oben) und gesellschaftliche Aktivitäten. Im Fall einer gesellschaftlichen Krise dürfte sich daher der Weg zu einem Tiefenlager, insbesondere zu der aufwendigen Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, als besonders ungewiss erweisen.

Die Ungewissheiten, die sich mit gesellschaftlichen Entwicklungen verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Biosphäre. Die generellen Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre an den Standorten der Entsorgungsanlagen und zu Entwicklungen der Biosphäre während der Phase werden aus heutiger Perspektive als bei allen drei Entsorgungsoptionen vergleichbar eingestuft.

Der Bau der Tiefenlager wird die Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage merklich beeinflussen. Unter Umständen wirken sich diese Einflüsse auf Menschen aus, insbesondere die Anwohner der Anlage. Die vorliegende Phase ist daher bei den Tiefenlagern mit mehr Ungewissheiten

hinsichtlich von Entwicklungen der Biosphäre verbunden als der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers.

Die Ungewissheiten zu Entwicklungen der Biosphäre sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Geosphäre betreffen in der vorliegenden Phase voraussichtlich nur die Tiefenlager. Dort werden sie im Verlauf der Phase durch Untersuchungen und Forschungsarbeiten reduziert. Aufgrund der höheren Komplexität der Anlage stehen sie bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker im Vordergrund als bei der Endlagerung.

Ungewissheiten, die das geologische Umfeld betreffen, sind bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten und bei der Oberflächenlagerung am geringsten.

Fazit 3.3.3: Ungewissheiten, die mit allgemeinen Entwicklungen verbunden sind, wirken sich bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit in der betrachteten Phase am stärksten und bei der Oberflächenlagerung am geringsten aus.

3.3.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Bei den Tiefenlagern wird der Bau der über- und untertägigen Anlagen voraussichtlich immer wieder Teilgenehmigungen und Anpassungen bei der Planung erfordern, was mit Ungewissheiten dazu einhergeht, ob, wann und in welcher Art und Weise diese Anpassungen und Genehmigungen erfolgen. Aufgrund der höheren Komplexität der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit

werden die Ungewissheiten hier voraussichtlich größer ausfallen als bei der Endlagerung.

Beim Oberflächenlager sind in der vorliegenden Phase Planungen und Verfahren vor allem für die Transporte radioaktiver Abfälle zum Oberflächenlager, für die Außerbetriebnahme und für den Rückbau der Zwischenlager erforderlich. Die Aktivitäten, die mit der Instandhaltung des Oberflächenlagers selbst in Verbindung stehen, sowie erste Planungen für die nachfolgende Entsorgungslösung dürften im Vergleich dazu eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt werden die Ungewissheiten, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, für das Oberflächenlager geringer als für die Tiefenlager eingestuft.

Die Ungewissheiten, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Forschung und Entwicklung. Bis zur Inbetriebnahme der Tiefenlager werden weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sein. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bedingt einen höheren Aufwand als die Endlagerung, da hier zusätzliche Arbeiten zum Monitoring und zur Rückholbarkeit erforderlich sind. Daher werden auch die Ungewissheiten bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer eingeschätzt als bei der Endlagerung.

Beim Oberflächenlager wird der Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit der Inbetriebnahme voraussichtlich deutlich nachlassen. Damit verringern sich auch Ungewissheiten, die auf Forschung und Entwicklung zurückgehen.

Die Ungewissheiten, die sich mit Forschung und Entwicklung verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Bei den Tiefenlagern muss in dieser Phase die Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle fortgeführt werden. Aus heutiger Sicht ist offen, ob die gegenwärtigen Anforderungen an eine laufende Verbesserung der Sicherheit von Zwischenlagern auch in Zukunft übernommen und eingehalten werden (können). Dies gilt insbesondere während der vorliegenden Phase, in der erhebliche Ressourcen in den Bau eines Tiefenlagers investiert werden müssen, die Nutzung der Kernenergie aber bereits länger zurückliegt, so dass zumindest in Deutschland auch Engpässe bei Personen mit der erforderlichen Fachkompetenz und Erfahrung naheliegend sind. Falls der Gesellschaft Ressourcen oder die Bereitschaft fehlen, die Abfälle weiter sicher zwischenzulagern, könnte es während dem Bau des Tiefenlagers zu einem Anwachsen der Risiken kommen, die auf die Zwischenlagerung zurückgehen.

Auch das sich in der laufenden Phase abzeichnende Ende des Betriebs der Zwischenlager kann mit erhöhten Ungewissheiten verbunden sein, beispielsweise aufgrund nachlassender Investitionen in sicherheitsgerichtete technische und bauliche Maßnahmen oder aufgrund nachlassender Motivation der Mitarbeitenden, die sich auf die Sicherheitskultur der jeweiligen Betriebe auswirkt.

Zwischen den beiden Tiefenlageroptionen bestehen keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf die Ungewissheiten, die mit der Verpackung und mit Transporten von hoch radioaktiven Abfällen in Verbindung stehen.

Beim Oberflächenlager sind zu Beginn der Phase über etwa 20 Jahre hinweg Transporte aus den Zwischenlagern in das Oberflächenlager erforderlich. Die Zwischenlager werden nach und nach außer Betrieb genommen. Die Übergangsphase vom Betrieb der Zwischenlager zu deren Au-

ßerbetriebnahme und Stilllegung wird voraussichtlich mit erhöhten Ungewissheiten verbunden sein, beispielsweise zur Sicherheitskultur in den Zwischenlagern und zum technischen Zustand dieser Anlagen in den Jahren vor ihrer Außerbetriebnahme.

Die Ungewissheiten, die sich mit Verpackung, Zwischenlagerung und Transporten verbinden, werden beim Oberflächenlager am größten eingeschätzt. Hier finden über einen längeren Zeitraum Transporte hoch radioaktiver Abfälle statt, die ebenso wie der auslaufende Betrieb der Zwischenlager mit Ungewissheiten verbunden sind.

Bei der Tiefenlagerung stehen die in der vorangegangenen Phase errichteten Zwischenlager dagegen im weitgehend stabilen Langzeitbetrieb. Transporte hoch radioaktiver Abfälle sind nicht geplant.

Die Ungewissheiten zu Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung sind bei der Oberflächenlagerung größer als bei den Tiefenlageroptionen.

Bauliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlagern finden in der vorliegenden Phase umfangreiche bauliche Arbeiten statt – sowohl über- als auch untertägig. Diese Arbeiten sind mit erheblichen Ungewissheiten verbunden. Diese Ungewissheiten betreffen vor allem

- die Stabilität der politischen Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf den Verlauf der baulichen Aktivitäten
- den Ablauf der erforderlichen Verfahren, die sich zum Beispiel aufgrund von Einsparungen verzögern können
- die Verfügbarkeit der erforderlichen personellen, finanziellen und materiellen Ressourcen
- die Beschaffenheit des geologischen Untergrunds
- die Entwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik bis zum Beginn und während der vorliegenden Phase
- die Zusammenarbeit der beteiligten Organisationen und Personen

- das Auftreten von Ereignissen wie Unfällen, Störfällen oder Angriffen auf die Baustelle

Da die Entsorgungsanlage bei der Endlagerung einfacher konzipiert ist als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, dürften die Ungewissheiten bei der Endlagerung geringer ausfallen als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Bei beiden Tiefenlageroptionen sind in der vorliegenden Phase zudem Unterhaltsmaßnahmen an Zwischenlagern erforderlich.

Beim Oberflächenlager sind bauliche Arbeiten in der vorliegenden Phase von deutlich geringerer Bedeutung als bei den Tiefenlagern. Allerdings müssen die Zwischenlager nach und nach rückgebaut werden, nachdem die dort gelagerten Abfälle in das Oberflächenlager verbracht worden sind. Die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten verbinden, werden jedoch geringer eingeschätzt als bei den Tiefenlagern, da der Rückbau von Zwischenlagern mit weniger organisatorischen und bautechnischen Herausforderungen verbunden ist als die Errichtung eines Tiefenlagers mit allen seinen Anlagenteilen.

Die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Betriebliche Aktivitäten. Die Tiefenlager stehen in der vorliegenden Phase noch nicht in Betrieb.

Das Oberflächenlager wird zu Beginn der laufenden Phase in Betrieb genommen. Die erforderlichen Aktivitäten sind näher unter 4.3.2 beschrieben.

Es ist damit zu rechnen, dass insbesondere der Beginn des Einlagerungsbetriebs mit erhöhten Ungewissheiten verbunden ist, weil mit der neuen Anlage erst Erfahrungen gesammelt werden müssen.

Da der Betrieb des Oberflächenlagers während der gesamten Phase ohne erhebliche weitere Investitionen möglich ist, ist zu erwarten, dass das Lager auch im Fall mangelnder Ressourcen oder mangelnden Willens in der Gesellschaft, die Entsorgung weiter voranzubringen, in Betrieb genommen oder sein Langzeitbetrieb weitergeführt würde. Dies gilt allerdings nur dann, wenn die Errichtung der Module des Oberflächenlagers zu Beginn der vorliegenden Phase bereits weit fortgeschritten ist.

Ungewissheiten im Zusammenhang mit betrieblichen Aktivitäten betreffen nur die Oberflächenlagerung.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die Bedrohungslage in der vorliegenden Phase lässt sich aus heutiger Sicht nicht mehr einschätzen.

Die größten Ungewissheiten dürften sich mit Sicherungsrisiken verbinden, die die Zwischenlager und Transporte radioaktiver Abfälle betreffen. Bei den Tiefenlageroptionen befindet sich das gesamte Inventar an hochradioaktiven Abfällen in der vorliegenden Phase in fünf zentralen Zwischenlagern, die in der vorangegangenen Phase in Betrieb genommen wurden. Beim Oberflächenlager läuft der Betrieb der bereits heute bestehenden Zwischenlager zu Beginn der vorliegenden Phase aus. Die Abfälle werden nach und nach von den Zwischenlagern in das Oberflächenlager verbracht. Sowohl der auslaufende Betrieb der älteren Zwischenlager als auch die Transporte und der anlaufende Betrieb des Oberflächenlagers bieten viel Potential für Ungewissheiten.

Im Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers ist dagegen mit geringeren Ungewissheiten, die Sicherung und Kernmaterialüberwachung betreffen, zu rechnen. Lediglich die Ungewissheiten über künftige kriegerische Ereignisse und deren Auswirkungen lassen sich beim Oberflächenlager ebenso wie bei den Zwischenlagern kaum reduzieren. Der bei ENTRIA vorgesehene modulare Aufbau des Oberflächenlagers, bei dem einzelne

Einheiten verschlossen und gesichert werden können (Reichardt, 2016, S. 3), ist geeignet, die Auswirkungen unerwarteter Ereignisse zu begrenzen.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung werden bei der Oberflächenlagerung höher eingestuft als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Fazit 3.2.4: Bei den Ungewissheiten, die mit den auf dem Entsorgungspfad erforderlichen Aktivitäten verbunden sind, zeigen sich in der betrachteten Phase zwischen den untersuchten Entsorgungsoptionen keine wesentlichen Unterschiede.

3.3.5. Abwägung

Die Errichtung der Tiefenlager fordert erhebliche Ressourcen und günstige gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Ob diese Voraussetzungen in der vorliegenden Phase gegeben sein werden, ist aus heutiger Sicht weitgehend ungewiss. Auch zur Beschaffenheit des geologischen Untergrunds bestehen in der vorliegenden Phase voraussichtlich noch Ungewissheiten. Zudem muss der sichere Weiterbetrieb der zentralen Zwischenlager über die gesamte Phase hinweg gewährleistet sein.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stellt höhere Anforderungen an den Bau der Entsorgungsanlage als die Endlagerung. Daher sind auch die Ungewissheiten, die sich mit dieser Option verbinden, größer als bei der Endlagerung.

Das Oberflächenlager nimmt zu Beginn der vorliegenden Phase seinen Betrieb auf. Während dem Antransport der Abfälle, ihrer Umverpackung und Einlagerung bestehen Ungewissheiten zu den Risiken, die sich mit diesen Aktivitäten verbinden. Zudem müssen in der laufenden Phase die bestehenden Zwischenlager stillgelegt werden.

Anders als bei den Tiefenlagern wurde die Entsorgungsanlage beim Oberflächenlager bereits errichtet und nimmt im Verlauf der vorliegenden Phase den Langzeitbetrieb auf. Dies wirkt sich voraussichtlich günstig auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Option aus, stellt aber vor allem auch geringere Anforderungen an die Verfügbarkeit von Ressourcen und günstige gesellschaftliche Rahmenbedingungen als der Bau der Tiefenlager.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten zu Oberflächenlagerung geringer als jene zu Endlagerung, die Ungewissheiten zu Endlagerung geringer als jene zu Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

3.4. Weitere Zukunft

ca. Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungslösung

3.4.1. Wichtigste Schritte

- Einlagerung der Abfälle (Tiefenlager)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

3.4.2. Dauer der vorliegenden Phase

Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption. Welche der drei untersuchten Entsorgungsoptionen in der vorliegenden Phase die größte Akzeptanz finden wird, lässt sich heute nicht vorhersagen.

Falls sich beim Oberflächenlager bereits ein stabiler Langzeitbetrieb herausgebildet hat, dürfte diese Situation die gesellschaftliche Akzeptanz begünstigen. Falls Mängel an der Anlage oder im Betrieb erkennbar werden, ist mit nachlassender Akzeptanz zu rechnen.

Bei den Tiefenlagern könnte der beginnende Einlagerungsbetrieb noch einmal zu Kontroversen führen. Dies gilt insbesondere für das Endlager, das am Ende der laufenden Phase dem Verschluss entgegensieht und damit aus der aktiven Bewirtschaftung und dem Monitoring untertage entlassen werden soll. Denkbar ist aber auch, dass sich die Akzeptanz der Tiefenlager in der vorliegenden Phase verbessert, weil nun eine dauerhafte Lösung des Entsorgungsproblems in greifbare Nähe gerückt ist.

Bei den Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der Akzeptanz der Entsorgungsoptionen in Verbindung stehen, zeichnen sich heute keine klaren Unterschiede zwischen den Entsorgungsoptionen ab.

Verfügbarkeit von Ressourcen. Die Transporte zum Tiefenlager, der Einlagerungsbetrieb eines Tiefenlagers und der Rückbau der Zwischenlager

setzen erhebliche Ressourcen voraus – sowohl finanzieller und materieller Art als auch personelle Ressourcen, Kompetenzen und Erfahrung. Für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit gilt dies in noch höherem Maß als für ein Endlager. Ausreichende Ressourcen stehen nur dann zur Verfügung, wenn geeignete gesellschaftliche Rahmenbedingungen vorhanden sind. Die gesellschaftliche Entwicklung in der vorliegenden Phase ist aus heutiger Perspektive mit erheblichen Ungewissheiten verbunden.

Beim Oberflächenlager sind neben dem laufenden Betrieb voraussichtlich nur Instandhaltungsarbeiten und ggf. einzelne Nachrüstungen erforderlich. Der Ressourcenbedarf ist daher deutlich geringer als bei den Tiefenlagern und die entsprechenden Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase fallen weniger stark ins Gewicht.

Bei den Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der Verfügbarkeit von Ressourcen in Verbindung stehen, schneiden das Oberflächenlagerung am günstigsten und das Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am ungünstigsten ab.

Raumnutzungskonflikte. Es ist davon auszugehen, dass sowohl der Standort des Oberflächenlagers als auch die Standorte der Tiefenlager im Verlauf des Standortauswahlverfahrens raumplanerisch für längere Zeit gesichert wurden. Im Fall der Tiefenlager gilt dies ebenfalls für den tiefen Untergrund.

Dennoch ist nicht ganz auszuschließen, dass es in der vorliegenden Phase zu Raumnutzungskonflikten kommt. Das Standortauswahlverfahren liegt bereits mehrere Jahrzehnte zurück. Veränderungen bei den Anforderungen an die Raumplanung und den Maßstäben, die bei der Raumplanung angelegt werden, sind vorstellbar. Raumnutzungskonflikte können die Dauer der Phase beeinflussen – etwa, weil politisch anspruchsvolle Inte-

ressenabwägungen erforderlich sind oder weil nach technischen Lösungen gesucht werden soll, um die Konflikte zu entschärfen.

Die Ungewissheiten, die auf solche Raumnutzungskonflikte zurückgehen, werden bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen ähnlich eingestuft, obwohl bei den Tiefenlagern nicht nur die Raumnutzung an der Erdoberfläche und in der Nähe der Erdoberfläche, sondern auch im tieferen Untergrund betroffen ist.

Bei den Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der Raumnutzung in Zusammenhang stehen, zeichnen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Entsorgungsoptionen ab.

Fazit 3.4.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

3.4.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung des Inventars zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Ungewissheiten verbinden sich in erster Linie mit der Entwicklung der Abfallmatrix und der Entwicklung der Transport- und Zwischenlager- bzw. der Lagerbehälter.

Im Oberflächenlager wurden die Abfälle bereits in der vorangehenden Phase umverpackt und dabei deren Zustand genauer erfasst. Die sicherheitsrelevanten Ungewissheiten zum Zustand der Behälter und von deren Inhalt wurden dadurch vermindert. Wir gehen davon aus, dass unter anderem aufgrund von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfassende Kenntnisse zum Zustand und Verhalten der Lagerbehälter aufgebaut wurden, die Qualität der Behälterfertigung gesichert wurde und auch während der langfristigen Lagerung im Oberflächenlager wirksame Kontrollen erfolgen.

Bei den Tiefenlagern werden in der vorliegenden Phase die Abfälle vor der Einlagerung aus den Transport- und Zwischenlagerbehältern in Endlagerbehälter umverpackt. Dadurch reduzieren sich die Ungewissheiten zum Zustand der älteren Transport- und Zwischenlagerbehälter und von deren Inhalten nach und nach. Auch hier gehen wir davon aus, dass unter anderem aufgrund von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfassende Kenntnisse zum Zustand und Verhalten der Endlagerbehälter aufgebaut wurden, die Qualität der Behälterfertigung gesichert wurde und auch während der Einlagerung noch wirksame Kontrollen erfolgen. Zwischen den beiden Tiefenlageroptionen besteht voraussichtlich kein Unterschied. Da bei den Tiefenlagern bis gegen Ende der vorliegenden Phase jedoch noch Abfälle in alten Transport- und Lagerbehältern vorhanden sind, beurteilen wir die Ungewissheiten, die sich mit dem Inventar des Oberflächenlagers verbinden, als geringer als die Ungewissheiten im Zusammenhang mit dem Inventar der Tiefenlager.

Die Ungewissheiten, die die Entwicklung des Inventars der Entsorgungsanlage betreffen, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen in dieser Phase lassen sich aus heutiger Perspektive nicht mehr einschätzen. Die Tiefenlager stellen in der vorliegenden Phase die höchsten Anforderungen an Ressourcen (siehe oben) und Aktivitäten. Im Fall einer gesellschaftlichen Krise dürfte sich daher der Weg zu einem Tiefenlager, insbesondere zu der aufwendigen Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, weiterhin als besonders ungewiss erweisen.

Die Ungewissheiten, die sich mit gesellschaftlichen Entwicklungen verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und

bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Biosphäre. In der laufenden Phase können vielfältige Einflüsse dazu beitragen, dass sich die Biosphäre an den Standorten der Entsorgungsanlagen und in deren Umfeld verändert. Ein wichtiger Einfluss ist der Betrieb der Entsorgungsanlagen. Andere Veränderungen gehen unter Umständen auf Einflüsse wie eine sich wandelnde Raumnutzung, natürliche Fluktuationen in Lebensgemeinschaften oder den Klimawandel zurück.

Die Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre an den Standorten der Entsorgungsanlagen und zu Entwicklungen der Biosphäre während der laufenden Phase werden aus heutiger Perspektive bei den Tiefenlagern größer als beim Oberflächenlager eingestuft. Dieser Einschätzung liegt die Annahme zugrunde, dass der stabile Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers in der laufenden Phase nur noch wenig Einfluss auf die bestehenden Lebensgemeinschaften nimmt und von Veränderungen der Lebensgemeinschaften auch nur wenig beeinflusst wird. Bei den Tiefenlagern dagegen sind nach Abschluss der Bauphase und mit der Aufnahme des Einlagerungsbetriebs vielfältigere und tiefergreifende Wechselwirkungen mit dem Umfeld zu erwarten, die auch mit Ungewissheiten verbunden sind.

Die Ungewissheiten, die die Entwicklung der Biosphäre betreffen, sind aus heutiger Perspektive bei der Oberflächenlagerung am geringsten.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Geosphäre betreffen in der vorliegenden Phase voraussichtlich nur die Tiefenlager, sind allerdings weniger ausgeprägt als während dem Bau dieser Lager. Aufgrund der höheren Komplexität der Anlage stehen sie bei der Tiefen-

lagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker im Vordergrund als bei der Endlagerung.

Ungewissheiten, die das geologische Umfeld betreffen, sind bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten und bei der Oberflächenlagerung am geringsten.

Fazit 3.3.3: Ungewissheiten, die mit allgemeinen Entwicklungen verbunden sind, wirken sich in der betrachteten Phase bei der Oberflächenlagerung weniger stark aus als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung weniger stark als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

3.4.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Bei den Tiefenlagern wird der Einlagerungsbetrieb voraussichtlich immer wieder Teilgenehmigungen, ggf. auch Anpassungen bei der Planung erfordern, was mit Ungewissheiten dazu einhergeht, ob, wann und in welcher Art und Weise diese Anpassungen und Genehmigungen erfolgen. Aufgrund der höheren Komplexität der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit werden die Ungewissheiten hier voraussichtlich größer ausfallen als bei der Endlagerung. Anders als bei der Endlagerung müssen bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit in der vorliegenden Phase beispielsweise Entscheidungen getroffen werden, um eine längere Offenhaltung des Lagers zu ermöglichen, um die Überwachung während des Monitoringzeitraums vorzubereiten und um die Rückholbarkeit sicher zu stellen. Bei den Tiefenlagern sind zudem Planung und Verfahren erforderlich, die mit der Stilllegung der Zwischenlager in Verbindung stehen.

Beim Oberflächenlager sind in der vorliegenden Phase weniger Aktivitäten erforderlich. Denkbar ist, dass die Betriebsgenehmigung zunächst nur befristet erteilt wurde und in der vorliegenden Phase verlängert werden muss. Denkbar ist auch, dass Genehmigungen für Instandhaltung, Nach-

rüstung und Änderungen betrieblicher Abläufe in der Anlage eingeholt und erste Planungsarbeiten für den weiteren Entsorgungspfad vorgenommen werden.

Insgesamt werden die Ungewissheiten, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, für das Oberflächenlager geringer als für die Tiefenlager eingestuft.

Die Ungewissheiten, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Forschung und Entwicklung. Bei den Tiefenlagern gehen die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Vergleich zur vorangegangenen Phase zurück. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bedingt einen höheren Aufwand als die Endlagerung, da hier weiterhin Arbeiten zum Monitoring und ggf. auch zur Gewährleistung der Rückholbarkeit erforderlich sind. Daher werden auch die Ungewissheiten bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer eingeschätzt als bei der Endlagerung.

Beim Oberflächenlager hat der Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Langzeitbetrieb nachgelassen. Damit verringern sich auch Ungewissheiten, die auf Forschung und Entwicklung zurückgehen. Offen ist allerdings, wie intensiv in dieser Phase bereits für den nachfolgenden Entsorgungspfad vorgearbeitet wird. Daher werden die Ungewissheiten für das Oberflächenlager als verhältnismäßig groß eingestuft.

Die Ungewissheiten, die sich mit Forschung und Entwicklung verbinden, sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Bei den Tiefenlagern finden während der gesamten Phase Transporte aus den Zwischenlagern zum Tiefenlager statt. Die Zwischenlagerung läuft im Verlauf der vorliegenden Phase aus, wobei die Lager voraussichtlich zeitlich gestuft außer Betrieb genommen werden. Die Stilllegung der Zwischenlager ist mit Ungewissheiten verbunden. Diese Ungewissheiten gehen beispielsweise darauf zurück, dass lange nach der Außerbetriebnahme der letzten Kernkraftwerke in Deutschland möglicherweise Fachkompetenzen zur Stilllegung der Zwischenlager fehlen, dass die Investitionen in sicherheitsgerichtete technische und bauliche Maßnahmen in den Zwischenlagern nachgelassen haben oder dass die Motivation der Mitarbeitenden in den Zwischenlagern abgenommen haben könnte, was sich nachteilig auf die Sicherheitskultur der jeweiligen Betriebe auswirken würde.

Beim Oberflächenlager sind keine Transporte mehr erforderlich. Die Zwischenlagerung wurde bereits in der vorangegangenen Phase eingestellt. Daher werden die Ungewissheiten, die sich mit den beiden Tiefenlageroptionen verbinden, größer als beim Oberflächenlager eingeschätzt.

Die Ungewissheiten, die sich mit Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei den beiden Tiefenlageroptionen.

Bauliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlagern werden in der vorliegenden Phase noch neue Einlagerungsstrecken aufgefahren. Einlagerungsstrecken, in die bereits Endlagerbehälter verbracht worden sind, werden verfüllt und verschlossen. Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit werden zudem ggf. neue Monitoringstrecken aufgefahren und Bohrungen für das Monitoring abgeteuft. Die regionalen Zwischenlager werden bei beiden Tiefenlageroptionen gestuft zurückgebaut.

Beim Oberflächenlager sind bauliche Arbeiten in der vorliegenden Phase von untergeordneter Bedeutung. Sie betreffen nur die Instandhaltung sowie ggf. bauliche Nachrüstungen.

Die Ungewissheiten, die sich mit Risiken aufgrund baulicher Aktivitäten verbinden, fallen daher bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten und bei der Oberflächenlagerung am geringsten aus.

Die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Betriebliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlagern ist der Einlagerungsbetrieb mit vielfältigen Ungewissheiten verbunden. Bei der Einlagerung müssen verschiedene Arbeitsschritte durchlaufen werden und dabei zunächst Erfahrungen mit dem Betrieb der über- und untertägigen Anlagenteile gesammelt werden. Beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind zudem betriebliche Aktivitäten erforderlich, die dem Monitoring dienen.

Das Oberflächenlager dagegen befindet sich weiterhin im Langzeitbetrieb. Generell beurteilen wir die Ungewissheiten, die mit dem Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers einhergehen, als geringer als jene, die mit dem Einlagerungsbetrieb der Tiefenlager in Zusammenhang stehen. Der Betrieb des Endlagers ist einfacher konzipiert als jener bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und daher auch mit weniger Ungewissheiten verbunden.

Die Ungewissheiten, die sich mit betrieblichen Aktivitäten verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Zur Bedrohungslage in der vorliegenden Phase bestehen bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen erhebliche Ungewissheiten.

Bei den Tiefenlagern betreffen Ungewissheiten zum einen die Sicherungsrisiken für die Zwischenlager und während der Transporte. Diese Ungewissheiten bestehen bei den Tiefenlagern über die gesamte Phase, nehmen aber mit der schrittweisen Außerbetriebnahme der Zwischenlager ab. Zum anderen müssen Sicherung und Kernmaterialüberwachung im Tiefenlager selbst sichergestellt werden. Die vorliegende Phase ist daher bei den Tiefenlagern mit erhöhten Ungewissheiten bezüglich Sicherungsrisiken verbunden. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit kann Sicherungsrisiken reduzieren, weil sie mit besseren Überwachungsmöglichkeiten verbunden ist. Sie kann aber auch mit erhöhten Sicherungsrisiken verbunden sein, die auf die größere Komplexität der Anlage im Vergleich zu einem Endlager zurückzuführen sind.

Kommt es während des Einlagerungsbetriebs in ein Tiefenlager zu einer gesellschaftlichen Krise, die die Bedrohungslage deutlich verschärft, könnten Abfälle evtl. beschleunigt in das Tiefenlager verbracht und dort vorübergehend besser als an der Erdoberfläche gesichert werden. Kommt es zu einer tiefen Krise, die nicht vorhergesehen wurde und schnell eintritt, können aus der Perspektive der Sicherung während des anlaufenden Betriebs des Tiefenlagers und dem auslaufenden Betrieb der Zwischenlager äußerst ungünstige Situationen eintreten. Das gilt auch für den Fall eines Krieges.

Beim Oberflächenlager ist davon auszugehen, dass sich im Langzeitbetrieb wirksame Vorkehrungen und Prozesse zur Sicherung und Kernmaterialüberwachung bereits etabliert haben. Ggf. nachteilig dürfte sich das sehr hohe Schadenpotential der Anlage auswirken, in der das gesamte Inventar an hoch radioaktiven Abfällen aus Deutschland konzentriert ist. Kommt es während des Einlagerungsbetriebs zu einer schwerwiegenden Krise, die sicherungsrelevant ist, könnte das Oberflächenlager zusätzlich gesichert werden, sofern eine ausreichende Vorlaufzeit besteht. Dies ist

jedoch voraussichtlich nicht im gleichen Maß möglich wie bei einem Tiefenlager. Kommt es zu einer tiefen Krise, die nicht vorhergesehen wurde und schnell eintritt, können aus der Perspektive der Sicherung wie bei den Tiefenlagern sehr ungünstige Situationen eintreten, insbesondere auch dann, wenn es sich bei der Krisensituation um ein kriegerisches Ereignis handelt.

Die Ungewissheiten, die sich mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei den Tiefenlageroptionen.

Fazit 3.4.4: Die Ungewissheiten, die mit den auf dem Entsorgungspfad erforderlichen Aktivitäten im Zusammenhang stehen, sind in der vorliegenden Phase bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

3.4.5. Variante Rückholung

Während des Einlagerungsbetriebs im Tiefenlager wurden noch nicht alle Abfälle in das Lager verbracht und die Zugänge zu den Einlagerungsstrecken sind zumindest teilweise noch offen. Zudem wird das Lager voraussichtlich gut mit Personal und Infrastrukturen für den Betrieb ausgestattet sein, die im Fall einer Rückholung zum Einsatz kommen könnten. In den bestehenden Zwischenlagern und den Oberflächenanlagen des Tiefenlagers sollten Kapazitäten für die Auslagerung von Abfällen vorhanden sein. Die Ungewissheiten, die sich mit einer Rückholung oder Bergung verbinden, sind daher geringer als in den nachfolgenden Phasen.

Da die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit so konzipiert wurde, dass die Rückholung erleichtert ist, fallen die Ungewissheiten hier deutlich geringer aus als bei der Endlagerung.

Die Rückholung aus dem Oberflächenlager ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand und begrenzten Risiken möglich und voraussichtlich mit

geringeren Ungewissheiten verbunden als die Rückholung aus einem Tiefenlager. Bei der Rückholung aus dem Oberflächenlager ist allerdings eher als bei der Rückholung aus einem Tiefenlager damit zu rechnen, dass ein Mangel an fachkompetentem Personal zu sicherheitsrelevanten Problemen führen könnte, da der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers verhältnismäßig wenig fachkompetentes Personal erfordert. Während eine Teilrückholung möglicherweise bewältigt werden könnte, indem die Abfälle in ein Reservemodul des Oberflächenlagers verbracht werden, erfordert die Rückholung großer Teile der Abfälle, dass zunächst wieder Zwischenlagerkapazitäten geschaffen werden.

Fazit 3.4.5: Die Ungewissheiten, die sich mit einer Rückholung der Abfälle verbinden, sind in der betrachteten Phase bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Endlagerung am größten.

3.4.6. Abwägung

Bei den Tiefenlagern werden in der vorliegenden Phase wesentliche neue Aktivitäten aufgenommen; viele Aktivitäten laufen parallel zueinander ab: Die hoch radioaktiven Abfälle werden aus den regionalen Zwischenlagern zum Standort des Tiefenlagers transportiert, die Zwischenlager voraussichtlich schrittweise stillgelegt. In den Oberflächenanlagen am Standort des Tiefenlagers müssen die Abfälle kontrolliert und in neue Behälter umgeladen werden. Anschließend werden sie in die untertägige Anlage verbracht. Dort werden sie in den Einlagerungsstrecken platziert und die Einlagerungsstrecken verfüllt und versiegelt. Parallel zum Einlagerungsbetrieb werden voraussichtlich über längere Zeit neue Einlagerungsstrecken aufgefahren.

Die vorliegende Phase ist daher bei den Tiefenlagern mit größeren Ungewissheiten verbunden als beim Oberflächenlager, das sich in einem voraussichtlich stabilen Langzeitbetrieb befindet. Beim Oberflächenlager ist

zudem eine Lösung für den weiteren Entsorgungspfad noch nicht unmittelbar erforderlich, was die Ungewissheiten, die auf Forschung, Entwicklung, Planung und Verfahren zurückgehen, in der vorliegenden Phase begrenzt.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit folgt einem aufwendigeren Konzept als die Endlagerung. In der vorliegenden Phase sind hier vor allem zusätzliche Aktivitäten erforderlich, die in Verbindung mit dem Monitoring stehen und mit Ungewissheiten einhergehen. Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit dieser Tiefenlageroption sind daher größer als bei der Endlagerung – auch wenn eine mögliche Rückholung in der vorliegenden Phase hier einfacher zu bewältigen wäre als dies bei einem Endlager der Fall ist.

In der betrachteten Phase sind die Ungewissheiten zur Oberflächenspeicherung am geringsten, jene zur Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

3.5. Ferne Zukunft

ca. Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungslösung

3.5.1. Wichtigste Schritte

- Verschluss und Rückbau der Oberflächenanlagen (Endlager)
- Monitoring, Verschluss und Rückbau der Oberflächenanlagen (Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

3.5.2. Dauer der vorliegenden Phase

Planung und Regelung der Dauer. Beim Endlager beginnt die vorliegende Phase mit dem Verschluss der untertägigen Anlage und der Stilllegung der übertägigen Anlage. Aus heutiger Sicht lässt sich der Zeitbedarf beider Schritte einigermaßen abschätzen und beträgt voraussichtlich etwa zehn Jahre. Im Vergleich zur Dauer der gesamten Phase ist dies ein verhältnismäßig kurzer Zeitraum. Sobald sich das Lager im verschlossenen Zustand befindet, nimmt aus heutiger Sicht die Wahrscheinlichkeit stark ab, dass dieser Zustand, der zuvor über lange Zeit und mit erheblichem Aufwand herbeigeführt wurde, noch einmal verändert wird. Geplant ist, dass sich das Endlager nun auf Dauer in einem passiv sicheren Zustand befindet. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind daher beim Endlager überschaubar.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist die Dauer der vorliegenden Phase zurzeit noch unbekannt. Künftige Generationen werden darüber entscheiden, wie lange der Monitoringzeitraum andauern soll oder unter welchen Voraussetzungen das Monitoring beendet wird. Dabei müssen auch Überlegungen zur Machbarkeit der Offenhaltung aus geotechnischer Sicht eine Rolle spielen. Verschiedene Wirtsgesteine eignen sich unterschiedlich gut für eine längere Offenhaltung. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind

daher bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit groß.

Das Oberflächenlager befindet sich plangemäß weiter im Langzeitbetrieb. Nach etwa 100 Jahren Lagerzeit wird das jeweilige Inventar in neue oder gewartete Transport- und Lagerbehälter umgeladen. Dabei werden die gekapselten Brennelemente, die Forschungsreaktorbrennelemente und die Kokillen mit den Wiederaufarbeitungsabfällen stichprobenweise untersucht.

Vorstellbar ist jedoch auch, dass im Verlauf der Phase entschieden wird, die Oberflächenlagerung vorzeitig zu beenden. Zum Beispiel ist denkbar, dass das Lager vorzeitig außer Betrieb genommen wird, um einen neuen Entsorgungspfad zu beschreiten, der als besser beurteilt wird, oder weil es von seiner Auslegung her den geltenden Sicherheitsanforderungen nicht mehr genügt. Andererseits besteht beim Oberflächenlager aber auch die Gefahr des Attentismus, also eines untätigen Abwartens, das die Phase erheblich verlängern könnte. Attentismus wird unter anderem begünstigt, wenn

- personelle, finanzielle oder materielle Ressourcen, die für den weiteren Entsorgungspfad benötigt werden, knapp sind oder fehlen
- die Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle nicht mehr als wesentliche Aufgabe der Gesellschaft wahrgenommen wird oder andere Herausforderungen als wichtiger und dringender beurteilt werden
- der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers „unauffällig“, das heißt störungsarm und unproblematisch verläuft, so dass das Interesse daran, das Oberflächenlager schließlich zugunsten des weiteren Entsorgungspfades aufzugeben, gering ist
- neue wissenschaftliche Erkenntnisse den geplanten weiteren Entsorgungspfad immer wieder in Frage gestellt haben und ggf. weiterhin in Frage stellen
- der weitere Entsorgungspfad politisch und gesellschaftlich kontrovers beurteilt wird, so dass wenig Aussicht darauf besteht, sich auf das weitere Vorgehen nach Beendigung der Oberflächenlagerung zu einigen

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase werden daher auch bei der Oberflächenlagerung als groß beurteilt.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der zeitlichen Planung und Regelung in Verbindung stehen, sind bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und der Oberflächenlagerung.

Verfügbarkeit von Ressourcen. Beim Endlager setzen der Verschluss und der Rückbau der obertägigen Anlagenteile noch einmal einen größeren Aufwand voraus. Die erforderlichen personellen, finanziellen und materiellen Ressourcen werden in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum zu Beginn der Phase benötigt. Angesichts der erheblichen Investitionen, die bereits in das Endlager getätigt wurden, ist damit zu rechnen, dass Verschluss und Stilllegung des Endlagers auch dann zu Ende geführt werden, wenn im entsprechenden Zeitraum Schwierigkeiten bestehen sollten, die erforderlichen Ressourcen aufzubringen oder bereitzustellen. Im weiteren Verlauf der Phase, nach dem Verschluss und der Stilllegung des Endlagers, ist der Ressourcenbedarf für Umweltmonitoring und Dokumentation voraussichtlich gering. Ressourcenprobleme wirken sich daher wahrscheinlich nicht entscheidend auf die Dauer der vorliegenden Phase beim Endlager aus. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind begrenzt.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit erfordern Monitoring und Rückholbarkeit, das Lager über einen potentiell längeren Zeitraum nach wie vor in Betrieb zu halten und auch dafür zu sorgen, dass die erforderlichen finanziellen und materiellen Ressourcen sowie ausreichende personelle Ressourcen, Fachwissen und Erfahrung vorhanden sind. Sobald die Entscheidung gefallen ist, das Tiefenlager zu verschließen, setzen der Verschluss und der Rückbau der obertä-

gigen Anlagenteile noch einmal erheblichen Aufwand voraus. Schwierigkeiten bei der Verfügbarkeit von Ressourcen führen daher zu mehr Ungewissheiten, die die Dauer der vorliegenden Phase betreffen, als beim Endlager.

Beim Oberflächenlager sind neben dem laufenden Betrieb und dem Umladen der Inventare in neue oder gewartete Transport- und Lagerbehälter Instandhaltungsarbeiten und ggf. einzelne Nachrüstungen erforderlich. Der Ressourcenbedarf für die Lagerung selbst ist über weite Teile der vorliegenden Phase hinweg weitgehend konstant. Dazu tritt jedoch das Umladen. Zu den dafür benötigten Ressourcen bestehen Ungewissheiten, da heute nicht vorhergesehen werden kann, welche sicherheitstechnischen Anforderungen gestellt werden. Zudem ist noch nicht definiert, wie groß der Zeitrahmen ist, innerhalb dessen das Umladen erfolgen soll.

Gegen Ende der laufenden Phase müssen erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um den weiteren Entsorgungspfad sicherzustellen. Falls es dabei zu Ressourcenproblemen kommen sollte, kann sich dies auf die Dauer der Phase auswirken. Vorstellbar ist etwa, dass das Oberflächenlager über die eigentlich vorgesehene Betriebsdauer hinaus genutzt wird, weil die für den weiteren Entsorgungspfad benötigten Ressourcen fehlen (siehe oben). Denkbar ist aber auch, dass eine gute Verfügbarkeit von Fachwissen, neuen entsorgungsrelevanten Kenntnissen, technischen Hilfsmitteln und finanziellen Ressourcen dazu führt, dass die vorliegende Phase erheblich verkürzt wird.

Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase, die mit der Verfügbarkeit von Ressourcen in Verbindung stehen, sind bei der Endlagerung am geringsten.

Fazit 3.5.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Endlagerung am geringsten.

3.5.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung des Radionuklidinventars zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Ungewissheiten verbinden sich in erster Linie mit der Entwicklung der technischen und natürlichen Sicherheitsbarrieren.

Beim Endlager wurde der Inhalt der Transport- und Zwischenlagerbehälter in der vorangegangenen Phase in Endlagerbehälter umverpackt, wodurch Ungewissheiten zum Zustand der Behälter und ihrem Inhalt reduziert wurden. Aus heutiger Sicht werden voraussichtlich vorgelagerte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, ein gut entwickeltes Qualitätssicherungssystem, Kontrollen und die behördliche Aufsicht dazu beitragen, die Ungewissheiten zur sicherheitsrelevanten Beschaffenheit und zum Verhalten der Endlagerbehälter in Grenzen zu halten. Nach dem Verschluss befindet sich das Inventar nach heutiger Einschätzung in einer Umgebung, deren Einwirkungen auf das Inventar gut einschätzbar sind. Anders als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und der Oberflächenlagerung kann die Entwicklung des Inventars mit den heute verfügbaren Technologien aber nicht mehr überwacht und unerwartete Entwicklungen können daher nicht frühzeitig erkannt werden.

Beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wurde der Inhalt der Transport- und Zwischenlagerbehälter in der vorangegangenen Phase ebenfalls in Endlagerbehälter umverpackt, wodurch Ungewissheiten zum Zustand der Behälter und ihrem Inhalt reduziert wurden. Aus heutiger Sicht werden wie beim Endlager voraussichtlich vorgelagerte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, ein gut entwickeltes Qualitätssicherungssystem, Kontrollen und die behördliche Aufsicht dazu beitragen, die Ungewissheiten zur sicherheitsrelevanten Beschaffenheit und zum Verhalten der Behälter in Grenzen zu halten. Da sich die Behälter in der vorliegenden Phase bereits in den verschlossenen Einlagerungsstrecken befinden, dürften die Auswirkungen der verlängerten Offenhaltung des Lagers auf das Verhalten, insbesondere die Integrität von Abfallmatrix und Behälter, gering sein. Ungewissheiten zur Entwicklung des

Inventars und der Sicherheitsbarrieren werden mit dem Monitoring abgefangen. Im Rahmen der Entwicklung generischer Behälterkonzepte bei ENTRIA (ENCON, ENTRIA-Container) wurden Vorarbeiten zur Entwicklung von Behältern geleistet, die die Behälterüberwachung in einem Tiefenlager erleichtern (smart ENCON).

Beim Oberflächenlager gehen wir davon aus, dass die Abfälle im Verlauf der vorliegenden Phase in neue Lagerbehälter umverpackt werden. Ungewissheiten zum Zustand der bisherigen Lagerbehälter wirken sich daher beim Oberflächenlager zunächst am stärksten aus. Gleichzeitig kann die Umverpackung aber auch genutzt werden, um Ungewissheiten über den Zustand des Inventars für den Rest der laufenden Phase zu vermindern. Wesentliche Motive für die Umverpackung sind, Risiken aufgrund von Alterungsschäden zu vermeiden und die Abfälle dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend neu zu verpacken.

Eine Alternative zum Umverpacken bestünde darin, ein Konzept für robuste Behälter zu entwickeln, die auf Standzeiten von mehr als 200 Jahren ausgelegt sind. Damit liessen sich erhebliche Kosten sowohl für neue Behälter als auch für den Vorgang des Umverpackens sowie die mit dem Umverpacken verbundene radiologische Belastung für Menschen vermeiden (Köhnke, 2017).

Auch beim Oberflächenlager gehen wir davon aus, dass vielfältige Maßnahmen ergriffen werden, um die sicherheitsrelevanten Ungewissheiten zu begrenzen. Abfälle und Behälter lassen sich voraussichtlich gut überwachen und bei Bedarf untersuchen. Allerdings ist in der vorliegenden Phase das Inventar im Oberflächenlager stärker als die Inventare in den Tiefenlagern möglichen Einwirkungen von außen ausgesetzt.

Die Ungewissheiten zum Inventar der Entsorgungsanlage sind in der laufenden Phase bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am geringsten.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase sind aus heutiger Perspektive nicht mehr einschätzbar. Zwischen den drei untersuchten Entsorgungsoptionen besteht diesbezüglich kein Unterschied.

Im Fall einer gesellschaftlichen Krise stellt das verschlossene Endlager aus gegenwärtiger Sicht die geeignetste Option dar, um die Ungewissheiten bezüglich der Auswirkungen von gesellschaftlichen Entwicklungen gering zu halten. Die Abfälle sind weitab von gesellschaftlichen Aktivitäten und Biosphäre untergebracht, können nur mit verhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden und erfordern keine aktiven Maßnahmen und keine erheblichen Ressourcen mehr, um die Sicherheit der Entsorgung zu gewährleisten. Aufgrund seiner Robustheit gegenüber gesellschaftlichen Entwicklungen wird das Endlager daher günstiger bewertet als die anderen beiden Optionen.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit befinden sich die Abfälle zwar ebenfalls untertage, sind aber im Vergleich zur Endlagerung leichter zugänglich. Bei der Oberflächenlagerung erfordert das hier vorgesehene Umverpacken der Abfälle vorübergehend erhebliche zusätzliche Ressourcen.

Die Ungewissheiten, die auf gesellschaftliche Entwicklungen zurückgehen, sind in der laufenden Phase bei der Endlagerung am geringsten.

Biosphäre. Die generellen Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre an den Standorten und in der Umgebung der Entsorgungsanlagen und zu Entwicklungen der Biosphäre bzw. der biologischen Konstitution von Menschen während der vorliegenden Phase werden aus heutiger Perspektive als bei allen drei Entsorgungsoptionen vergleichbar eingestuft.

Sobald das Endlager verschlossen ist, sind seine Wechselwirkungen mit der Biosphäre in der vorliegenden Phase vernachlässigbar. Zu Beginn der Phase sind allerdings noch vereinzelte Ungewissheiten zu erwarten, die

sich mit Risiken beim Verschluss der untertägigen und beim Rückbau der übertägigen Anlagenteile verbinden.

Der andauernde Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers wird nach heutiger Einschätzung nicht stark durch Entwicklungen der Biosphäre beeinflusst und auch seinerseits mit geringen Einwirkungen auf die Biosphäre verbunden sein. Das gilt auch für das Umverpacken.

Die größten Ungewissheiten verbinden sich voraussichtlich mit der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, bei der sicherheitsrelevante Wechselwirkungen mit der Biosphäre vor allem beim aktiven Monitoringbetrieb auftreten können.

Die Ungewissheiten, die auf Veränderungen in der Biosphäre zurückgehen, sind in der laufenden Phase bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten und bei der Endlagerung am geringsten.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zu Veränderungen, die die Geosphäre betreffen, sind vor allem für die Tiefenlager relevant. Aufgrund der höheren Komplexität der Anlage stehen sie bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stärker im Vordergrund als bei der Endlagerung.

Ungewissheiten, die mit dem geologischen Umfeld in Verbindung stehen, sind bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als bei der Endlagerung und dort wiederum größer als bei der Oberflächenlagerung.

Fazit 3.5.3: Die Ungewissheiten, die allgemeine Entwicklungen betreffen, sind in der vorliegenden Phase bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

3.5.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Beim Endlager wurden Verschluss und Rückbau bereits in der vorangegangenen Phase geplant und genehmigt. In der vorliegenden Phase geht es noch um die Detailplanung und Ausführung der entsprechenden Arbeiten. Nach dem Verschluss und der Stilllegung sind Planung und Verfahren nur noch in sehr reduziertem Umfang für das Umweltmonitoring und die Longterm Stewardship erforderlich. Die Ungewissheiten, die Planung und Verfahren betreffen, sind daher beim Endlager vergleichsweise gering.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit befindet sich während der laufenden Phase in einem Monitoringzeitraum, dessen Dauer heute unbekannt ist. Nach der Entscheidung, das Monitoring zu beenden, müssen der Verschluss der untertägigen und die Stilllegung der übertägigen Anlagen vorbereitet werden. Die Ungewissheiten, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, fallen daher deutlich größer als beim Endlager aus.

Für die weitere Oberflächenlagerung ist die Planung der Umladung der Inventare in neue/gewartete Transport- und Lagerbehälter auf Grundlage des dann aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik voraussichtlich notwendig. Inwieweit hierzu eine neue Genehmigung erforderlich ist, lässt sich aus heutiger Sicht nicht abschätzen. Davon unabhängig ist bei der Oberflächenlagerung unbestimmt, wie der weitere Entsorgungspfad aussieht. Weil daher auch noch keine Aussagen zu entsprechender Planung und Verfahren getroffen werden können, sind die Ungewissheiten bei der Oberflächenlagerung am größten.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Planung und Verfahren sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Forschung und Entwicklung. Wenn sich das Endlager in den vorangehenden Phasen wie geplant verhalten und entwickelt hat, ist zu dieser Entsorgungsoption keine Forschung mehr erforderlich. Evtl. werden noch einzelne Arbeiten zum Umweltmonitoring und zur Longterm Stewardship durchgeführt. Daher sind auch die Ungewissheiten, die sich in der vorliegenden Phase mit Forschung und Entwicklung verbinden, gering.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit besteht nach wie vor Forschungsbedarf. Forschung und Entwicklung dienen in erster Linie dazu, die Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu halten. Gleichzeitig leisten sie einen wichtigen Beitrag dazu, die Kompetenzen, die während des Monitoringzeitraums und im Hinblick auf den Verschluss und die Stilllegung erforderlich sind, aufrecht zu erhalten. Forschung und Entwicklung sind daher weiterhin mit Ungewissheiten behaftet, die beispielsweise Risiken im Zusammenhang mit Forschungsarbeiten und aufgrund neuer unerwarteter Forschungsergebnisse betreffen.

Beim Oberflächenlager ist gegenwärtig vollkommen unbekannt, wie Forschung und Entwicklung für den weiteren Entsorgungspfad aussehen sollen oder werden. In der vorliegenden Phase werden aber erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten erforderlich sein, um nach Abschluss der Phase den weiteren Entsorgungspfad beschreiten zu können. Die Ungewissheiten sind beim Oberflächenlager daher größer als bei den Tiefenlageroptionen.

Die Ungewissheiten, die sich mit Forschung und Entwicklung verbinden, sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Transporte. Bei allen drei Entsorgungsoptionen sind in der vorliegenden Phase keine Transporte hoch radioaktiver Abfälle mehr erforderlich. Die

Optionen unterscheiden sich daher auch nicht bezüglich der entsprechenden Ungewissheiten.

Zu Transporten bestehen bei allen Entsorgungsoptionen aus heutiger Sicht keine Ungewissheiten.

Bauliche Aktivitäten. Das untertägige Endlager wird verschlossen, die übertägige Anlage wird stillgelegt. Anschließend sind keine weiteren baulichen Aktivitäten mehr erforderlich. Zu Beginn der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten verbinden, beim Endlager daher am größten. Nachdem der Verschluss erfolgt ist und die übertägigen Anlagen stillgelegt wurden, verbleiben aus heutiger Sicht keine Ungewissheiten mehr.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind im Monitoringzeitraum bauliche Instandhaltungsarbeiten erforderlich. Die Monitoringsohle und gegebenenfalls auch die Infrastrukturräume des Tiefenlagers über einen längeren Zeitraum offen zu halten, ist mit bergbaulichen Risiken und entsprechenden Ungewissheiten verbunden, die beim Endlager in dieser Phase keine Rolle mehr spielen. Nach der Entscheidung, das Monitoring zu beenden, müssen die untertägige Anlage verschlossen und die übertägige Anlage stillgelegt werden. Die Ungewissheiten, die im Zusammenhang mit baulichen Arbeiten auftreten, sind aufgrund des größeren Arbeitsumfangs und der ausgeprägteren Vielfalt der erforderlichen Arbeiten größer als beim Endlager.

Beim Oberflächenlager erfordern Unterhalt und Nachrüstung bauliche Aktivitäten. Inwiefern gegen Ende der vorliegenden Phase bereits bauliche Arbeiten zum weiteren Entsorgungspfad vorgenommen werden, ist unbekannt. Die Ungewissheiten werden daher auch beim Oberflächenlager höher eingestuft als die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten beim Endlager verbinden.

Die Ungewissheiten mit Bezug zu baulichen Aktivitäten sind bei der Endlagerung am geringsten.

Betriebliche Aktivitäten. Die letzten betrieblichen Aktivitäten werden beim Endlager spätestens etwa zehn Jahre nach Beginn der vorliegenden Phase abgeschlossen, wenn das Lager verschlossen und stillgelegt ist. Wahrscheinlich sind anschließend noch gewisse Aktivitäten zum Umweltmonitoring und zur Longterm Stewardship erforderlich. Im Vergleich zu den anderen beiden Entsorgungsoptionen ist der Betrieb des Endlagers in der vorliegenden Phase jedoch mit geringeren Ungewissheiten verbunden.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit erfordert weiterhin einen aktiven Betrieb der Entsorgungsanlage. Das Lager muss überwacht werden, Bauten und Infrastrukturen müssen betriebsfähig erhalten und nachgerüstet werden, Aktivitäten zum Kompetenzerhalt des Personals sind erforderlich. Im Fall einer (Teil-)Rückholung müsste der Betrieb des Lagers wieder stark intensiviert werden. Die Ungewissheiten, die sich mit den betrieblichen Aktivitäten verbinden, sind aufgrund der Vielfalt der Aktivitäten und der unterschiedlichen denkbaren Szenarien zum Verlauf dieser Phase groß.

Das Oberflächenlager befindet sich nach wie vor im Langzeitbetrieb. Die Heiße Zelle wird zum Umpacken der gelagerten hoch radioaktiven Abfälle genutzt. Ungewiss ist jedoch, wie sich die Planung und die Aktivitäten zum weiteren Entsorgungspfad auswirken – sowohl auf den Betrieb des Oberflächenlagers selbst als auch auf den Betrieb möglicher weiterer Entsorgungsanlagen, die erforderlich sind, um den weiteren Entsorgungspfad zu beschreiten. Die Ungewissheiten, die sich mit den betrieblichen Aktivitäten bei der Oberflächenlagerung verbinden, sind daher – ebenso wie bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit – groß.

Die Ungewissheiten, die sich mit betrieblichen Aktivitäten verbinden, fallen bei der Endlagerung am geringsten aus.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Zur Bedrohungslage in der vorliegenden Phase bestehen bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen erhebliche Ungewissheiten.

Nach dem Verschluss bietet aus heutiger Perspektive das Endlager den besten Schutz gegen Ungewissheiten, die künftige Entwicklungen betreffen. Die Abfälle werden dort durch mehrere passive Barrieren gegen Einwirkungen von außen geschützt, darunter die Endlagerbehälter, die Verfüllung und Versiegelung der Einlagerungsstrecken und das Wirtsgestein. Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist die Anlage über den Monitoringzeitraum hinweg noch zugänglich, was größere Ungewissheiten bezüglich Sicherung und Kernmaterialüberwachung mit sich bringt. Die Sicherung wird jedoch dadurch erleichtert, dass die Zahl der Zugänge zur untertägigen Anlage begrenzt ist.

Beim Oberflächenlager und der darin enthaltenen Heißen Zelle ist aus heutiger Sicht ungewiss, inwiefern neuartige Bedrohungen in der Zukunft mit der ursprünglichen Auslegung und aufgrund von Nachrüstungen abgefangen werden können. Während des Umpackens liegen Kernbrennstoffe nur durch das Gebäude geschützt vor, was die von Innentätern ausgehenden Risiken erhöht.

Die Ungewissheiten zu Sicherung und Kernmaterialüberwachung sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Fazit 3.5.4: Die Ungewissheiten, die sich mit Aktivitäten zur Entsorgung verbinden, sind in der vorliegenden Phase bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

3.5.5. Variante Rückholung oder Bergung

Beim Endlager ist Rückholbarkeit nach dem Verschluss nicht vorgesehen. Nach dem Verschluss des Lagers müssen die Abfälle daher geborgen werden. Eine Bergung soll nach (BMU, 2010) über 500 Jahre möglich sein. Sie ist jedoch aufwendig und mit vielen Ungewissheiten verbunden. Falls die Abfälle geborgen werden sollen, weil sich herausgestellt hat oder vermutet wird, dass das Lager unter Tage den Sicherheitsanforderungen nicht genügt, müssen unter anderem neue Zwischenlagerkapazitäten geschaffen und ein alternativer Entsorgungspfad gesucht werden. Die Ungewissheiten, die sich mit einer Rückholung oder Bergung verbinden, sind daher bei der Endlagerung am größten.

Das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist zumindest am Beginn der vorliegenden Phase, evtl. aber auch über deren gesamten Verlauf hinweg, noch teilweise zugänglich – je nachdem, wie lange das Monitoring andauern soll. Da der Entsorgungspfad, der in das Tiefenlager mündete, auf Rückholbarkeit hin konzipiert wurde, wird eine Rückholung oder – während bzw. kurz nach dem Verschluss – Bergung voraussichtlich mit deutlich weniger Ungewissheiten verbunden sein als dies bei einem Endlager der Fall ist.

Beim Oberflächenlager ist die Rückholung der Abfälle bei planmäßigem Verlauf des Entsorgungspfads am einfachsten und mit verhältnismäßig geringen Ungewissheiten verbunden.

Fazit 3.5.5: Die Ungewissheiten, die sich mit einer Rückholung oder Bergung der Abfälle verbinden, sind in der betrachteten Phase bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Endlagerung am größten.

3.5.6. Abwägung

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten zu Entwicklungen, die die Rahmenbedingungen der Entsorgung betreffen, vor allem zu gesellschaftlichen Entwicklungen, bereits so groß, dass sich ein Vergleich der Entsorgungsoptionen nur mit Schwierigkeiten durchführen lässt.

Aus heutiger Sicht ist die Endlagerung in der vorliegenden Phase mit den geringsten Ungewissheiten verbunden. Nachdem die Entsorgungsanlage verschlossen und stillgelegt worden ist, verbleiben nahezu keine Ungewissheiten mehr, die mit baulichen und betrieblichen Aktivitäten, mit Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung einhergehen. Die Ungewissheiten, die sich mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung verbinden, nehmen stark ab. Da die Entsorgung kaum mehr auf menschliche Aktivitäten angewiesen ist, geht die Abhängigkeit von gesellschaftlichen Entwicklungen deutlich zurück.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist der weitere Entsorgungspfad vorgezeichnet. Wird dieser Entsorgungspfad realisiert und das Lager schließlich in ein Endlager überführt, sind in der vorliegenden Phase nur noch begrenzt menschliche Aktivitäten erforderlich, um die Sicherheit der Entsorgung zu gewährleisten. Es verbleiben allerdings etliche Ungewissheiten, vor allem zum Verlauf und zur Dauer des Monitoringzeitraums und den Konsequenzen, die aus dem Monitoring gezogen werden.

Das Oberflächenlager befindet sich in der vorliegenden Phase planmäßig im stabilen Langzeitbetrieb. Die Abfälle werden jedoch voraussichtlich in neue oder gewartete Behälter umverpackt. Entscheidungen zum weiteren Entsorgungspfad müssen getroffen und entsprechende Arbeiten aufgenommen werden. Da der weitere Entsorgungspfad aus heutiger Sicht unbekannt ist, sind die Ungewissheiten, die sich mit dieser Entsorgungsoption verbinden, im Optionenvergleich groß.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten zur Endlagerung geringer als jene zu den anderen beiden Entsorgungsoptionen.

3.6. Fernere Zukunft

ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungslösung

3.6.1. Wichtigste Schritte

- Longterm Stewardship (Tiefenlager)
- Rückbau und neuer Entsorgungspfad (Oberflächenlager)

3.6.2. Dauer der vorliegenden Phase

Gesellschaftliche Einflüsse. Vielfältige gesellschaftliche Einflüsse könnten dazu führen, dass die vorliegende Phase bei den Tiefenlagern anders als geplant verläuft, und sich damit auch deren Dauer verändert. Einige Einflüsse sind heute bereits denkbar, andere noch unbekannt. Mögliche Einflüsse, die sich nach gegenwärtiger Einschätzung auf den Verlauf und damit auch auf die Dauer der Phase auswirken könnten, sind:

- Neue Erkenntnisse führen dazu, dass Veränderungen an den Tiefenlagern vorgenommen werden, beispielsweise um deren Sicherheit zu verbessern
- Hoch radioaktive Abfälle werden aus den Tiefenlagern geborgen, um sie einer neuen Behandlung oder Verwendung zuzuführen.
- Neue Nutzungen, vor allem neue Nutzungen des Untergrunds, am Standort des Lagers führen dazu, dass an der Entsorgungsanlage Änderungen vorgenommen werden müssen.
- Das Tiefenlager wird unabsichtlich durch menschliche Aktivitäten beschädigt.

Diese Ungewissheiten betreffen das Endlager und das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit in ähnlicher Weise.

Beim Oberflächenlager ist aus heutiger Sicht ungewiss, welcher Entsorgungspfad in der vorliegenden Phase eingeschlagen wird. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind daher beim Oberflächenlager am größten.

Fazit 3.6.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der laufenden Phase sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

3.6.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar und Sicherheitsbarrieren. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Entwicklung der Nuklide in den hoch radioaktiven Abfällen zugrunde liegen, sind nach heutiger Einschätzung gut bekannt. Ungewissheiten verbinden sich daher vor allem mit der Entwicklung der technischen und natürlichen Sicherheitsbarrieren.

Diese Ungewissheiten sollten in der laufenden Phase beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit geringer ausfallen als beim Endlager, da beim Tiefenlager in der vorangegangenen Phase weiterhin aktiv nach neuen Erkenntnissen zur Sicherheit des Tiefenlagers gesucht wurde. Es ist zudem denkbar, dass in der vorliegenden Phase bei den Tiefenlagern noch ein Umweltmonitoring, vor allem ein radiologisches Monitoring, stattfindet, das Hinweise auf unerwartete Vorgänge liefern könnte. Unerwartete Erkenntnisse zur Entwicklung der Tiefenlageroptionen stammen ggf. auch aus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die in anderen Kontexten vorgenommen wurden und werden.

Nach Beendigung der Oberflächenlagerung ist offen, wie in der vorliegenden Phase mit den hoch radioaktiven Abfällen verfahren und welcher Entsorgungspfad beschritten wird. Wahrscheinlich würde sich der weitere

Entsorgungspfad an einem Vorbild orientieren, mit dem in anderen Ländern bereits gute Erfahrungen gemacht worden sind (Köhnke, 2017). Die Ungewissheiten zum Zustand und zur Entwicklung des Inventars und der Sicherheitsbarrieren sind daher bei der Oberflächenlagerung am größten.

Die Ungewissheiten zum Inventar der Entsorgungsanlage sind in der laufenden Phase bei der Oberflächenlagerung am größten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am geringsten.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase sind aus heutiger Perspektive nicht mehr einschätzbar. Zwischen den drei untersuchten Entsorgungsoptionen besteht diesbezüglich kein Unterschied.

Im Fall einer gesellschaftlichen Krise würden die verschlossenen Tiefenlager die aus gegenwärtiger Sicht geeignetste Option darstellen, um die Ungewissheiten bezüglich der Auswirkungen von gesellschaftlichen Entwicklungen gering zu halten, weil die Abfälle fernab menschlicher Aktivitäten gelagert und durch ein dauerhaft wirksames Mehrfachbarrierensystem gegenüber menschlichen Aktivitäten und der Biosphäre abgeschirmt sind. Zunehmende menschliche Aktivitäten, die bereits heute in den tiefen Untergrund drängen, wie beispielsweise die Tiefengeothermie, die Nutzung von Tiefengrundwasser oder der Abbau von Rohstoffen im tiefen Untergrund relativieren allerdings diese Aussage.

Der weitere Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung wird aus heutiger Sicht voraussichtlich erhebliche gesellschaftliche Ressourcen beanspruchen. Die Ungewissheiten aufgrund gesellschaftlicher Entwicklungen sind damit groß. Zwar ist denkbar, dass in der vorliegenden Phase ein Entsorgungspfad beschritten wird, der letztlich zu mehr Unabhängigkeit von gesellschaftlichen Entwicklungen als die Tiefenlagerung führt. Ob ein solcher Entsorgungspfad gefunden und realisiert werden kann, ist aber seinerseits ungewiss.

Die Ungewissheiten, die sich mit gesellschaftlichen Entwicklungen verbinden, sind in der laufenden Phase bei der Oberflächenlagerung am größten.

Biosphäre. Die Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage(n) und zu Entwicklungen der Biosphäre bzw. der biologischen Konstitution von Menschen während der vorliegenden Phase werden aus heutiger Perspektive als bei allen drei Entsorgungsoptionen vergleichbar eingestuft.

Wie bei den gesellschaftlichen Entwicklungen wird aus heutiger Sicht die Unempfindlichkeit der Tiefenlager gegenüber Entwicklungen der Biosphäre als hoch eingeschätzt, weil sich die Lager fernab menschlicher Aktivitäten befinden und durch ein dauerhaft wirksames Mehrfachbarrierensystem gegenüber großen Teilen der Biosphäre¹ abgeschirmt sind. Beim Entsorgungspfad, der nach Beendigung der Oberflächenlagerung beschritten wird, sind die Ungewissheiten deutlich größer.

Die Ungewissheiten, die sich mit Entwicklungen der Biosphäre verbinden, sind in der laufenden Phase bei der Oberflächenlagerung am größten.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zu Veränderungen, die die Geosphäre betreffen, sind für die Tiefenlager, evtl. aber auch für den weiteren Entsorgungspfad nach der Oberflächenlagerung relevant.

Die Tiefenlager sind in jedem Fall von Ungewissheiten betroffen, die sich auf Entwicklungen des geologischen Umfelds beziehen.

Beim Oberflächenlager ist es denkbar, dass der weitere Entsorgungspfad nahezu unabhängig von Veränderungen im geologischen Umfeld ist. Dies

¹ Die Mikroorganismen im Wirtsgestein und im untertägigen Bereich des Lagers sind ebenfalls Teil der Biosphäre.

wäre zum Beispiel vorstellbar, wenn es eine fortgeschrittene Form der Transmutation erlauben würde, die Radionuklide der hoch radioaktiven Abfälle in stabile Nuklide umzuwandeln. Denkbar ist aber auch, dass ein Entsorgungspfad gewählt wird, der größere Ungewissheiten zum geologischen Umfeld mit sich bringt als die Tiefenlagerung. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn die Abfälle in sehr tiefen Schichten der Erdkruste entsorgt werden sollten, über deren Eigenschaften nur lückenhafte Kenntnisse bestehen.

Die Ungewissheiten, die sich mit Veränderungen der Geosphäre verbinden, werden daher für alle Entsorgungsoptionen gleich eingestuft.

Bei den Ungewissheiten, die sich mit Entwicklungen der Geosphäre verbinden, zeigt sich kein klarer Unterschied zwischen den Entsorgungsoptionen.

Fazit 3.6.3: Die Ungewissheiten, die allgemeine Entwicklungen betreffen, sind in der vorliegenden Phase bei der Oberflächenlagerung am größten.

3.6.4. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Bei den Tiefenlagern ist nicht vorgesehen, dass in dieser Phase noch Planung und Verfahren erforderlich sind. Evtl. werden Planungen und Verfahren noch in sehr reduziertem Umfang für das Umweltmonitoring und die Longterm Stewardship benötigt. Die Ungewissheiten, die im Zusammenhang mit Planung und Verfahren stehen, sind daher gering.

Bei der Oberflächenlagerung ist gegenwärtig unbestimmt, wie der weitere Entsorgungspfad aussieht. Wenn in der vorliegenden Phase – wie gegenwärtig vorgesehen – der weitere Entsorgungspfad beschritten und das Oberflächenlager stillgelegt wird, ist dies aus heutiger Perspektive zumindest zu Beginn der Phase mit einem hohen Aufwand im Bereich Planung und Verfahren verbunden. Aufgrund der großen Zahl und Vielfalt der er-

forderlichen Aktivitäten und der vermuteten politischen Relevanz dürften die Ungewissheiten hier erheblich sein.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Planung und Verfahren sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Forschung und Entwicklung. Bei den Tiefenlagern sind Forschung und Entwicklung nicht mehr erforderlich oder nur noch in sehr reduziertem Umfang für das Umweltmonitoring und die Longterm Stewardship. Die Ungewissheiten, die Planung und Verfahren betreffen, sind gering.

Bei der Oberflächenlagerung ist heute offen, wie der weitere Entsorgungspfad aussieht. Wenn in der vorliegenden Phase – wie gegenwärtig vorgesehen – der weitere Entsorgungspfad beschrritten wird, ist dies aus gegenwärtiger Perspektive mit einem hohen Aufwand im Bereich Forschung und Entwicklung verbunden. Die Ungewissheiten werden daher beim der Oberflächenlagerung nachfolgenden Entsorgungspfad als groß eingestuft.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Transporte. Bei den Tiefenlageroptionen sind in der vorliegenden Phase keine Transporte erforderlich.

Bei der Oberflächenlagerung ist zu erwarten, dass der weitere Entsorgungspfad mit Transporten verbunden sein wird und daher auch entsprechende Ungewissheiten mit sich bringt.

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit Transporten sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Bauliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlageroptionen sind in der vorliegenden Phase keine baulichen Aktivitäten erforderlich.

Bei der Oberflächenlagerung ist für die laufende Phase der Rückbau des Oberflächenlagers vorgesehen. Zudem ist anzunehmen, dass der weitere Entsorgungspfad mit baulichen Aktivitäten verbunden sein wird und daher auch entsprechende Ungewissheiten mit sich bringt.

Die Ungewissheiten, die sich mit baulichen Aktivitäten verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Betriebliche Aktivitäten. Bei den Tiefenlageroptionen sind in der vorliegenden Phase keine betrieblichen Aktivitäten geplant.

Das Oberflächenlager befindet sich zu Beginn der laufenden Phase voraussichtlich noch in Betrieb. Nach Beendigung der Oberflächenlagerung ist anzunehmen, dass der weitere Entsorgungspfad mit betrieblichen Aktivitäten verbunden sein wird und daher auch entsprechende Ungewissheiten mit sich bringt.

Die Ungewissheiten, die sich mit betrieblichen Aktivitäten verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die Bedrohungslage in der vorliegenden Phase ist bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen unbekannt.

Die Tiefenlageroptionen befinden sich in der vorliegenden Phase nach heutiger Erwartung in einem passiv sicheren Zustand, der mit verhältnismäßig geringen Ungewissheiten zur Sicherung und Kernmaterialüberwachung einhergehen dürfte.

Bei der Oberflächenlagerung sind die Ungewissheiten bezüglich Sicherung und Kernmaterialüberwachung angesichts des unbekanntes weiteren Entsorgungspfad sehr hoch.

Die Ungewissheiten, die sich mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung am größten.

Fazit 3.6.4: Die Ungewissheiten, die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Entsorgung betreffen, sind in der vorliegenden Phase bei der Oberflächenlagerung am größten.

3.6.5. Variante Rückholung oder Bergung

Bei beiden Tiefenlageroptionen ist Rückholbarkeit in der vorliegenden Phase nicht mehr vorgesehen. Die Abfälle müssten daher geborgen werden. Eine Bergung ist aus heutiger Sicht aufwendig und mit vielen Ungewissheiten verbunden. Falls die Abfälle geborgen werden sollen, weil sich herausgestellt hat oder vermutet wird, dass das Lager unter Tage den Sicherheitsanforderungen nicht genügt, müssen zudem unter anderem neue Zwischenlagerkapazitäten geschaffen und ein alternativer Entsorgungspfad gesucht werden. Es ist jedoch vorstellbar, dass technische Fortschritte die Ungewissheiten, die sich mit der Bergung verbinden, in der vorliegenden Phase erheblich reduzieren.

Beim Oberflächenlager ist die Rückholung der Abfälle bei planmäßigem Verlauf des Entsorgungspfad zu Beginn der laufenden Phase mit verhältnismäßig geringen Ungewissheiten verbunden. Wie sich die Rückholung oder Bergung nach Beschreiten des weiteren Entsorgungspfad gestaltet, ist aus heutiger Sicht vollkommen offen.

Fazit 3.6.5: Die Ungewissheiten, die sich mit einer Rückholung oder Bergung der Abfälle verbinden, sind in der laufenden Phase bei allen Entsorgungsoptionen groß.

3.6.6. Abwägung

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten, die sich mit der Oberflächenlagerung verbinden, am größten. Aus heutiger Perspektive ist es vollkommen offen, wie sich die Entsorgung in der betrachteten Phase gestaltet.

Auch bei den Tiefenlagern verbleiben Ungewissheiten. Die Tiefenlager wurden jedoch in der vorangegangenen Phase in einen Zustand gebracht, der Robustheit gegenüber unerwarteten Entwicklungen gewährleisten soll.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten zur Oberflächenlagerung am größten.

3.7. Sehr ferne Zukunft

ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungslösung

3.7.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

3.7.2. Dauer der vorliegenden Phase

Die Dauer dieser Phase wird wesentlich durch die Entwicklungen des Inventars und der technischen Barrieren in den Tiefenlagern bestimmt. Bei der Oberflächenlagerung ist nicht bekannt, wie eine sinnvolle weitere zeitliche Einteilung des Entsorgungspfads aussieht. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind hier daher am größten.

Fazit 3.7.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind in der betrachteten Phase bei der Oberflächenlagerung größer als bei den Tiefenlageroptionen.

3.7.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar und Sicherheitsbarrieren. Bei den Tiefenlagern kann die Entwicklung von Inventar und Sicherheitsbarrieren bei planmäßigem Verlauf der Entsorgung in der vorliegenden Phase aus heutiger Sicht einigermaßen eingeschätzt werden – auch wenn Ungewissheiten verbleiben, die vor allem menschliche Einflüsse betreffen.

Beim weiteren Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung ist vollkommen offen, wie in der vorliegenden Phase mit den hochradioaktiven Abfällen verfahren wird. Die Ungewissheiten zur Entwicklung

des Inventars und der Sicherheitsbarrieren sind daher beim weiteren Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung am größten.

Die Ungewissheiten zur Entwicklung von Inventar und Sicherheitsbarrieren sind bei der Oberflächenlagerung größer als bei den Tiefenlageroptionen.

Gesellschaft. Die gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase und ihre Auswirkungen auf die Entsorgungsoptionen sind aus heutiger Perspektive nicht einschätzbar. Offen ist letztlich sogar, ob es zu dieser Zeit noch eine „Gesellschaft“ oder „Gesellschaften“ im heutigen Sinn gibt. Zwischen den drei untersuchten Entsorgungsoptionen besteht diesbezüglich kein Unterschied.

Zur Robustheit der Entsorgungsoptionen gegenüber unerwarteten gesellschaftlichen Entwicklungen in dieser Phase lassen sich aus heutiger Perspektive keine Aussagen mehr machen, da die gesellschaftlichen und technologischen Entwicklungen unbekannt sind.

Die Oberflächenlagerung, die in der vorangegangenen Phase in einen heute noch unbekanntem Entsorgungspfad eingemündet ist, unterscheidet sich angesichts der für alle untersuchten Entsorgungsoptionen sehr großen Ungewissheiten zu den gesellschaftlichen Entwicklungen nicht mehr deutlich von den Tiefenlageroptionen.

Die Ungewissheiten zu gesellschaftlichen Entwicklungen sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

Biosphäre. Die Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre am Standort der Entsorgungsanlage(n) und zu Entwicklungen der Biosphäre bzw. der biologischen Konstitution von Menschen während der vorliegenden Phase werden aus heutiger Perspektive als bei allen drei Entsorgungsoptionen vergleichbar eingestuft. Zur Robustheit der Entsor-

gungsoptionen gegenüber unerwarteten Entwicklungen in der Biosphäre und der Konstitution von Menschen lassen sich aus heutiger Perspektive keine Aussagen mehr machen.

Die Ungewissheiten zu Entwicklungen der Biosphäre sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zu Veränderungen, die die Geosphäre betreffen, sind für die Tiefenlager, evtl. aber auch für den weiteren Entsorgungspfad nach der Oberflächenlagerung relevant.

Die Tiefenlager sind in jedem Fall von Ungewissheiten betroffen, die sich auf Entwicklungen des geologischen Umfelds beziehen. Sofern es sich dabei um natürliche Entwicklungen handelt, werden die Ungewissheiten aus heutiger Perspektive als überschaubar eingestuft. Entwicklungen, die auf menschliche Aktivitäten zurückgehen, sind für den vorliegenden Zeitraum nicht mehr vorhersehbar.

Beim Oberflächenlager ist es denkbar, dass der weitere Entsorgungspfad weitgehend unabhängig von Veränderungen im geologischen Umfeld ist. Dies wäre zum Beispiel vorstellbar, wenn es eine fortgeschrittene Form der Transmutation erlaubt hätte, die Radionuklide der hoch radioaktiven Abfälle in der vorangegangenen Phase in stabile Nuklide umzuwandeln. Denkbar ist aber auch, dass ein Entsorgungspfad gewählt wurde, der größere Ungewissheiten zum geologischen Umfeld mit sich brachte als die Tiefenlagerung (vgl. 3.6.3).

Die Ungewissheiten, die sich mit Veränderungen der Geosphäre verbinden, werden daher für alle Entsorgungsoptionen gleich eingestuft.

Die Ungewissheiten, die das geologische Umfeld betreffen, unterscheiden sich nicht deutlich zwischen den Entsorgungsoptionen.

Fazit 3.7.3: Die Ungewissheiten, die sich mit allgemeinen Entwicklungen verbinden, sind in der betrachteten Phase bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

3.7.4. Erforderliche Aktivitäten

Zu den in dieser Phase erforderlichen oder nicht erforderlichen Aktivitäten lassen sich kaum Aussagen machen. Die Ungewissheiten zur bisherigen Entwicklung der Entsorgungsoptionen und zu den Veränderungen im Umfeld, vor allem Veränderungen, die durch menschliche Aktivitäten herbeigeführt wurden, sind zu groß.

Zwar wurden die Tiefenlageroptionen so angelegt, dass sie sich in dieser Phase gegenüber verschiedensten Entwicklungen im Umfeld als robust erweisen. Für die vorliegende Phase ist es aber sowohl möglich, dass sich das derzeitige Verständnis von einer „robusten Entsorgungslösung“ als überholt erweist als auch, dass der nach Beendigung der Oberflächenlagerung beschrittene Entsorgungsweg robuster als die Tiefenlageroptionen gestaltet ist.

Fazit 3.7.4: Die Ungewissheiten, die Aktivitäten betreffen, die im Zusammenhang mit den Entsorgungsoptionen stehen, unterscheiden sich in der vorliegenden Phase bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht deutlich.

3.7.5. Abwägung

Wie sich der weitere Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung gestaltet, ist aus heutiger Sicht unbekannt. Daher besteht aus heutiger Sicht nahezu vollständige Ungewissheit über die Risiken, die sich in der vorliegenden Phase mit der Oberflächenlagerung verbinden.

Auch bei den Tiefenlagern verbleiben große Ungewissheiten, da die gesellschaftlichen Entwicklungen und die Entwicklungen der Biosphäre für die laufende Phase nicht vorhersehbar sind. Die Tiefenlager wurden jedoch in der vorangegangenen Phase in einen Zustand gebracht, der eine gewisse Robustheit gegenüber unerwarteten Entwicklungen gewährleisten soll.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten, die sich mit der Oberflächenlagerung verbinden, am größten.

3.8. Sehr weit entfernte Zukunft

ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungslösung

3.8.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

3.8.2. Dauer der vorliegenden Phase

Die Dauer dieser Phase ist durch die Sicherheitsanforderungen in Deutschland vorgegeben. Bei den Tiefenlagern werden die Risiken in dieser Zeit wesentlich durch die Entwicklungen des Inventars und die Ausbreitung der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bestimmt.

Bei der Oberflächenlagerung ist nicht bekannt, wie eine sinnvolle weitere zeitliche Gliederung des Entsorgungspfads aussieht. Die Ausgestaltung und die Dauer der vorliegenden Phase sind daher unbestimmt.

Fazit 3.8.2: Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Oberflächenlagerung größer als bei den Tiefenlageroptionen.

3.8.3. Allgemeine Entwicklungen

Inventar und Sicherheitsbarrieren. Bei den Tiefenlagern kann die natürliche Entwicklung von Inventar und Sicherheitsbarrieren bei planmäßigem Verlauf der Entsorgung in der vorliegenden Phase aus heutiger Sicht einigermaßen eingeschätzt werden – auch wenn Ungewissheiten verbleiben. Beim weiteren Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung ist vollkommen offen, wie in der vorliegenden Phase mit den hoch

radioaktiven Abfällen verfahren wird. Die Ungewissheiten zur Entwicklung des Inventars und der Sicherheitsbarrieren sind daher beim weiteren Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung am größten.

Die Ungewissheiten zur Entwicklung von Inventar und Sicherheitsbarrieren sind bei der Oberflächenlagerung größer als bei den Tiefenlageroptionen.

Gesellschaft. Ob in dieser Phase noch gesellschaftliche Entwicklungen existieren, ist heute unbekannt. Falls es solche Entwicklungen geben sollte, lassen sich aus heutiger Perspektive keine Aussagen zu deren Verlauf machen. Zwischen den drei untersuchten Entsorgungsoptionen besteht diesbezüglich kein Unterschied. Zu den Ungewissheiten, die sich mit gesellschaftlichen Entwicklungen verbinden, kann keine Einschätzung abgegeben werden.

Die Ungewissheiten zur gesellschaftlichen Entwicklung sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

Biosphäre. Die Ungewissheiten zur Beschaffenheit der Biosphäre am Standort und im Umfeld der Entsorgungsanlage(n) und zu Entwicklungen der Biosphäre bzw. der biologischen Konstitution von Menschen oder nachmenschlichen Lebensformen während der vorliegenden Phase werden aus heutiger Perspektive als bei allen drei Entsorgungsoptionen vergleichbar eingestuft.

Gegenwärtig werden die Ungewissheiten zu Risiken, die mit mikrobiellen Aktivitäten in einem Tiefenlager für hoch radioaktive Abfälle einhergehen, in Bezug auf Sicherheitsnachweise und Sicherheitsmaßnahmen im Allgemeinen als nicht vordringlich betrachtet. Angesichts der sehr langen Dauer der vorliegenden Phase müssen diese Ungewissheiten aber dennoch im Auge behalten werden.

Zur Robustheit der Entsorgungsoptionen gegenüber aus heutiger Sicht unerwarteten Entwicklungen in der Biosphäre über Tage lassen sich heute keine vergleichenden Aussagen mehr machen.

Die Ungewissheiten zur Entwicklung der Biosphäre sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

Geologisches Umfeld. Ungewissheiten zu Veränderungen, die die Geosphäre betreffen, sind für die Tiefenlager, evtl. aber auch für den weiteren Entsorgungspfad nach der Oberflächenlagerung relevant.

Die Tiefenlager sind in jedem Fall von Ungewissheiten betroffen, die sich auf langfristige Entwicklungen des geologischen Umfelds beziehen. Trotz den aus heutiger Sicht gut begründeten Aussagen zur natürlichen geologischen Entwicklung verbleiben immer noch Ungewissheiten. So ist es beispielsweise denkbar, dass ein wesentliches Entwicklungsszenarium bisher übersehen wurde. Menschliche Einwirkungen, die das geologische Umfeld in der vorliegenden Phase betreffen, lassen sich gegenwärtig nicht vorhersehen.

Beim weiteren Entsorgungspfad, der sich an die Oberflächenlagerung anschließt, sind geringere Ungewissheiten vorstellbar. Diese wäre beispielsweise der Fall, wenn es in der vorangegangenen Phase gelungen wäre, die Radionuklide unschädlich zu machen. Ähnliche Ungewissheiten wie bei den Tiefenlageroptionen sind denkbar, wenn sich an die Oberflächenlagerung eine Endlagerung oder Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit angeschlossen hat, die etwa den aktuellen Sicherheitsanforderungen entspricht. Größere Ungewissheiten sind möglich, wenn ein Tiefenlagerkonzept verfolgt wurde, zu dem während seiner Realisierung noch viele offene Fragen bestanden, wie dies etwa heute für die Lagerung in tiefen Bohrlöchern der Fall ist.

Die Ungewissheiten, die sich mit Veränderungen der Geosphäre verbinden, werden daher für alle Entsorgungsoptionen gleich eingestuft.

Die Ungewissheiten, die das geologische Umfeld betreffen, sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen deutlich.

Fazit 3.7.3: Die Ungewissheiten, die sich mit allgemeinen Entwicklungen verbinden, sind in der betrachteten Phase bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen groß.

3.8.4. Erforderliche Aktivitäten

Zu den in dieser Phase erforderlichen oder nicht erforderlich Aktivitäten lassen sich kaum Aussagen machen. Die Ungewissheiten zur bisherigen Entwicklung der Entsorgungsoptionen und zu den Veränderungen im Umfeld, vor allem Veränderungen, die durch menschliche Aktivitäten herbeigeführt wurden, sind zu groß.

Zwar wurden die Tiefenlageroptionen so angelegt, dass sie sich in dieser Phase gegenüber verschiedensten Entwicklungen im Umfeld als robust erweisen. Für die vorliegende Phase ist es aber sowohl möglich, dass sich das derzeitige Verständnis von einer „robusten Entsorgungslösung“ als überholt erweist als auch, dass der nach Beendigung der Oberflächenlagerung beschrittene Entsorgungsweg robuster als die Tiefenlageroptionen gestaltet ist.

Fazit 3.8.4: Die Ungewissheiten, die Aktivitäten betreffen, die im Zusammenhang mit den Entsorgungsoptionen stehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen in der vorliegenden Phase nicht deutlich.

3.8.5. Abwägung

Wie sich der weitere Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung gestaltet, ist gegenwärtig unbekannt. Daher besteht aus heuti-

ger Sicht nahezu vollständige Ungewissheit über die Risiken, die sich in der vorliegenden Phase mit der Oberflächenlagerung verbinden.

Auch bei den Tiefenlagern sind die Ungewissheiten groß, vor allem da mögliche gesellschaftliche Entwicklungen für die laufende Phase nicht vorhersehbar sind. Die Aussagekraft aktueller Risikoanalysen und -beurteilungen nimmt angesichts der langen Zeiträume und der zu erwartenden Zunahme von Szenarien, die gegenwärtig nicht vorhergesehen wurden oder vorhergesehen werden können, voraussichtlich deutlich ab. Da bei den Tiefenlagern weiterhin ein definierter Entsorgungspfad verfolgt wird, stufen wir die Ungewissheiten hier jedoch weiterhin geringer ein als bei der Oberflächenlagerung – auch wenn es denkbar ist, dass in der Folge der Oberflächenlagerung ein Entsorgungspfad beschritten wurde, der die mit den hoch radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken ganz erheblich reduziert.

In der vorliegenden Phase sind die Ungewissheiten, die sich mit der Oberflächenlagerung verbinden, am größten.

4. Kalkulierbare Risiken

Ein *kalkulierbares Risiko* liegt vor, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens abgeschätzt werden können. Dabei ist es nicht erforderlich, dass sich Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß genau quantifizieren lassen. Auch eine qualitative Einordnung kann ausreichend sein, damit ein Risiko zu den kalkulierbaren Risiken zählt (Eckhardt & Rippe, 2016, S. 18).

Wenn Sicherheitsnachweise für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle erbracht werden, stehen gegenwärtig die kalkulierbaren Risiken im Vordergrund. Im Bereich der quantifizierbaren kalkulierbaren Risiken können klare Vorgaben in Form von Grenzwerten gesetzt und deren Einhaltung kontrolliert werden, während der Umgang mit Ungewissheiten vielschichtiger und damit auch anfälliger für unterschiedliche Interpretationen ist.

Im Folgenden wird eine *verbal-argumentative Bewertung* der kollektiven Risiken, die sich in der jeweiligen Phase mit den untersuchten Entsorgungsoptionen verbinden, vorgenommen. Bei den individuellen Risiken gehen wir davon aus, dass die Referenzmodelle im Einklang mit den derzeit geltenden Anforderungen und juristischen Festlegungen stehen (Tzschentke, 2017). Entsprechend werden die individuellen Risiken, die mit den Entsorgungsoptionen verbunden sind, auf ein Maß begrenzt, das derzeit als akzeptabel gilt.

Wie bei der vergleichenden Bewertung nach Ungewissheiten kommt auch hier ein *Outranking-Verfahren* zur Anwendung. Die Entsorgungsoptionen werden anhand der Bewertung der kalkulierbaren Risiken in eine Rangfolge gebracht. Eine Option wird umso besser beurteilt, je geringer die mit ihr verbundenen kalkulierbaren Risiken sind.

4.1. Unmittelbare Zukunft

Jahr 0 bis ca. Jahr 10 nach Start der Entsorgungslösung

4.1.1. Wichtigste Schritte

- Entscheidung für eine Entsorgungsoption
- Konzept für das Standortauswahlverfahren

4.1.2. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Die kalkulierbaren Risiken für Personen, die sich in dieser Phase aktiv mit konzeptionellen Arbeiten befassen, sind vor allem durch psychische Belastungen geprägt. Psychische Belastungen entstehen insbesondere aufgrund hoher Leistungsanforderungen oder konfliktreicher Situationen.

Es ist zu erwarten, dass die konzeptionellen Arbeiten und die Entwicklung regulatorischer Vorgaben umso reibungsloser verlaufen, je größer der gesellschaftliche Konsens zur gewählten Entsorgungsoption ist.

Zur Entsorgungsoption „Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit“ besteht in Deutschland derzeit offenbar der größte gesellschaftliche Konsens. Diese Entsorgungsoption wurde durch die Endlagerkommission gestützt und scheint in der interessierten Öffentlichkeit am wenigsten umstritten zu sein.

Die erforderlichen konzeptionellen Arbeiten und die Entwicklung regulatorischer Vorgaben werden zudem voraussichtlich umso reibungsloser verlaufen, je größer der gesellschaftliche Konsens zum Standortauswahlverfahren für ein Tiefen- bzw. Oberflächenlager ist.

Bei den Tiefenlagern kann auf bereits vorhandene nationale und internationale Grundlagen und Vorbilder für Standortauswahlverfahren zurückgegriffen werden. Dazu, wie ein Standortauswahlverfahren grundsätzlich

zu konzipieren ist, hat sich in Deutschland und weiteren europäischen Ländern bereits ein gewisses Maß an Einigkeit herausgebildet, das Gerechtigkeit und Partizipation einen hohen Stellenwert einräumt.

Beim Standortauswahlverfahren für ein Oberflächenlager lässt sich dem Prinzip der Freiwilligkeit besser Rechnung tragen als bei den Tiefenlagern. Dies ist deshalb möglich, weil die Standortauswahl nur in geringer Weise von den Verhältnissen im geologischen Untergrund geprägt ist. So ist es beispielsweise denkbar, dass Gemeinden eingeladen werden, sich als Standorte für ein Oberflächenlager zu bewerben und zum Ausgleich für das übernommene Risiko von nachhaltig besseren Entwicklungsperspektiven zu profitieren. Wahrscheinlich wird das Standortauswahlverfahren für Oberflächenlager aber auch von vielfältigeren Interessenabwägungen gekennzeichnet sein, als dies bei den Tiefenlagern der Fall ist. Daher könnte das Standortauswahlverfahren für ein Oberflächenlager zu mehr Kontroversen Anlass geben als das Standortauswahlverfahren für ein Tiefenlager (vgl. 3.1).

Bei der Endlagerung, die in Deutschland und vielen anderen Ländern bereits seit längerem in Betracht gezogen und eingehender untersucht wird, kann am weitest gehenden auf bereits geleistete wissenschaftliche und technische Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Dadurch werden die Belastungen für alle an konzeptionellen Arbeiten und der Entwicklung regulatorischer Vorgaben beteiligten Personen reduziert.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind mehr konzeptionelle Fragen zu klären als bei der Endlagerung, was die Belastung für Personen, die mit konzeptionellen Arbeiten und der Entwicklung regulatorischer Vorgaben befasst sind, erhöht. Zum Monitoring nach Abschluss der Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle beispielsweise wurden bisher bereits verschiedene technische Vorarbeiten geleistet, zu Ziel und Zweck des Monitorings wurde aber noch kein differenzierterer gesellschaftlicher Diskurs geführt. Zudem muss geklärt werden, anhand welcher Kriterien über eine Rückholung entschieden werden

soll und wer eine mögliche Entscheidung zur Rückholung fällen kann und soll.

Die Oberflächenlagerung bietet zwar die Möglichkeit, zumindest teilweise auf bereits bestehende Grundlagen für Zwischenlager für hoch radioaktive Abfälle zurückzugreifen. Wichtige konzeptionelle Arbeiten müssen für diese Option jedoch erst neu geleistet werden. Dies wirkt sich tendenziell negativ auf kalkulierbare Risiken durch hohe Arbeitsbelastung und konfliktbelastete Situationen aus.

Im Hinblick auf die kalkulierbaren Risiken, die mit konzeptionellen Arbeiten und der Entwicklung regulatorischer Vorgaben einhergehen, werden die beiden Tiefenlageroptionen als letztlich etwa gleichwertig eingeschätzt: Die Endlagerung weist Vorteile auf, da hier bereits viele Grundlagen bestehen und Vorarbeiten geleistet wurden. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit kann wohl auf die beste Akzeptanz in der Bevölkerung zählen.

Bei der Oberflächenlagerung müssen noch am meisten konzeptionelle Arbeiten geleistet und gesellschaftliche Diskussionen geführt werden. Die konzeptionellen Arbeiten betreffen sowohl die Ausgestaltung dieser Entsorgungsoption als auch die Ausgestaltung eines geeigneten Standortauswahlverfahrens und Vorarbeiten für die nachfolgenden Genehmigungs- und Realisierungsschritte (vgl. 4.2.2). Gesellschaftliche Diskussionen sind nicht nur dazu erforderlich, wie ein sicheres und gerechtes Standortauswahlverfahren auszusehen hat, sondern auch dazu, welche Sicherheitsanforderungen an eine Entsorgungsanlage zu stellen sind, die über etwa 200 Jahre hinweg in Betrieb bleiben soll.

Die kalkulierbaren Risiken, die auf Planung und Verfahren zurückgehen, sind bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit geringer als bei der Oberflächenlagerung. Dies ist vor allem darin begründet, dass für die Oberflächenlagerung in der

vorliegenden Phase die meisten, anspruchsvollsten und potentiell umstrittensten konzeptionellen Arbeiten geleistet werden müssen.

Forschung und Entwicklung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen, die sich in dieser Phase mit Forschung und Entwicklung befassen, sind voraussichtlich durch konventionelle Arbeitsrisiken geprägt, die beispielsweise mit Arbeitsunfällen oder der Einwirkung chemischer Substanzen in Verbindung stehen. In manchen Fällen ist auch die Einwirkung ionisierender Strahlung zu berücksichtigen. Wenn Arbeiten unter hohem Zeit- und/oder Konkurrenzdruck durchgeführt werden müssen, ist mit psychischen Belastungen zu rechnen.

Bisher stand in Deutschland und vielen weiteren Ländern die Endlagerung als Entsorgungsoption im Vordergrund. Zu dieser Entsorgungsoption wurden bereits viele Forschungsarbeiten durchgeführt. Forschung und Entwicklung in Deutschland haben sich jedoch bisher auf das Wirtsgestein Salz konzentriert. Zu einem möglichen Endlager in Ton/Tonstein bzw. auch Kristallin ist daher weitere Forschung und Entwicklung erforderlich. Wird die Tiefenlagerung um Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit erweitert, dann sind neben den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, wie sie auch das Endlager erfordert, zusätzliche Arbeiten notwendig. Diese Arbeiten betreffen Monitoring und Rückholbarkeit sowie weitere indirekt damit zusammenhängende Fragen. Wirtsgesteinsspezifische Untersuchungen müssen sowohl für Salz als auch für Tongestein und ggf. Kristallin durchgeführt werden.

Die Oberflächenlagerung erfordert vor allem Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die auf Betriebseinrichtungen sowie die dauerhafte Sicherheit der Lagerbehälter und der Gebäudehülle ausgerichtet sind – auch bei unwahrscheinlicheren oder sich im Lauf der Zeit verändernden inneren und äußeren Einwirkungen. Zudem ist zu klären, wie der sichere Betrieb

des Lagers und die anschließende weitere Entsorgungslösung organisiert und finanziert werden können.

Der größte Forschungsbedarf besteht also bei der Oberflächenlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Für Forschung und Entwicklung werden voraussichtlich mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt, wenn die gesellschaftliche Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption groß ist. Eine hohe Akzeptanz erhöht die Bereitschaft, in eine Option zu investieren – auch weil damit die Zuversicht steigt, dass die bei Forschung und Entwicklung eingesetzten Mittel tatsächlich einer realisierbaren und tragfähigen Lösung zugutekommen werden. Aus derzeitiger Perspektive weist die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit daher gegenüber den anderen beiden Optionen Vorteile hinsichtlich der Vergabe von Forschungsmitteln und Mitteln für Entwicklungsarbeiten auf. Dies könnte sich positiv auf die Arbeitsbedingungen der in Forschung und Entwicklung Beschäftigten und damit auch auf die entsprechenden kalkulierbaren Risiken auswirken. Mehr Beschäftigte in Forschung und Entwicklung aufgrund größerer Investitionen in entsprechende Projekte gehen allerdings auch mit einem steigenden kollektiven Risiko für Personen einher.

Insgesamt werden die Auswirkungen der Akzeptanz auf die kalkulierbaren Risiken bei Forschung und Entwicklung daher als nicht eindeutig und die Unterschiede zwischen den Optionen als für das gesamte Risiko in der laufenden Phase nicht entscheidend eingestuft.

Bei den Tiefenlagern wird ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Felslabors stattfinden. Die Arbeit unter Tage ist für Forschende, aber auch für Personen, die Instandhaltungsarbeiten vornehmen, und für Besucher mit größeren kalkulierbaren Risiken verbunden als die ausschließliche Arbeit über Tage, wie sie bei der Oberflächenlagerung zu erwarten ist. Die kalkulierbaren Risiken in Felslabors gehen vor allem auf

Unfall- und Störfallrisiken sowie ggf. auch auf Emissionen von natürlichen Radionukliden zurück. Zur Erkundung des geologischen Untergrunds können zudem Arbeiten im Feld erforderlich sein.

Die kalkulierbaren Risiken bei Forschungsarbeiten im Feld und in Felslabors, die für die Tiefenlagerung notwendig sind, stufen wir höher ein als die kalkulierbaren Risiken bei Forschungsarbeiten zur Oberflächenlagerung.

Ob die kalkulierbaren Risiken, die mit der Oberflächenlagerung in Verbindung stehen, größer oder geringer sind als jene, die sich mit der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit verbinden, lässt sich aus heutiger Perspektive nicht entscheiden. Die kalkulierbaren Risiken werden jedoch bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit voraussichtlich höher als bei der Endlagerung ausfallen.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen, die sich in dieser Phase mit Transporten und der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle sowie evtl. noch mit der Verpackung befassen, sind voraussichtlich vor allem durch konventionelle Arbeitsrisiken geprägt, beispielsweise Verletzungen bei Arbeitsunfällen, sowie durch die Einwirkung ionisierender Strahlung. Dazu treten Sicherungsrisiken, also Risiken, die auf beabsichtigte schädigende Einwirkungen zurückgehen. Diese Risiken dürften vor allem für Transporte hoch radioaktiver Abfälle von den Kernanlagen zu den Zwischenlagern relevant sein (siehe „Sicherung und Kernmaterialüberwachung“).

Von kalkulierbaren Risiken betroffen sind insbesondere Personen, die aus beruflichen Gründen mit den Abfällen umgehen. Störfallrisiken betreffen auch die Anwohner von Zwischenlagern und Transportrouten.

Zwischen den Entsorgungsoptionen bestehen in der vorliegenden Phase keine wesentlichen Unterschiede, da sowohl bei den Tiefenlagern als auch beim Oberflächenlager gleichermaßen Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung erforderlich sind.

Die kalkulierbaren Risiken, die auf Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Bauliche Aktivitäten. In dieser Phase sind keine größeren baulichen Aktivitäten vorgesehen, die in direktem Zusammenhang mit der Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle stehen. Eventuell erforderliche bauliche Maßnahmen an Zwischenlagern betreffen die Tiefenlageroptionen und die Oberflächenlagerung voraussichtlich in gleicher Art und Weise.

Die kalkulierbaren Risiken, die auf bauliche Aktivitäten zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Betrieb der Entsorgungsanlage. In dieser Phase stehen weder ein Tiefen- noch ein Oberflächenlager für hoch radioaktive Abfälle in Betrieb. Der Betrieb der Zwischenlager wurde unter „Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung“ behandelt.

Die kalkulierbaren Risiken, die auf betriebliche Aktivitäten in einem Tiefen- oder Oberflächenlager zurückgehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen im Zusammenhang mit Sicherung und Kernmaterialüberwa-

chung sind vielfältig. Ein schwerer Angriff, zum Beispiel ein gut geplanter und mit ausreichenden Mitteln durchgeführter terroristischer Angriff auf ein Zwischenlager, kann zu weitreichenden Schäden führen, die nicht nur das Personal der Kernanlage, sondern auch Anwohner und Einsatzkräfte betreffen.

Aber auch unspektakuläre Ereignisse wie kleine, friedliche Demonstrationen oder Mahnwachen bei Zwischenlagern bzw. an Orten, wo wichtige Entscheidungen zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung gefällt werden, sind mit Belastungen verbunden, die sowohl die Demonstrierenden als auch jene betreffen, die mit der Demonstration angesprochen sind und die ggf. aufgebotenen Einsatzkräfte. Dabei handelt es sich in erster Linie um psychische Belastungen.

Wir gehen davon aus, dass die Akzeptanz der für die Zukunft gewählten Entsorgungsoption in der vorliegenden Phase keinen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheitsrisiken an den Standorten der Zwischenlager oder bei Transporten hoch radioaktiver Abfälle zu den Zwischenlagern ausübt.

Die kalkulierbaren Risiken im Zusammenhang mit der Sicherung und Kernmaterialüberwachung unterscheiden sich bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen voraussichtlich kaum. Sie stehen in erster Linie im Zusammenhang mit der Zwischenlagerung und ggf. letzten noch stattfindenden Transporten zu den Zwischenlagern, die bei allen drei untersuchten Entsorgungsoptionen gleichermaßen erforderlich sind.

Die kalkulierbaren Risiken im Zusammenhang mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

4.1.3. Abwägung

Einschätzbarkeit der Risiken. Die Einschätzung der kalkulierbaren Risiken wird in der laufenden Phase bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen durch Ungewissheiten erschwert (vgl. 3.1).

Dauer der Phase. Die Dauer der vorliegenden Phase und das Ausmaß möglicher zeitlicher Verzögerungen unterscheiden sich bei den drei Entsorgungsoptionen nicht wesentlich (vgl. 3.1.2). Die identifizierten kalkulierbaren Risiken sind bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen über einen ähnlichen Zeitraum relevant.

Anzahl betroffener Personen. Die laufende Phase wird vor allem durch konzeptionelle Arbeiten, Planung und Verfahren bestimmt. Diese Aktivitäten und die damit verbundenen kalkulierbaren Risiken werden zahlreiche Personen betreffen, zum Beispiel bei der mit der Realisierung der Entsorgungsoption beauftragten Organisation, nach derzeitigem Stand also der Bundesgesellschaft für Endlagerung, und den Aufsichts- und Genehmigungsbehörden. Die Endlagerung wird voraussichtlich weniger Personen beschäftigen als die anderen beiden Entsorgungsoptionen, da bei der Endlagerung in der Vergangenheit bereits das höchste Maß an Vorarbeiten geleistet worden ist.

Hohe individuelle Risiken. Ein Schwerpunkt in Bezug auf die Größe der zu erwartenden individuellen Risiken liegt bei der Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle, die vor allem mit kalkulierbaren Risiken für in den Entsorgungsanlagen Beschäftigten sowie für die Anwohner dieser Anlagen verbunden ist. Zwischen den Entsorgungsoptionen bestehen hier keine deutlichen Unterschiede.

Merkmale der Entsorgungsoptionen. Zur Option Endlagerung wurden bereits die meisten Vorarbeiten geleistet. Dies trägt zu verhältnismäßig geringen kalkulierbaren Risiken für Personen bei, die sich mit der Entwick-

lung von Vorgaben und Konzepten, mit der Planung sowie mit Forschung und Entwicklung befassen.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit erfordert ebenso wie die Oberflächenlagerung mehr Vorarbeiten als die Endlagerung. Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung verbinden, sind daher größer als bei der Endlagerung.

In der vorliegenden Phase sind noch keine Entsorgungsanlagen im Bau oder Betrieb, die spezifisch für eine der untersuchten Entsorgungsoptionen sind. Die kalkulierbaren Risiken, die mit Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung in Verbindung stehen, sowie die Sicherheitsrisiken unterscheiden sich daher bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen nicht wesentlich.

Gesamthaft werden die kalkulierbaren Risiken bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen als ähnlich eingeschätzt. Aufgrund der umfassenderen Vorarbeiten fallen die kalkulierbaren Risiken bei der Endlagerung aber letztlich geringer als jene bei den anderen beiden Optionen aus.

Die kalkulierbaren Risiken sind in der betrachteten Phase bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und der Oberflächenlagerung.

4.2. Nähere Zukunft

ca. Jahr 10 bis 30 nach Start der Entsorgungslösung

4.2.1. Wichtigste Schritte

- Standortauswahl
- Eignungsnachweis am gewählten Standort
- Genehmigungsverfahren, Bau und Inbetriebnahme der Entsorgungsanlage (nur Oberflächenlager)

4.2.2. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Die Standortauswahl und die Genehmigungsverfahren sind für die aktiv an Planung und Verfahren Beteiligten vor allem von „Schreibtischarbeit“, fachlichen Diskussionen und gegenseitiger Abstimmung und dem gesellschaftlichen Diskurs geprägt. Bei den kalkulierbaren Risiken, die mit Planung und Verfahren einhergehen, stehen psychische Belastungen im Vordergrund. Diese Belastungen gehen vor allem auf quantitativ und qualitativ hohe Leistungsanforderungen und konfliktreiche Situationen zurück.

Der Druck, der in Form von hohen Leistungsanforderungen auf den handelnden Personen lastet, ist wesentlich von den terminlichen Vorgaben für Planung und Verfahren und von den zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie von der politischen Rückendeckung für das Verfahren abhängig.

Im Hinblick auf die Realisierung des Oberflächenlagers sind in der vorliegenden Phase mehr Verfahrensschritte zu bewältigen als bei den Tiefenlagern, und es müssen mehr politisch relevante Entscheidungen getroffen werden, bis das Lager am Ende der vorliegenden Phase bereit zur Inbetriebnahme ist.

Bei den Tiefenlageroptionen ist die laufende Phase vor allem auf das Standortauswahlverfahren und die Vorbereitung der nachfolgenden Genehmigungsverfahren ausgerichtet.

Sowohl beim Oberflächenlager als auch bei den Tiefenlagern muss in der vorliegenden Phase die Stilllegung der bis dahin genutzten Zwischenlager vorbereitet und im Fall der Tiefenlager auch zumindest teilweise bereits in die Wege geleitet werden.

Darüber hinaus erfordern die Tiefenlageroptionen fünf neue regionale Anlagen für die Zwischenlagerung, die in der laufenden Phase bis zur Inbetriebnahme geplant und genehmigt werden müssen.

Bei den Tiefenlagern werden die kalkulierbaren Risiken, die auf hohe Leistungsanforderungen an die aktiv an Planung und Verfahren beteiligten Personen zurückgehen, daher voraussichtlich ähnlich ausfallen wie beim Oberflächenlager.

Die Belastung von Personen durch konfliktbeladene Situationen wird durch die Akzeptanz der gewählten Entsorgungsoption, voraussichtlich aber vor allem durch die Ausgestaltung der Verfahren bestimmt, die in der vorliegenden Phase ablaufen müssen. Aus heutiger Perspektive zeichnen sich im Hinblick auf die Verfahren keine klaren Unterschiede zwischen den Optionen ab. Grund dafür ist vor allem, dass noch nicht bekannt ist, wie die Verfahren, die in der vorliegenden Phase ablaufen, gestaltet und umgesetzt werden.

Die durch Planung und Verfahren bedingten kalkulierbaren Risiken unterscheiden sich bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen nicht deutlich.

Untersuchungen, Forschung und Entwicklung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen, die sich in dieser Phase mit Forschung und Entwicklung befassen, werden voraussichtlich vor allem durch konventionelle Arbeitsrisiken bestimmt, die beispielsweise mit Arbeitsunfällen oder der Einwirkung

von Chemikalien in Verbindung stehen. In manchen Fällen ist auch die Einwirkung ionisierender Strahlung von Bedeutung. In Felslabors können je nach Beschaffenheit des geologischen Untergrunds Belastungen durch natürliche Radioaktivität auftreten. Psychische Belastungen sind vor allem dann denkbar, wenn Arbeiten unter hohem Zeit- bzw. Konkurrenzdruck durchgeführt werden müssen.

Bei den Tiefenlagern ist mit hohem Forschungs-, Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf in der vorliegenden Phase zu rechnen. Mögliche Standorte müssen eingehender erkundet und konkrete bauliche und technische Lösungen vorbereitet werden. Techniken, die für ein Tiefenlager benötigt werden, werden zunehmend in Felslabors erprobt. Untertägige Erkundungen und Forschungsarbeiten in Felslabors sind im Vergleich zu Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für das Oberflächenlager, die über Tage – beispielsweise in Versuchshallen – stattfinden, mit erhöhten Risiken für Menschen verbunden.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf nach wie vor größer als bei der Endlagerung. Grund dafür sind vor allem Arbeiten, die mit der späteren Umsetzung von Monitoring und Rückholbarkeit im Zusammenhang stehen.

Auch vor dem Bau und der Inbetriebnahme des Oberflächenlagers sind spezifische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Gegen Ende der vorliegenden Phase werden diese Aktivitäten voraussichtlich reduziert und neu auf den Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers ausgerichtet werden.

Wegen der im Verlauf der Phase nachlassenden Aktivitäten und den ausschließlich übertägigen Forschungsarbeiten werden die kalkulierbaren Risiken beim Oberflächenlager geringer eingestuft als bei den Tiefenlagern. Wegen des höheren Forschungsbedarfs beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit werden die kalkulierbaren Risiken dort größer eingeschätzt als beim Endlager.

Sowohl das Standortauswahlverfahren für ein Oberflächenlager als auch das Standortauswahlverfahren für ein Tiefenlager beinhalten die übertägige Erkundung potentiell geeigneter Standorte. Die kalkulierbaren Risiken, die mit der übertägigen Erkundung in Verbindung stehen, dürften sich bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen in einem ähnlichen Bereich bewegen und beziehen sich vor allem auf den konventionellen Arbeitsschutz. Da ein Tiefenlager auch Oberflächenanlagen umfasst, müssen dort ebenso wie beim Oberflächenlager Baugrunduntersuchungen vorgenommen werden – allerdings erst in einer späteren Phase des Standortauswahlprozesses.

Die durch Untersuchungen, Forschung und Entwicklung bedingten kalkulierbaren Risiken sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen, die sich in dieser Phase mit Transporten und der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle befassen, sind voraussichtlich vor allem durch konventionelle Arbeitsrisiken geprägt, z.B. Verletzungen bei Arbeitsunfällen, sowie durch die Einwirkung ionisierender Strahlung. Dazu treten Sicherungsrisiken. Diese Risiken dürften vor allem für Transporte von den bisherigen dezentralen Zwischenlagern an den Kernanlagen zu den regionalen Zwischenlagern relevant sein (siehe „Sicherung und Kernmaterialüberwachung“).

Von kalkulierbaren Risiken betroffen sind insbesondere Personen, die aus beruflichen Gründen mit den Abfällen umgehen. Störfallrisiken betreffen auch die Anwohner von Zwischenlagern und Transportrouten.

Bei allen Entsorgungsoptionen muss die Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in der vorliegenden Phase fortgeführt werden.

Bei den Tiefenlageroptionen läuft der Betrieb der heute bestehenden Zwischenlager im Verlauf der Phase aus. Dies könnte dazu führen, dass die betrieblichen Risiken ansteigen, zum Beispiel aufgrund nachlassender Sicherheitskultur bei der Belegschaft oder zunehmender Alterung und Veraltung technischer Komponenten, die im Hinblick auf die bevorstehende Außerbetriebnahme eines Zwischenlagers nicht mehr gewartet oder nachgerüstet wurden.

Während die älteren Zwischenlager dem Rückbau entgegensehen, gehen fünf neue Zwischenlager in Betrieb. Die neuen Zwischenlager werden voraussichtlich so ausgelegt sein, dass die kalkulierbaren betrieblichen Risiken geringer ausfallen als bei den zuvor in Betrieb stehenden Zwischenlagern. Unmittelbar nach der Inbetriebnahme ist jedoch mit vorübergehend erhöhten kalkulierbaren Risiken zu rechnen, bis sich der Betrieb der neuen Zwischenlager eingespielt hat.

Die Umlagerung der hoch radioaktiven Abfälle aus den zuvor bestehenden Zwischenlagern in neue regionale Zwischenlager ist mit erhöhten kalkulierbaren Risiken verbunden, die primär auf die Handhabung und den Transport der hoch radioaktiven Abfälle zurückgehen.

Bei der Oberflächenlagerung bleiben die bestehenden Zwischenlager bis zum Ende der vorliegenden Phase in Betrieb. Transporte von hoch radioaktiven Abfällen werden voraussichtlich nicht erforderlich sein, da die Einlagerung der Abfälle in das Oberflächenlager erst in der nachfolgenden Phase beginnt.

Der auslaufende Betrieb der bereits heute bestehenden Zwischenlager könnte dazu führen, dass die betrieblichen Risiken in diesen Zwischenlagern ansteigen, zum Beispiel aufgrund nachlassender Sicherheitskultur oder zunehmender Alterung und Veraltung technischer Komponenten, die im Hinblick auf die bevorstehende Außerbetriebnahme des Zwischenlagers nicht mehr gewartet oder nachgerüstet wurden.

Die durch Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung bedingten kalkulierbaren Risiken sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Bauliche Aktivitäten. Bauliche Aktivitäten sind mit kalkulierbaren Risiken verbunden, die in erster Linie auf Unfälle sowie auf die Einwirkung von Schadstoffen, Stäuben und Lärm und mechanische Belastungen für die auf der Baustelle Beschäftigten zurückgehen. Einige dieser Risiken betreffen auch die Anwohner der Baustelle.

In der vorliegenden Phase sind bauliche Arbeiten bei allen untersuchten Entsorgungsoptionen von Bedeutung.

Beim Bau des Oberflächenlagers muss vor allem mit kalkulierbaren Risiken gerechnet werden, die den Bereich der konventionellen Arbeitssicherheit betreffen. Im Jahr 2014 ereigneten sich in Deutschland im Baugewerbe 62 meldepflichtige Arbeitsunfälle je 1'000 Vollarbeiter. Die Anzahl der tödlichen Arbeitsunfälle hat in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland stark abgenommen – von etwa 5'000 zu Beginn der 1960er Jahre auf 639 im Jahr 2014 (baua, 2016). Dieser Trend wird zum einen dadurch beeinflusst, dass die Intensität des Bergbaus in Deutschland sehr deutlich nachgelassen hat und nur noch wenige Personen in diesem Bereich arbeiten. Sie geht zum anderen aber auch auf Verbesserungen in den Bereichen der technischen und organisatorischen Arbeitssicherheit zurück. Letzterer Trend könnte sich in die Zukunft fortsetzen, im Baugewerbe zum Beispiel aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Robotern und von Sicherheitstechnologie. Dennoch muss auf einer Großbaustelle, wie sie das Oberflächenlager darstellen wird, und in deren Umfeld voraussichtlich nach wie vor mit kalkulierbaren Risiken für Menschen gerechnet werden –

durch Arbeits- und Verkehrsunfälle, aber auch aufgrund von Emissionen von Staub, Lärm etc.

Wenn bei der Standortauswahl für das Oberflächenlager auf die Bevölkerungsdichte und mögliche weitere Gefahrenpotentiale im Umfeld des Lagers Rücksicht genommen wird, lassen sich dadurch die kalkulierbaren Risiken für Anwohner der künftigen Anlage beim Bau reduzieren.

Während der Standortauswahl, den Genehmigungsverfahren und dem Bau eines Oberflächenlagers müssen an den bestehenden Zwischenlagern Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Ggf. werden Nachrüstungen erforderlich.

Im Zusammenhang mit den Tiefenlageroptionen werden fünf neue zentrale Zwischenlager errichtet. Es ist zu erwarten, dass der Bau eines neuen Zwischenlagers weniger aufwendig und mit einem geringeren Maß an kalkulierbaren Risiken verbunden ist als der Bau eines Oberflächenlagers. Wichtige Gründe dafür sind vor allem die geringere geplante Betriebsdauer der Zwischenlager, die auch mit geringeren Anforderungen an das Bauwerk einhergeht, und das geringere Abfallvolumen, das in die Zwischenlager eingebracht werden soll. Dennoch wird der Bau von fünf Zwischenlagern voraussichtlich gesamthaft mit einem höheren Maß an kalkulierbaren Risiken verbunden sein als der Bau eines einzelnen Oberflächenlagers. Weitere kalkulierbare Risiken verbinden sich mit dem Rückbau der bestehenden Zwischenlager.

Zudem ist mit kalkulierbaren Risiken zu rechnen, die sich mit den Sondierbohrungen im Verlauf des Standortauswahlverfahrens verbinden sowie ggf. auch mit der Errichtung neuer Felslabors.

Die durch bauliche Aktivitäten bedingten kalkulierbaren Risiken sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Betriebliche Aktivitäten. In der vorliegenden Phase ist noch keine der auf Dauer angelegten Entsorgungsanlagen in Betrieb gegangen. Die betrieblichen Risiken, die mit der Zwischenlagerung in Zusammenhang stehen, werden unter „Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung“ behandelt.

Die durch betriebliche Aktivitäten bedingten kalkulierbaren Risiken unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die kalkulierbaren Risiken für Personen im Zusammenhang mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung sind vielfältig. Ein schwerer Angriff, zum Beispiel ein gut geplanter und mit ausreichenden Mitteln durchgeführter terroristischer Angriff auf ein Zwischenlager, kann zu weitreichenden Schäden führen, die nicht nur das Personal der Kernanlage, sondern auch Anwohner und Einsatzkräfte betreffen.

Aber auch unspektakuläre Ereignisse wie kleine, friedliche Demonstrationen oder Mahnwachen bei Zwischenlagern bzw. an Orten, wo wichtige Entscheidungen zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung gefällt werden, sind mit Belastungen verbunden, die sowohl die Demonstrierenden als auch jene betreffen, die mit der Demonstration angesprochen sind und die ggf. aufgebotenen Einsatzkräfte. Dabei handelt es sich in erster Linie um psychische Belastungen.

Bei der Oberflächenlagerung müssen in der vorliegenden Phase die meisten Realisierungsschritte durchlaufen werden, die Anlass für Proteste, auch gewaltsame Proteste, bieten könnten. Es finden jedoch keine Transporte zwischen Entsorgungsanlagen statt, die mit erhöhten Sicherheitsrisiken einhergehen könnten.

Bei den Tiefenlageroptionen kann die Errichtung und Inbetriebnahme der neuen Zwischenlager zu zusätzlichen Sicherheitsrisiken führen. Werden

die neuen Zwischenlager an den Standorten bestehender Zwischenlager errichtet, ist Widerstand von Anwohnern gegen die Umwandlung eines Zwischenlagers in ein „Dauerlager“ zu erwarten. Werden die neuen Zwischenlager an neuen Standorten errichtet, muss mit Widerstand an diesen Standorten gerechnet werden, die sich gegen die ihnen zusätzlich auferlegten Risiken wehren. Dabei werden voraussichtlich nicht nur Personen aus den Standortregionen mobilisiert, sondern auch weitere Kreise, die indirekt betroffen sind oder sich mit den direkt Betroffenen solidarisieren. Als „Trittbrettfahrer“ können dann auch gewaltbereite Personen und Organisationen relevant werden, bei denen Betroffenheit durch die Zwischenlager keine wesentliche Rolle mehr spielt. Bei den Tiefenlagern dürften die Vorteile, die die neuen Zwischenlager in Bezug auf Vorkehrungen zur Sicherung und Kernmaterialüberwachung mit sich bringen, in der laufenden Phase daher durch erhöhte Risiken beim Transport der Abfälle zwischen den älteren und den neuen Lagern sowie durch erhöhte Risiken an den Standorten der neuen Zwischenlager ungefähr aufgewogen werden.

Ob die kalkulierbaren Risiken der Tiefenlageroptionen jene der Oberflächenlagerung überwiegen oder geringer als bei der Oberflächenlagerung ausfallen, hängt stark von der Ausgestaltung der laufenden Phase und den politischen Rahmenbedingungen ab. Aus heutiger Sicht zeichnet sich kein klarer Vorteil für eine der drei Optionen ab.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung in Zusammenhang stehen, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen nicht deutlich.

4.2.3. Abwägung

Einschätzbarkeit der Risiken. Die Einschätzung der kalkulierbaren Risiken wird in der vorliegenden Phase durch Ungewissheiten beeinträchtigt (vgl. 3.2).

Dauer der Phase. Die Dauer der vorliegenden Phase ist bei der Oberflächenlagerung mit größeren Ungewissheiten verbunden als bei den Tiefenlageroptionen (vgl. 3.2.2) Grund dafür sind zum einen größere Ungewissheiten, die die Ausgestaltung und die gesellschaftliche Akzeptanz des Standortauswahlverfahrens betreffen. Zum anderen müssen bei dieser Option in der laufenden Phase relativ rasch mehrere wichtige Schritte auf dem Weg zur Realisierung durchlaufen werden. Daher besteht wenig Spielraum für Anpassungen der Planung aufgrund unerwarteter Ereignisse oder Entwicklungen. Die identifizierten kalkulierbaren Risiken könnten also bei der Oberflächenlagerung über einen längeren Zeitraum relevant sein als bei den Tiefenlageroptionen.

Anzahl betroffener Personen. Zu Beginn der Phase sind nach wie vor die meisten Personen von kalkulierbaren Risiken betroffen, die mit Planung und Verfahren im Zusammenhang stehen. Bei der Oberflächenlagerung treten dann im Verlauf der Phase zahlreiche Personen hinzu, die mit der Erstellung der Entsorgungsanlage beschäftigt sind. Bei den Tiefenlagern arbeitet voraussichtlich eine größere Anzahl von Personen als beim Oberflächenlager am Bau neuer regionaler Zwischenlager und am Rückbau der älteren Zwischenlager. Zudem werden hier auch Personen mit Transporten hoch radioaktiver Abfälle beschäftigt sein, was beim Oberflächenlager nicht der Fall ist.

Hohe individuelle Risiken. Die größten individuellen Risiken sind im Zusammenhang mit baulichen Aktivitäten zu erwarten. Diese Aktivitäten sind bei den Tiefenlageroptionen mit der Errichtung von fünf neuen regionalen Zwischenlagern und dem Rückbau der bestehenden Zwischenlager umfangreicher als beim Oberflächenlager. Bedeutendere individuelle Risiken sind zudem für die Tiefenlageroptionen im Zusammenhang mit den Transporten hoch radioaktiver Abfälle zu erwarten, auch in Form von Sicherheitsrisiken.

Merkmale der Entsorgungsoptionen. Gegen Ende der vorliegenden Phase stehen für die hoch radioaktiven Abfälle entweder ein Oberflächenlager bereit oder – im Fall der Tiefenlageroptionen – mehrere regionale neue Zwischenlager.

Bei den Tiefenlagern ist die Phase durch verschiedene Aktivitäten gekennzeichnet, die teilweise parallel ablaufen und mit kalkulierbaren Risiken verbunden sind. Dazu gehören vor allem das Standortauswahlverfahren, die Arbeiten für die neuen regionalen Zwischenlager, die Transporte zwischen älteren und neuen Zwischenlagern und die Stilllegung der älteren Zwischenlager.

Beim Oberflächenlager müssen in einem überschaubaren Zeitrahmen mehrere wichtige Umsetzungsschritte erfolgen, nämlich Standortauswahlverfahren, Genehmigungsverfahren und Bau. Zudem wird die Stilllegung der bestehenden Zwischenlager vorbereitet.

Nach unserer Einschätzung sind die kalkulierbaren Risiken in der vorliegenden Phase bei der Option Oberflächenlagerung trotz der höheren Ungewissheiten zur Dauer der Phase geringer als bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass die hoch radioaktiven Abfälle bei den Tiefenlageroptionen von älteren in neue Zwischenlager umgelagert werden, wobei die älteren Zwischenlager stillgelegt und rückgebaut und die neuen Zwischenlager erst errichtet werden müssen sowie zahlreiche Transporte hoch radioaktiver Abfälle erforderlich sind. Im Zusammenhang mit diesen Aktivitäten treten größere individuelle Risiken auf, und es sind zahlreiche Personen Risiken ausgesetzt.

Die kalkulierbaren Risiken der Oberflächenlagerung sind in der untersuchten Phase geringer als jene der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

4.3. Mittlere Zukunft

ca. Jahr 30 bis 55 nach Start der Entsorgungslösung

4.3.1. Wichtigste Schritte

- Bau der Entsorgungsanlage (Tiefenlager)
- Einlagerung der Abfälle und Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

4.3.2. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Gesundheitliche Belastungen von Personen sind vor allem auf hohe Leistungsanforderungen bzw. konfliktbeladene Situationen bei den an Planung und Verfahren aktiv beteiligten Personen zurückzuführen. Betroffen sein können sowohl Personen aus der Organisation, die den Bau einer Entsorgungsanlage in Auftrag gibt und den Betrieb der Anlage übernimmt, als auch Personen bei den Aufsichts- und Genehmigungsbehörden sowie bei Unternehmen, die an Bauvorhaben, Revisionen von Anlagen, technischen Nachrüstungen etc. als Ingenieurbüro, Bauunternehmen, Anwaltskanzlei etc. beteiligt sind.

In manchen Fällen können auch Anwohner und weitere Personen Risiken ausgesetzt sein, zum Beispiel, wenn es im Zusammenhang mit Planung und Verfahren zu Konflikten kommt.

Bei den gesundheitlichen Risiken, die im Zusammenhang mit Planung und Verfahren auftreten, überwiegen wahrscheinlich die psychischen Belastungen.

In der vorliegenden Phase werden die Tiefenlager errichtet. Im Verlauf der Bauphase, die sich über 25 Jahre erstreckt, vor allem zu Beginn der Bauphase, sind Planungen für weitere bauliche Schritte über und unter Tage erforderlich. Zudem muss der Betrieb der Entsorgungsanlage vorbereitet werden. Entsprechende Genehmigungen sind einzuholen und zu erteilen.

Wichtige Verfahrensschritte bei den Tiefenlageroptionen dürften aus heutiger Sicht mit einem erhöhten Kommunikationsaufwand verbunden sein und möglicherweise auch vermehrt Anlass für konfliktbeladene Situationen bieten.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist voraussichtlich mit höheren Belastungen für die an Planung und Verfahren beteiligten Personen verbunden als das Endlager. Gründe dafür sind die höhere Komplexität der Anlage und die spezifischen Anforderungen an Monitoring und Rückholbarkeit, die sich in einem Mehraufwand bei Planung und Verfahren niederschlagen und voraussichtlich auch häufiger als bei der Endlagerung neuartige, innovative Lösungsansätze verlangen oder zu umstrittenen Fragen führen.

Beim Oberflächenlager wird der Beginn des Einlagerungsbetriebs aus heutiger Sicht mit erhöhten Beanspruchungen für die beteiligten Personen einhergehen. Wahrscheinlich müssen Abläufe anhand erster Betriebserfahrungen optimiert, evtl. auch Anpassungen an der Planung von betrieblichen Abläufen und an der Planung der weiteren Module der Anlage vorgenommen werden.

Der Kommunikationsaufwand dürfte in den ersten Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage ebenfalls besonders hoch sein. Auch die Transporte hoch radioaktiver Abfälle zum Oberflächenlager und der Rückbau der Zwischenlager werden voraussichtlich mit vermehrtem Kommunikationsbedarf einhergehen.

Sobald die Anlage in den stabilen Langzeitbetrieb übergeht, reduzieren sich die Anforderungen, die im Zusammenhang mit Planung und Verfahren stehen. Planung und Verfahren sind dann voraussichtlich nur noch im Zusammenhang mit dem Bau weiterer Module oder Nachrüstungen der Anlage erforderlich. Daher werden die kalkulierbaren Risiken bei der Oberflächenlagerung geringer eingestuft als bei den Tiefenlagern.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit Planung und Verfahren in Zusammenhang stehen, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Forschung und Entwicklung. Bei Forschung und Entwicklung zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle werden Personen in der vorliegenden Phase voraussichtlich überwiegend konventionellen Arbeitsrisiken ausgesetzt sein, zum Beispiel aufgrund von Unfällen oder chemischen Emissionen. In manchen Fällen werden Risiken auftreten, die mit der Einwirkung ionisierender Strahlung in Zusammenhang stehen. Zudem dürften immer wieder auch psychische Belastungen eine Rolle spielen, etwa wenn ein Entwicklungsprojekt trotz unerwarteter Verzögerungen im Ablauf termingerecht abgeschlossen werden muss.

Kalkulierbare Risiken betreffen vor allem Personen, die direkt an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beteiligt sind. Risiken für Anwohner von Forschungs- und Entwicklungsanlagen, Besucher oder unbeteiligte Dritte sind voraussichtlich von untergeordneter Bedeutung.

Bei den Tiefenlagern ist die vorliegende Phase sowohl von Forschungsarbeiten geprägt, die auf die Standorteignung ausgerichtet sind, als auch von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Aspekten wie Umverpackung, Einlagerung, Monitoring und ggf. Rückholung. Ein Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten findet voraussichtlich unter Tage statt, vor allem im Erkundungsbergwerk am Standort des Tiefenlagers sowie ggf. auch weiterhin in Felslabors an anderen Standorten im In- und Ausland. Da der Bau des Tiefenlagers bereits im Gang ist und anschließend mit der Einlagerung der Abfälle begonnen werden soll, ist es gut vorstellbar, dass vor allem Entwicklungsarbeiten immer wieder unter zeitlichem Druck vorgenommen werden.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf ausgeprägter als bei der Endlagerung, weil weiterhin an Lösungen für das längerfristige Monitoring der Entsorgungsanlage und die Rückholbarkeit gearbeitet werden muss.

Bei der Oberflächenlagerung liegt der Bedarf an einer weiterführenden Entsorgungslösung, die spätestens bei Außerbetriebnahme des Oberflächenlagers zur Verfügung stehen muss, noch in größerer zeitlicher Ferne. Forschung und Entwicklung, die den Betrieb des Oberflächenlagers begleiten, werden voraussichtlich weiter durchgeführt aber mit geringer Intensität. Die Belastungen für Personen, die mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten befasst sind, dürften daher beim Oberflächenlager deutlich geringer ausfallen als bei den Tiefenlagern.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Forschung und Entwicklung verbinden, werden bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung eingeschätzt und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung sind mit Risiken für Personen verbunden, die sich beruflich mit diesen Aktivitäten befassen, setzen aber auch unbeteiligte Personen wie Anwohner Risiken aus. Neben Risiken, die auf die Einwirkung ionisierender Strahlung zurückgehen, sind der konventionelle Arbeits- und Immissionsschutz, der Schutz vor Störfällen und der Notfallschutz zu beachten.

Bei den Tiefenlageroptionen wird die Zwischenlagerung in der vorliegenden Phase in neueren Anlagen fortgesetzt, die im Verlauf der vorangehenden Phase in Betrieb genommen wurden. Evtl. werden in diesen Anla-

gen Abfälle umverpackt, zum Beispiel, wenn Zweifel daran bestehen, ob sich die Behälter oder deren Inhalt wie erwartet entwickeln. Aus heutiger Sicht müssen die Zwischenlager im Lauf der Zeit mit Nachrüstungsmaßnahmen dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden, was zu einer laufenden Verbesserung der Sicherheit dieser Anlagen führt.

Bei der Oberflächenlagerung läuft die Zwischenlagerung in der vorliegenden Phase aus, was die kalkulierbaren Risiken der Zwischenlagerung reduziert. Die hoch radioaktiven Abfälle müssen aus den Zwischenlagern ausgelagert und zum Oberflächenlager transportiert werden. Dadurch nehmen die kalkulierbaren Risiken für beruflich exponierte Personen aber auch gewisse Risiken für die Anwohner von Zwischenlagern und Transportstrecken vorübergehend zu.

Aus heutiger Sicht sind die kalkulierbaren Risiken, die aus Transporten ins Oberflächenlager resultieren, über ca. 20 Jahre zu Beginn der vorliegenden Phase hinweg groß.

Generell ist aus heutiger Sicht offen, welche Möglichkeiten in vierzig bis fünfzig Jahren bestehen, um Menschen vor den zu erwartenden kalkulierbaren Risiken in Zusammenhang mit Transporten, Verpackung und Zwischenlagerung zu schützen, zum Beispiel, indem Umverpackung und Transport von Abfällen gänzlich automatisiert erfolgen und Transporte evtl. in unterirdischen Gütertransporttunnels (Cargo sous terrain, 2018; VDI, 2016) abgewickelt werden.

Bei den Tiefenlagern ist über die gesamte Dauer der Phase mit kalkulierbaren Risiken aus der Zwischenlagerung zu rechnen. Diese Risiken könnten gegen Ende der Phase zunehmen, weil die Sicherheitsmaßnahmen in den Zwischenlagern mit deren auslaufendem Betrieb an Wirksamkeit nachlassen und Probleme mit der betrieblichen Sicherheitskultur auftreten. Gesamthaft werden jedoch die kalkulierbaren Risiken, die sich mit der

auslaufenden Zwischenlagerung und den Transporten zum Oberflächenlager verbinden, höher eingestuft, als jene, die mit der Lagerung in den zuvor neu errichteten fünf Zwischenlagern einhergehen.

Die durch Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung bedingten kalkulierbaren Risiken sind bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit geringer als bei der Oberflächenlagerung.

Bauliche Aktivitäten. Bauliche Aktivitäten sind mit kalkulierbaren Risiken verbunden, die in erster Linie auf Unfälle und Störfälle sowie auf die Einwirkung von Schadstoffen, Stäuben und Lärm zurückgehen. Bauliche Aktivitäten unter Tage können zudem mit einer erhöhten Strahlenbelastung aufgrund der natürlichen Radioaktivität im Untergrund verbunden sein (siehe unten).

Diese Risiken betreffen vor allem Personen, die auf der Baustelle beschäftigt sind, und Anwohner. Potentiell betroffen sind auch Besucher der Baustelle, Mitarbeitende von Aufsichtsbehörden etc.

Bei den Tiefenlagern beginnt die vorliegende Phase mit der genaueren untertägigen Erkundung des Standorts. Voraussichtlich wird ein Erkundungsbergwerk errichtet. Später werden die Einlagerungsstrecken vorangetrieben, bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit auch die Monitoringstrecken.

Die untertägigen Arbeiten, die für ein Tiefenlager erforderlich sind, sind aus heutiger Sicht immer noch mit erheblichen Risiken für die am Bau beteiligten Personen verbunden. So starben beim Bau des Gotthard-Basistunnels, der 2016 in der Schweiz in Betrieb genommen wurde, neun Personen und beim Bau des Lötschberg-Basistunnels, der 2007 in Betrieb ging, fünf Personen. Beim Bau des Eurotunnels, der 1993 vollendet wor-

den war, kamen elf Personen ums Leben (Soukup, 2016). Bei Arbeiten im geplanten französischen Tiefenlager Bure wurde 2016 eine Person getötet, als eine Stollenwand einbrach. Die Fortschritte, die bei der Arbeitssicherheit auf Baustellen in den letzten Jahrzehnten erzielt wurden, sind allerdings groß (vgl. 4.2.2). Voraussichtlich werden sich die kalkulierbaren Risiken bis zum Bau eines Tiefenlagers unter anderem durch bessere Messtechniken und den Einsatz von Baurobotern weiter vermindern.

Bei baulichen Arbeiten unter Tage können die an diesen Arbeiten beteiligten Personen und weitere Personen, die sich unter Tage aufhalten, Strahlenbelastungen durch die natürlicherweise im Wirtsgestein vorhandenen Radionuklide ausgesetzt sein. Wie hoch die Strahlenbelastung im konkreten Fall ausfällt, ist nicht einfach vorhersehbar (Saurí Suárez et al., 2017).

Abhängig von der Organisation der baulichen Arbeiten, den eingesetzten Verfahren und der Beschaffenheit des Untergrunds am Standort eines Tiefenlagers ist auch mit kalkulierbaren Risiken für Anwohner zu rechnen, etwa aufgrund von Lärm- und Staubemissionen sowie evtl. auch Emissionen von Radionukliden aus dem geologischen Untergrund.

Unfälle und Störfälle sind beispielsweise beim Baustellenverkehr denkbar oder aufgrund eines Brandereignisses.

Neben den untertägigen Anlageteilen müssen in der laufenden Phase auch die übertägigen Teile der Tiefenlager errichtet werden. Dabei ist besonders das Eingangslager zu nennen. An den in Betrieb stehenden Zwischenlagern sind weiterhin Instandsetzungsarbeiten sowie ggf. Nachrüstungen vorzunehmen, damit die Sicherheit der Anlagen bis zur Außerbetriebnahme gewährleistet ist. Diese übertägigen baulichen Arbeiten sind ebenfalls mit kalkulierbaren Risiken verbunden.

Beim Oberflächenlager können zu Beginn der vorliegenden Phase noch weitere Module des Lagers errichtet werden. Davon abgesehen sind in der vorliegenden Phase lediglich bauliche Kontroll- und Instandhaltungsarbeiten sowie ggf. erste Nachrüstungen zu erwarten. Die außer Betrieb gehenden Zwischenlager werden rückgebaut. Der Rückbau geht mit kalku-

lierbaren Risiken einher, die in erster Linie beruflich Involvierte betreffen. Beim Rückbau werden aber auch die Anwohner eines Zwischenlagers Belastungen ausgesetzt, zum Beispiel durch Lärm und Staubemissionen.

Aufgrund der umfassenden, vor allem untertägigen baulichen Arbeiten, die in der vorliegenden Phase erforderlich sind, werden die kalkulierbaren Risiken für beruflich involvierte Personen und nicht beruflich involvierte Personen bei der Tiefenlagerung höher als jene bei der Oberflächenlagerung eingestuft. Beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit muss ein größeres Hohlraumvolumen aufgefahren und betriebssicher gehalten werden als beim Endlager. Deshalb wird das bergbauliche Risiko für dieses Tiefenlager voraussichtlich größer ausfallen als für ein Endlager.

Die durch bauliche Aktivitäten bedingten kalkulierbaren Risiken sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Betriebliche Aktivitäten. Der Normalbetrieb einer Entsorgungsanlage ist vor allem mit kalkulierbaren Risiken für die in dieser Anlage beschäftigten Personen verbunden. Neben konventionellen Arbeitsrisiken treten auch radiologische Risiken auf.

Dazu kommen Unfall- und Störfallrisiken, die ebenfalls in erster Linie die in der Anlage Beschäftigten sowie ggf. weitere Personen, die sich in der Anlage aufhalten, betreffen, aber auch Auswirkungen zeigen können, die über das Anlagenareal hinausgehen. Diese Risiken werden durch die konventionelle und die spezifische nukleare Störfallvorsorge und den Notfallschutz begrenzt.

In der vorliegenden Phase befinden sich die Tiefenlager noch nicht im Einlagerungsbetrieb. Es finden jedoch bereits Untersuchungen und Ent-

wicklungsarbeiten am Standort der Entsorgungsanlage statt und Techniken, die im Einlagerungsbetrieb zum Einsatz kommen sollen, werden erprobt. Diese Arbeiten wurden weiter oben unter „Forschung und Entwicklung“ behandelt.

Der Einlagerungsbetrieb im Oberflächenlager umfasst mehrere Schritte:

- Eingangskontrolle der Transport- und Zwischenlagerbehälter
- Beförderung der Behälter in den Annahmehereich des Oberflächenlagers.
- Radiologische Kontrolle der eingehenden Behälter
- Abladen der Behälter vom Transportfahrzeug
- Verbringen der Behälter in die Heiße Zelle des Oberflächenlagers
- Ausladen der Brennelemente in der Heißen Zelle
- Kapselung der Brennelemente (oder Treffen einer anderen Maßnahme zur Gewährleistung der Handhabbarkeit der Brennelemente) in der Heißen Zelle
- Einlagerung der gekapselten Brennelemente in die Transport- und Lagerbehälter. Denkbar ist, dass dabei neue Behälter verwendet werden, die vorsorglich bereits für eine anschließende Endlagerung in tiefen geologischen Formationen optimiert worden sind.
- Verschluss der Transport- und Lagerbehälter und Anbringen von Monitoringeinrichtungen
- Transport der Behälter zum Stellplatz
- Ggf. anschließen an weitere Monitoringsysteme

Im Langzeitbetrieb sind dann primär Kontrollgänge erforderlich. In jedem Fall müssen Vorkehrungen getroffen und aufrechterhalten werden, um das Inventar bei Bedarf aus den bestehenden Lagerbehältern umzulagern (Reichardt, 2016, S. 1f.), zum Beispiel, wenn sich ein Behälter als defekt erweisen sollte.

Voraussichtlich wird ein erheblicher Teil der aufgeführten Prozesse automatisiert ablaufen. Dennoch ist mit kalkulierbaren Risiken zu rechnen. Diese Risiken betreffen vor allem Personen, die in der Anlage arbeiten. Während die Emissionen im Normalbetrieb der Anlage weitgehend vernachlässigbar sein dürften, lässt sich nicht vollkommen ausschließen, dass ein schwerer Unfall zu Schäden bei Anwohnern der Anlage und in der umgebenden Umwelt führt. Über die Genehmigungsanforderungen hinaus soll ein modularer Aufbau des Oberflächenlagers kalkulierbare Risiken, zum Beispiel aufgrund von Bränden oder terroristischen Angriffen, mindern (Reichardt, 2016, S. 3).

Durch betriebliche Aktivitäten bedingte kalkulierbare Risiken existieren in dieser Phase nur bei Oberflächenlagerung.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Veränderungen in der Bedrohungslage aus sicherheitspolitischer Perspektive wirken sich wahrscheinlich in dieser Phase auf das Oberflächenlager ähnlich wie auf die bei der Tiefenlagerung noch in Betrieb stehenden Zwischenlager aus. Das Inventar und damit auch das Schadenpotential des Oberflächenlagers sind größer als bei einem einzelnen Zwischenlager. Das Oberflächenlager wird aber voraussichtlich besser gegen Einwirkungen Dritter abgesichert sein als ein Zwischenlager.

Akzeptanzkrisen, die zu sicherungsrelevanten Ereignissen führen können, sind besonders beim Bau der Tiefenlager zu erwarten. Der Bau eines Tiefenlagers stellt nicht nur einen großen und verbindlichen Schritt in Richtung einer dauerhaften Entsorgungslösung dar, sondern ist auch mit spürbaren Belastungen für die Anwohner verbunden, zum Beispiel aufgrund des erhöhten Verkehrsaufkommens, Erschütterungen, Staubemissionen und Lärm.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung in Zusammenhang stehen, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei den Tiefenlageroptionen.

4.3.3. Variante Rückholung

Bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen steht in der vorliegenden Phase lediglich bei der Oberflächenlagerung eine auf lange Zeit angelegte Entsorgungsanlage in Betrieb. Die Rückholung aus einem Oberflächenlager ist ebenso wie die Auslagerung der Abfälle aus einem Zwischenlager im Allgemeinen mit verhältnismäßig geringem Aufwand und begrenzten Risiken möglich. Lediglich sehr schwerwiegende Einwirkungen von außen, zum Beispiel ein kriegerischer Angriff, könnten dazu führen, dass die Rückholung mit großen kalkulierbaren Risiken verbunden ist.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit einer Rückholung verbinden, unterscheiden sich bei den untersuchten Entsorgungsoptionen kaum.

4.3.4. Abwägung

Einschätzbarkeit der Risiken. In der laufenden Phase ist die Einschätzbarkeit der kalkulierbaren Risiken durch Ungewissheiten bereits deutlich erschwert.

Dauer der Phase. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung und bei der Endlagerung geringer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit (vgl. 3.3.2). Die kalkulierbaren Risiken könnten bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit über einen längeren Zeitraum relevant sein als bei der Endlagerung und der Oberflächenlagerung. 3.1.2

Anzahl betroffener Personen. Der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers lässt sich voraussichtlich mit einem überschaubaren Personalbestand realisieren. Dies gilt vor allem dann, wenn die Transporte und die Einlagerung ins Oberflächenlager abgeschlossen sind. Anhaltspunkte für den erforderlichen Personalbestand liefern die heutigen Zwischenlager und das Oberflächenlager HABOG in den Niederlanden – auch wenn deren Inventar deutlich geringer als jenes im hier betrachteten Oberflächenlager ist. Das Zentrale Zwischenlager Würenlingen in der Schweiz beispielsweise beschäftigt gegenwärtig ca. 80 Personen (ZWILAG, 2017). Im weiteren Verlauf der Phase geht schließlich auch die Anzahl der Personen zurück, die mit dem Rückbau der Zwischenlager beschäftigt sind.

Beim Bau der unter- und übertägigen Entsorgungsanlagen der Tiefenlager sind voraussichtlich wesentlich mehr Personen im Einsatz als beim Betrieb des Oberflächenlagers. Da das Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sowohl über als auch vor allem unter Tage die komplexere Anlage darstellt, erfordert seine Errichtung den Einsatz von mehr Personen als das Endlager.

Hohe individuelle Risiken. Bis zum Beginn der vorliegenden Phase sind weitere Fortschritte bei der Arbeitssicherheit auf Baustellen und bei der Handhabung radioaktiver Materialien in Entsorgungsanlagen für hoch radioaktive Abfälle zu erwarten. Ein wichtiger Grund dafür dürfte die zunehmende Automatisierung von Arbeitsabläufen sein.

Dennoch stufen wir die individuellen kalkulierbaren Risiken, die sich für viele auf der Baustelle beschäftigte Personen mit dem Bau eines Tiefenlagers und dem Rückbau von Zwischenlagern verbinden, als weiterhin höher ein als die Risiken, die mit Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung verbunden sind. Die individuellen kalkulierbaren Risiken, die mit dem Betrieb von Entsorgungsanlagen und den Transporten hoch radioaktiver Abfälle einhergehen, schätzen wir auf der Grundlage der gegenwärtigen Erfahrungen als im Allgemeinen geringer ein als die indivi-

duellen Risiken, die den Bau der Tiefenlager, insbesondere der untertägigen Anlagenteile, begleiten.

Große individuelle Risiken werden sich also voraussichtlich in erster Linie mit dem Bau der Tiefenlager verbinden.

Merkmale der Entsorgungsoptionen. In der vorliegenden Phase werden die kalkulierbaren Risiken daher durch den Bau der Tiefenlager dominiert – auch wenn Transporte einzig zwischen den Zwischenlagern und dem Oberflächenlager stattfinden, sich die betrieblichen Aktivitäten mit dem beginnenden Einlagerungsbetrieb im Oberflächenlager intensivieren und dort evtl. weitere Module errichtet werden. Dazu treten bei den Tiefenlagern auch höhere kalkulierbare Risiken bei Planung und Verfahren, Forschung und Entwicklung sowie Sicherung und Kernmaterialüberwachung als beim Oberflächenlager.

Aufgrund der komplexeren Anlage sind die mit Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung verbundenen Risiken beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als beim Endlager. Insbesondere muss aber bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ein größeres Hohlraumvolumen aufgefahren und betriebssicher gehalten werden als beim Endlager. Deshalb wird das bergbauliche Risiko für dieses Tiefenlager voraussichtlich größer ausfallen als für ein Endlager.

Die kalkulierbaren Risiken der Oberflächenlagerung sind in der betrachteten Phase geringer als jene der Endlagerung, jene der Endlagerung geringer als die kalkulierbaren Risiken der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

4.4. Weitere Zukunft

ca. Jahr 55 bis 90 nach Start der Entsorgungslösung

4.4.1. Wichtigste Schritte

- Einlagerung der Abfälle (Tiefenlager)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

4.4.2. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Planung und Verfahren können aus heutiger Sicht mit gesundheitlichen Risiken einhergehen, die auf hohe Leistungsanforderungen bzw. konfliktbeladene Situationen zurückzuführen sind und daher vor allem Risiken für die psychische Gesundheit sind. Ob in der vorliegenden Phase Planung und Verfahren ähnlich ablaufen wie dies heute der Fall ist, ist offen. Ebenso ist unbekannt, ob die Entsorgung radioaktiver Abfälle nach wie vor zu gesellschaftlichen Konflikten Anlass gibt und wie sich diese Konflikte äußern. Die Einschätzung der kalkulierbaren Risiken stößt daher in der vorliegenden Phase bereits deutlich an Grenzen.

In der laufenden Phase müssen aus heutiger Sicht vor allem für die Transporte der hoch radioaktiven Abfälle aus den Zwischenlagern in ein Tiefenlager und die Einlagerung der Abfälle in das Tiefenlager Genehmigungen beantragt und erteilt werden.

Bei beiden Tiefenlageroptionen, insbesondere aber bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit, müssen zudem Entscheidungen zur Durchführung des Monitorings des Lagers getroffen und während dem Verlauf der Phase dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung angepasst werden. Voraussichtlich setzen die Entscheidungen zum Monitoring entsprechende behördliche Verfahren voraus. Während der gesamten Einlagerung dürfte der Kommunikation mit Stakeholdern große Bedeutung zukommen.

Beim Endlager muss im Verlauf der vorliegenden Phase nach gegenwärtigem Stand die Genehmigung zum Verschluss des Lagers vorbereitet werden. Evtl. ist auch eine politische Entscheidung erforderlich, um den Verschluss des Lagers einzuleiten. Daher ist spätestens in der laufenden Phase verbindlich und eingehend zu klären, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit die Entscheidung getroffen werden kann, das Lager endgültig zu verschließen. Aus heutiger Sicht ist zu erwarten, dass die Entscheidung zum Verschluss des Endlagers noch einmal mit einem erheblichen Bedarf an Informationsaustausch und Diskussionen zwischen allen relevanten Stakeholdern einhergehen wird.

Während der Einlagerung in die Tiefenlager werden die Zwischenlager nach und nach rückgebaut. Auch dafür sind Planung und Verfahren erforderlich.

Bei den Tiefenlagern sind in der vorliegenden Phase also vielfältige Aktivitäten erforderlich, die mit Planung und Verfahren im Zusammenhang stehen. Die Anforderungen und damit auch die kalkulierbaren Risiken sind beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als beim Endlager. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei letzterem keine Arbeiten im Bereich des Monitorings und der Rückholbarkeit erforderlich sind.

Bei der Oberflächenlagerung sind in der laufenden Phase kaum planerische Aktivitäten und Genehmigungsverfahren zu erwarten. Ggf. werden bereits Vorarbeiten für die weitere Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle geleistet. Mit hohen Leistungsanforderungen und konfliktreichen Situationen ist hier nur dann zu rechnen, wenn außergewöhnliche Ereignisse oder Entwicklungen eintreten, die tiefgreifende Zweifel an der Sicherheit des Oberflächenlagers begründen bzw. die Ablösung der Oberflächenlagerung durch einen anderen Entsorgungspfad wichtig und dringend erscheinen lassen.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit Planung und Verfahren in Zusammenhang stehen, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Forschung und Entwicklung. Auch die kalkulierbaren Risiken im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung lassen sich in dieser Phase nur noch schwer einschätzen. Denkbar ist beispielsweise, dass viele Experimente durch Modellierungen und Simulationen ersetzt worden sind oder vollautomatisiert ablaufen. Auch Entwicklungsarbeiten könnten stark automatisiert sein.

Aus heutiger Sicht ist zu vermuten, dass sowohl der Betrieb des Endlagers als auch jener des Tiefenlagers mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und jener des Oberflächenlagers durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten begleitet werden. Diese Aktivitäten sind bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit intensiver als bei der Endlagerung (vgl. 4.3.2), was auch höhere kalkulierbare Risiken mit sich bringt.

Bei der Oberflächenlagerung muss der nächste Entsorgungsschritt vorbereitet werden. Allerdings ist das Lager so konzipiert, dass es noch über etliche Jahrzehnte in Betrieb stehen kann, so dass der Handlungsdruck nicht allzu hoch sein dürfte. Die kalkulierbaren Risiken im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung sind daher in der vorliegenden Phase wahrscheinlich gering. Aufgrund von Ungewissheiten über gesellschaftliche Entwicklungen und den weiteren geplanten Entsorgungspfad ist deren Einschätzbarkeit aber bereits deutlich eingeschränkt.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit Planung und Verfahren in Zusammenhang stehen, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der

Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Verpackung, Transporte und Zwischenlagerung. Wie bei Forschung und Entwicklung könnten sich die kalkulierbaren Risiken auch in diesem Bereich bis zur vorliegenden Phase wesentlich verändert haben und im Verlauf der Phase weiter wandeln.

Die Abfälle, die in ein Tiefenlager eingelagert werden sollen, werden in der laufenden Phase nach und nach von den regionalen Zwischenlagern zum Standort des Tiefenlagers transportiert. Die Intensität der Transporte von hoch radioaktiven Abfällen und die damit verbundenen Risiken nehmen in dieser Phase also deutlich zu. Die Abfälle werden für die Tiefenlagerung konditioniert und neu verpackt (siehe unten). Auch dadurch nehmen die Risiken zu. Zwischen der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit zeichnen sich gegenwärtig keine wesentlichen Unterschiede in den kalkulierbaren Risiken ab.

Bei der Oberflächenlagerung ist die Lagerung hoch radioaktiver Abfälle in den ursprünglichen Zwischenlagern in dieser Phase beendet. Transporte stehen nicht mehr an.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Verpackung, Transporten und Zwischenlagerung verbinden, unterscheiden sich bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit nicht wesentlich. Bei Oberflächenlagerung treten keine entsprechenden Risiken mehr auf.

Bauliche Aktivitäten. Die Sicherheitsrelevanz von baulichen Arbeiten kann aus heutiger Perspektive nur noch sehr ungenau eingeschätzt werden. Möglicherweise werden viele Arbeiten von Robotern ausgeführt, die Si-

cherheitsvorkehrungen auf Baustellen haben sich weiter verbessert und neuartige Monitorings- und Schutzmaßnahmen vermindern die Risiken für Personen, die mit den baulichen Arbeiten einhergehen, auf ein vernachlässigbares Maß. Möglicherweise führen fehlende Ressourcen aber auch dazu, dass die Risiken für die auf der Baustelle Beschäftigten und Personen im Umfeld der Baustelle im Vergleich zur aktuellen Situation gewachsen sind.

Bei den Tiefenlageroptionen werden parallel zur beginnenden und bereits laufenden Einlagerung weitere Einlagerungsstrecken aufgefahren. Voraussichtlich werden die meisten Einlagerungsstrecken schon verfüllt, während noch Behälter in weitere Einlagerungsstrecken eingebracht werden. Ist die Einlagerung in eine Strecke abgeschlossen, wird das Verschlussbauwerk für die Einlagerungsstrecke erstellt. Ist die Einlagerung in ein Einlagerungsfeld abgeschlossen, wird der Zugang zum Einlagerungsfeld verschlossen.

Vor dem Verschluss des Endlagers in der nachfolgenden Phase werden voraussichtlich Infrastrukturen in der untertägigen Anlage rückgebaut.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bleibt der Zugang zum Einlagerungsfeld nach Beendigung der Einlagerung vermutlich offen, die Einlagerungsstrecken sind aber verschlossen. Die Bohrungen für das Monitoring werden erst dann abgeteuft, wenn die entsprechende Einlagerungsstrecke verschlossen wurde. Aufgrund der Monitoringstrecken sind intensivere bauliche Aktivitäten erforderlich als bei der Endlagerung.

Die Zwischenlager werden nach der Einlagerung der Abfälle in ein Tiefenlager nicht mehr benötigt und daher in der vorliegenden Phase nach und nach rückgebaut.

Bei der Oberflächenlagerung beschränken sich die baulichen Aktivitäten in dieser Phase voraussichtlich auf Instandhaltungsarbeiten sowie ggf. auf Nachrüstungen der in Betrieb stehenden Anlage.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit baulichen Aktivitäten einhergehen, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Betriebliche Aktivitäten. Auch hier lassen sich die kalkulierbaren Risiken in der vorliegenden Phase aus heutiger Sicht kaum noch einschätzen. Grund dafür sind Ungewissheiten, die vor allem gesellschaftliche und technische Entwicklungen betreffen.

Beim Oberflächenlager sind die Beschäftigten der Anlage über die gesamte Dauer der laufenden Phase radiologischen Belastungen durch die gelagerten Abfälle ausgesetzt, die allerdings sehr gering ausfallen dürften. Bei den Tiefenlagern ist die radiologische Belastung von Beschäftigten voraussichtlich erheblich höher, da wesentlich mehr betriebliche Aktivitäten stattfinden – beispielsweise die Eingangskontrolle der Abfälle, deren Pufferlagerung, Umverpackung und Einlagerung ins Tiefenlager sowie Monitoringaktivitäten.

Die radiologische Belastung von Anwohnern und Besuchern der Anlage ist bei der Oberflächenlagerung aus heutiger Sicht sehr gering. Bei den Tiefenlagern wird sie trotz der abschirmenden Wirkung von Wirtsgestein und Deckgebirge höher ausfallen. Gründe dafür sind vor allem die Aktivitäten im übertägigen Teil der Anlage sowie ggf. auch (natürliche) radiologische Emissionen aus dem untertägigen Teil der Anlage.

Die Arbeitsrisiken werden sowohl durch die Art als auch durch die Intensität der betrieblichen Aktivitäten in einer Entsorgungsanlage bestimmt. In der laufenden Phase werden die Abfälle, die in ein Tiefenlager eingelagert werden sollen, nach und nach von den Zwischenlagern zum Standort des Tiefenlagers transportiert und dort in Endlagerbehälter umverpackt. Innerhalb der Entsorgungsanlage sind Transporte erforderlich. Kalkulier-

bare Risiken verbinden sich zudem mit der Einlagerung der Abfallbehälter in die Einlagerungsstrecken.

Zwischen der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit dürften dabei keine wesentlichen Unterschiede bestehen. Letztere erfordert jedoch zusätzlich betriebliche Aktivitäten, die mit dem Monitoring und der Gewährleistung der Rückholbarkeit im Zusammenhang stehen und mit kalkulierbaren Risiken einhergehen.

Spezifische Vorteile des Monitorings bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit für die Sicherheit der Entsorgungsanlage kommen in dieser Phase noch kaum zum Tragen, weil auch beim Endlager ein Monitoring während dem Bau und Betrieb stattfinden wird – das allerdings nicht von einer eigenen Monitoringsohle aus betrieben wird. Zudem werden Effekte, die beim Monitoring aus den Überfahrungsstrecken erfasst werden sollen, falls sie denn überhaupt auftreten, voraussichtlich erst nach längeren Zeiträumen sichtbar.

Das Oberflächenlager befindet sich im Langzeitbetrieb. Dabei werden wohl neue Techniken zum Einsatz kommen, die bis zum Beginn dieser Phase und in deren Verlauf entwickelt wurden. Wie hoch die Arbeitsrisiken ausfallen, lässt sich daher aus heutiger Perspektive nur schwer einschätzen. Sie dürften jedoch markant geringer sein als bei den Tiefenlagern, da im Vergleich zu den Tiefenlageroptionen sowohl deutlich weniger Aktivitäten erforderlich sind als auch Aktivitäten, die mit geringeren Arbeitsrisiken einhergehen.

Unfall- und Störfallrisiken begleiten den Betrieb aller drei Entsorgungsoptionen. Wir gehen davon aus, dass die entsprechenden kalkulierbaren Risiken für Personen bei der Oberflächenlagerung am geringsten sind, weil die Abfälle hier in der vorliegenden Phase nur gelagert werden und die Behälter nicht oder kaum bewegt werden. Bei den Tiefenlageroptionen wird dagegen mit den Behältern und den Abfällen hantiert, was größere Unfall- und Störfallrisiken mit sich bringt.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit betrieblichen Aktivitäten in Verbindung stehen, sind bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die Bedrohung durch Veränderungen der sicherheitspolitischen Lage sowie der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen und von Menschen verursachter Veränderungen der Natur auf die Bedrohungslage in dieser Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht einschätzen. Aussagen über kalkulierbare Risiken, die mit der Sicherung der Anlagen in Verbindung stehen, sind daher nicht möglich.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung verbinden, lassen sich nicht mehr einschätzen.

4.4.3. Variante Rückholung

Die Rückholung aus einem Tiefenlager ist während des Einlagerungsbetriebs mit begrenzten und relativ gut kalkulierbaren Risiken möglich, weil die Zugänge zu den Einlagerungsstrecken zumindest noch teilweise offenstehen und das Lager ausreichend mit Personal und Infrastrukturen für den Betrieb ausgestattet sein sollte, das auch im Fall einer Rückholung zum Einsatz kommen könnte.

Eine wichtige Voraussetzung für die Rückholung ist allerdings, dass mit den Oberflächenanlagen des Tiefenlagers oder den ggf. noch verbliebenen Zwischenlagern genügend Lagerkapazität zur Verfügung steht, um die ausgelagerten Abfälle aufzunehmen.

Die Rückholung aus dem Oberflächenlager ist in der vorliegenden Phase weiterhin mit verhältnismäßig geringem Aufwand und begrenzten Risiken möglich. Lediglich sehr schwerwiegende Einwirkungen von außen, zum

Beispiel ein kriegerischer Angriff, könnten dazu führen, dass die Rückholung mit großen kalkulierbaren Risiken verbunden ist.

Bei der Rückholung aus dem Oberflächenlager ist allerdings eher als bei der Rückholung aus einem Tiefenlager damit zu rechnen, dass ein Mangel an fachkompetentem Personal zu sicherheitsrelevanten Problemen führen könnte. Während der Langzeitbetrieb des Oberflächenlagers verhältnismäßig wenig fachkompetentes Personal erfordert, müssen für die vielfältigen Aktivitäten, die mit der Einlagerung in die Tiefenlager in Verbindung stehen, mehr personelle Kapazitäten vorgehalten werden.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit einer Rückholung verbinden, sind bei der Oberflächenlagerung geringer als bei der Endlagerung oder Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

4.4.4. Abwägung

Einschätzbarkeit der Risiken. Ungewissheiten erschweren die Einschätzung der kalkulierbaren Risiken in der vorliegenden Phase erheblich.

Dauer der Phase. Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase betreffen vor allem die Tiefenlageroptionen. Hier könnten sich neue technische Entwicklungen, die den Bau von Einlagerungsstrecken oder die Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle betreffen, gesellschaftliche Krisen, die mit Ressourcenknappheit einhergehen, und andere Entwicklungen deutlich auf die Dauer der vorliegenden Phase auswirken. Aus heutiger Perspektive lässt sich jedoch nicht entscheiden, ob eine Verkürzung oder eine Verlängerung der Phase wahrscheinlicher ist.

Anzahl betroffener Personen. Bei den Tiefenlageroptionen sind im Zusammenhang mit Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung, bei den Transporten hoch radioaktiver Abfälle, beim Einlagerungsbetrieb, bei baulichen Arbeiten am Tiefenlager und bei den Rückbauarbeiten

ten der Zwischenlager deutlich mehr Personen von kalkulierbaren Risiken betroffen als beim Oberflächenlager, das in der vorliegenden Phase weiterhin im stabilen Langzeitbetrieb stehen soll. Nach wie vor werden beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit voraussichtlich mehr Personen kalkulierbaren Risiken ausgesetzt sein als beim Endlager (vgl. 4.3.4).

Hohe individuelle Risiken. Hohe individuelle Risiken verbinden sich voraussichtlich vor allem mit den baulichen Arbeiten, die im Zusammenhang mit den Tiefenlageroptionen erforderlich sind, und bei den Aktivitäten rund um die Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in ein Tiefenlager.

Merkmale der Entsorgungsoptionen. Da sich das Oberflächenlager im voraussichtlich stabilen Langzeitbetrieb befindet, das Ende seiner Betriebszeit und die damit einhergehenden Aktivitäten aber noch in weiterer zeitlicher Ferne liegt, werden die kalkulierbaren Risiken, die sich mit dieser Entsorgungsoption verbinden, am geringsten eingeschätzt. Planung und Verfahren, Forschung und Entwicklung werden voraussichtlich keinen erheblichen Stellenwert haben und nur zu geringen kalkulierbaren Risiken führen. Auch bauliche Aktivitäten sind nur in geringem Umfang zu erwarten. Zwischenlagerung und Transporte wurden bereits in der vorangehenden Phase abgeschlossen.

Der Einlagerungsbetrieb im Endlager ist mit intensiven Aktivitäten verbunden, die kalkulierbare Risiken für beruflich Involvierte aber auch für Personen in der Umgebung des Lagers mit sich bringen. Dazu zählen zum Beispiel die Umverpackung der Abfälle in Endlagerbehälter oder die Einlagerung der Endlagerbehälter in das Tiefenlager, das schrittweise Auffahren neuer Einlagerungsstrecken und deren Verfüllung. Auch bei Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung sind weiterhin Aktivitäten erforderlich. Die Transporte der hoch radioaktiven Abfälle zum Endla-

ger und der Rückbau der Zwischenlager gehen voraussichtlich mit größeren kalkulierbaren Risiken einher.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit treten zu den kalkulierbaren Risiken, die mit den Aktivitäten zur Endlagerung verbunden sind, noch weitere Risiken hinzu. Diese Risiken gehen auf vor allem auf die erforderlichen baulichen und betrieblichen Aktivitäten im Zusammenhang mit Monitoring und Rückholbarkeit zurück. Sie sind aber auch durch entsprechende Anforderungen bei Planung und Verfahren sowie Forschung und Entwicklung bedingt.

Die kalkulierbaren Risiken sind in der vorliegenden Phase bei der Oberflächenlagerung am geringsten und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit am größten.

4.5. Ferne Zukunft

ca. Jahr 90 bis Jahr 200 nach Start der Entsorgungslösung

4.5.1. Wichtigste Schritte

- Verschluss und Rückbau der Oberflächenanlagen (Endlager)
- Monitoring, Verschluss und Rückbau der Oberflächenanlagen (Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit)
- Langzeitbetrieb (Oberflächenlager)

4.5.2. Erforderliche Aktivitäten

Planung und Verfahren. Wie Planung und Verfahren in der vorliegenden Phase bewerkstelligt werden, ist heute nicht vorhersehbar. Wir gehen davon aus, dass die kalkulierbaren Risiken, die mit Planung und Verfahren verbunden sind, auch in Zukunft tendenziell umso größer ausfallen werden, je mehr Aktivitäten in einem gegebenen Zeitrahmen erforderlich sind.

Bei der Endlagerung müssen nur noch wenige Entscheidungen gefällt werden. Dabei geht es vor allem darum, den Verschluss der untertägigen und den Rückbau der übertägigen Anlage zu konkretisieren, das Endlager aus der aktiven Bewirtschaftung zu entlassen und die langfristige Dokumentation zu sichern.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit stehen dagegen noch vielfältige Aktivitäten an, die geplant und aus heutiger Sicht teilweise auch genehmigt werden müssen. Dazu zählt neben dem Monitoring auch der endgültige Verschluss des Lagers. Evtl. wird auch die Entscheidung für eine (Teil-)Rückholung getroffen. Zudem wird in der laufenden Phase der Rückbau der übertägigen Anlagen in die Wege geleitet.

Inwieweit für das Kontrollieren und Umpacken der Inventare in neue oder gewartete Transport- und Lagerbehälter im Oberflächenlager ein neues Genehmigungsverfahren erforderlich ist, lässt sich heute nicht einschätzen. Bei der Oberflächenlagerung sind aus gegenwärtiger Perspektive in der vorliegenden Phase zudem vorbereitende Arbeiten für den weiteren Entsorgungspfad erforderlich. Diese Vorbereitungsarbeiten werden voraussichtlich aufwendig sein. Für den weiteren Entsorgungspfad müssen wegweisende Entscheidungen gefällt werden.

Da der weitere Entsorgungspfad nicht bekannt ist, lassen sich die kalkulierbaren Risiken kaum mehr einschätzen. Aus heutiger Perspektive ist aber zu erwarten, dass die Vorbereitung eines neuen Entsorgungspfades hinsichtlich Planung und Verfahren mit größeren kalkulierbaren Risiken verbunden sein wird als der Weiterbetrieb bzw. der Verschluss eines Tiefenlagers.

Die kalkulierbaren Risiken schätzen wir also für die Entsorgungsoption Oberflächenlager am größten ein. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist aufgrund des höheren Bedarfs an Planung und Verfahren mit größeren kalkulierbaren Risiken verbunden als die Endlagerung.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Planung und Verfahren verbinden, sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Forschung und Entwicklung. Wie Forschung und Entwicklung in rund 100 bis 200 Jahren durchgeführt werden, ist heute nicht vorhersehbar. Wir gehen davon aus, dass die kalkulierbaren Risiken, die mit Forschung und Entwicklung verbunden sind, auch in Zukunft umso größer ausfallen wer-

den, je mehr Aktivitäten in einem gegebenen Zeitrahmen erforderlich sind.

Forschung und Entwicklung zur Endlagerung können bei planmäßigem Verlauf der Entsorgung in dieser Phase nahezu eingestellt werden. Evtl. werden noch Arbeiten zur Verbesserung des Umweltmonitorings, zur dauerhaften Sicherstellung der Kernmaterialüberwachung und zur Long-term Stewardship durchgeführt.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ist voraussichtlich weiterhin Forschung und Entwicklung erforderlich, um das Monitoring und die Vorkehrungen zur Rückholbarkeit auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu halten oder technisch weiter zu entwickeln. Zudem werden bei dieser Form der Tiefenlagerung auch höhere Anforderungen an den Kompetenzerhalt gestellt als bei der Endlagerung. Zum Kompetenzerhalt leisten Forschung und Entwicklung aus heutiger Sicht wichtige Beiträge.

Bei der Oberflächenlagerung muss der weitere Entsorgungspfad vorbereitet werden, was – soweit heute absehbar – mit intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten verbunden sein wird.

Die kalkulierbaren Risiken im Zusammenhang mit Forschung und Entwicklung sind bei der Oberflächenlagerung größer als bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als bei der Endlagerung.

Bauliche Aktivitäten. Auf welche Art und Weise in der vorliegenden Phase gebaut wird, ist heute nicht vorhersehbar. Möglicherweise werden bauliche Aktivitäten weitgehend von Robotern ausgeführt. Möglicherweise

werden Bauwerke auch aus Werkstoffen hergestellt, die heute noch unbekannt sind oder noch keine oder kaum Verwendung bei baulichen Aktivitäten finden. Wenn wir davon ausgehen, dass die kalkulierbaren Risiken, die mit baulichen Aktivitäten verbunden sind, auch in Zukunft umso größer ausfallen werden, je mehr Aktivitäten in einem gegebenen Zeitrahmen erforderlich sind, stellt diese Annahme daher lediglich eine grobe Annäherung an die Wirklichkeit dar.

In der vorliegenden Phase wird bei der Endlagerung die untertägige Anlage verschlossen. Die übertägige Anlage wird rückgebaut und das gesamte Endlager stillgelegt. Es finden also bauliche Aktivitäten statt, die sich zeitlich jedoch auf den Beginn der Phase konzentrieren dürften.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit werden der Rückbau der übertägigen Anlage und der Verschluss der untertägigen Anlage später als beim Endlager ausgeführt. Während des Monitoringzeitraums sind noch bauliche Instandhaltungsarbeiten erforderlich. Vor dem Verschluss der untertägigen Anlage werden Vorkehrungen, die dem Monitoring und der Rückholbarkeit dienen, zurückgebaut, und das Tiefenlager wird verschlossen. Auch die übertägigen Teile der Entsorgungsanlage werden stillgelegt und voraussichtlich vollständig oder zumindest zum größten Teil rückgebaut. Es sind also mehr bauliche Aktivitäten erforderlich als beim Endlager. Falls im Verlauf der Phase deutliche Fortschritte erzielt werden sollten, die die Sicherheit von baulichen Aktivitäten verbessern, liessen sich dadurch allerdings möglicherweise kalkulierbare Risiken, die auf ein höheres Maß an baulichen Aktivitäten zurückgehen als bei der Endlagerung kompensieren.

Das Oberflächenlager wird am Ende dieser Phase stillgelegt. Welche baulichen Aktivitäten die weiterführende Entsorgungslösung erfordert, ist nicht bekannt. Die kalkulierbaren Risiken, die sich in der vorliegenden

Phase mit baulichen Aktivitäten bei der Oberflächenlagerung verbinden, können daher nicht bewertet werden.

Die kalkulierbaren Risiken, die mit baulichen Aktivitäten einhergehen, sind der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größer als bei der Endlagerung. Bei der Oberflächenlagerung lassen sie sich aufgrund von Ungewissheiten über den weiteren Entsorgungspfad nicht mehr einschätzen.

Betrieb der Entsorgungsanlage. Wie sich der Betrieb von Entsorgungsanlagen in rund 100 Jahren bis 200 Jahren gestaltet, ist heute nicht vorhersehbar. Wahrscheinlich sind die betrieblichen Aktivitäten rund um die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle weitgehend automatisiert. Wenn wir davon ausgehen, dass die kalkulierbaren Risiken, die mit betrieblichen Aktivitäten verbunden sind, auch in Zukunft umso größer ausfallen werden, je mehr Aktivitäten in einem gegebenen Zeitrahmen erforderlich sind, stellt diese Annahme daher im besten Fall eine grobe Annäherung an die Wirklichkeit dar.

Im Endlager sind nach dessen Verschluss keine betrieblichen Aktivitäten mehr erforderlich. Kernmaterialüberwachung, Umweltmonitoring und Longterm Stewardship erfordern voraussichtlich noch einen sehr reduzierten Betrieb, vor allem bei den Institutionen, die für die Durchführung dieser Aufgaben zuständig sind. Mit Arbeiten, die mit größeren kalkulierbaren Risiken verbunden sind, ist nicht mehr zu rechnen.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wird der Betrieb während des Monitoringzeitraums weiter aufrechterhalten, um das Lager zu überwachen und die Bereitschaft zur Rückholung aufrecht zu erhalten. Durch die Offenhaltung des Lagers er-

höhen sich im Vergleich zum Endlager sowohl die kalkulierbaren Risiken im Normalbetrieb als auch die Unfall- und Störfallrisiken.

Im Oberflächenlager werden die Abfälle voraussichtlich nach 100 Jahren Lagerzeit inspiziert und in neue oder gewartete Transport- und Lagerbehälter verpackt. Ansonsten befindet sich das Lager weiter im Langzeitbetrieb, bis am Ende dieser Phase ein anderer Entsorgungspfad definitiv vorbereitet wird.

Wir schätzen die kalkulierbaren Risiken aufgrund betrieblicher Aktivitäten und möglicher Störfälle im verschlossenen Endlager am geringsten ein. Aufgrund der erforderlichen Umverpackung der Abfälle fallen die kalkulierbaren Risiken beim Oberflächenlager am größten aus.

Die kalkulierbaren Risiken aufgrund betrieblicher Aktivitäten sind bei der Endlagerung am geringsten und bei der Oberflächenlagerung am größten.

Sicherung und Kernmaterialüberwachung. Die Bedrohung durch Veränderungen der sicherheitspolitischen Lage sowie der Einfluss neuer technologischer Entwicklungen und von Menschen verursachter Veränderungen der Natur auf die Bedrohungslage in dieser Phase lassen sich aus heutiger Sicht nicht einschätzen. Aussagen über kalkulierbare Risiken, die mit der Sicherung der Anlagen in Verbindung stehen, sind daher nicht möglich.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit Sicherung und Kernmaterialüberwachung verbinden, lassen sich in der vorliegenden Phase nicht mehr einschätzen.

4.5.3. Variante Rückholung oder Bergung

Bei der Endlagerung ist nach dem Verschluss nur noch eine Bergung der Abfälle möglich. Nach den geltenden Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) muss die Bergbarkeit der Abfälle über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sein. Die Bergung ist jedoch aufwendiger und mit deutlich mehr kalkulierbaren Risiken verbunden als die Rückholung. Im Fall einer Bergung muss zudem ein neuer Entsorgungs- bzw. Nutzungsweg für die Abfälle offenstehen, oder die Abfälle müssen zumindest sicher zwischengelagert werden, bis sich ein solcher Weg eröffnet.

Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit wurde die Rückholung von vorneherein eingeplant, und es wurden entsprechende Vorkehrungen getroffen. Teile des Lagers werden in der vorliegenden Phase noch offengehalten, so dass die Abfälle für die Rückholung besser zugänglich sind als im Endlager. Zudem erhöht das Monitoring die Wahrscheinlichkeit, dass unerwartete Entwicklungen, die zur Entscheidung für eine Rückholung führen, früh erkannt werden und damit die Schäden geringer ausfallen als es bei der Endlagerung der Fall wäre. Die kalkulierbaren Risiken für Menschen fallen daher geringer aus als bei der Bergung aus einem Endlager. In jedem Fall muss aber auch bei der Rückholung ein neuer Entsorgungs- bzw. Nutzungsweg für die Abfälle offenstehen, oder sie müssen sicher zwischengelagert werden, bis sich ein solcher Weg eröffnet.

Die Rückholung aus dem Oberflächenlager ist in der vorliegenden Phase weiterhin mit verhältnismäßig geringem Aufwand und begrenzten Risiken möglich. Lediglich sehr schwerwiegende Einwirkungen von außen, zum Beispiel ein kriegerischer Angriff, könnten dazu führen, dass die Rückholung mit erheblichen kalkulierbaren Risiken verbunden ist.

Die kalkulierbaren Risiken, die sich mit einer Rückholung oder Bergung verbinden, sind bei der Endlagerung am größten und bei der Oberflächenlagerung am geringsten.

4.5.4. Abwägung

Dauer der Phase. Die Ungewissheiten zur Dauer der vorliegenden Phase dürften beim Endlager, das zu Beginn der Phase verschlossen wird, am geringsten sein (vgl. 3.5.2). Beim Tiefenlager mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit sind die Ungewissheiten davon abhängig, ob die Dauer des Monitoringzeitraums in den vorangehenden Phasen festgelegt wurde oder grundsätzlich offengeblieben ist. Zudem werden gesellschaftliche Entwicklungen, die sich für die laufende Phase nicht mehr antizipieren lassen, Einfluss auf die Entscheidung zum Verschluss des Lagers oder evtl. auch zur Rückholung der Abfälle nehmen. Groß fallen auch die Ungewissheiten bei der Oberflächenlagerung aus, weil der weitere Entsorgungspfad aus heutiger Sicht unbekannt ist.

Anzahl betroffener Personen. Die Anzahl der von kalkulierbaren Risiken betroffenen Personen lässt sich für diese Phase nicht mehr einschätzen. Grund dafür sind vor allem Ungewissheiten über die künftige Entwicklung von Arbeitsabläufen sowie über die über- und untertägige Raumnutzung der Zukunft.

Hohe individuelle Risiken. Für die laufende Phase kann nicht mehr eingeschätzt werden, welche Personen von besonders hohen individuellen Risiken betroffen sein werden. Grund dafür sind vor allem Ungewissheiten über die künftige Entwicklung von Arbeitsabläufen. Dazu treten unter anderem Ungewissheiten über die künftige über- und untertägige Raumnutzung und über Entwicklungen im biomedizinischen Bereich, die sich auf die Regelungen zum Strahlenschutz auswirken könnten.

Merkmale der Entsorgungsoptionen. Die kalkulierbaren Risiken werden vermutlich in dieser Phase bei der Endlagerung am geringsten ausfallen. Dies geht vor allem darauf zurück, dass das Endlager nach dem Verschluss in einen passiv sicheren Zustand übergehen soll. Demnach sind nach dem Verschluss keine weiteren Aktivitäten erforderlich, um die Sicherheit der Entsorgung zu gewährleisten. Auch bei der Sicherung erweist sich das Endlager aus heutiger Sicht als beste Variante.

Falls eine Rückholung oder Bergung der Abfälle notwendig werden sollte oder erwünscht ist, wäre die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit dem Endlager überlegen. Dass die Rückholung hier von Anfang an einkalkuliert wurde, wird sich aller Voraussicht nach günstig auf die mit einer Rückholung oder Bergung verbundenen kalkulierbaren Risiken auswirken.

Die mit der Oberflächenlagerung verbundenen kalkulierbaren Risiken lassen sich für die vorliegende Phase kaum mehr einschätzen. Kalkulierbare Risiken ergeben sich wohl vor allem aus der notwendigen Sicherstellung der Handhabbarkeit von Behältern und Inventar, die mit dem Umpacken der Abfälle nach 100 Jahren Lagerzeit gewährleistet werden soll. Zudem gehen wir davon aus, dass der Übergang zu einem neuen Entsorgungspfad mit tendenziell höheren kalkulierbaren Risiken verbunden sein wird als sie bei den Tiefenlageroptionen, die dem Verschluss des Lagers entgegengehen, auftreten.

Die kalkulierbaren Risiken Oberflächenlagerung sind nur schwer einschätzbar, werden aber voraussichtlich in der untersuchten Phase größer ausfallen als jene der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und vor allem jene der Endlagerung.

4.6. Fernere Zukunft

ca. Jahr 200 bis ca. Jahr 1'000 nach Start der Entsorgungslösung

4.6.1. Wichtigste Schritte

- Longterm Stewardship (Tiefenlager)
- Rückbau und neuer Entsorgungspfad (Oberflächenlager)

4.6.2. Allgemeine Entwicklungen

Kalkulierbare Risiken beziehen sich auf Werte, die geschädigt werden können. Im Vordergrund stehen dabei aus heutiger Sicht und wahrscheinlich auch in der vorliegenden Phase die Gesundheit und das Leben von Menschen. Wie die biologische Konstitution von Menschen in 200 bis 1'000 Jahren aussieht und über welche Möglichkeiten Menschen verfügen, um sich vor Schäden wie etwa einer Krebserkrankung zu schützen, ist heute nicht absehbar. Nicht absehbar ist auch, welche weiteren Werte Menschen in Zukunft als schützenswert betrachten werden. Die Auffassungen dazu, was wichtige Lebensgrundlagen des Menschen sind, könnten sich beispielsweise in den kommenden Jahrhunderten verändern.

Generell lassen sich Entwicklungen der Biosphäre, der Menschheit und der Gesellschaft für diese Phase nicht mehr einschätzen. Dadurch wird die eigentliche Einschätzung von Risiken, die Personen betreffen, verunmöglicht. Es lassen sich lediglich noch grobe Plausibilitätsbetrachtungen vornehmen. Mit der Aktivität des Inventars nehmen bei allen Entsorgungsoptionen möglicherweise auch die kalkulierbaren Risiken für Menschen ab.

4.6.3. Spezifische Entwicklungen

Falls keine gesellschaftlichen Veränderungen eintreten, die den tiefen Untergrund betreffen, befinden sich die Tiefenlager in der vorliegenden Phase in einem Zustand, der aus heutiger Sicht nur geringe kalkulierbare Risiken birgt. Bei der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit haben Erkenntnisse, die während des Monitoringzeitraums gewonnen wurden, möglicherweise zu Optimierungen geführt, die die kalkulierbaren Risiken geringer halten als beim Endlager. Gleichzeitig können jedoch die Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit aus heutiger Sicht zu größeren kalkulierbaren Risiken führen als bei der Endlagerung, beispielsweise aufgrund von Schädigungen des Wirtsgesteins, die durch die verlängerte Offenhaltung und die für das Monitoring aufgefahrenen Hohlräume bedingt sind. Die kalkulierbaren Risiken bei der Endlagerung und der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit unterscheiden sich daher voraussichtlich wenig.

Für die Abfälle, die sich im Oberflächenlager befinden, muss spätestens nach ca. 200 Jahren Lagerzeit ein neuer Entsorgungspfad gefunden und beschritten werden. Da dieser Entsorgungspfad heute unbekannt ist, lassen sich zu den kalkulierbaren Risiken keine Aussagen machen. Denkbar ist beispielsweise, dass zu Beginn der vorliegenden Phase Verfahren angewendet werden können, die das Schadenpotential der hoch radioaktiven Abfälle deutlich reduzieren. Denkbar ist aber auch, dass der Gesellschaft ausreichende Ressourcen fehlen, um die Abfälle einer Entsorgung zuzuführen, die heutigen Sicherheitsanforderungen entspricht.

Aus heutiger Sicht lässt sich nicht beurteilen, ob sich mit der Endlagerung oder der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit größere kalkulierbare Risiken verbinden als mit der jeweils anderen Entsorgungsoption. Bei der Oberflächenlagerung sind aufgrund erheblicher Ungewissheiten keine Aussagen mehr dazu möglich, wie sich die kalkulier-

baren Risiken dieser Option im Vergleich zu den kalkulierbaren Risiken der Tiefenlageroptionen verhalten.

4.6.4. Variante Rückholung oder Bergung

Die Bergung der hoch radioaktiven Abfälle aus einem verschlossenen Tiefenlager ist aus heutiger Sicht aufwendig und mit erheblichen kalkulierbaren Risiken verbunden. Es ist davon auszugehen, dass die Entscheidung zur Bergung nur dann getroffen würde, wenn die Risikoabwägung deutlich zugunsten der Bergung ausfallen würde.

Bei der Oberflächenlagerung ist der weitere Entsorgungspfad unbekannt. Daher können zur Rückholung oder Bergung der Abfälle auch keine Aussagen gemacht werden.

Zu den kalkulierbaren Risiken, die mit der Rückholung oder Bergung der hoch radioaktiven Abfälle bei den drei untersuchten Entsorgungsoptionen verbunden sind, lassen sich in der vorliegenden Phase keine vergleichenden Aussagen mehr machen.

4.6.5. Abwägung

In der vorliegenden Phase lassen sich keine vergleichenden Aussagen zu den kalkulierbaren Risiken der untersuchten Entsorgungsoptionen mehr machen.

4.7. Sehr ferne Zukunft

ca. Jahr 1'000 bis ca. Jahr 10'000 nach Start der Entsorgungslösung

4.7.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

4.7.2. Entwicklungen

Die Ungewissheiten, die vor allem auf Entwicklungen der Menschheit und der Gesellschaft zurückgehen, sind in der vorliegenden Phase außerordentlich groß. Wahrscheinlich werden sich in dieser Phase menschliche Aktivitäten oder Aktivitäten nachmenschlicher Personen auch auf die Entwicklung der Biosphäre, der Geosphäre und des Klimas ausgewirkt haben oder noch auswirken.

Daher lassen sich die Risiken, die mit den Entsorgungsoptionen verbunden sind, nicht mehr einschätzen. Es ist lediglich möglich, Plausibilitätsbetrachtungen anzustellen und sich mithilfe von Szenarien ein Bild vom Spektrum der aus heutiger Sicht infrage kommenden Entwicklungen zu verschaffen.

Die vergleichende Risikobewertung der Entsorgungsoptionen stützt sich daher für diese Phase nicht mehr auf kalkulierbare Risiken ab.

4.7.3. Abwägung

In der vorliegenden Phase ist keine vergleichende Bewertung der kalkulierbaren Risiken mehr möglich.

4.8. Sehr weit entfernte Zukunft

ca. Jahr 10'000 bis ca. 1 Mio. Jahre nach Start der Entsorgungslösung

4.8.1. Wichtigste Schritte

- keine (Tiefenlager)
- unbekannt (Oberflächenlager)

4.8.2. Entwicklungen

Die Ungewissheiten, die auf Entwicklungen der Menschheit oder nachmenschlicher Lebensformen zurückgehen sowie auf Entwicklungen der Gesellschaft, der Biosphäre, des Klimas und der Geosphäre sind in der vorliegenden Phase außerordentlich groß.

Aus diesem Grund ist eine vergleichende Bewertung der kalkulierbaren Risiken, die sich mit den untersuchten Entsorgungsoptionen verbinden, nicht möglich.

4.8.3. Abwägung

In der vorliegenden Phase ist keine vergleichende Bewertung der kalkulierbaren Risiken möglich.

5. Gesamtbeurteilung

5.1. Verfahren

Bei der im vorliegenden Arbeitsbericht beschriebenen vergleichenden Risikobewertung wird nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten differenziert. Damit wird den Ungewissheiten, die im gesellschaftlichen Diskurs eine wesentliche Rolle spielen (Marti, 2016; Eckhardt & Rippe, 2016), ein höherer Stellenwert eingeräumt als dies heute bei vergleichenden Risikobewertungen und Sicherheitsnachweisen im Allgemeinen der Fall ist. Zudem wird die Bewertung für Aspekte *geöffnet*, die aus gesellschaftlicher Perspektive und der Perspektive verschiedener Fachdisziplinen relevant sind. Dazu gehört vor allem die Berücksichtigung von Fragen der Akzeptanz und psychosozialen Einflüssen auf die Gesundheit von Menschen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit konzentriert sich die Bewertung auf Ungewissheiten und Risiken, die *Personen* betreffen. Die Methodik kann aber auch auf weitere Werte wie Umwelt oder Sachwerte angewendet und die vergleichende Risikobewertung entsprechend verbreitert werden.

Die vergleichende Bewertung nach Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken ist insbesondere für den *Zeitraum von 0 bis 200 Jahren* aussagekräftig, nachdem ein Entsorgungspfad beschrrieben wurde. Anschliessend führen die grossen Ungewissheiten dazu, dass nur noch unscharfe oder teilweise sogar keine Aussagen mehr möglich sind. In der umfassenden Risikobewertung wird die Bewertung nach Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken daher insbesondere durch eine Bewertung nach Sicherheitsfunktionen und Robustheit ergänzt, die vor allem auf die Langzeitsicherheit abzielt.

Eine Bewertung, die die kommenden Jahrzehnte in Betracht zieht, ist insbesondere aus zwei Gründen angezeigt: Aus ethischer Perspektive wird oft argumentiert, dass die heutigen Generationen vor allem Verantwortung für die unmittelbar nachfolgenden Generationen tragen und weniger für Menschen, die in einer fernen ungewissen Zukunft nachfolgen könnten. Zudem folgt die Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle in Deutschland wie in anderen Ländern weltweit dem Prinzip der schrittweisen Konkretisierung. Demnach ist es für jeden Entsorgungsschritt wesentlich, zwar den gesamten weiteren Entsorgungspfad, vor allem aber die nachfolgenden Schritte im Blick zu haben.

Die vergleichende Bewertung wird dadurch erschwert, dass die bei ENT-RIA untersuchten Entsorgungsoptionen auf unterschiedliche *Zeithorizonte* ausgelegt sind. Die beiden Tiefenlageroptionen sollen bis zu einer Million Jahre, nachdem der Entsorgungspfad beschritten wurde, Sicherheit gewährleisten. Das Oberflächenlager dagegen wird 150 bis 200 Jahre betrieben. Wie der anschließende Entsorgungspfad aussieht, bleibt ungewiss. Diese Ungewissheit ist ein unauflösbarer Teil der Entsorgungsoption Oberflächenlager – denn diese Entsorgungsoption zielt wesentlich darauf ab, Zeit zu gewinnen, um eine bessere Entsorgungslösung zu entwickeln als die Optionen, die gegenwärtig zur Verfügung stehen.

5.2. Ergebnisse

Bei der vergleichenden Beurteilung der Risiken und Ungewissheiten kommen bei der Endlagerung vor allem folgende Stärken zum Tragen:

- Unter den drei untersuchten Entsorgungsoptionen ist die Endlagerung die bisher am besten untersuchte.

- Das Endlager gelangt schneller in einen Zustand, in dem die Sicherheit nahezu vollständig durch passive Vorkehrungen gewährleistet ist, als die anderen beiden Optionen.
- Die Endlagerung folgt einem einfacheren Konzept als die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit.

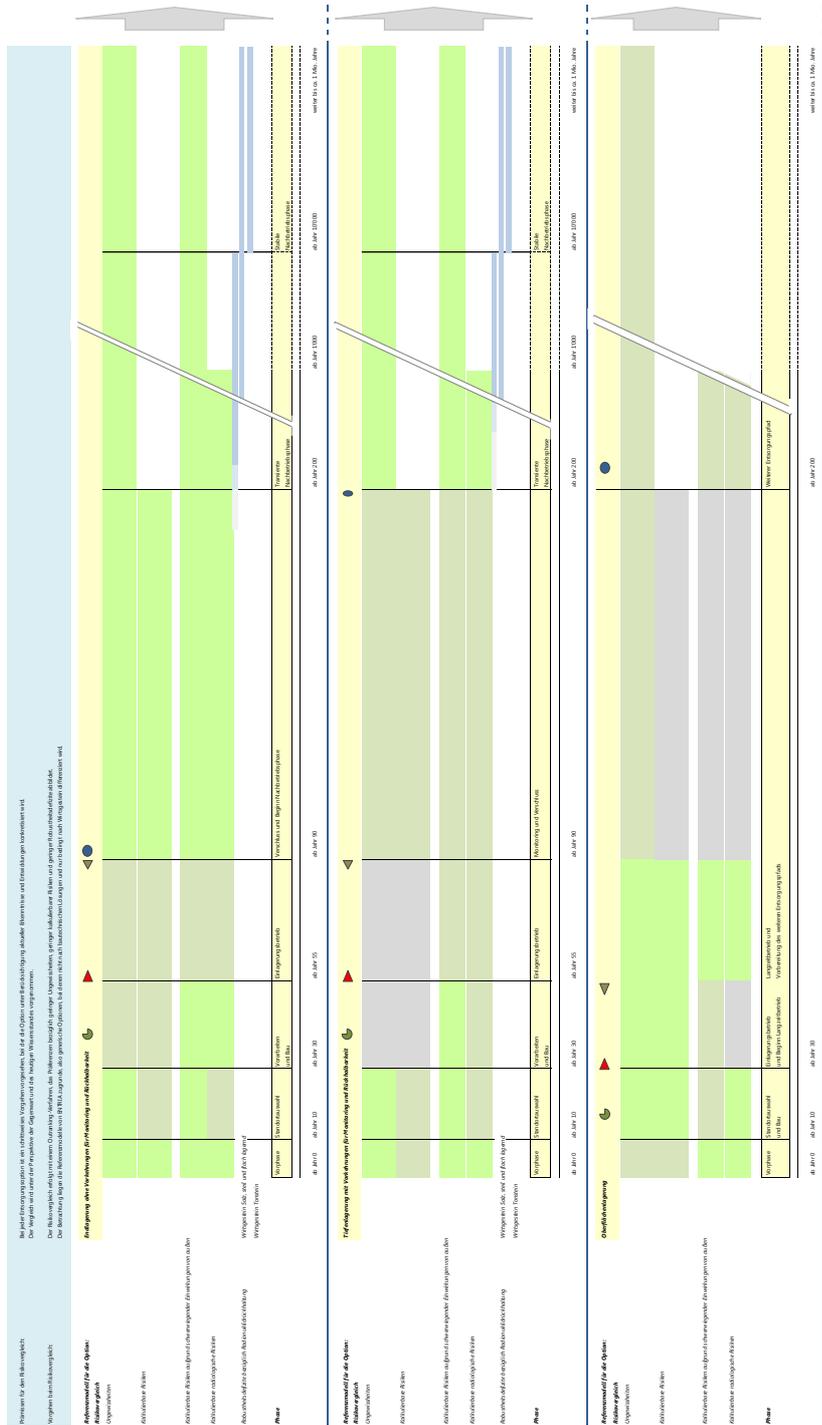
Die Oberflächenlagerung weist gegenüber den anderen beiden Optionen vor allem einen Vorteil auf:

- Die hoch radioaktiven Abfälle werden verhältnismäßig rasch in ein Lager verbracht, das für etliche Jahrzehnte hohe Sicherheitsanforderungen erfüllt.

Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit bewegt sich zwischen den anderen beiden Varianten, indem sie einige von deren spezifischen Vorteilen kombiniert. Im Vordergrund stehen dabei die Möglichkeit der Überwachung des Lagers und einer einfachen Rückholung der hoch radioaktiven Abfälle wie beim Oberflächenlager und die Gewährleistung eines hohen Maßes an passiver Sicherheit, vor allem über sehr lange Zeiträume hinweg, wie beim Endlager. Die Stärken der Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit liegen weniger in geringen kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten, als in gesellschaftlichen Vorteilen. Zu letzteren zählt insbesondere, dass diese Option derzeit in Deutschland wohl die größte Akzeptanz findet.

Die im vorliegenden Bericht dargestellte vergleichende Bewertung vom Entsorgungsoptionen anhand von Risiken und Ungewissheiten ist Teil einer umfassenderen vergleichenden Risikobewertung der drei Entsorgungsoptionen Endlagerung, Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und Oberflächenlagerung, die im Rahmen von ENTRIA vorgenommen wurde. Die Ergebnisse der umfassenden vergleichenden Risikobewertung sind in der Risikokarte zusammengefasst, die

ebenfalls im Rahmen von ENTRIA entwickelt wurde und auf der folgenden Seite abgebildet ist.



■ Fortschritt
■ Rückstand
■ Nicht bearbeitet
▲ Zielvorgabe
● Zielvereinbarung
● Zielumsetzung
● Zielüberprüfung

Zielvorgabe und Zielvereinbarung
 Zielumsetzung
 Zielüberprüfung

Zielvorgabe und Zielvereinbarung
 Zielumsetzung
 Zielüberprüfung

Zielvorgabe und Zielvereinbarung
 Zielumsetzung
 Zielüberprüfung

6. Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Köln.
- Appel, D., Kreusch, J., Neumann, W. (2015): Darstellung von Entsorgungsoptionen. ENTRIA-Arbeitsbericht-01. Hannover.
- AtG (2016): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843) geändert worden ist.
- Basler & Hofmann (2012): Prüfbericht zur Kostenstudie KS11. Extended Summary. Erstellt im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats. Zürich.
- baua (2016): Meldepflichtige Arbeitsunfälle.
<http://www.baua.de/de/Informationen-fuer-die-Praxis/Statistiken/Unfaelle/meldepflichtige-Arbeitsunfaelle/meldepflichtige-Arbeitsunfaelle.html>. Stand am 27. Mai 2016.
- BFE (2014): Radioaktive Reststoffe. Zeitplan. Stand am 15. April 2014.
http://www.bfe.admin.ch/radioaktiveabfaelle/01277/01308/index.html?lang=de&print_style=yes. Abgerufen am 15. März 2016.
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bern.
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Reststoffe. Stand am 30. September 2010.
- BMUB (2015): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. (Nationales Entsorgungsprogramm). Berlin / Bonn.
- Bundesregierung (2016): Weißbuch zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr. Berlin.

- Cargo sous terrain (2018): Website von Cargo sous terrain.
<http://www.cargosousterrain.ch/de/>. Abgerufen am 6. Oktober 2018.
- Chaudry, S. (2015): Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle. Ergebnisprotokoll der Besprechung vom 23. Juni 2015.
- Eckhardt, A., Rippe, K.P. (2016): Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf. Zürich.
- EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Schlussbericht. Bern.
- Endlagerkommission (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Vorabfassung vom 4. Juli 2016.
- ENSI / AGNEB (2015): Abfallbewirtschaftung im Vergleich. Projektbericht im Rahmen des Forschungsprogramms «Radioaktive Abfälle» der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung. Brugg.
- Entsorgungskommission (2015): Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle.
https://www.bundestag.de/blob/395132/9bf851892dc413b49f1293d875400928/kmat_41-data.pdf. Abgerufen am 31. Juli 2016.
- Entsorgungskommission (2013): Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland. Teil 1: Anlagen der Brennstoffversorgung, Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle, Anlagen zur Behandlung bestrahlter Brennelemente.
http://www.BMUB.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Atomenergie/esk-stresstest_stellungnahme_der_entsorgungskommission_teil_1_14032013_bf.pdf. Abgerufen am 31. Juli 2016.
- GNS (2016): Ablauf des Standortauswahlverfahrens (§§ 13 ff.).
<http://www.endlagerung.de/language=de/17164/ablauf-des-standortauswahlverfahrens>. Abgerufen am 17. Juni 2016.

- Griebler, Ch., Kellermann, C., Stump, Ch., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S. (2015): Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung. Texte 54/2015. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- GRS (2016): Tiefe Bohrlöcher. Bericht im Auftrag der AG 3 der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe. Autoren: Bracke, G., Charlier, F., Geckeis, H., Harms, U., Heidbach, O., Kienzler, B., Lieb-scher, A., Müller, B., Prevedel, B., Röckel, Th., Schilling, F., Sperber, A. Mit Unterstützung von Reich, M., Röhlig, K.-J.
- Kastelein, J., Codée, H.D.K. (2005): HABOG One building for all high level waste and spent fuel in the Netherlands. The first year of experience. <http://www.euronuclear.org/pdf/RRFM2005-Session4.pdf#page=20>. Abgerufen am 16. März 2016.
- Köhnke, D. (2017): Persönliche Mitteilung.
- Köhnke, D., Reichardt, M., Semper, F. (Hrsg.) (2017a): Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Springer. Wiesbaden.
- Köhnke, D., Hartmann, F., Reichardt, M., Budelmann, H. (2017b): Länderstudie Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Frankreich. Braunschweig.
- Köhnke, D., Riemann, M. (2016): An engineering and normative approach to surface storage of high level radioactive waste. Forum on Philosophy, Engineering & Technology. <http://program.fpet2016.org/AbstractBooklet.pdf>. Abgerufen am 4. November 2016
- Lux, K.-H., Wolters, R., Zhao, J., Rutenberg, M., Feierabend, J. & Pan, T. (2017): THM2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. Ein Beitrag zur

- Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen. ENTRIA-Arbeitsbericht-07. Hannover.
- Marti, M. (2016): Risikoansichten. ENTRIA-Arbeitsbericht-05. Zürich.
- Metz, V., Geckeis, H., González-Robles, E., Loida, A., Bube, C., Kienzler, B. (2012): Radionuclide behaviour in the near-field of a geological repository for spent nuclear fuel. *Radiochimica Acta* 100, S. 699-713.
- Müller-Lyda, I., Rübél, A. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Behälterstandzeiten. Braunschweig / Darmstadt.
- Nagra (2016): Präsentation zur verlängerten Zwischenlagerung von HAA. Protokoll der gemeinsamen Sitzung von ENSI-Rat und Nagra vom 21. März 2016.
- Nagra (2015a): Langzeitsicherheit – die Hauptaufgabe der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Themenheft. Wettingen.
- Nagra (2015b): Wie entsorgen? Ausland.
<http://www.nagra.ch/de/ausland.htm>. Abgerufen am 17. März 2016.
- Nagra (2014): Realisierung Tiefenlager HAA.
http://www.nagra.ch/display.cfm/id/101966/disp_type/display/filename/Zeitplan%20Realisierung%20Tiefenlager%20HAA.pdf. Abgerufen am 12. Juni 2016.
- Nagra (2012): Geologisches Tiefenlager – Brennelement-Verpackungsanlage (BEVA) im Zwiilag statt in einer Oberflächenanlage im Planungssperimeter? Themenblatt 2 / November 2012. Wettingen.
- Pönitz, E. (2017): Wärmeentwicklung und Radionuklid-Inventar. In Köhnke, D., Reichardt, M., Semper, F. (Hrsg.): Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Springer. Wiesbaden.

- Reichardt, M. (2016): Abstimmungstreffen zum Sicherheitskonzept der Langzeitzwischenlagerung – Protokoll der Sitzung vom 20. April 2016. Braunschweig.
- RSK (2005): Gase im Endlager. RSK- Stellungnahme vom 27.01.2005 (379. Sitzung).
<http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage1rsk379hp.pdf>. Abgerufen am 1. Oktober 2018.
- Saurí Suárez, H., Pang, B., Becker, F., Metz, V. (2017): Monte-Carlo based comparison of the personal dose for emplacement scenarios of spent nuclear fuel casks in generic deep geological repositories. *ATW Atomwirtschaft-Atomtechnik, International Journal for Nuclear Power* 62, S. 384-388.
- SH (2013): OVG Schleswig hebt die Genehmigung für das Zwischenlager Brunsbüttel auf. Landesportal Schleswig-Holstein. Erscheinungstag: 20.06. 2013. http://www.schleswig-holstein.de/DE/Justiz/OVG/Presse/PI_OVG/19062013_OVG_Zwischenlager_Brunsbuettel.html. Abgerufen am 23. November 2016.
- Soukup, M. (2016): Die toten Arbeiter vom Gotthard. *TagesAnzeiger*.
<http://www.tagesanzeiger.ch/schweiz/standard/die-toten-arbeiter-vom-gotthard/story/28467385>. Abgerufen am 29. Dezember 2016.
- SSM (2008): The Swedish radiation safety authority's regulations and general advice concerning the protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste. *Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code. SSMFS 2008:37*. Stockholm.
- Stahlmann, J., Leon-Vargas, R. P., Mintzlaff, V. (2015): Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. *ENTRIA-Arbeitsbericht-03*. Braunschweig.

- StandAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). Ausfertigungsdatum: 23.07.2013, BGBl. I S. 2553.
- Thomauske, B. (2016): Ablauf des Standortauswahlverfahrens – Zeitrahmen und Auswahl eines bestmöglichen Standortes. Präsentation Endlagersymposium 4./5.2.2016. München.
- TNS opinion (2008): Einstellung zu radioaktiven Reststoffen. Spezial Eurobarometer 297. European Commission. Bruxelles / Luxembourg.
- Tzschentke, Ch. (2017): Protokoll der Besprechung „Langzeitsicherheit“ am 3. Mai 2017 in Hannover. Dokument im Rahmen von ENTRIA. Hannover.
- VDI (2015): Gütertransport im unterirdischen Tunnelsystem. Ingenieur.de. <http://www.ingenieur.de/Branchen/Verkehr-Logistik-Transport/Guetertransport-im-unterirdischen-Tunnelsystem>. Abgerufen am 14. September 2016.
- ZWILAG (2017): Organigramm. http://www.zwilag.ch/de/organigramm-_content---1--1048.html. Abgerufen am 14. Juni 2017.

7. Glossar

Arbeitsrisiken	Kalkulierbare Risiken, die mit Arbeitsabläufen verbunden sind, die nicht durch Unfälle oder Störfälle beeinflusst werden
Barriere	Natürliche oder technische Komponente einer Entsorgungsanlage, die Sicherheitsfunktionen übernimmt
Bergung	Rückholung hochradioaktiver Abfälle aus einer Entsorgungsanlage als Notfallmaßnahme
einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Bereich des Wirtsgesteins, der bei normaler Entwicklung eines Tiefenlagers den Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide im Zusammenwirken mit den technischen Barrieren sicherstellen muss
Endlager	Anlage zur wartungsfreien, zeitlich unbefristeten und passiv sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall ohne beabsichtigte Rückholbarkeit
Entsorgung	Behandlung von Abfällen mit dem Ziel, die dauerhafte Sicherheit von Menschen und Umwelt zu gewährleisten

Entsorgungsanlage	Räumlich konzentrierter Komplex von Gebäuden und Einrichtungen, der der Entsorgung radioaktiver Abfälle dient
Entsorgungsoption	Eine Möglichkeit, radioaktive Abfälle zu entsorgen
Entsorgungspfad	Ein spezifischer soziotechnischer Prozess, der zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen führt
Inventar	Radionuklide, Abfallmatrix und Behälter bei hoch radioaktiven Abfällen
kalkulierbares Risiko	Form des Risikos, bei dem sich Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausmaß eines Schadens quantitativ oder qualitativ einschätzen lassen
Kernmaterialüberwachung	Überwachung radioaktiver Materialien mit dem Bestreben, die Weiterverbreitung von Kernwaffen zu verhindern und die unerlaubte Entnahme zu entdecken
Monitoring	Aktivitäten innerhalb einer Entsorgungsanlage oder in deren Umgebung, die darauf abzielen, den Zustand und die Entwicklung der Anlage und ihres Inventars einzuschätzen
Referenzmodell	Generisches Modell zur Ausgestaltung einer Entsorgungsoption

Risiko	Situation, in der ein Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten oder nicht eintreten kann
Robustheit	Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen einer Entsorgungslösung gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen
Rückholbarkeit	Geplante technische Vorkehrungen zum Entfernen von radioaktiven Abfällen aus einer Entsorgungsanlage
Rückholung	Auslagerung von Abfällen aus einer Entsorgungsanlage
Sicherheitsfunktion	Eigenschaft von Komponenten, Teilsystemen oder ablaufenden Prozessen einer Entsorgungslösung, die definierten sicherheitsrelevanten Anforderungen dient und deren Wirkungen messbar oder zumindest einschätzbar sind
Sicherheitsnachweis	Ganzheitliche Prüfung, ob eine Entsorgungslösung die Sicherheitsanforderungen erfüllt – unter Einbezug aller Daten, Analysen und unterstützenden Argumente (engl. safety case)

Sicherung	Schutz gegen beabsichtigte schädigende Einwirkungen
Sicherungsrisiken	Risiken, die auf beabsichtigte schädigende Einwirkungen zurückgehen
Störfallrisiken	Risiken, die mit einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebes einer Entsorgungsanlage oder einem Unfall, der schwere Schäden nach sich zieht, in Zusammenhang stehen
Tiefenlager	Anlage zur wartungsfreien, zeitlich unbefristeten und passiv sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall im tiefen Untergrund – mit oder ohne zeitlich begrenztes Monitoring und Möglichkeit der Rückholung der Abfälle
Unfallrisiken	Risiken, die mit einem unbeabsichtigten plötzlichen, zeitlich und örtlich bestimmbar und von außen einwirkenden Ereignis in Zusammenhang stehen, das geringe bis mittlere Schäden nach sich zieht
Ungewissheit	Mangel an Information, der eine Risikoeinschätzung erschwert oder verunmöglicht
Werte	In der Person verwurzelte abstrakte, relativ stabile motivationale Dispositionen, die Einfluss auf menschliche Entscheidungen ha-

ben. Werte beziehen sich auf wünschenswerte Zielzustände oder Verhaltensweisen

Wirtsgestein

Gesteinsformation, in der ein Tiefenlager untergebracht wird

8. Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (Deutschland)
AtG	Atomgesetz (Deutschland)
baua	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Deutschland)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Deutschland)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Deutschland)
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
ENCON	ENTRIA-Container
Endlagerung	Referenzmodell zur Endlagerung
ENSI	Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
ESK	Entsorgungskommission (Deutschland)
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (Deutschland)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Deutschland)
IAEA	International Atomic Energy Agency
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
Oberflächenlagerung	Referenzmodell zur Oberflächenlagerung
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD)
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission (Deutschland)
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten – Swedish Radiation Safety Authority (Schweden)

StandAG	Standortauswahlgesetz (Deutschland)
Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit	Referenzmodell zur Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VerSi	Projekt Vergleichende Sicherheitsanalysen (Deutschland)
ZWILAG	Zentrales Zwischenlager Würenlingen (Schweiz)