

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

**Kommentar zur K-Drs./AG3-69 „Kapitel 4: Entsorgungsoptionen und ihre
Bewertung, Entwurf 29. Oktober 2015, Verfasser: Michael Sailer,
Prof. Dr. Armin Grunwald“**

Verfasser: Dr. Detlef Appel

Datum: 8. Januar 2016

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-76

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

Kapitel 4: Entsorgungsoptionen und ihre Bewertung

Entwurf, 29. Oktober 2015

Verfasser: Michael Sailer, Prof. Dr. Armin Grunwald

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-69



4. Entsorgungsoptionen und ihre Bewertung

Entwurf der AG3-Vorsitzenden, 29.10.2015

Achtung: dieser Entwurf enthält in keinem seiner Teile bereits abschließend beratene Aussagen. Diese Beratung muss noch in AG3 und Kommission geleistet werden!

4.1 Ziele und Vorgehen

Der mit dem StandAG verbundene Neuanfang zur Lösung der Frage nach einer sicheren, gerechten und friedlichen Entsorgung der radioaktiven Abfälle (insbesondere der hoch radioaktiven) besteht nicht nur aus einem Neustart der Standortsuche. Vielmehr geht es auch darum, grundsätzlich neu über die Art und Weise des Umgangs mit und der Verbringung von diesen Abfällen nachzudenken. Dies bedeutet insbesondere, auch mögliche andere Optionen als die bislang in Deutschland favorisierte Verbringung in einem Endlagerbergwerk in einer tiefen geologischen Formation zu betrachten.

Das Ziel dieses Kapitels ist es, die seriösen Optionen, die in der internationalen Debatte um den Umgang mit radioaktiven Abfällen eine Rolle gespielt haben oder noch spielen, zunächst in ihrer Breite darzustellen, um sodann auf der Basis des aktuellen Wissensstandes und nachvollziehbaren Kriterien diejenige Option oder auch diejenigen Optionen herauszufinden, die im weiteren Beratungsprozess vertieft untersucht werden sollen. Auf diese Weise soll der Auswahlprozess in Bezug auf die letztlich empfohlene Option transparent dargestellt werden.

Dieser Auswahlprozess wurde in der Kommission, vorbereitet durch die Arbeitsgruppe 3, in mehreren und wie üblich vollständig und transparent dokumentierten Schritten vollzogen (hier ggf. wichtige Schritte nennen). Im Beratungsprozess wurde externe Kompetenz in folgenden Formen mit einbezogen:

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung (Auftrag BMWi Az. IIA5 – 32507/7 vom 08.06.2015)
- Anhörung der AG3 zum Thema „Tiefe Bohrlöcher“ am 8. Juni 2015
- Gutachten Transmutation (2x)
- Gutachten Langfristzwischenlagerung
- Gutachten Tiefe Bohrlöcher
-

4.2 Kurzüberblick über Entsorgungsoptionen und ihre Einstufung

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle muss so erfolgen, dass kurz-, mittel- und langfristig keine Gefahren für Mensch und Umwelt entstehen. Bedingt durch die lange Halbwertszeit einiger Radionuklide soll diese Sicherheit für eine Million Jahre gewährleistet werden. Diese extreme Langzeitigkeit der Herausforderung, die radioaktiven Abfälle von der Biosphäre fernzuhalten, dominiert die Suche nach verantwortbaren Entsorgungsoptionen.

In der Frühzeit der Atomenergie wurde dem Abfallthema wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Es herrschte der Optimismus vor, dass man zu gegebener Zeit schon eine Lösung finden werde (Radkau 1983). Teils wurden Ideen kolportiert, die aus heutiger Sicht den Herausforderungen extrem unangemessen erscheinen. Die Verbringung in unterirdischen Kavernen, die Auflösung und entsprechende Verdünnung im Wasser der Ozeane, oder auch das Vertrauen in den technischen Fortschritt, von dem erwartet wurde, dass dadurch die Probleme auf technische Art gelöst

werden könnten, dominierten den Umgang mit dem nuklearen Abfallproblem. Erst im Laufe der Zeit wurde deutlich, wie groß die wissenschaftliche und technische, aber auch die gesellschaftliche Herausforderung eines sicheren, gerechten und friedlichen Umgangs mit diesem Problem ist.

Das Ziel, die atomaren Abfälle von der Biosphäre fernzuhalten, hat einige Optionen wie die Verbringung im Weltraum, in den Tiefen der Erdkruste (z.B. durch tiefe Bohrlöcher in 3000 - 5000 m Tiefe), in der Tiefsee oder im antarktischen oder grönländischen Inlandeis motiviert. Eine weitere Gruppe von Optionen setzt auf den Faktor Zeit, also auf eine länger (einige Jahrhunderte) dauernde Zwischenlagerung, in der Erwartung, dass sich bis dahin neue Lösungsoptionen ergeben. Von der Transmutation wird teils erwartet, das Entsorgungsproblem zumindest vereinfachen zu können, was jedoch umstritten ist. Bergwerkslösungen in tiefen geologischen Schichten können nach dem Maß der Rückholbarkeit der Abfälle unterschieden werden und reichen von einem möglichst raschen und praktisch irreversiblen Verschluss bis hin zur Sicherstellung der Rückholbarkeit für längere Zeiträume und sogar der Bergbarkeit nach Verschluss des Bergwerks.

Diese Optionen sind aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit mit einer hohen Vielfalt an Randbedingungen, Voraussetzungen, Unsicherheiten und Implikationen verbunden. In diesem Kapitel werden diese Optionen nach ihren Aussichten, zur Problemlösung beitragen zu können, in drei Kategorien eingeteilt,

Nicht weiter zu verfolgen (Kap. 4.3): angesichts des derzeitigen und absehbaren Wissensstandes empfiehlt die Kommission, diese Optionen unter Angabe der Argumente und Kriterien nicht weiter zu verfolgen

Nicht abschließend beurteilbar (Kap. 4.4): diese Optionen können mangels belastbaren Wissens zurzeit noch nicht abschließend eingestuft werden. Sie werden nicht im Detail ausgearbeitet. Die Kommission empfiehlt, sie weiter systematisch zu beobachten und ggf. durch gezielte Forschung den Wissensstand zu verbessern

Aussichtsreich (Kap. 4.5): diese Option (bzw. Optionenfamilie) erscheint angesichts des wissenschaftlich-technischen Wissensstandes als aussichtsreich. Sie wird aktiv weiterverfolgt, im Detail ausgearbeitet und dem Deutschen Bundestag zur Umsetzung empfohlen (vgl. dazu im Detail Kap. 5)

Die in den folgenden Kapiteln vorgenommene Zuordnung der Optionen zu den Kategorien erfolgt nach Maßgabe folgender Randbedingungen, Ausschlusskriterien, Einschätzungen und Bewertungen:

- geltende völkerrechtliche Vereinbarungen
- im StandAG gesetzte Randbedingungen
- Erfolgsaussicht zur Erreichung des Ziels, die radioaktiven Abfälle dauerhaft von der Biosphäre fernzuhalten
- Beherrschbarkeit von Technologien und Verfahren, insbesondere von Risiken und Havarien

Auf diese Weise wird der gegenwärtige und absehbare Stand von Wissenschaft und Technik, aber auch von gesellschaftlichen Randbedingungen, z.B. rechtlichen Festlegungen, berücksichtigt, um eine transparente Argumentationslinie für die als aussichtsreich angesehene Option vorzulegen.

4.3 Nicht weiter verfolgte Optionen

Angesichts des derzeitigen und absehbaren Wissensstandes und unter Angabe klarer Argumente werden Pfade aus dieser Kategorie von der Kommission nicht weiter verfolgt, auch wenn nicht vollständig auszuschließen ist, dass Pfade aus dieser Kategorie in Zukunft wieder diskutiert werden, z.B. aufgrund überraschender technischer Entwicklungen. Hierfür sieht die Kommission auch bei optimistischer Interpretation des Wissensstandes und der Perspektiven zurzeit keine ernst zu nehmenden Anzeichen.¹

3.3.1 Entsorgung im Weltraum

Die Option der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Weltraum wurde besonders in den 1970er und 1980er Jahren untersucht. Federführend waren Wissenschaftler der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und der Boeing Aerospace Corporation in den USA (BOEING 1981, ERDA 1976, RICE & PRIEST 1981, SCHNEIDER & PLATT 1974). Der Transport in den Weltraum wurde meistens als komplementäre Alternative zur Endlagerung auf der Erde betrachtet und sollte vornehmlich für kleinere Abfallmengen aus separierten langlebigen Nukliden angewendet werden (AkEnd 2000). Für große Abfallmengen kommt die Verbringung in den Weltraum allein aus Kostengründen nicht in Frage.

Die untersuchten Konzepte variieren von der Verbringung der Abfälle in die Sonne über den Transport aus dem Sonnensystem heraus bis hin zur Lagerung auf dem Mond oder in einem hohen Erdorbit. Die Umlaufbahnen im inneren Sonnensystem (Erde, Mond) wie auch die Verbrennung in der Sonne wurden schlechter bewertet als z. B. die Verbringung in eine Sonnenumlaufbahn, auf die Mondoberfläche oder ganz aus dem Sonnensystem heraus (BURNS et al. 1978, RICE & PRIEST 1981). Die Verbrennung in der Sonne würde die gefährlichen Substanzen zwar sicher zerstören, wäre aber extrem kostspielig. Erd- und Mondumlaufbahnen wären für die Langzeitlagerung nicht stabil genug (RECHARD et al. 2011).

Beim Transport in den Weltraum sind zentrale Probleme in Bezug auf Sicherheit zu lösen. Rettungsfunktionen müssen vorgesehen werden, die bei Fehlstarts oder anderen Fehlfunktionen während der Versendung zum Einsatz kommen können. Eine Verteilung der nuklearen Abfälle in der Atmosphäre oder am Boden in der Folge von Havarien muss vermieden werden. Die Abfallstoffe könnten in Form von Cermet, einem hitzebeständigen Material aus Keramik und gesintertem Metall, transportiert werden, um die Ausbreitung von Radionukliden im Fall eines Unfalls zu minimieren. Von Möglichkeiten einer ‚Fehlerkorrektur‘ (StandAG) kann man hier wohl nicht sprechen.

Die National Academy of Sciences der USA (NAS) stellt fest, dass die Option der Endlagerung im Weltraum nicht sicher und praktikabel sei und wohl auch nie sein werde (NAS 2001). Auch MCKINLEY et al. (2007) sprechen von einer Hochrisikotechnologie. Zusätzlich würden die Kosten um einen Faktor 10 über denen der geologischen Endlagerung liegen. Die Wahrscheinlichkeit eines Raketenfehlsstarts liege im Bereich von 1 bis 10 Prozent (so auch MINHANS et al. (2008) sowie (DUTTON et al. 2004)). Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Separierung langlebiger Radionuklide ein aufwändiges und teures kerntechnisches Verfahren mit Gefährdungsrisiken für das eingesetzte Personal ist (KRAUSKOPF 1988).

Deutschland könnte aufgrund seiner ungünstigen geographischen Lage diese Abfälle nicht von eigenem Hoheitsgebiet aus in den Weltraum bringen. Für die Endlagerung im Weltraum wären Transporte der Abfälle zu einem Weltraumbahnhof in der Nähe des Äquators erforder-

¹ Dieses Kapitel fußt zu wesentlichen Teilen auf einer Ausarbeitung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2015).

lich. Dies würde jedoch in Widerspruch zum §1 des StandAG und zum Nationalen Entsorgungsplan der Bundesregierung stehen, in dem es heißt: „Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen erfolgt grundsätzlich in nationaler Verantwortung. Die Endlagerung soll im Inland erfolgen“ (BMBU 2015, S. 5).

Ein völkerrechtlicher Hinderungsgrund ist schließlich Artikel IX des sogenannten *Weltraumvertrages* (United Nations 2008), in dem sich die Unterzeichner verpflichten, dass bei Forschungsaktivitäten eine schädliche Kontamination des Weltraumes einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper vermieden werden soll. Dieses am 10.10.1967 in Kraft getretene Übereinkommen ist für die Bundesrepublik Deutschland seit dem 10.02.1971 rechtsverbindlich (HOFMANN 1981).

Resümee: Aufgrund von Sicherheitsbedenken, völkerrechtlichen Bestimmungen und Transportnotwendigkeiten des Abfalls in Äquatornähe empfiehlt die Kommission, diesen Pfad nicht weiter zu verfolgen.

4.3.2 Entsorgung im antarktischen oder grönländischen Inlandeis

Bereits 1957 wurde von der National Academy of Sciences der USA (NAS 1957) eine Lagerung in Eis und Permafrost in Betracht gezogen. Das Konzept wurde in Studien von SCHNEIDER & PLATT (1974) sowie der ERDA (1976) entwickelt und anschließend bewertet (Department of Energy 1980). Vorgeschlagen wurden Zonen in der Antarktis und Grönland, die beide von mächtigen Eiskappen bedeckt sind. Grönland wurde, obwohl es für Schiffstransporte besser erreichbar ist und die Umweltbedingungen weniger extrem sind, aufgrund der Zugehörigkeit zu Dänemark und des Vorhandenseins von Siedlungsbereichen nicht näher betrachtet (ZELLER et al. 1976). Auch in Deutschland wurde Ende der 1950er Jahre über die Entsorgung in den polaren Eiskappen nachgedacht (PHILBERTH 1958, 1959), der Ansatz aber Anfang 1960 endgültig vom damaligen Bundesministerium für Atomfragen verworfen.

Aufgrund der erwartbar hohen Transport- und Konditionierungskosten kämen vornehmlich hoch radioaktive Abfälle in Betracht. Sie sollten entweder von einem 50-100 m tiefen Bohrloch im Eis aus durch ihre Wärmeentwicklung selbstständig bis zur Gesteinsoberfläche unterhalb des Eises absinken, oder müssten durch Verankerungen an der Oberfläche in einer bestimmten Position gehalten werden (Committee of Science and Technology 1999, MCKINLEY et al. 2007). Patentierte Konzepte liegen vor (VALFELLS 2002). Dabei wurde angenommen, dass die Antarktis seit 200 Millionen Jahren auch während wärmerer Klimaperioden ununterbrochen vereist war (ANGINO et al. 1976, BUDD et al. 1971). Zweifel an der sicheren Vorhersagbarkeit der für eine sichere Endlagerung notwendigen klimatischen Bedingungen wurden allerdings schon zur damaligen Zeit geäußert (BULL 1975) und in der Zwischenzeit bestätigt (MCKINLEY et al. 2007). Gegenwärtig wird die Idee der Lagerung in Eis und Permafrost wegen der anhaltenden globalen Erwärmung mit abschmelzenden Eismassen und der sehr empfindlichen arktischen und antarktischen Ökologie stark in Zweifel gezogen (WHIPPLE 2010). Frühere Annahmen (KUBO & ROSE 1973) zur Ausdehnung von Eisflächen, die über mehr als 10.000 Jahre existieren können, sind nach heutigem Erkenntnisstand nicht haltbar (FISCHER et al. 2013). Es bestehen nach wie vor Wissenslücken z.B. zur Gletscherdynamik oder zu den (sicherheits-) technischen Voraussetzungen (MINHANS et al. 2008). Beispielsweise ist die Wirkung einer starken Hitzequelle im Eis oder an seiner Basis nur schwer abschätzbar (KRAUSKOPF 1988).

Nach Artikel 5 des am 23.06.1961 in Kraft getretenen Antarktisvertrags (ATCM 1959) und seinen zahlreichen Folgeverträgen ist die Lagerung radioaktiver Abfälle in der Antarktis bislang völkerrechtlich ausgeschlossen. Hinzu kommt, dass eine Einlagerung in Eis außerhalb der

Grenzen Deutschlands erfolgen müsste, entsprechende Transporte erforderlich machen würde und in Widerspruch zum §1 des Stand AG stünde.

Resümee: Aufgrund von Sicherheitsbedenken, klimatischen Unwägbarkeiten, völkerrechtlichen Bestimmungen und Transportnotwendigkeiten des Abfalls zur Antarktis empfiehlt die Kommission, diesen Pfad nicht weiter zu verfolgen.

4.3.3 Entsorgung in den Ozeanen

Ozeane als mögliche Orte einer Entsorgung des atomaren Abfalls wurden bereits in der Frühzeit in Betracht gezogen, und zwar (a) in Bezug auf die Verdünnungswirkung in den riesigen Wassermengen, (b) mit Blick auf große Sedimentschichten am Grund der Ozeane, und (c) zur Verbringung der Abfälle in Subduktionszonen. Diese drei Optionen werden im Folgenden einzeln kurz diskutiert, gefolgt von der Darstellung der alle drei gleichermaßen betreffenden rechtlichen Lage.

(a) Verdünnungsprinzip: Die erste Meeresversenkung wurde von den USA bereits 1946 durchgeführt. Im Rahmen von Regelungen durch die IAEA (IAEA 1981) wurden noch bis in die 1980er Jahre von einigen kernenergienutzenden OECD-Staaten vornehmlich schwach radioaktive Abfälle im Meer entsorgt (MCKINLEY et al. 2007). In Containern oder Fässern verpackte Abfälle wurden zumeist im Nordatlantik und nordöstlichen bzw. westlichen Pazifik versenkt (Committee of Science and Technology 1999). Die Abwurfzonen befanden sich weit entfernt von Küsten und aktiven Plattenrändern in Wassertiefen zwischen 2000 und 4000 m. Das Gefährdungsrisiko des Verfahrens wurde in einem Bericht der Nuclear Energy Agency (NEA) für einige Abfallarten als relativ gering eingestuft (NEA 1985), in der Annahme, dass die Schadstoffe mit ihrer Aktivität schnell in einer sehr großen Wassermenge verdünnt und weitläufig verteilt werden, wodurch die geforderten Grenzwerte eingehalten werden können. Ein Moratorium der Unterzeichnerstaaten der *London Convention* beendete diese Praxis, und seit 1994 ist die Versenkung schwachradioaktiver Abfälle untersagt.

MINHANS et al. (2008) nennen verschiedene Argumente, die gegen das Verdünnungsprinzip sprechen. Zum einen sei es schwierig eine gänzlich unschädliche Konzentration anzugeben, wobei auch die Kollektivdosis zu berücksichtigen sei. Zudem könne die Verdünnung durch verschiedene Anreicherungsseffekte in Sedimenten oder der Nahrungskette aufgehoben werden, was dann wegen der praktisch irreversiblen Methode kaum korrigierbar wäre.

(b) Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens: Als mögliche Methoden für die Lagerung in Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens wurden zwei Verfahren näher betrachtet. Bei dem einen werden speziell angefertigte stromlinienförmige und mehrere Tonnen schwere Abfallbehälter von Bord eines Schiffes fallen gelassen (KLETT 1997, MOBBS et al. 1988, 1989), die sich bis zu 30 Meter tief in unverfestigte weiche Sedimente am Meeresboden bohren. Dies wurde in den 1980er Jahren erfolgreich in der atlantischen Tiefsee getestet (MCKINLEY 2007). Bei dem anderen (nicht in der Praxis getesteten) Verfahren sollen die Abfälle in Bohrlöchern von einigen hundert Metern Tiefe in verfestigten oder unverfestigten Sedimenten gelagert werden, die abschließend mit Beton zu versiegeln wären. Als Ergebnis von Untersuchungen der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD liegen eine Reihe von Abschlussberichten zur Machbarkeit der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tiefseesedimenten vor (NEA 1988, RECHARD et al. 2011).

Für diese Methode sprechen aus technischer Sicht die relativ geringe Störfallwahrscheinlichkeit und die günstigen Eigenschaften von Tiefseesedimenten mit hohem Rückhaltevermögen

(AkEnd 2002). Kritisch sind allerdings lange Transportwege, eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf See, das Risiko von Havarien und von Korrosionsleckagen an Metallcontainern im Salzwassermilieu, die praktisch nicht vorhandene Möglichkeit der Fehlerkorrektur bzw. Rückholung sowie Risiken für das eingesetzte Personal während des Transportes und der Einlagerung. Weiterhin gibt es große Wissenslücken bezüglich der Tiefseebedingungen, in denen die Last der Entsorgung auf die internationale Gemeinschaft abgeschoben wird, Störfälle nicht beherrschbar sind und hoher technischer Entwicklungsaufwand betrieben werden muss, um die Machbarkeit zu gewährleisten (MINHANS et al. 2008). Nach Einschätzung des AkEnd (2002) stehen für die Erschließung derartiger Endlagerstandorte und die nachfolgende Einlagerung keine erprobten Techniken zur Verfügung.

(c) Subduktionszonen: Die Überlegung, radioaktive Abfälle in Subduktionszonen (~~„Abtauchzonen“ in der Erdkruste an den Grenzflächen der kontinentalen Plattenverschiebungen~~) zu entsorgen (BOSTROM & SHERIF 1970), verdankt sich vor allem dem Argument, dass die Abfälle durch den Prozess des Abtauchens einer tektonischen Platte in den Erdmantel von der Biosphäre isoliert werden könnten (RECHARD et al. 2011). Das „Abtauchen“ erfolgt mit einer Rate von einigen Zentimetern pro Jahr relativ langsam. Nach RAO (2001) reiche dies aber aus, um die Diffusionsgeschwindigkeit von Radionukliden zu übertreffen, so dass mit ihrer Freisetzung in die Ozeane hinein nicht zu rechnen sei.

Allerdings erhöht sich durch die tektonische Aktivität entlang der Grabenzonen auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Sicherheit eines derartigen Endlagers schon frühzeitig und vor dem Eindringen in den Erdmantel beeinträchtigt werden könnte und Radionuklide freigesetzt würden. Diese Unsicherheit bei der Prognose der geologischen Abläufe und damit des Weges, den die Abfälle letztendlich nehmen, wird auch von MINHANS et al. (2008) und KRAUSKOPF (1988) bemängelt. Schließlich wären bei einem derartigen Verfahren Fehlerkorrektur und ggf. Rückholung der Abfälle kaum vorstellbar.

*

Die Versenkung von festen radioaktiven Abfällen auf oder in den Meeresgrund ist mittlerweile durch mehrere internationale Abkommen untersagt. Dies beruht auf Zweifeln hinsichtlich des letztendlichen Verbleibs des Abfälle und der Einsicht, dass einige wenige Länder nicht die von allen geteilte marine Umwelt verunreinigen sollten (MCKINLEY 2007). Die *London Dumping Convention (Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, LC72)* ist seit 1975 in Kraft. Durch die 1996 erfolgte Ergänzung durch das *London Protocol (IMO 1972)* ist nicht nur die Entsorgung auf, sondern auch im Meeresboden und im tieferen Meeresuntergrund ausgeschlossen. Die einzige Ausnahme wäre ein von Land aus erreichbarer Bereich des Meeresbodens. Damit sind einer möglichen Endlagerung radioaktiver Abfälle in den Ozeanen in allen oben genannten Formen - auch unbeschadet der oben genannten Sicherheitsbedenken, mangelnder technischer Nachweise und geologischer Unsicherheiten - klare völkerrechtliche Riegel vorgeschoben.

Es kommt aus deutscher Sicht hinzu, dass eine Entsorgung in den Ozeanen der im StandAG festgeschriebenen nationalen Entsorgungspflicht widersprechen würde. Transportnotwendigkeiten und die Notwendigkeit der Nutzung internationaler Gewässer sprechen genauso gegen diese Optionen wie die schlechten bis gar nicht vorhandenen Methoden der Fehlerkorrektur und Rückholung.

Resümee: Aufgrund von Sicherheitsbedenken, mangelnden Möglichkeiten von Fehlerkorrektur und Rückholbarkeit der Abfälle und völkerrechtlichen Bestimmungen empfiehlt die Kommission, diesen Pfad in allen drei Teilpfaden nicht weiter zu verfolgen.

4.3.4 Dauerlagerung an oder nahe der Erdoberfläche ohne Endlagerintention

Die oberflächennahe Lagerung hochradioaktiver Abfälle ist derzeit zur Zwischenlagerung als Vorstufe zur späteren Endlagerung gängige Praxis. In einigen Ländern wird auch über eine oberflächennahe Langzeitlagerung nachgedacht, bis eine geeignete Endlagermethode zur Verfügung steht (vgl. Kap. 4.4.1). An dieser Stelle soll es jedoch nur um Lagerungsoptionen gehen, die keine spätere Endlagerung in den Blick nehmen (daher „Dauerlagerung“).

Für eine Dauerlagerung der Abfälle auf unabsehbare Zeit in Form eines oberirdischen oder oberflächennahen und ständig zu kontrollierenden und kontrollierbaren Lagers sind nicht nur, wie bei Endlagerkonzepten, zeitlich begrenzte Kontroll- und Monitoringmaßnahmen eingeplant (dazu Kap. 4), sondern die Abfälle sollen *jederzeit* inspizier- und problemlos rückholbar sein. Die Aufrechterhaltung des Sicherheitskonzepts ist nur im Rahmen einer langfristigen gesellschaftlichen Kontrolle zu gewährleisten.

Vorteile des Verfahrens sind die permanente Zugänglichkeit der Abfälle, ihre Überwachbarkeit und die Möglichkeit sofortiger Intervention bei Störfällen. Im Falle eines technischen Fortschrittes bei den Einlagerungsmethoden oder der Abfallbehandlung könnten die radioaktiven Substanzen entweder teilweise wieder nutzbar oder in ihrem Risikogehalt vermindert werden. Dadurch könnte insgesamt die gesellschaftliche Akzeptanz verbessert werden (MINHANS et al. 2008).

Der entscheidende Faktor hierbei ist jedoch die Langlebigkeit und Stabilität des Überwachungskonzepts einschließlich der beauftragten Institutionen. Im sogenannten *Hüte-Konzept* (BUSER 1998) soll die Verantwortung zur Überwachung eines oberirdischen Lagers über Generationen weitergegeben werden. In einem an schwedische Verhältnisse angepassten Ansatz (CRONHJORT et al. 2003) sollen die Abfälle in trockenen Gesteinsschichten knapp unter der Erdoberfläche eingelagert werden. Beide Ansätze wurden nicht weiterverfolgt (MCKINLEY & MUNIER 2003, MÖRNER 2003).

Die Verlässlichkeit der beauftragten Institutionen über eine extrem lange Zeitspanne stellt laut MCKINLEY et al. (2007) den größten Unsicherheitsfaktor dar. Aus diesem Grund geht die IAEA davon aus, dass derartige Verfahren nur für kurzlebige Isotope sinnvoll anwendbar ist (IAEA 1992, 2002, 2003). In die gleiche Richtung tendiert auch die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), die die gesellschaftliche der geologischen Stabilität gegenüberstellt (NAGRA 1997). Aus Sicht von APPEL et al. (2001) ist die baldige Endlagerung gegenüber Optionen mit Überwachung zu bevorzugen, da weder bezüglich der (Langzeit-)Sicherheit noch der ethischen Begründbarkeit Vorteile der Dauerlagerung erkennbar sind. Die *Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle* (EKRA 2000) kommt zu dem Schluss, dass die Langzeitsicherheit nicht durch eine überwachte Dauerlagerung, sondern nur durch geologische Konzepte gewährleistet werden kann. Ein plausibler Nachweis der Funktion gesellschaftlich-institutioneller Schutzsysteme über den erforderlichen Zeitraum ist nicht möglich (MINHANS et al. 2008; AkEnd 2002). Stabile gesellschaftliche Verhältnisse über Jahrtausende oder länger anzunehmen widerspricht der historischen Erfahrung, während viele geologische Konstellationen eine hohe zeitliche Stabilität haben, die als passive Schutzsysteme genutzt werden können.

Weitere Kritikpunkte neben der unsicheren Prognose hinsichtlich gesellschaftlicher und politischer Entwicklungen sind die Gefahr von Unfällen (z.B. durch mangelnde Wartung) und Angriffen durch Krieg oder Terrorismus, die Proliferationsgefahr, der große organisatorische und finanzielle Aufwand für zukünftige Generationen und klimatische Unwägbarkeiten.

Resümee: Aufgrund der mangelnden Erwartbarkeit stabiler gesellschaftlicher Verhältnisse über extrem lange Zeiträume und der Verpflichtung, die Belastung zukünftiger Generationen möglichst gering zu halten, empfiehlt die Kommission, diesen Pfad nicht weiter zu verfolgen.

4.3.5 Tiefengeologische Bergwerkslösung ohne Rückholbarkeit

Das Verbringen der radioaktiven Abfälle in einem eigens dazu angelegten Bergwerk in einer tiefen geologischen Formation gehört zu den bestuntersuchten Entsorgungsoptionen. Die meisten Ansätze sehen vor, ein Endlagerbergwerk in einer Tiefe von 500 - 1000 Meter in einer geeigneten geologischen Formation zu errichten, deren langzeitige Stabilität den weitaus größten Teil der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen übernehmen soll (AkEnd 2002). Als Wirtsgestein kommen nach gegenwärtigem Wissensstand Salz, Ton und Kristallingestein (z.B. Granit) in Frage, deren Wahl jeweils Auswirkungen auf die erforderliche Bergwerkstechnologie und die notwendigen Sicherheitsnachweise hat.

Die Option eines Endlagerbergwerks wird auch von der Kommission als verfolgenswerte Option empfohlen (Kap. 4.5), jedoch mit einem zentralen Unterschied zu der Version, die hier als nicht verfolgenswert eingestuft wird. Dieser Unterschied betrifft die *Rückholbarkeit* der Abfälle. Man kann zwar sagen, dass die Rückholbarkeit der Abfälle nur eine Frage des Aufwandes sei. In jeder tiefengeologischen Konstellation ist „im Prinzip“ eine Rückholung möglich. Der Aufwand für und die Risiken von einer Rückholung können jedoch extrem unterschiedlich sein. Dementsprechend macht es einen großen Unterschied, ob die Rückholbarkeit bereits von Anfang an unter bestimmten Bedingungen und in bestimmten Zeiträumen vorgesehen wird (dazu Kap. 4.5), oder ob ein möglichst schneller Verschluss des Endlagerbergwerks ohne Rücksicht auf eine Rückholbarkeit angestrebt wird.

Für einen schnellen und endgültigen Verschluss spricht vor allem das Argument, dass keine Nachsorge erforderlich wäre. Idealerweise gäbe es keine Anforderungen an eine länger dauernde Kontrolle des Endlagerbergwerks, weil die geologische Formation die geforderte Sicherheit garantieren soll. Zukünftigen Generationen würden weder Kosten durch Nachsorge noch Belastungen durch Risiken entstehen. Die notwendige Wissensweitergabe wäre beschränkt auf die Kenntnis des Standortes, damit dort nicht in späteren Zeiten ~~andere~~ Nutzungen vorgesehen würden.

Die Kritik an diesem Ansatz betrifft vor allem die Frage, ob die Prämissen überhaupt erfüllbar sind. Die zentrale Prämisse ist, dass eine technisch/geologisch *absolut sichere* Lösung möglich ist, dass also Sicherheitsnachweise so verlässlich geführt werden können, dass zukünftige Generationen vor möglichen Schädigungen durch die Abfälle garantiert geschützt sind. Diese Prämisse entstammt einem technisch/naturwissenschaftlichen Machbarkeitsideal, das durch die Bewusstwerdung der Ambivalenz von Technik (Grunwald 2010), insbesondere im Auftreten nicht intendierter Folgen, in grundlegende Zweifel geraten ist (dazu Kap. 2). In einer ethischen Analyse wurde sogar das Ergebnis erzielt, dass eine Endlagerung ohne Rückholbarkeit, die ja eigentlich zukünftige Generationen von Belastungen möglichst freihalten soll, zu besonders großen Risiken für diese führen könne (Kalinowski et al. 1999).

Wenn jedoch die Machbarkeit einer garantiert sicheren Lösung in Zweifel gerät, müssen Vorkehrungen getroffen werden, um mit unerwarteten Entwicklungen - die in der ersten Zeit nach der Einlagerung aufgrund der Wärmeentwicklung am wahrscheinlichsten sind - verantwortlich umgehen zu können. Genau diese Argumentation führt auf die auch im StandAG genannten Anforderungen an die Möglichkeit von Fehlerkorrekturen und Rückholbarkeit und somit zu einem Ausschluss von Optionen, die keine Rückholbarkeit vorsehen.

Resümee: Aufgrund mangelnder Vorkehrungen für Fehlerkorrekturen und zur Rückholbarkeit der Abfälle empfiehlt die Kommission, diesen Pfad nicht weiter zu verfolgen.

4.4 Optionen zur weiteren Beobachtung und ggf. Erforschung

Einige Optionen können mangels belastbaren Wissens zurzeit noch nicht abschließend eingestuft werden. Sie sind weiter systematisch zu beobachten, ggf. ist durch gezielte Forschung der Wissensstand zu verbessern, um eine spätere abschließende Beurteilung zu ermöglichen. Sie eignen sich jedoch nach dem gegenwärtigen und absehbaren Stand des Wissens nicht als Basis für eine sichere Entsorgung und werden daher nicht weiter ausgearbeitet.

geschätzter Platzbedarf: je ca. 3 Seiten pro Option

4.4.1 Langfristige Zwischenlagerung

Es wird darauf verzichtet, ein Endlagerkonzept in absehbarer Zeit zu entwickeln. Stattdessen wird die Lagerung der Abfälle auf sehr lange Zeit (Größenordnung einige Jahrhunderte) in Form eines oberirdischen oder oberflächennahen und damit ständig zu kontrollierenden und kontrollierbaren Lagers vorgesehen mit der Absicht, irgendwann dennoch auf ein Endlagerkonzept umzusteuern.

Dieses Kapitel wird geschrieben, nachdem das entsprechende Gutachten in der AG3 diskutiert und ausgewertet wurde.

4.4.2 Transmutation

Transmutation ist technisch noch in der Entwicklung. Sie würde das Aufrechterhalten einer kerntechnischen Industrie erfordern (vergleichbar zur Wiederaufbereitung). Auch bei optimistischen Annahmen besteht die Notwendigkeit der Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes zum langfristigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen weiter.

Dieses Kapitel wird geschrieben, nachdem die beiden Gutachten vorliegen und in der AG3 diskutiert und ausgewertet wurden.

4.4.3 Tiefe Bohrlöcher

Diese Option besteht darin, Bohrlöcher mit Durchmesser von einem bis mehreren Metern und mehreren tausend Metern Tiefe zur Endlagerung vorzusehen (ca. 3000 - 5000 m). Nach der Einlagerung der Abfallbehälter sollen diese Bohrlöcher verschlossen werden.

Dieses Kapitel wird geschrieben, nachdem das vergebene Gutachten vorliegt und in der AG3 diskutiert und ausgewertet wurde.

4.5 Priorität: Endlagerbergwerk mit Reversibilität/Rückholbarkeit/Bergbarkeit

Die Kommission kommt nach mehreren intensiven Diskussionen über die Entsorgungsoptionen zu dem Schluss, dass die bislang in Deutschland verfolgte Option eines Endlagerbergwerks die beste Möglichkeit zu einer sicheren Entsorgung bietet - allerdings mit einer erheblichen konzeptionellen Änderung. Gegenüber früheren Ansätzen misst die Kommission der Reversibilität von Entscheidungen und der Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit der Abfälle hohe Bedeutung bei (entgegen der Option in Kap. 4.3.5), z.B. um Fehlerkorrekturen (StandAG) zu ermöglichen,

aber auch um zukünftigen Generationen Handlungsoptionen und Entscheidungsspielräume offen zu halten.

Im Folgenden werden zunächst die Grundannahmen und Prämissen der Option erläutert (4.5.1), um sodann ihre Phasen entlang der Zeitachse kurz zu beschreiben (4.5.2), den möglichen Zeitbedarf für die einzelnen Schritte zu skizzieren (4.5.3) und schließlich die zentralen Argumente zu nennen, die die Endlagerkommission bewogen haben, auf diese Option zu setzen (4.5.4).

4.5.1 Grundlagen und Prämissen

Die mit dieser Option verbundenen Prozesswege haben als letztendliches Ziel ein Endlager in einer tiefen geologischen Formation in Form eines Bergwerks, das in einer (mehr oder weniger fernen) Zukunft verschlossen werden kann und keine Belastungen der Biosphäre und zukünftigen Generationen verursacht. Selbstverständlich bleibt es zukünftigen Generationen offen, über den Zeitpunkt, die Modalitäten, ja sogar über das „ob überhaupt“ eines ‚endgültigen‘ Verschlusses zu befinden. Das heutige mit dieser Option verbundene Ziel ist jedoch *ein sicher verschlossenes Endlagerbergwerk*. Entscheidungskriterien und Verfahrensschritte sind so festzulegen, dass dieses Ziel erreicht werden kann (hierzu im Detail Kap. 5).

Die Gestaltung des Prozessweges bis hin zu einem verschlossenen Endlagerbergwerk soll ein Höchstmaß an Lernmöglichkeiten und Möglichkeiten für Fehlerkorrektur und zur Berücksichtigung neuer Erkenntnisse garantieren. Konzepte der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit der Abfälle bzw. der Reversibilität von Entscheidungen sind dafür zentral. Bevor unumkehrbare oder nur unter großem Aufwand revidierbare Entscheidungen getroffen werden, muss an Meilensteinen im Prozess eine transparente und wissenschaftlich gestützte Evaluation unter Beteiligung nationaler und internationaler Gremien und der Öffentlichkeit durchgeführt werden. Um die Notwendigkeit von Umsteuerungen im Prozess, z.B. zur Fehlerkorrektur, überhaupt erkennen zu können, bedarf es geeigneter Formen des Monitoring (vgl. dazu Kap. 5).

Die (insbesondere) hoch radioaktiven Abfälle werden von der Kommission als *Abfälle* angesehen, die dauerhaft sicher verwahrt werden müssen. Insofern eine Rückholbarkeit der Abfälle vorgesehen werden soll, geschieht dies ausschließlich in Hinblick auf die dauerhaft sichere Lagerung der Abfälle, keinesfalls dahingehend, die Abfälle möglicherweise in Zukunft als Wertstoffe zu nutzen. Freilich stünde es zukünftigen Generationen frei, dies anders zu sehen.

In der Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit (Kap. 5.3) kommt es grundsätzlich nicht nur auf das Wirtsgestein an, sondern auf Kombinationen von Wirtsgestein und zugehörigem technischem wie organisatorischem Endlagerkonzept. Die Frage, ob Salz, Ton oder Kristallingestein am besten geeignet sind, kann ohne Angabe des jeweiligen Endlagerkonzeptes nicht abschließend beantwortet werden und stellt sich auf dieser Ebene nicht.

In dem ab 2018 vorgesehenen Standortsuchverfahren müssen alle für die möglichen Prozesswege hin zu einem verschließbaren Endlagerbergwerk relevanten Aspekte bedacht werden, vor allem durch die Festlegung der Kriterien und der Verfahrensschritte (Kap. 5). Die Anforderung der Rückholbarkeit/Bergbarkeit der Abfälle bringt dabei eigene Anforderungen mit sich. Andererseits sollen möglichst wenige Vorentscheidungen getroffen werden, damit den zukünftigen Generationen Möglichkeiten des Umschwenkens auf andere Optionen offen bleiben. Heute angestellte Gedanken über teils weit entfernte zukünftige Entwicklungen dienen nicht dem Zweck, diese vorweg festzulegen, sondern herauszufinden, was alles bereits zu Beginn des Suchverfahrens bedacht werden muss, damit als Ergebnis des Verfahrens der ‚bestmögliche Standort‘ (Kap. 5.3) herauskommt.

4.5.2 Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit - Begriffsklärungen

Die Gestaltung des Prozessweges bis hin zu einem verschlossenen Endlagerbergwerk soll ein Höchstmaß an Lernmöglichkeiten und Möglichkeiten für Fehlerkorrektur und zur Berücksichtigung neuer Erkenntnisse garantieren. Konzepte der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit der Abfälle bzw. der Reversibilität von Entscheidungen sind dafür zentral. Folgende Begriffsverständnisse liegen den weiteren Ausführungen zugrunde:

- *Reversibilität* von Entscheidungen bedeutet, einmal getroffene Entscheidungen rückgängig ~~zu machen~~ auf andere Entsorgungspfade umsteigen zu können, z.B. aufgrund neuer und attraktiver erscheinender technischer Möglichkeiten oder aufgrund neu erkannter Probleme mit dem ursprünglichen Plan. Entscheidungsumkehr ist in der Regel mit Zeitbedarf und Kosten verbunden. Die Kosten dürften umso höher sein, in je späterem Stadium die Umkehr erfolgt.
- *Rückholbarkeit* ist die Fähigkeit, hochradioaktiven Abfall aus einem Endlager wieder zurückzuholen, wenn dieser bereits in einem Endlager eingelagert ist und die Eingangsstrecken und Bohrlöcher teilweise endgültig verschlossen (verwahrt; abgedichtet) sind. Rückholung ist die konkrete Handlung, mit der die Abfallbehälter aus dem Endlager zurückgeholt werden. Rückholbarkeit setzt voraus, dass Vorkehrungen getroffen worden sind, die eine Rückholung der Abfallbehälter erleichtern bzw. gewährleisten, also entsprechende Technologien von der Infrastruktur bis hin zu den Behältern.
- *Bergbarkeit* meint die Möglichkeit der Rückholung von Behältern mit hochradioaktiven Abfall verstanden, wenn das Endlagerbergwerk bereits vollständig verschlossen (verwahrt, abgedichtet) ist. Dies kann z.B. durch das Auffahren eines zweiten Bergwerks in Nachbarschaft zu dem ursprünglichen Endlagerbergwerk erfolgen, über das die Bergung erfolgen kann. ~~Voraussetzung dafür ist~~ eine genaue Kenntnis der Lage der Abfälle sowie der intakte Zustand der Behälter.

Die Sicherstellung von Reversibilität im Prozess sowie Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Abfälle bedeutet nicht, dass ~~irgendwas davon~~ im heutigen Zeitpunkt bereits beabsichtigt ~~wäre~~ es geht ausschließlich darum, diese Möglichkeiten offen zu halten. Warum spätere Generationen vielleicht die Abfälle rückholen wollen, kann ~~und darf~~ heute nicht entschieden werden. Das Anliegen der Kommission ist es, Möglichkeiten der Reversibilität (z.B. zur Fehlerkorrektur), zur Rückholbarkeit (z.B. um auf andere Pfade zu wechseln) und zur Bergbarkeit (im Falle unvorhergesehener negativer Entwicklungen im verschlossenen Endlager) in den Prozess einzubauen, um den Prozess möglichst lernfähig zu machen und zukünftigen Generationen Handlungsmöglichkeiten offen zu halten.

4.5.2 Zeitliche Struktur: Phasenmodell

Unter den angegebenen Rahmenbedingungen sind durchaus unterschiedliche konkrete Realisierungen vorstellbar. Die Option „Endlagerbergwerk mit Rückholbarkeit“ ist daher nicht ein einzelner Pfad, sondern in sich eine Pfadfamilie. Die folgende Darstellung soll zeigen, wie diese aus heutiger Sicht in Phasen eingeteilt werden kann.

Phase 1: Standortauswahlverfahren

Der Start des Auswahlverfahrens möglicher Endlagerstandorte kann nach StandAG gegebenenfalls ab 2018 nach einer Entscheidung des Deutschen Bundestages erfolgen. Notwendig sind hier vor allem wissenschaftlich klar definierte und demokratisch legitimierte ~~Suchkriterien, insbesondere Sicherheitskriterien~~ (Kap. 5), sowie klare Regeln für Verfahrensschritte, Beteiligung der Öffentlichkeit, Behördenstruktur und Entscheidungsprozesse. Die Standortsuche erfolgt in

mehreren Schritten der allmählichen Eingrenzung von in Frage kommende Standorten bis hin zur Bestimmung des bestmöglichen Standorts (vgl. Kap. 5.3). In diesem Prozess führen die hoch radioaktiven Abfälle weiter in Zwischenlagern. Im Falle eines hohen Zeitbedarfs der Suche nach einem Endlagerstandort oder wenn auf andere Pfade umgeschwenkt werden soll, müssen möglicherweise technisch, ökonomisch und institutionell aufwändige Prozesse der sicheren Aufbewahrung eingeleitet werden (z.B. Transport an andere Standorte oder die Umladung in andere Behälter). Während des Suchprozesses kann das Verfahren jederzeit abgebrochen und es kann auf (auch ganz) andere Pfade umgeschwenkt werden. Ggf. müssten die bereits eingesetzten Mittel zur Standortsuche abgeschrieben werden. Mit der Festlegung eines Endlagerstandortes durch eine Entscheidung des Deutschen Bundestages wird diese Phase abgeschlossen (vgl. die detaillierte Beschreibung dieser Phase in Kap.5.5.1).

Phase 2: Bergtechnische Erschließung des Standortes

Die bergtechnische Erschließung des Standortes für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle umfasst zunächst die vorlaufenden erforderlichen Planungs- und Genehmigungsverfahren und die Erbringung der erforderlichen Sicherheitsnachweise in der Kombination von geologischen Barrieren und technischem Endlagerkonzept. Sodann geht es um den Bau des Endlagers mit allen erforderlichen technischen Anlagen ober- und untertägig einschließlich der Transportwege für die spätere Einlagerung. Diese Phase wird voraussichtlich mit einer „kalten“ Probe-Phase abgeschlossen, in der das bergtechnische Funktionieren aller Prozesse der Einlagerung (und ggf. des Monitoring) getestet wird. Parallel müssen die technischen Voraussetzungen für die Einlagerung geschaffen werden, z.B. was geeignete Behälter für die Abfälle und die Transportwege betrifft. Während dieser Phase kann die Erschließung jederzeit abgebrochen und es kann auf andere Pfade umgeschwenkt werden. Die Kosten würden sich darin erschöpfen, die Mittel für die Suche und für die Erschließung abzuschreiben (vgl. die detaillierte Beschreibung dieser Phase in Kap.5.5.2).

Phase 3: Einlagerung der radioaktiven Abfälle

Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle beginnt mit dem Einbringen des ersten beladenen Endlagergebundes in das vorbereitete Bergwerk. Die Endlagergebünde werden in eine Reihe von Kammern, Strecken oder Bohrlöcher (von den Strecken aus) verbracht. Abhängig vom jeweiligen Endlagerkonzept, sobald einer dieser Lagerorte gefüllt ist, wird er verschlossen, damit die Gebünde im Falle eines Wassereintrittes geschützt sind. Die Behälter werden in ihre endgültige Lage gebracht. Der Verschluss geschieht so, dass eine Wiederöffnung und Rückholung der Abfälle in angemessener Zeit (Zeitdauer: einige Jahre, ähnlich wie die Einlagerung) möglich ist. Auch die Gebünde/Behälter müssen so ausgelegt sein; dass eine Rückholung möglich ist. Das Bergwerk selbst verbleibt in dieser Phase in einem ordnungsgemäßen und betriebsbereiten Zustand. Die Einlagerung kann jederzeit unterbrochen werden und später fortgesetzt werden oder auch endgültig aufgegeben werden. Es ist auch möglich, zunächst einen Teil einzulagern und z.B. eine Strecke zu befüllen und zu verschließen, dann einige Zeit, z.B. 20 Jahre, zu warten, wie sich die Konstellation Wirtsgestein/Abfallbehälter entwickelt, um abhängig vom Ergebnis dieser Untersuchung über das weitere Vorgehen zu entscheiden. Bereits eingelagerte Gebünde können je nach Ergebnis der Untersuchung verbleiben oder rückgeholt werden. Das Verfahren kann komplett abgebrochen werden und es kann auf andere Pfade umgeschwenkt werden, da das Bergwerk funktionsfähig bleibt. Die noch nicht eingelagerten Abfälle verbleiben in Zwischenlagern mit entsprechenden Anforderungen an die Gewährleistung der Sicherheit. Das Ende der Einlagerung ist mit dem Einbringen des letzten beladenen Endlagergebundes gekommen. Die Endlagergebünde sind in verschiedene Kammern oder Strecken verbracht, die verschlossen sind, damit die Gebünde im Falle eines Wassereintrittes geschützt sind (vgl. die detaillierte Beschreibung dieser Phase in Kap.5.5.3).

Phase 4: Beobachtungsphase vor Verschluss

In der Phase nach Abschluss der der Einlagerung ist das Bergwerk  weiterhin voll funktionsfähig und zugänglich. Die  Beobachtung der weiteren Entwicklung  z.B. Temperatur, Stabilität der geologischen Formation) ist möglich. ~~Monitoring-Möglichkeiten.~~ Die eingelagerten Gebinde können ~~im Bergwerk verbleiben, bei Bedarf aber auch~~  rückgeholt werden. Auch in diesem Stadium kann das Verfahren noch abgebrochen werden und es kann auf andere Pfade umgeschwenkt werden. In diesem Fall müssen die eingelagerten Abfälle rückgeholt und an einen sicheren oberirdischen Ort verbracht werden. Der Verschluss des Endlagerbergwerkes als Abschluss dieser Phase ist abhängig von Entscheidungen zukünftiger Generationen. Das Verschlussverfahren kann gestoppt werden, es bleiben dann die Optionen wie in der Phase nach Abschluss der Einlagerung. Der Aufwand einer Umsteuerung steigt dann wahrscheinlich weiter an; die Umsteuerung bleibt aber weiter technisch möglich (vgl. die detaillierte Beschreibung dieser Phase in Kap.5.5.4).

Phase 5: Verschlussenes Endlagerbergwerk

Mit dem Zustand eines verschlossenen Endlagerbergwerks ist das Ziel eines sicheren und wartungsfreien Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Bergwerk erreicht. Das verschlossene Endlagerbergwerk kann weiter von außen beobachtet werden. Inwieweit auch die Vorgänge im Inneren weiter beobachtet werden können, hängt von  ~~den Züge der Einlagerung oder in der Phase vor Verschluss~~ vorgesehenen Monitoring-Maßnahmen ab (Kap. 4). Bei Bedarf können die Gebinde über d  Auffahrung eines neuen Bergwerks und unter Nutzung der Dokumentation geborgen werden. Die Bergung ist möglich, solange der Standort des Endlagerbergwerks bekannt ist, solange die Dokumentation auffindbar und lesbar ist, solange die Endlagergebäude (Behälter) selbst in bergbarem Zustand sind, und solange die technischen und gesellschaftlichen Voraussetzungen einer Bergung (d.h. Auffahren eines parallelen Bergwerks) gegeben sind (vgl. die detaillierte Beschreibung dieser Phase in Kap.5.5.5).

*

Auf diese Weise kann das Ziel einer sicheren und wartungsfreien Endlagerung mit den Wünschen nach Reversibilität von Entscheidungen, Rückholbarkeit der Abfälle, Ermöglichung von Fehlerkorrekturen und Lernmöglichkeiten im Prozess verbunden werden. Meilensteine im Verfahren, die jeweils den aktuellen Stand des Wissens reflektieren und mögliche Änderungen im Verfahren bis hin zu Rücksprüngen oder einem Umschwenken auf ganz andere Optionen bedenken, sind jederzeit definierbar. Sie sind auch geeignete Punkte der Beteiligung der breiten Öffentlichkeit bzw. der regional betroffenen Öffentlichkeit.

4.5.3 Begründung der Priorität

Die zentralen Argumente, die oben kurz geschilderte Option „Endlagerbergwerk mit Rückholbarkeit“ weiter auszuarbeiten und dem Deutschen Bundestag zu empfehlen, sind zusammengefasst:

- diese Lösung ist in Deutschland ~~machbar~~  anders als die ~~meisten der~~ in 4.3 diskutierten Optionen)
- mit dieser Option werden zukünftige Generationen von einem bestimmten (allerdings möglicherweise recht weit entfernten) Zeitpunkt an von Belastungen durch die radioaktiven Abfälle befreit (anders als  Konzept der oberflächennahen Dauerlagerung, Kap. 4.3.4)

- diese Option erlaubt hohe Flexibilität zur Nutzung neu hinzukommender Wissensbestände. Ein Umschwenken auf andere Entsorgungspfade bleibt über lange Zeit im Prozess mit überschaubarem Aufwand und ohne Sicherheitsprobleme möglich (anders als bei den meisten der in 4.3 diskutierten Optionen)
- ebenso ermöglicht diese Option weitgehende Möglichkeiten des Lernens aus den bisherigen Prozessschritten und von Fehlerkorrekturen (z.B. durch Maßnahmen des Monitoring)
- über die erforderlichen geologischen Voraussetzungen (passive Sicherheitssysteme, Barrieren) liegen weit reichende wissenschaftliche Kenntnisse vor, welche die Realisierung als aussichtsreich erscheinen lassen (dazu Kap. 5.6)
- die technischen Voraussetzungen (Behälter, Auffahren und Betrieb des Endlagerbergwerks, Einlagerung und Verschluss) sind zum Teil Stand der Technik heute, zu anderen Teilen erscheinen sie einlösbar (dazu Kap. 5.8 und 5.9)
- diese Option kollidiert nicht mit Bestimmungen des Völkerrechts (wie manche der in 4.3 diskutierten Optionen)

Damit ist die Option „Endlagerbergwerk mit Reversibilität/Rückholbarkeit/Bergbarkeit“ nach Auffassung der Kommission ein aussichtsreicher Weg mit den Hinterlassenschaften des Atomzeitalters verantwortlich umzugehen.

4.6 Zeitbedarf zur Realisierung und notwendige Zwischenlagerzeiten

4.6.1 Zeitplan beim favorisierten Ansatz

Die hohe Flexibilität des geschilderten Verfahrens bringt es mit sich, dass über die Zeitbedarfe der einzelnen Schritte und die Zeiten bis zu den jeweiligen Entscheidungsfindungen nur wenig ausgesagt werden kann. Folgende Zeitstruktur ist am StandAG orientiert, erscheint aber als sehr optimistisch (die Zahlenangaben dürfen nur als grobe Orientierung verstanden werden):

Phase	Beginn	Abschluss
Standortsuche	2018	2031 (nach StandAG)
Bergtechnische Erschließung	2031	2050
Einlagerung der Abfälle	2050	2070
Beobachtung vor Verschluss	2070	2100
Verschluss	2100	offen

Aufgrund von längeren Abläufen, von beabsichtigten oder nicht beabsichtigten Wartezeiten, von Änderungen im Prozessablauf bis hin zu Planänderungen etc. können sich die Zeitspannen erheblich weiter in die Zukunft erstrecken. Es ist jedoch müßig, darüber bereits heute zu spekulieren. Für heute ist entscheidend, den Beginn des Prozesses, also die Standortsuche, mit dem wissenschaftlich bestmöglichen, gesellschaftlich legitimierten und verantwortbaren Satz an Suchkriterien und Verfahrensschritten zu beginnen. Alles Weitere obliegt Gesellschaft und Entscheidungsträgern in Zukunft.

4.6.2 Mögliche Zeitpläne bei anderen Pfaden

offen

4.6.3 Notwendige Zwischenlagerung vor der Endlagerung

offen

Literatur

Zu Kap. 4.3 in BGR-Zuarbeit

Anselm Tiggemann, Die "Achillesferse" der Kernenergie in Deutschland. Zur Kernenergiekontroverse und Geschichte der Entsorgung von den Anfängen bis Gorleben 1955 bis 1985. Lauf an der Pegnitz 2004.

Grunwald 2010

Kalinowski et al 1999