

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Rückholung/Rückholbarkeit hoch radioaktiver Abfälle aus einem Endlager

Diskussionspapier vom 2. September 2011 der Entsorgungskommission (ESK), Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL)

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 24 b</p>

Entsorgungskommission (ESK)
Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL)

**„Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager –
ein Diskussionspapier“**

02.09.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Grundlagen und Ziele einer nachhaltig sicheren Endlagerung	4
1.3	Die Rückholbarkeit in den Sicherheitsanforderungen des BMU	6
1.4	Varianten und Zeitskalen der Endlagerung radioaktiver Abfälle mit und ohne einer Option der Rückholbarkeit	6
2	Thematisch geordnete Argumente zur Rückholbarkeit	10
2.1	Sicherheitsorientierte Argumente	11
2.1.1	Gewährleistung der Langzeitsicherheit	11
2.1.2	Nachweis der Langzeitsicherheit	13
2.1.3	Betriebliche und Umgebungssicherheit	14
2.2	Ethische Argumente	16
2.2.1	Intragenerationelle Gerechtigkeit	16
2.2.2	Intergenerationelle Gerechtigkeit	16
2.3	Argumente zum Akzeptanzgewinn	19
2.4	Ökonomische Argumente	21
2.5	Argumente zu Proliferation, Kernmaterialüberwachung und Terrorismus	21
3	Position des ESK-EL	22
4	Zu klärende Aspekte zur Rückholbarkeit	24
4	Referenzen	26
Anhang		28
A1	Das deutsche Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle	28
A2	Frühere Arbeiten in Deutschland zur Rückholbarkeit	28
A3	Bestrebungen zur Rückholbarkeit / Reversibilität in anderen Ländern	35
A4	Tabellen zu Möglichkeiten und Konsequenzen einer Rückholung	41

1 Grundlagen

1.1 Einleitung

Das deutsche Atomgesetz schreibt vor, alle radioaktiven Abfälle durch Endlagerung in tiefen geologischen Formationen innerhalb Deutschlands zu entsorgen. Die Gewährleistung einer sicheren Endlagerung ist dabei eine Aufgabe des Bundes. Ziel der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist der Einschluss der radioaktiven Abfälle, um sie von der belebten Umwelt über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahre fernzuhalten. Einschluss bedeutet in diesem Kontext, dass die Freisetzung und der Transport von Radionukliden so weit behindert werden, dass die Sicherheitsprinzipien und die Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraums eingehalten werden (Handbuch GRS-247). Langfristig nicht zu vermeidende Radionuklidfreisetzungen sollen so gering gehalten werden, dass sie nicht zu einem erhöhten Risiko für Mensch und Umwelt führen. Dies beinhaltet das Prinzip der ‚Konzentration‘ der Abfälle im Gegensatz zu früheren Überlegungen, radioaktive Abfälle durch Verdünnung z.B. durch Einleitung ins Meer zu entsorgen. Ein weiteres Ziel besteht darin, einen langfristig wirksamen Schutz vor einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen zum Abfall zu gewährleisten. Außerdem ist damit der Zugriff auf Spaltmaterial wesentlich erschwert. Die ESK ist zusammen mit vielen deutschen Fachorganisationen und in Übereinstimmung mit internationalen Verlautbarungen der OECD/NEA, IAEA und der kürzlich verabschiedeten EU-Richtlinie zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (EU 2011) der Meinung, dass nur mit der Endlagerung radioaktiver und insbesondere hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen eine nachsorgefreie Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Umwelt („passive Sicherheit“) erreicht werden kann.

Im Rahmen der öffentlichen Diskussion zum Thema Endlagerung werden in der letzten Zeit vielfach Endlagerungskonzepte mit der Option der Rückholbarkeit gefordert. Diese Forderung ist oftmals mit der Ansicht verbunden, dass technische Maßnahmen für eine spätere Rückholung des Abfalls aus dem Endlager die Sicherheit eines Endlagerkonzepts erhöhen könnten. Andere Argumente zielen dahin, ggf. zukünftig verfügbare technische Verfahren abzuwarten, um den Abfall besser entsorgen oder als Energiequelle nutzen zu können. Der Endlagerausschuss der ESK (ESK-EL) erachtet es für notwendig, sich der öffentlichen Debatte um Rückholung/Rückholbarkeit zu stellen. Im Folgenden werden daher Argumente pro und contra Rückholbarkeit nach thematischen Schwerpunkten gesammelt und einander gegenübergestellt, wie sie den in der Öffentlichkeit geführten Diskussionen zugrunde liegen. Sie sind nicht umfassend und erschöpfend, sollen jedoch dem Einstieg in eine weitergehende Diskussion dienen. Ein hier vorweggenommenes erstaunliches Ergebnis ist, dass vielfach ähnliche Argumente für und gegen Rückholbarkeit angeführt werden. So werden beispielsweise ethische Grundsätze der Generationengerechtigkeit angeführt, um für *und* gegen Rückholbarkeit zu plädieren. Ähnliches gilt für die Einschätzung der Sicherheit eines Endlagers mit und ohne Rückholbarkeit.

Um Rückholbarkeitskonzepte bewerten zu können, erscheint es erforderlich, nochmals die Grundlagen und Ziele einer nachhaltig sicheren Endlagerung zu nennen. Daran angelehnt soll klargestellt werden, welche technischen Maßnahmen ergriffen werden müssen, um Abfälle rückholbar lagern zu können, und welche Konsequenzen diese für ein Endlagerkonzept haben. Eine wichtige Rolle spielen hier die zu betrachtenden Zeiträume: Sollen Maßnahmen ergriffen werden, um den Abfall für einige Jahrzehnte, solange ein Endlager

sich noch im Betrieb befindet, rückholen zu können, oder soll Rückholbarkeit über hunderte Jahre oder sogar noch länger gewährleistet sein? Der Zeitaspekt wirkt sich erheblich auf die technische Auslegung, aber auch auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers aus. Die Komplexität des Themas erfordert darüber hinaus eine eindeutige Definition von Begriffen: Wie unterscheidet sich beispielsweise die Rückholung von Abfällen von einer Bergung (siehe Textkasten)? In Kapitel 3 wird die Position des ESK-EL zum Thema Rückholbarkeit dargestellt.

Das Papier beschränkt sich in seiner Diskussion jedoch auf solche Wege, die mittelfristig, d.h. innerhalb der nächsten Jahrzehnte zu einem verschlossenen Endlagerbergwerk führen sollen. Konzepte wie langfristig offen zu lassende Zwischenlager im geologischen Untergrund oder Langzeitzwischenlager im oberflächennahen Untergrund oder direkt an der Erdoberfläche werden hier nicht behandelt. Es ist die Überzeugung der ESK, dass solche Konzepte für den langfristig sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen, d.h. über Zeiträume von hunderttausenden von Jahren eindeutig nicht geeignet sind.

1.2 Grundlagen und Ziele einer nachhaltig sicheren Endlagerung

Ein nachhaltig wirkendes Endlagerkonzept muss die langfristige Sicherheit und den Einschluss der Abfälle und damit ihr Fernhalten von Mensch und Umwelt gewährleisten. Die Schutzfunktionen werden durch das nachweisbar langzeitstabile geologische Wirtsgestein und die technischen Barrieren übernommen. Im Unterschied zur Zwischenlagerung besteht bei der Endlagerung keine Absicht, den Abfall zu einem späteren Zeitpunkt wieder zurückzuholen.

Alle untersuchten Endlageroptionen haben gemein, dass über sehr lange Zeiträume eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen nicht absolut ausgeschlossen werden kann. Daher ist von einer nachhaltigen Entsorgung die langfristige Begrenzung möglicher Freisetzungen von Radionukliden auch über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre hinweg zu fordern durch:

- den Einschluss der radioaktiven Abfälle,

Begriffe und Definitionen

Endlagerung: Einschluss/Isolation radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ohne die Intention einer Rückholung. Endlager (Endlagersysteme) können ohne oder mit Berücksichtigung einer Option „Rückholbarkeit“ konzipiert und realisiert werden. Ausschlaggebend für Konzeption und Realisierung sind gesetzliches und untergesetzliches (nationales) Regelwerk.

Lagerung mit Überwachung: Sichere Aufbewahrung radioaktiver Abfälle mit der Intention einer Rückholung, ggf. in einer untertägigen Entsorgungseinrichtung (die dann aber nicht als Endlager konzipiert und genehmigt ist).

Reversibilität (engl. reversibility): Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerplanung und –auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung.

Rückholbarkeit (engl. retrievability): Im Endlagersystem implementierte konzeptionelle und technische Maßnahmen, die es ermöglichen oder erleichtern, den eingelagerten radioaktiven Abfall zurückzuholen.

Rückholung (engl. retrieval): Die aktive Maßnahme der Rückholung von Abfallbehältern.

Bergung (engl. recover): Die aktive Maßnahme der Bergung des Abfalls bzw. der Abfallbehälter. Hiermit ist generell die Rückholung der Abfälle zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt gemeint, bei der die Integrität der Abfallbehälter nicht mehr notwendigerweise gewährleistet ist.

Proliferation (engl. proliferation): Weiterverbreitung bzw. Weitergabe von Nuklearmaterial zur Herstellung von Massenvernichtungswaffen.

Kernmaterialüberwachung (engl. safeguards): Absicherungsmaßnahmen zur Unterbindung der Proliferation von Nuklearmaterial.

-
- die Ver- oder Behinderung der Freisetzung von Radionukliden sowie
 - die Rückhaltung möglicherweise freigesetzter Radionuklide in Barrieren des Endlagersystems.

Ziel eines nachhaltigen Endlagerkonzepts ist es, zu gewährleisten, dass

- kein erhöhtes Risiko für Mensch und Umwelt durch Freisetzungen von Radionukliden zu besorgen ist,
- Vorsorge gegen die Möglichkeit von unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in die Abfälle und die damit verbundenen Auswirkungen getroffen wird.

Nach Einschätzung vieler deutscher Gremien und Institutionen (AKEnd, BfS, BGR, ESK, GRS etc.) und internationaler Fachgremien (der OECD/NEA, IAEA, EU etc.) kann die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen diese Anforderungen und Ziele am sichersten erfüllen. Sie weist die folgenden Vorteile auf:

- Sie trägt dem international akzeptierten Prinzip des Konzentrierens und des Einschlusses der Schadstoffe Rechnung.
- Sie ist auf Basis hinreichend bekannter Techniken für die in Deutschland endzulagernden radioaktiven Abfälle mit vertretbarem und wirtschaftlich angemessenem Aufwand realisierbar.
- Die Unfallmöglichkeiten und –risiken, einschließlich der Gefahren durch Terrorismus, sind bei der wartungsfreien Endlagerung in geeigneten tiefen geologischen Formationen signifikant geringer und erheblich zuverlässiger vorhersagbar als bei der auf fortdauernde aktive Eingriffe und konstante Bewachung angewiesenen Aufbewahrung an der Erdoberfläche.
- Bei richtiger Wirtsgesteins- und Standortauswahl sowie richtiger Endlagerauslegung sind mögliche Freisetzungen radioaktiver und chemotoxischer Abfallbestandteile in die Biosphäre (Lebensraum des Menschen) langfristig auf einen so geringen Umfang begrenzt, dass die heute geltenden Schutzstandards auch über sehr lange Zeiträume sicher eingehalten werden können.

In Deutschland ist für alle radioaktiven Abfälle die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen vorgesehen, wobei entsprechend den hierzulande vorliegenden geologischen Gegebenheiten (siehe BGR, 2007) in erster Linie Steinsalz und Tonstein als mögliche Wirtsgesteinsformationen untersucht werden. Nach der Einlagerung werden verbleibende Hohlräume mit Versatzmaterial verfüllt und Einlagerungsbereiche und Schächte mit einem gestaffelten System geeigneter Verschlussysteme abgedichtet. Mit diesen Maßnahmen soll erreicht werden, dass kein oder nur geringste Mengen Grundwasser zu den Abfällen vordringen. Für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen, in einer Tiefe von mehreren hundert Metern unter der Erdoberfläche, ist eine Mobilisierung von Radionukliden nur durch den Zutritt von Grundwasser denkbar. Aus diesem Grund sind eine möglichst vollständige Verfüllung aller Hohlräume und ein dichter Verschluss von höchster Wichtigkeit für die Langzeitsicherheit eines Endlagers.

Technische Konzepte, die die Rückholung von Abfällen ermöglichen oder erleichtern sollen, erfordern notwendigerweise ein Offenhalten von Teilen des Endlagers. Damit erhöht sich grundsätzlich die Wahrscheinlichkeit eines Wasserzutritts zu den verfügbaren Hohlräumen und damit auch zum eingelagerten Abfall.

Details zum deutschen Endlagerkonzept finden sich im Anhang A1.

1.3 Die Rückholbarkeit in den Sicherheitsanforderungen des BMU

Bereits heute sind in Deutschland gewisse Rückholbarkeitsmaßnahmen in einem Endlager zu berücksichtigen. In den neuen Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) wird Bezug zum Thema Rückholung / Rückholbarkeit hergestellt.

In Kapitel 8, „Endlagerauslegung“ wird unter Punkt 8.6 festgehalten:

Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.

In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

Damit schreibt der BMU vor, dass in einem Zeitraum von mehreren Jahrzehnten, in dem ein Endlager in Deutschland voraussichtlich betrieben werden wird, hochradioaktive wärmeproduzierende Abfälle rückholbar gelagert werden müssen. Die Forderung nach Mindestbehälterstandzeiten soll eine mögliche Bergung der Abfälle aus einem verschlossenen Endlager, in dem alle Hohlräume weitestgehend verfüllt wurden, auch über längere Zeiträume erleichtern.

1.4 Varianten und Zeitskalen der Endlagerung radioaktiver Abfälle mit und ohne einer Option der Rückholbarkeit

Die Umsetzung eines Rückholbarkeitskonzepts in einem realen Endlagerprojekt und die Konsequenzen für Endlagerbau und -sicherheit sind eng gekoppelt an die Zeiträume, über die eine Rückholung des Abfalls ermöglicht werden soll (Abb. 1). Verschiedene Varianten einer zeitnahen (d.h. im Zeitraum von maximal wenigen hundert Jahren zu einem Verschluss kommenden) Endlagerung mit und ohne Rückholbarkeitsoption sind:

- **Zeitnahe Endlagerung und Verschluss des Endlagers ohne Rückholbarkeitsoption**
 - Nach Verschluss Übergang in die Phase passiver Sicherheit

- **Zeitnahe Endlagerung und Verschluss des Endlagers mit potenzieller Rückholbarkeit aber ohne gravierende technische Eingriffe in das Endlagerkonzept**
 - Nach Verschluss Übergang in die Phase passiver Sicherheit, jedoch mit Maßnahmen, um eine potenzielle Rückholung zu erleichtern (z.B. durch Forderung nach verlängerten Behälterstandzeiten).

- **Zeitnahe Endlagerung mit der Option der Rückholbarkeit bis zum Verschluss**
 - Während der Betriebsphase des Endlagers wird mit der Betriebsmannschaft und der vorhandenen Ausrüstung die Rückholung sichergestellt.
 - Nach dem Verschluss geht das Endlager in die Phase passiver Sicherheit über.

- **Zeitnahe Endlagerung und Verschluss des Endlagers mit zeitlich begrenzter Option der Rückholbarkeit**
 - Nach Verschluss Übergang in die Phase passiver Sicherheit, jedoch mit Auslegungsanforderungen an die Rückholbarkeit für einen bestimmten Zeitraum

- **Zeitnahe Endlagerung und Verschluss des Endlagers mit zeitlich nicht klar definierter Option der Rückholbarkeit**
 - Nach Verschluss Übergang in die Phase passiver Sicherheit, jedoch mit Auslegungsanforderungen an eine langfristige Rückholbarkeit

Abb. 1 zeigt eine schematisierte Zeitskala für ein Endlagerprojekt.

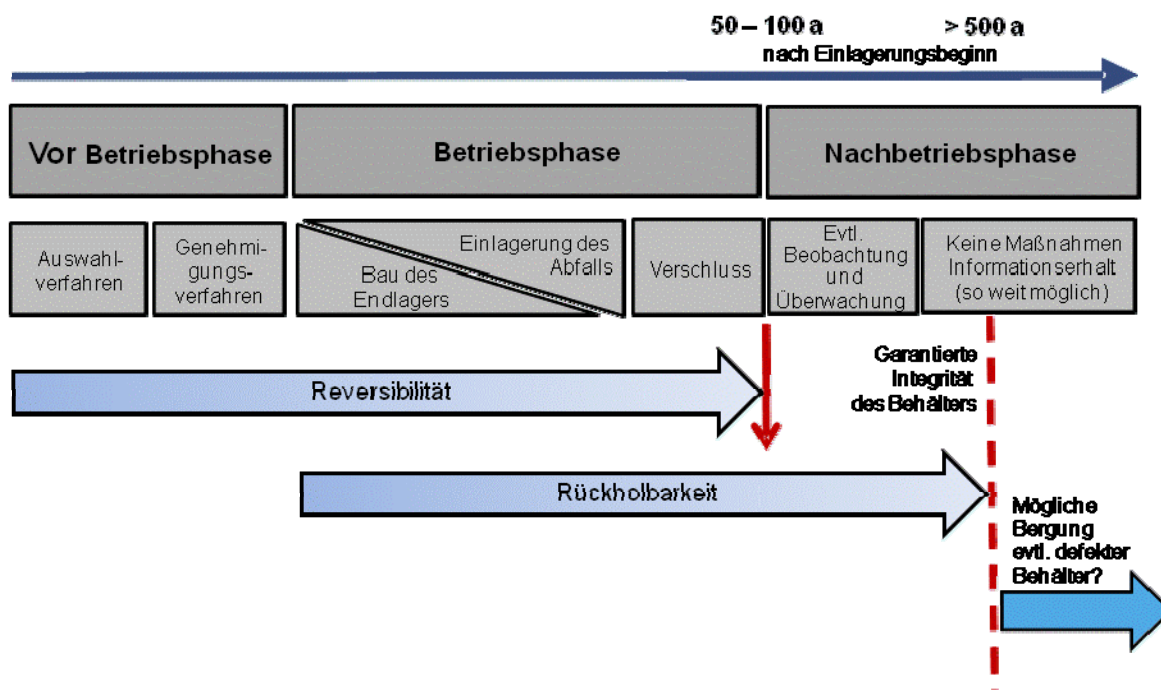


Abb. 1 Zeitskala für mögliche Rückholungskonzepte (modifiziert nach Blommaert 2010).

Bevor das Endlager in Betrieb gehen kann, werden im Rahmen von Forschungsarbeiten und Planungen Endlagerkonzepte konkretisiert sowie Standorte ausgewählt, ausführlich erkundet und charakterisiert. Das Endlagerprojekt muss anschließend ein Genehmigungsverfahren durchlaufen.

Während des Baus und des Betriebs werden die Eigenschaften der Endlagerbereiche und dessen Bestandteile kontinuierlich weiter überwacht und die Ergebnisse der Untersuchungen mit Vorgaben abgeglichen. Gegebenenfalls kann das Endlagerprojekt in dieser Phase angepasst bzw. verändert oder auch beendet werden. Sukzessive erfolgt das Auffahren von Einlagerungsbereichen, die Einlagerung von Abfällen und Verfüllung und Verschluss von Hohlräumen.

Einige Endlagerprojekte (z.B. Schweiz) sehen nach erfolgter Einlagerung und Hohlraumverfüllung eine Beobachtungsphase für einen Teil des Endlagers vor, um die erwartete Endlagerentwicklung zu überprüfen.

Nach vollständigem Verschluss des Endlagerbauwerks beginnt die Nachbetriebsphase, in der die Endlagerbarrieren ihre passive Sicherheitsfunktion übernehmen und evtl. Bauwerke an der Erdoberfläche beseitigt werden. Informationen über das Endlager sowie die darin enthaltenen Abfälle werden archiviert und so lange als möglich erhalten. In hunderten bzw. tausenden von Jahren nach Endlagerverschluss muss mit Informationsverlust gerechnet werden. Es ist über lange Zeiträume mit Korrosion der Abfallbehälter und Degradation der anderen technischen Barrieren zu rechnen.

In der Planungsphase für ein Endlagerkonzept können prinzipiell Maßnahmen vorbereitet werden, die die Rückholbarkeit von Abfallgebinden ermöglichen oder zumindest erleichtern. Dazu gehören z. B. die Verwendung besonders korrosionsbeständiger Behältermaterialien (z.B. Kupferbehälter im skandinavischen Endlagerkonzept), die Konzeption von Bergungsmaschinen bzw. Maßnahmen, Einlagerungstrecken, Zugangstunnels und Schächte so zu stabilisieren bzw. offenzuhalten, dass eine Rückholung nach heutigen Gesichtspunkten technisch und ökonomisch realisierbar wird. Prinzipiell können alle Schritte des Endlagerbaus und -betriebs noch bis zum endgültigen Verschluss des Bauwerks zurückgenommen werden, wenn sich die Notwendigkeit ergibt. Der Zeitraum, über den eine Rückholbarkeit ermöglicht werden soll, wird grundsätzlich dadurch begrenzt, dass Informationen über das Endlager für die Realisierung einer Rückholung verfügbar sein müssen. Je länger ein Endlagerbergwerk offen gehalten wird, umso unsicherer werden Planungen bezüglich Abfallrückholung bzw. vollständigem Endlagerverschluss. Von Beginn des Einlagerungsbetriebes an werden die Einlagerungsbereiche zur Minimierung der Hohlräume mit Versatz oder Puffermaterialien verfüllt. Je weiter die Verfüllung der Resthohlräume vorangeschritten ist, desto schwieriger und aufwändiger werden die Rückholmaßnahmen. Eine Bergung des Abfalls lange Zeit nach dem Verschluss des Endlagers ist nur mit relativ großem technischen Aufwand zu bewerkstelligen.

Am Beispiel verschiedener Wirtsgesteine (Steinsalz, Ton, Kristallin) sollen im Folgenden die Zusammenhänge zwischen Wirtsgestein, Rückholbarkeit und Anforderungen an die Lagerauslegung illustriert werden. Die folgenden Ausführungen beinhalten nur eine sehr beschränkte und keineswegs vollständige Betrachtung.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz erlaubt die Konzeption eines relativ kleinen Endlagers mit hoher Einlagerungsdichte von wärmeentwickelnden Abfallgebinden. Gleichzeitig beschleunigen die von den Abfällen ausgehenden hohen Temperaturen die Hohlraumkonvergenz und die Kompaktionsrate des Versatzes

und sorgen aufgrund der erhöhten Kriechfähigkeit des Salzes für einen raschen Verschluss der Einlagerungsbereiche. Die relativ hohen Temperaturen, die sich im Endlagerbereich nach Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen einstellen, können eine mögliche Rückholung der Abfälle vorübergehend wegen hoher Temperaturen im Arbeitsbereich und der daraus resultierenden hohen Plastizität des Salzgesteins für einige hundert Jahre erschweren. Durch verschiedene Maßnahmen (z.B. Bewetterungsmaßnahmen, geringere Beladung der Behälter etc.) lässt sich die Temperatur im Endlager begrenzen. Niedrigere Temperaturen verlangsamen allerdings die Rate der Versatzkompaktion und verlängern damit die Zeit bis zu einem gewünschten vollständigen Einschluss der Abfallgebinde. Bei einer Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen, wie Kristallin- und Tongestein, die weniger gut wärmeleitend sind und die vom Behälter durch eine Bentonitverfüllung getrennt sind, wird die Obergrenze für die Temperatur der Abfallgebinde an der Oberfläche technisch auf etwa 100°C begrenzt, damit eine nachteilige Veränderung des anstehenden Gesteins durch thermische Belastung verhindert wird. Dies bedeutet, dass die Abfälle in größeren Abständen gelagert werden müssen und damit ein Endlager deutlich größer wird als im Steinsalz. Wegen der geforderten relativ niedrigen Temperatur im Endlager und der geringeren Plastizität von Tonstein und insbesondere der fehlenden Plastizität in Kristallingestein ist eine Abfallrückholung in der frühen Nachbetriebsphase im Allgemeinen einfacher zu bewerkstelligen als bei einem Endlager im Steinsalz. Für alle Gesteine gilt jedoch, dass das Auffahren der untertägigen Bauwerke irreversible Veränderungen im Gestein verursacht. In weniger plastischen Wirtsgesteinen wie Tonstein und Kristallin ist eine Versatzkompaktion und damit eine Minimierung von Hohlräumen bzw. Restporositäten wie in Steinsalz nicht zu erreichen.

Nach vollständigem Verschluss eines Endlagers ist eine Rückholung i. Allg. nur noch mit bergbautechnischen Methoden möglich. Allerdings muss bei einem plastischen Wirtsgestein bereits mit Verschiebungen gerechnet werden, so dass eine Ortung der Gebinde erschwert ist. Für die Zeit nach der prognostizierten minimalen Standzeit für das Behältermaterial sind zudem defekte Gebinde zu erwarten (500a-Grenze in Abb. 1). Bei Bergungsmaßnahmen nach Ablauf der Standzeit ist eine Freisetzung von radioaktivem Material nicht auszuschließen, und es werden entsprechend aufwändige Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich.

Während der Phasen der Einlagerung und des Verschlusses nimmt der technische und finanzielle Aufwand für eine Rückholung der Abfallgebinde aus dem Endlager deutlich zu. Gleichzeitig wächst die Wirksamkeit der passiven Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems. Diese Zusammenhänge sind in Abb. 2. für verschiedene Fortschrittsstadien der Endlagerentwicklung generisch dargestellt. Im Anhang A4 sind Möglichkeiten und Konsequenzen einer Rückholung von hochradioaktiven und wärmeentwickelnden Abfälle am Beispiel eines Endlagersystems in steilstehenden Salinarstrukturen (Salzstock) während verschiedener Zeiträume im Detail aufgezeigt. Ähnliche Zeitabläufe und entsprechende Konsequenzen können analog auch für die Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen aufgestellt werden.

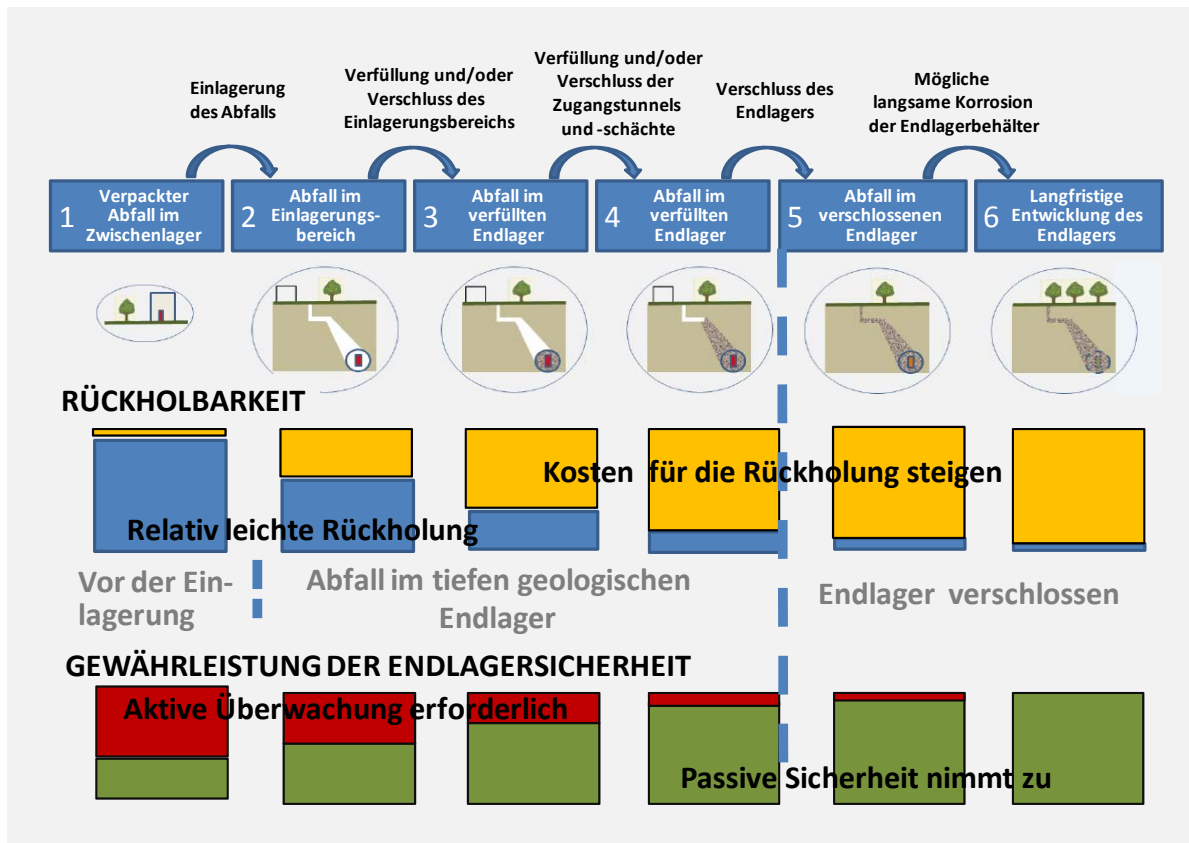


Abb. 2 Entwicklung des Aufwands für eine Rückholung radioaktiven Abfalls sowie des Grades an passiver Sicherheit des Endlagers in Abhängigkeit vom Fortschritt der Endlagerung (Quelle: <http://www.nea.fr/rwm/rr>).

2 Thematisch geordnete Argumente zur Rückholbarkeit

Im Folgenden sind die Argumente zusammengestellt worden, die in der internationalen Literatur und in der Öffentlichkeit zur Diskussion der Rückholbarkeit anzutreffen sind. Die Zusammenstellung ist unabhängig vom gewählten Wirtsgestein und die Argumente betreffen Zeiträume über die Betriebsphase eines Endlagers hinaus. Die Zusammenstellung erhebt weder den Anspruch auf Vollständigkeit, noch sind die genannten Argumente in ihrer Korrektheit geprüft worden oder untereinander schlüssig. Sie geben nicht die Position des ESK-EL wieder.

Die Argumente für und gegen eine Rückholbarkeit werden im Folgenden unterteilt in

- sicherheitsorientierte Argumente,
- ethische Argumente,
- Argumente zum Akzeptanzgewinn,
- ökonomische Argumente sowie
- Argumente aus den Bereichen Proliferation, Kernmaterialüberwachung, Terrorismus.

Mit der Liste der Argumente wird versucht, die Kernargumente für oder gegen eine Option der Rückholbarkeit zu identifizieren und einander gegenüber zu stellen. Alle Argumente werden in Form einer These und einer Begründung (selten auch mehreren Begründungen) präsentiert.

2.1 Sicherheitsorientierte Argumente

2.1.1 Gewährleistung der Langzeitsicherheit

Für die beiden Optionen ohne bzw. mit Rückholbarkeit wird von gleichen Sicherheitsstandards bei Standortsuche, Standorterkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung ausgegangen.

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Der Eingriff in die Geosphäre durch Bau und Betrieb des Endlagers bleibt ohne Option Rückholbarkeit räumlich und zeitlich enger begrenzt als mit Option Rückholbarkeit. Ein Endlager mit implementierter Rückholbarkeit ist zwangsweise länger einer höheren Gefährdung ausgesetzt.
Begründung: Die höhere Gefährdung (bzw. geringere Sicherheit) resultiert aus dem Offenhalten des Endlagers zwecks Überwachung, zwecks Erfordernis, die Infrastruktur des Endlagers zumindest teilweise vorzuhalten (z. B. durch Offenhalten des Zugangs zu den Abfällen) und zwecks Befahrbarkeit (offener Zugang / Schächte).
- *These:* Die Berücksichtigung der Rückholbarkeit kann in Lagerkonzept und Lagerauslegung Modifikationen verursachen, die die Langzeitsicherheit beeinträchtigen.
Begründung: Die verlängerte Offenhaltung kann zu einer Degradation oder Minderung der Wirksamkeit technischer Barrieren, einer Veränderung der geologischen Verhältnisse im Untergrund führen oder durch das Vorhalten von Infrastruktur unter Tage das Hohlraumvolumen erhöhen.
- *These:* Ziel des Einschlusses der Abfälle in einem Endlager ist der minimierte Kontakt mit Wasser. Dieses Ziel ist ohne die Option der Rückholbarkeit besser erreichbar.
Begründung: Die in einem unterirdischen Endlager angestrebte große Distanz zwischen Abfällen und menschlichem Lebensraum, und damit die geringe Geschwindigkeit des Stofftransports sowie die dauerhafte oder zumindest langfristige Rückhaltung von Radionukliden bei einem eventuell stattfindenden Transport mit Grundwasser, stehen ohne Option Rückholbarkeit so rasch wie möglich zur Verfügung.
- *These:* Ein Endlager **mit** Option Rückholbarkeit stellt nicht per se ein Endlagersystem mit höherer Sicherheit als ein Endlager **ohne** diese Option dar.
Begründung: Die Rückholbarkeit an sich stellt nur eine zusätzliche Handlungsoption dar, erzeugt für sich jedoch keine zusätzliche Sicherheit.
- *These:* Ein langfristiger Einschluss der Schadstoffe in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist ohne eine Option Rückholbarkeit realisierbar.
Begründung: Mit der Auswahl eines geeigneten Standorts und der Realisierung eines an die

Standortgegebenheiten angepassten Endlagerkonzeptes wird der langfristige Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erreicht. Die technischen Barrieren, das Wirtsgestein und die umgebende Geologie werden auf einen dauerhaften Einschluss ausgerichtet bzw. ausgewählt. Weitere Maßnahmen sind daher nicht notwendig.

- *These:* Die langfristige Integrität eines Endlagersystems (Abschirmung eines Endlagers gegenüber Veränderungen im Bereich der Erdoberfläche, des Klimas, Naturkatastrophen, menschlicher Tätigkeiten, gesellschaftlicher Veränderungen u. ä.) kann ohne die Option der Rückholbarkeit gewährleistet werden.

Begründung: Die langfristige Stabilität der die Sicherheit gewährleistenden Gesteinsformationen (z. B. gegenüber Substanzverlust) sowie der hydro- und geochemischen Verhältnisse ist aufgrund vorhandener umfassender geowissenschaftlicher Expertise beurteilbar und soll so kurz und wenig wie möglich durch eine direkte Verbindung zur Oberfläche beeinträchtigt werden.

- *These:* Zeitnah realisierte Verfüll- und Abdichtungsmaßnahmen werden als Maßnahmen angesehen, die die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems steigern.

Begründung: Der Eingriff in den geologischen Untergrund soll minimiert werden, um die Eigenschaften der umgebenden Geologie optimal ausnutzen zu können. Dazu gehört auch die zeitliche Minimierung des Eingriffs.

- *These:* Mit einer Option ohne Rückholbarkeit wird auf die Sicherheitsstandards der heutigen Generation abgestützt. Bei einer Option mit Rückholung wird das Lager für längere Zeit offen stehen und erst von künftigen Generationen verschlossen. Deren Sicherheitsstandards sind nicht bekannt, könnten aber (aus heutiger Sicht) ungenügend sein.

Begründung: Einem nach heutigem Kenntnisstand konzipierten und realisierten Endlagersystem wird mit höherer Wahrscheinlichkeit als dem Handeln künftiger Generationen zugetraut, den langfristig sicheren Einschluss der endgelagerten Abfälle zu gewährleisten. Die Geologie übernimmt dabei passiv die maßgebende Barrierefunktion. Die Offenhaltung eines Endlagers während eines unbekanntes (aber möglicherweise langen) Zeitraumes nach der Phase der Abfalleinlagerung wird bei der Endlagerung ohne Rückholbarkeit vermieden. Während einer verlängerten Offenhaltung kann die Entwicklung instabiler sozioökonomischer und politischer Situationen zur Be- oder Verhinderung des im Endlagerkonzept vorgesehenen Verschlusses des Endlagers führen.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems kann aus grundsätzlichen Erwägungen nicht gewährleistet werden. Das Endlager sollte deshalb grundsätzlich so gestaltet sein, dass die Möglichkeit gegeben ist, auf unerwartete Ereignisse reagieren zu können.

Begründung: Eine absolute Garantie, dass das Endlager sich wie geplant verhält, gibt es nicht. Die Möglichkeit soll daher gegeben sein, z. B. die Sicherheitsfunktionen eines Endlagers über einen festzulegenden Zeitraum überprüfen und ggf. auf Fehlfunktionen reagieren zu können.

- *These:* Die langen Nachweiszeiträume und die Ungewissheiten über in ferner Zukunft ablaufende Ereignisabfolgen stellen wichtige Unsicherheitsfaktoren dar. Deshalb wird ein Endlagersystem

propagiert, dessen Auslegung Maßnahmen der Überwachung, der Reparatur und ggf. auch der Rückholung der Abfälle ermöglicht. In letzter Konsequenz ist ein so konzipiertes Endlager als Langzeitlager oder Langzeitzwischenlager anzusehen.

Begründung: Künftigem menschlichen Handeln zur Gewährleistung von Sicherheit wird mehr vertraut als einem nach heutigem ingenieur- und naturwissenschaftlichem Kenntnisstand konzipierten passiven Endlagersystem. Dabei wird Handlungsfähigkeit und –wille sowie die gesellschaftlich und institutionell verankerte Überwachung und Nachsorge über relativ lange Zeiträume vorausgesetzt und die dazu bestehenden Ungewissheiten werden als weniger entscheidende Unsicherheitsfaktoren als die o. g. Ungewissheiten über die zukünftig ablaufenden Ereignisabfolgen beurteilt.

- *These:* Durch aktive Kontrolle der Anlage, Wartung und ggf. Reparatur kann die Sicherheit des Endlagersystems im Vergleich zur Endlagerung ohne Rückholbarkeit erhöht werden.

Begründung: Auf unvorhergesehene und bei Konzeption, Planung, Bau und Betrieb außer Acht gebliebene oder nicht richtig eingeschätzte Ereignisse, die im Endlagersystem während der Betriebsphase oder in der Phase der Überwachung ablaufen können, kann durch die Möglichkeit des „direkten“ Zugriffs auf die Abfälle bzw. durch einen Eingriff in das System im Sinne einer Steigerung der Langzeitsicherheit reagiert werden.

- *These:* Eine falsche Standortentscheidung kann durch Auslagerung des Inventars in ein anderes Endlager oder ein Zwischenlager korrigiert werden.

Begründung: Die Entscheidung für einen Standort wird immer auf Grundlage des zum Zeitpunkt der Entscheidung vorhandenen Standes von Wissenschaft und Technik getroffen. Ergeben sich neue Erkenntnisse, die eine Standortentscheidung in Frage stellen, kann entsprechend reagiert werden.

- *These:* Durch ein Endlagerkonzept mit Rückholbarkeit kann der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik und der Möglichkeit sich ergebender Alternativen zur Endlagerung besser Rechnung getragen werden.

Begründung: Eine solche Weiterentwicklung lässt sich zum Beispiel in Form besserer (zukünftiger) Behandlungs- oder Beseitigungsverfahren zu einem späteren Zeitpunkt nutzen (z. B. Verringerung des Gefährdungspotentials der Abfälle durch Partitioning & Transmutation). Im Gegensatz dazu kann bei einer Endlagerung ohne Rückholbarkeit nur der gegenwärtige (d. h. der in der Ära des Endlagerprojektes verfügbare) Stand des Wissens umgesetzt werden.

2.1.2 Nachweis der Langzeitsicherheit

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Die Prognose der langfristigen zukünftigen Entwicklung des passiven Endlagersystems und seiner Umgebung ist erheblich sicherer als die Prognose der sehr viel dynamischeren zukünftigen gesellschaftlichen Verhältnisse.

Begründung: Der Nachweis der langfristigen Sicherheit des Endlagersystems und damit des vollständigen oder des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle ist entscheidend von der auf einem guten Verständnis der Geosphäre basierenden belastbaren Prognostizierbarkeit des Verhaltens der geologischen Barrieren bzw. des Einschlussvermögens und sonstiger Bedingungen bei

sorgfältiger Standortauswahl über lange Zeiträume abhängig. Bei sorgfältiger Standortauswahl und Endlagerimplementierung ist die Geschwindigkeit der Veränderungen der geologischen Verhältnisse und der geotechnischen Barrieren klein im Verhältnis zu den Veränderungen der erwarteten und möglichen gesellschaftlichen Verhältnisse. Die Langzeitsicherheit kann zwar nicht „mathematisch exakt“ nachgewiesen werden, es kann aber unter Berücksichtigung aller Elemente/Indizien ein belastbarer und vertrauenswürdiger „Plausibilitätsnachweis“ geführt werden.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Der Nachweis der Langzeitsicherheit ist über den geforderten Zeitraum allein aus methodischen Gründen nicht machbar bzw. nicht aussagekräftig genug und nicht mit der erforderlichen (gewünschten) Genauigkeit realisierbar. Sicherheit für lange Zeiträume kann deshalb nur durch längerfristige (d.h. bis zum Verschluss des Endlagers dauernde) Kontrolle und Überwachung der Abfälle durch Menschen erreicht werden.

Begründung: Das Verständnis über die Prozesse in der Geo- und Hydrosphäre ist nicht vollständig. Das Verständnis zur zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklung und über deren zukünftiges Interesse am geologischen Untergrund (Gewinnung von Rohstoffen und Erdwärme) ist schlecht prognostizierbar. Eine längerfristige Rückholbarkeit erlaubt, weiteres Verständnis mit genügender Genauigkeit zu erlangen und aufgrund dieser Erkenntnis die richtigen Entscheidungen zu treffen.

- *These:* In einem aktiv überwachten Endlagersystem können die für die Sicherheitsanalyse eingesetzten Modellvorstellungen durch Beobachtung des Endlagersystems und den fortlaufenden Vergleich der Beobachtungen mit den Prognosen aus den Modellen abgesichert werden.

Begründung: Der angesetzte Zeitraum, während dem die Rückholbarkeit aufrecht erhalten wird, fungiert als längerer Prüf- und Testzeitraum. Die Qualität der für die Langzeitsicherheitsanalyse erhobenen Daten ist durch die in-situ Untersuchungen und den deutlich verlängerten Prüf- und Testzeitraum verbessert. Der Nachweis der (technischen) Machbarkeit kann durch eine „Demonstrationseinlagerung“ gewährleistet werden.

2.1.3 Betriebliche und Umgebungssicherheit

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Nach Verschluss des Endlagers tritt keine radiologische Belastung mehr auf, die radiologische Belastung (Strahlenexposition) der Beschäftigten wird minimiert.

Begründung: Die radiologische Belastung der Beschäftigten und der Bevölkerung bleibt zeitlich auf die Einlagerungs- und Stilllegungsphase begrenzt. Während der Einlagerung wird die radiologische Belastung der Belegschaft (und der Bevölkerung) durch den sofortigen Verschluss von Einlagerungsorten, Zugangsstrecken und Teilfeldern entsprechend der Vorgaben des Strahlenschutzes kontinuierlich minimiert.

- *These:* In einem kurzen Zeitraum bis zum Verschluss kann von optimierten, weil durch die Auslegung vorgegebenen Bedingungen ausgegangen werden.

Begründung: Über einen begrenzt kurzen Zeitraum sind die Betriebs- und Umgebungssicherheit zu gewährleisten. Im Falle einer ausgedehnten Beobachtungsphase wären an den Untertagebauwerken Maßnahmen der Kontrolle, Wartung und Reparatur vorzunehmen, die ihrerseits eine zusätzliche Strahlenexposition des involvierten Personals und der Bevölkerung verursachen können.

- *These:* Eine Rückholung der Abfälle zurück an die Oberfläche kann signifikante zusätzliche Dosen verursachen.

Begründung: Im Falle einer Rückholung der Abfälle an die Oberfläche entsteht eine Erhöhung des Risikos für die Bevölkerung und die Umwelt durch die zwangsweise notwendige Zwischenlagerung an der Oberfläche oder zumindest die Transporte des Abfalls an der Oberfläche, insbesondere, wenn die Abfallgebinde dann nicht mehr in ihrer ursprünglichen Form vorliegen (z. B. durch eingetretene Korrosion). Es ist daher abzuwägen zwischen potenzieller radiologischer Belastung (durch das Endlager im Zuge dessen langfristiger Entwicklung) und einer realen Belastung bei der Rückholung.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Eine Kontrollperiode mit der Möglichkeit der Reparatur und Rückholbarkeit der Abfälle kann nachhaltig die radiologische (Strahlenexposition) und chemische Belastung reduzieren, die im Fall einer nicht bestimmungsgemäßen Entwicklung des Endlagers entsteht.

Begründung: Die radiologische Belastung von Beschäftigten und Bevölkerung währt über einen längeren Zeitraum und kann – abhängig von Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes – höher liegen als bei einer Endlagerung ohne Option der Rückholbarkeit. Diese voraussichtlich höhere Belastung wird trotzdem geringer bewertet als die von einem Endlagersystem ohne Option der Rückholbarkeit ausgehende potenzielle langzeitige radiologische (und möglicherweise chemische) Belastung im Fall einer nicht bestimmungsgemäßen Entwicklung, da diese potentielle Belastung durch das Einsetzen einer Periode der Kontrollier- und, Reparierbarkeit mit der Option des Auslagerns von Abfällen u. ä. bei Endlagern mit Rückholbarkeit verringert oder vermieden werden kann.

- *These:* Die mögliche Strahlenbelastung bei einer Umsetzung der Rückholung ist weniger hoch als eine potentielle langfristige radiologische Exposition im Fall einer Fehlentwicklung im Endlager.

Begründung: Abgestützt auf die Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes wird davon ausgegangen, dass eine mögliche radiologische Mehrbelastung während der aufrechterhaltenen Rückholbarkeit deutlich geringer ist als eine möglicherweise über viele Generationen dauernde radiologische Belastung durch ein sich nicht bestimmungsgemäß entwickelndes Endlager, in dessen Konzept auf die Option Rückholbarkeit verzichtet wurde.

Anmerkung zur Betriebs- und Umgebungssicherheit: Die Argumente zeigen die Problematik der Abwägung zwischen einer realen Strahlenbelastung (Beschäftigte, Anwohner der heutigen Generation) durch ein in Betrieb befindliches Endlager einerseits und einer zukünftigen potenziellen Strahlenbelastungen (zukünftige Generationen) eines vor langer Zeit verschlossenen Endlagers auf. Je nach Gewichtung der Argumente erfolgt eine andere Entscheidung bezüglich Rückholbarkeit.

2.2 Ethische Argumente

2.2.1 Intragenerationelle Gerechtigkeit

Intragenerationelle Gerechtigkeit ist die Gerechtigkeit zwischen heute lebenden Menschen. Sie bedingt gleiche Rechte für alle Menschen bzw. für gesellschaftliche Gruppen der Gegenwart. Die Forderung nach intragenerationeller Gerechtigkeit ist unabhängig davon, ob ein Endlager mit der Option Rückholbarkeit ausgelegt wird oder nicht. Gefordert werden häufig Gerechtigkeit zwischen den Bürgern, Teilhabe, fairer Entscheidungsprozess, Diskriminierungsverbot usw. Eine demokratische Teilhabe an Entscheidungen über Endlagerung mit oder ohne Rückholbarkeit bzw. zu anderen Entsorgungsoptionen ist grundsätzlich möglich. Im Fall der Option mit Rückholbarkeit umfasst diese Teilhabe ein breiteres Spektrum zu treffender Entscheide, die in der näheren Zukunft zu treffen sind.

Die Gleichbehandlung der Menschen erfordert unabhängig von der gewählten Endlager-Option bei der Festlegung eines Standortes einen fairen Entscheidungsprozess sowie eine wie auch immer geartete Kompensation für übernommene Lasten. Die tatsächliche Gleichbehandlung ist im Einzelfall wegen der Standortabhängigkeit eines Endlagers nicht möglich. Folglich sind auf der Basis dieser Argumentation Kompensationen für die entstehenden Nachteile erforderlich.

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Es erfolgt keine unnötige Belastung der zur Zeit des Betriebs lebenden Menschen in der Umgebung des Endlagers.
Begründung: Der schnellstmögliche Verschluss des Endlagerbauwerks minimiert die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager. Das Gleichgewicht im geologischen Untergrund wird so kurz und schonend wie möglich gestört und eine Stigmatisierung der Endlagerregion wird so kurz wie möglich gehalten.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Der Standortentscheid für ein Endlager ist eine Ungleichbehandlung der dort lebenden Menschen. Daher muss der Standortentscheid soweit wie möglich reversibel bleiben, um einen möglichen Fehlentscheid bis zum Verschluss rückgängig machen zu können.
Begründung: Der Standortentscheid wird aufgrund des aktuellen Wissensstandes gefällt. Betroffen davon sind die dort lebenden Menschen. Diese haben ein Anrecht darauf, dass der Standort aufgegeben wird, sollte sich durch einen ändernden Stand von Wissenschaft und Technik herausstellen, dass der Standort nicht geeignet oder ein anderer Standort besser geeignet ist.

2.2.2 Intergenerationelle Gerechtigkeit

Intergenerationelle Gerechtigkeit ist die Gerechtigkeit zwischen den Generationen. Diese bedeutet im Wesentlichen den Schutz künftiger Generationen vor den Folgen heutigen Handelns und vor ungebührlicher Einschränkung ihres Handlungsspielraums. Die zukünftigen Generationen umfassen dabei diejenigen

Generationen, die nach Verschluss des Lagers (d.h. nach dem Ende der Rückholbarkeit) leben, also nicht mehr unmittelbar in die Entwicklung des Lagers Einfluss nehmen können.

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Die den zukünftigen Generationen zumutbaren Belastungen durch das Endlager dürfen nicht größer sein als diejenigen, die der heutigen Generation zugemutet werden. Dies ist durch ein Endlager ohne Rückholbarkeit bei einem geeigneten Standort gewährleistet. Eine Offenhaltung, Überwachung, Wartung und Reparatur des Endlagers für längere Zeit ist folglich nicht erforderlich.

Begründung: Bereits heute stützt sich eine Sicherheitsanalyse zu einem Endlager auf den Grundsatz, dass die heutigen Belastungsgrenzwerte auch für zukünftige Generationen gelten. Damit sind die Ansprüche zukünftiger Generationen berücksichtigt.

- *These:* Das Verursacherprinzip wird eingehalten: Verursacher bzw. nutznießende Generationen tragen alle Lasten und Kosten der Endlagerung. Zukünftige Generationen sind nicht von zusätzlichen Kosten und Lasten eingeschränkt, denen keine Nutznießung gegenübersteht. Die Verpflichtung der möglichst schadlosen Beseitigung der Abfälle wird erfüllt.

Begründung: Das Verursacherprinzip verlangt, dass die nutznießenden Generationen alle Lasten und Kosten der Endlagerung tragen. Mit der Berücksichtigung einer Option Rückholbarkeit wird die Verantwortung für die Abfälle an zukünftige Generationen weitergegeben, die nicht von der Kernenergie profitiert haben.

- *These:* Nach sorgfältigem Verschluss des Endlagers wird ein passiv sicheres System erreicht. Maßnahmen der Überwachung, Wartung oder Reparatur sind dann nicht mehr erforderlich. Den künftigen Generationen wird so klar die Verantwortung und Last für die weitere Besorgung der Abfälle abgenommen.

Begründung: Im Falle einer Berücksichtigung der Option Rückholbarkeit wird die Verantwortung an künftige Generationen weitergegeben, obwohl das Lager in seiner Konzeption als passiv sicheres System ausgelegt worden ist.

- *These:* Die Handlungsspielräume bzw. Entscheidungsfreiheit künftiger Generationen bleiben gerade deshalb erhalten, weil das Endlager langfristig „vergessen“ werden kann. Folglich müssen sich zukünftige Generationen nicht um das Endlager kümmern.

Begründung: Der nachsorgefreie Verschluss eines Endlagers zielt darauf ab, die Verantwortung für das System Endlager an ein passives System im Untergrund abzugeben. Es stellt sich darüber hinaus die Frage, ob künftige Generationen überhaupt noch die wirtschaftlichen oder technologischen Ressourcen besitzen, um einen (theoretisch vorhandenen) Handlungsspielraum wahrnehmen zu können. Dies gilt auch für ggf. vorhandene verbesserte Entsorgungsmöglichkeiten oder die Ressourcenschonung. Die weitere Entwicklung der Gesellschaft ist nicht prognostizierbar. Die stillschweigende Annahme der zukünftigen Verbesserung des Niveaus von Wissenschaft und Technik ist lediglich plausibel aber nicht quantifizierbar.

-
- *These:* Wird das Endlager ohne Rückholbarkeit vergessen, entsteht keine besondere Gefährdungssituation.

Begründung: Das Endlager wird speziell auf das langfristige „Vergessen“ eines Endlagers ausgelegt (passive Sicherheit) und diese Auslegung mit einem Nachweis über eine Sicherheitsanalyse begründet und genehmigt. Im Konzept wird bewusst auf ein passives Endlagersystem, das ohne weitere Nachsorge auskommt, abgestützt.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Die den zukünftigen Generationen zumutbaren Belastungen durch das Endlager dürfen nicht größer sein als diejenigen, die der heutigen Generation zugemutet werden. Diese Forderung kann nur durch eine Endlagerung mit Rückholbarkeit erfüllt werden.
Begründung: Heute kennt niemand die genaue zukünftige Belastung aus dem Endlager: Es ist auch nicht bekannt, welches Risiko (z. B. welche potenzielle Strahlenbelastung) zukünftig akzeptiert werden wird. Dieser Unsicherheit ist durch eine Verlängerung der Handlungsfähigkeit zu begegnen.
- *These:* Gerade weil das Verursacherprinzip bei Endlagerung ohne Rückholbarkeit nicht eingehalten werden kann, darf das Wissen um das Endlager nicht verloren gehen.
Begründung: Zugangs- und Kontrollmöglichkeiten zum Endlager müssen längerfristig bestehen bleiben. Der offene Zugang zum Endlager ist eine geringere Belastung als das Endlager selbst. Die nutznießende Generation hinterlässt späteren Generationen mit dem Endlager ein erhebliches langfristiges Gefährdungspotential, das z. B. durch unbeabsichtigtes Anbohren von Abfällen oder unkontrollierte Freisetzung von Radionukliden mit Grundwasser gravierende Folgen haben könnte.
- *These:* Mit der Option der Rückholbarkeit bleiben die Handlungsspielräume bzw. Entscheidungsfreiheit künftiger Generationen erhalten.
Begründung: Bei einem noch nicht verschlossenen Endlager können zukünftige Generationen auf Entwicklungen im Endlager oder auf technologische Entwicklungen gezielt reagieren. Eine Teilhabe künftiger Generationen an Entscheidungen am endgültigen Entsorgungsweg ist möglich. So könnten sich künftige Generationen für dann ggf. vorhandene, bessere Entsorgungsmöglichkeiten (wie z. B. Partitioning & Transmutation) entscheiden. Es wird erwartet, dass durch zukünftige Entwicklung neuer Technologien andere bessere Möglichkeiten der Entsorgung gefunden werden.
- *These:* Die Reversibilität der Endlagerung ist aus grundsätzlichen Erwägungen anzustreben, die von nicht auszuschließenden Fehlentscheidungen und Fehlinterpretationen im Zuge eines Endlagerprojektes ausgehen.
Begründung: Die Rücknahme von einzelnen Entscheidungen oder Schritten bei der Endlagerentwicklung z. B. zur Korrektur einer falschen Standortentscheidung oder sich nach geraumer Zeit als untauglich erweisender technischer Maßnahmen oder als Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse bleibt nur unter Berücksichtigung der Option Rückholbarkeit einfacher realisierbar.

2.3 Argumente zum Akzeptanzgewinn

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Der Verzicht auf Rückholbarkeit und langfristige Überwachung dient dem entscheidenden Ziel der Endlagerung, nämlich der Gewährleistung der (Langzeit-)Sicherheit.
Begründung: Die Akzeptanz eines Endlagers und dessen Verschlusses wird durch den Nachweis der Sicherheit erreicht. Dieser Sicherheitsnachweis muss überzeugend kommuniziert und von der Öffentlichkeit wahr- und angenommen werden. Eine eingebaute Rückholbarkeit könnte die Annahme schüren, dass man nicht so genau weiß, wie sich das Lager langfristig entwickeln wird.
- *These:* Die technische Machbarkeit (im Sinne einer Inaugenscheinnahme des Endlagers) kann bei Einführung einer „Demonstrationsphase“ gezeigt werden. Dazu braucht es keine Rückholbarkeit.

Begründung: Das Zeigen der technischen Machbarkeit kann anstelle einer langwierigen Beobachtungsphase nach Auffahren der Endlagertunnel erfolgen, d. h. vor Beginn der ersten nicht reversiblen Einlagerungsschritte. Es ist zu erwarten, dass auch eine ausgedehnte Beobachtungsphase keine eindeutigen Erkenntnisse darüber liefert, ob das Endlager sich tatsächlich auslegungskonform verhält.

- *These:* Eine Kontrolle langfristiger Veränderungen des Endlagersystems ist nicht sicher möglich.
Begründung: Die Lebensdauer von Messinstrumenten ist begrenzt, Da die meisten zu erwartenden Prozesse sehr langsam ablaufen. Die sichere Identifizierung falscher Messwerte stellt aufgrund fortschreitender Alterung der Messinstrumente langfristig ein Problem dar. Ohne harte Kriterien, anhand derer eine Entscheidung zur Intervention getroffen werden könnte, bleibt die Option der Rückholbarkeit „Augenwischerei“, die den Eindruck vermittelt, man könne durch „akzeptanzfördernde Maßnahmen“ (deren Umsetzung nicht sicher möglich ist) das Lager sicherer und die Entscheidungsfreiheit größer machen.
- *These:* Die „Stigmatisierung“ einer Region mit Endlager bleibt zeitlich begrenzt.
Begründung: Die Nähe eines Endlagers kann für die in der Umgebung lebenden Menschen stigmatisierend wirken. Die Wahrnehmung eines Endlagers in der Öffentlichkeit definiert sich stark am Betrieb des Endlagers, welcher nach Verschluss der Anlage endet.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Akzeptanz durch Reversibilität: Die mutmaßliche oder tatsächliche Reversibilität der Entscheidung über alle Phasen der Endlagerentwicklung erhöht die Akzeptanz des Lagers und Glaubwürdigkeit der daran beteiligten Organisationen.
Begründung: Eine vollständige Rückabwicklung des Endlager-Projektes ist möglich (und wird in gewissen Ländern sogar gesetzlich gefordert, vgl. Anhang A3). Eine schrittweise Entscheidungsfindung erhöht das Verständnis für die Errichtung des Endlagers am gewählten Standort. Auch in Deutschland fordern die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle eine Rückholbarkeit des Abfalls während der Betriebsphase.

-
- *These:* Durch eine Überwachung der maßgeblichen Vorgänge im Endlager kann ein Fehlverhalten von Teilen des Endlagersystems festgestellt werden. Das Endlager wird „transparent“.
Begründung: Bezüglich der langfristigen Entwicklung des Endlagers stützt sich der Nachweis auf Experimente, die zum Teil über sehr kurze Zeiträume durchgeführt worden sind. Über lange Zeiträume könnten sich die Aussagen zur Endlagerentwicklung aus diesen Experimenten als nicht entscheidend oder gar falsch erweisen. Es braucht darum für einen aussagekräftigen Langzeitnachweis auch eine Überprüfung der für die langfristige Entwicklung verantwortlichen Prozesse. In einem Konzept mit der Option Rückholbarkeit dient die Überwachung damit der Verifizierung des Langzeitnachweises und bei einer Entwicklung innerhalb der vorausgesagten Bandbreiten auch der Beweisführung, dass nicht rückgeholt werden muss.
 - *These:* Veränderungen der ethischen, sozialen oder politischen Anforderungen an die Entsorgung oder Veränderungen von Sicherheitsstandards können berücksichtigt werden.
Begründung: Die ethischen, sozialen oder politischen Anforderungen an die Entsorgung und ein Endlager spiegeln die Gesellschaft wider und sind Veränderungen unterworfen. Ein sich verändernder Sicherheitsstandard könnte nach einem Verschluss eines Endlagers ggf. nicht mehr angewendet werden.
 - *These:* Rückholbarkeit im Endlagerkonzept kann die Akzeptanz erhöhen, da ein Ausweg eröffnet werden kann.
Begründung: Der Einbau der Option Rückholbarkeit kommt einem Bekenntnis der Entsorgenden gleich, dass sie sich irren können. Sollte durch neue Erkenntnisse offenbar werden, dass sich das Endlager nicht auslegungskonform verhält, könnte innerhalb dieses Zugeständnisses reagiert werden. Für die Menschen ist es außerdem einfacher, ihr Vertrauen auf eine überwachte, als auf eine „sich selbst überlassene“ Anlage zu setzen. Die Berücksichtigung der Rückholbarkeit müsste sich dann aber auf einen maximalen Zeitbereich oder zumindest Kriterien abstützen, anhand derer die Beobachtungsphase tatsächlich beendet bzw. der Verschluss tatsächlich realisiert wird.
 - *These:* Die Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen Rückholbarkeit löst das Problem der Markierung und der Informationsweitergabe bis zum Verschluss, sofern solche Dinge gefordert werden.
Begründung: Zum Schutz des Endlagers über lange Zeiträume ist es wichtig, dass die Information über das Endlager an zukünftige Generationen weitergegeben wird. Während einer ausgedehnten Beobachtungsphase vor dem Verschluss bleibt das Endlager in der Gesellschaft und benötigt dann noch keine Markierung, wenn die radioaktiven Abfälle die höchste Toxizität haben. Für eine solche Beobachtungsphase muss jedoch die dauernde Bewirtschaftung einschließlich deren Finanzierung sichergestellt werden.
 - *These:* Die „Stigmatisierung“ einer Region bleibt über den Verschluss eines Endlagers erhalten, wenn nicht der Gesellschaft überzeugend gezeigt werden kann, dass das Endlager sich wie erwartet entwickelt. Dazu braucht es langfristige Messungen zur Entwicklung.
Begründung: Die Nähe eines Endlagers kann für die in der Umgebung lebenden Menschen stigmatisierend wirken. Wenn ein Endlager nur auf der Basis kurzzeitiger experimenteller Befunde (die für einen Nachweis über sehr viel längere Zeiten herhalten müssen) verschlossen wird, wird der

langfristigen Entwicklung nach Lagerverschluss nicht vertraut. Die in der Umgebung lebenden Menschen müssen weiterhin mit der Angst eines Versagens der Barrieren im Untergrund leben.

2.4 Ökonomische Argumente

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Ein Endlager ohne die Option Rückholbarkeit ist relativ kostengünstig zu realisieren. Es entstehen keine langfristigen Kosten.
Begründung: Im Gegensatz zu Endlagerung mit Rückholbarkeit verbleiben nach dem Verschluss des Lagers lediglich Tätigkeiten im Rahmen einer relativ kurzzeitigen Überwachung der Tagesoberfläche (darunter Messung bestimmter Umweltparameter u. ä.). Nach Abschluss dieser Arbeiten werden keinerlei weitere Kosten mehr generiert, d.h. die Entsorgungskosten können gut prognostiziert und frühzeitig von den Abfallverursachern bereitgestellt werden.
- *These:* Ökonomisch ist das Verursacherprinzip bei der Endlagerung ohne Rückholbarkeit erfüllt: Die den Abfall verursachenden Generationen zahlen für die Endlagerung.
Begründung: Gemäß Verursacherprinzip soll die nutznießende Generation auch für die Kosten der Entsorgung aufkommen. Durch einen zeitnahen Verschluss eines Endlagers wird sichergestellt, dass auch die Kosten zeitnah anfallen und nicht zu späteren Zeiten durch wirtschaftliche Randbedingungen massiv angepasst werden müssen.
- *These:* Die Option Rückholbarkeit verursacht zusätzliche Kosten. Es besteht die Gefahr, dass diese Kosten zu Lasten der Sicherheit gedeckt werden.
Begründung: Die Maßnahmen zur Implementierung einer Option Rückholung sind eventuell mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden. Solche zusätzlichen Kosten könnten finanzielle Kompromisse mit Einfluss auf die Qualität der Verfüllung der untertägigen Hohlräume und des Endlagerverschlusses und damit einen langfristigen Sicherheitsverlust verursachen.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Mit Berücksichtigung der Option Rückholbarkeit sind die Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung gewährleistet.
Begründung: Abfallbestandteile können einer Wiederverwertung zugeführt werden bzw. Wertstoffe können aus Abfällen zurück gewonnen werden. Diese Argumentation spricht insbesondere die abgebrannten Brennelemente an, die durch ihre direkte Endlagerung nicht einer Wiederaufarbeitung zugeführt werden.

2.5 Argumente zu Proliferation, Kernmaterialüberwachung und Terrorismus

Argumente für eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit:

- *These:* Die Proliferation wird durch einen raschen Verschluss deutlich erschwert.
Begründung: Nach erfolgtem Verschluss des Endlagers ist eine Entwendung von Kernmaterialien aus

dem Endlager nur noch unter sehr großem Aufwand möglich. Bei einer Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit kann der Mensch rückgeholte spaltbare Materialien ggf. auch im militärischen Bereich verwenden.

- *These:* Konzepte zur Kernmaterialüberwachung sind gegenüber einer Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit erleichtert.
Begründung: Bereits während des planmäßigen Rückbaus des Endlagers besteht nur noch ein erschwelter Zugang zum spaltbaren Material. Nach Verschluss des Endlagers besteht kaum eine Gefahr durch unrechtmäßige Entwendung von Kernmaterial mehr.

Argumente für eine Endlagerung mit der Option Rückholbarkeit:

- *These:* Aufgrund der permanenten Kontrolle des Endlagers sind der Zugang und die Entwendung von spaltbarem Material deutlich erschwert.
Begründung: Anstelle einer fehlenden Kontrolle bei einem verschlossenen Endlager wird eine aktive Kontrolle des spaltbaren Materials erforderlich. Damit kann der Nicht-Proliferation von Kernmaterial insgesamt besser gedient werden.

3 Position des ESK-EL

Die gesammelten Thesen und die spezifischen Begründungen (Argumente) pro und contra Rückholbarkeit verschiedene Grundsätze für die Vertrauensbasis zugrunde legen: Eine argumentative Richtung setzt ihr Vertrauen auf die geologischen Gegebenheiten und technischen Möglichkeiten sowie auf die Prognostizierbarkeit und Quantifizierbarkeit der am Standort und im Untergrund ablaufenden Prozesse, während die andere Richtung ihr Vertrauen in das menschliche Handeln jetzt und in der Zukunft, also der Gesellschaft und ihrer Entwicklung ausspricht. Daraus resultiert, dass ein Endlager tendenziell entweder einem natürlich-technischen System anvertraut oder die Verantwortung für das Endlager in die Hände der Gesellschaft gelegt wird.

Auch im Bereich der ethischen Bewertung hinsichtlich der intergenerationellen Gerechtigkeit bestehen zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze: Während eine Richtung die (nachsorgefreie) Gewährleistung der Sicherheit als prioritär ansieht, legt die andere zuerst Wert auf die Gewährleistung einer größtmöglichen Flexibilität für nachfolgende Generationen, auch wenn diese mit einer Belastung durch eine dann notwendige Nachsorge verbunden ist.

Aus den oben genannten Vertrauenszuweisungen resultiert ein großes Spektrum von Möglichkeiten der technischen Umsetzung einer Reversibilität und Rückholbarkeit, die von einem unmittelbar nach Einlagerung zu verschließenden Endlager über ein Endlager mit zeitlich beschränkter Rückholung zu einem Endlager mit kontinuierlicher Option Rückholbarkeit und schlussendlich zu einem Langzeitzwischenlager an der Oberfläche reicht.

Die argumentative Darstellung der Rückholung lässt sich aus Sicht des ESK-EL nicht auf eine geschlossene Frage reduzieren, ob eine Rückholbarkeit sinnvoll ist oder nicht. Sie muss differenzierter (Was für eine Rückholbarkeit ist sinnvoll? Für welche Abfälle und über welche Zeiträume soll eine Rückholbarkeit

eingepplant werden?) betrachtet werden. Aus einer solchen differenzierteren Betrachtung könnte dann auch abgeleitet werden, welche Kriterien erfüllt sein müssen, damit zurückgeholt wird. Aus einer differenzierten Betrachtung heraus müsste auch die Klärung einer Reihe von rechtlichen und sicherungstechnischen Aspekten vorgenommen werden (vgl. Kap. 4).

Der ESK-EL bewertet die Sicherheit in der Nachbetriebsphase als prioritär im Vergleich mit der Aufrechterhaltung einer Flexibilität für zukünftige Generationen. Er erachtet einen Sicherheitsgewinn für ein Endlager mit Option Rückholbarkeit für fraglich. Ein sich ändernder Stand von Wissenschaft und Technik lässt sich in der Phase zwischen Einlagerung und Verschluss nutzen, um die Sicherheit des Endlagers zu verbessern, er kann aber genauso zur Rückholung führen und dann, zumindest kurzzeitig (bis ein neues, besseres Endlager zur Verfügung steht), einen Sicherheitsverlust bewirken. Aus Sicht des ESK-EL ist außerdem eher damit zu rechnen, dass technische Einbauten zur Verbesserung der Rückholbarkeit sowie längere Zeiträume der Offenhaltung des Endlagers die natürlichen und technischen Barrieren beeinträchtigen und sich damit insgesamt negativ auf die Langzeitsicherheit auswirken.

Die heutigen deutschen Endlagerkonzepte sind auf den Einschluss der radioaktiven Abfälle, deren Konzentration im geologischen Untergrund und Isolation vom menschlichen Lebensraum ausgerichtet. Aus Sicht des ESK-EL sind diese Konzepte richtig. Ein Konzept zur Rückholbarkeit mit Offenhalten über längere Zeiträume eines Endlagers widerspricht diesem Ansatz fundamental. Unabhängig vom gewählten Wirtsgestein verursacht das längerfristige Offenhalten eine Reihe von nicht erwünschten Prozessen (Auflockerung des Wirtsgesteins, mögliches Eindringen von Wasser in die Hohlräume, Verformung der Untertagebauten, Reaktion des Gesteins und der Einbauten auf Bewetterung etc.) und vermindert die Langzeitsicherheit. Daher soll das Offenhalten eines Endlagers auf ein sinnvolles Minimum beschränkt bleiben. Eine Minimierung der Offenhaltung würde darüber hinaus der Gefahr von sich rasch verändernden Rahmenbedingungen durch die menschliche Gesellschaft entgegenwirken.

Die sehr langen Zeiträume, in denen die radioaktiven Abfälle vom Lebensraum des Menschen isoliert werden müssen, lassen aus Sicht des ESK-EL eine Langzeitzwischenlagerung, egal ob an der Oberfläche oder im nahen oder tiefen geologischen Untergrund als ein Unterfangen mit großen Unsicherheiten erscheinen. Ein langfristiges Offenhalten eines Endlagers in der Verantwortung einer sich rasch entwickelnden menschlichen Gesellschaft ist aus Sicht des ESK-EL unsicherer als das Abstützen auf den Einschluss der Abfälle durch geologische und technische Gegebenheiten zu einem verschlossenen Endlagersystem.

Der ESK-EL kommt daher zum Schluss, dass die Berücksichtigung einer Option Rückholbarkeit nur in einem Rahmen sinnvoll ist, in dem sie keine signifikante Beeinflussung der Langzeitsicherheit verursacht. Ein solcher Rahmen kann eine zeitlich begrenzte Beobachtungsphase umfassen. Für eine solche wären der notwendige Rechtsrahmen und die notwendigen Anforderungen und Verantwortlichkeiten zu klären. Die Frage einer Verbringung potenzieller Rohstoffe in ein Endlager ist unabhängig davon vorab zu entscheiden. Die Maßnahmen zum Schutz vor Proliferation sind bis zum Verschluss des Endlagers zwingend aufrecht zu halten.

4 Zu klärende Aspekte zur Rückholbarkeit

In gleicher Weise wie die Sammlung an Argumenten in Kapitel 2 zwar ausführlich, jedoch nicht vollständig ist, sind auch die im Folgenden zusammengestellten zu klärenden Aspekte zur Rückholbarkeit keineswegs als abschließend zu verstehen. Genauso ist deren hier vorgenommene Einteilung unter verschiedenen Untertiteln auch anders möglich und diverse Fragen sprechen mehrere Aspekte an.

Die Fragen sollen als Basis einer Diskussion in der Öffentlichkeit und innerhalb von Fachkreisen dienen. Sie können im Rahmen einer solchen Diskussion durch neue Fragen und Aspekte ergänzt werden.

Grundsätzliches: Die praktische Umsetzung einer Rückholbarkeit/Rückholung bleibt zurzeit ungewiss. Was wären Gründe für eine Rückholung, aufgrund welcher Ereignisse/Messwerte könnte sie jemals notwendig sein? Hier fehlen zurzeit die Kriterien. Zu den Kriterien gehört auch die Frage: Wer entscheidet, dass rückgeholt wird? Wenn entwickelte Kriterien zur Rückholbarkeit vorhanden und die Entscheidungsträger definiert sind: Ist die Rückholung ein „on-off“-System oder kann selektiv rückgeholt werden? Macht es Sinn, die radioaktiven Abfälle in die zwei Klassen “für die Rückholung geeignet” und “für die Rückholung ungeeignet” einzuteilen und dementsprechend endzulagern? Wenn ja: Nach welchen Kriterien wird eingeteilt? Besteht ein Interessenskonflikt zwischen Endlagerung und Rückholbarkeit? Wenn ja: Kann der „Spagat“ zwischen Endlagerung und Rückholbarkeit gelingen? Wenn nein, ist das Gelingen einer sicheren Endlagerung zeitlich befristet?

Ethische Fragen: Sollen radioaktive Substanzen dauerhaft aus der Biosphäre entfernt werden, auch wenn sie - wie im Beispiel der direkt endgelagerten abgebrannten Brennelemente - in einer näheren oder fernerer Zukunft doch noch als Rohstoffe wieder verwendet werden könnten? Ist die Gesellschaft willens, heute eine irreversible Entscheidung zum Verschluss des Endlagers mit dieser zeitlichen Tragweite zu treffen? Sollte die Entscheidung zum Verschluss eines Endlagers zukünftigen Generationen überlassen werden? Wer sind die zukünftigen Generationen? Wie lange sollte die Option offen gehalten werden (Länge einer Beobachtungszeit)? Ist es den nachfolgenden Generationen gegenüber ethisch verantwortbar, ihnen die Beseitigung der radioaktiven Abfälle aufzubürden, die unsere Generation produziert hat? Wie wird gewährleistet, dass die Sicherheitskultur und das Vermögen der Gesellschaft, mit dem Gefährdungspotenzial adäquat umzugehen (Weitergabe von Wissen und technischem Vermögen) erhalten bleibt?

Akzeptanz in der Öffentlichkeit: Wird eine Endlagerung ohne die Option Rückholbarkeit je akzeptiert? Bringt eine Einlagerung mit Rückholoption Vorteile hinsichtlich Akzeptanz der Endlagerung in der Öffentlichkeit, oder wirkt sie eher kontraproduktiv? Muss eine Rückholbarkeit nicht zuerst in all ihren Konsequenzen für das Lagerkonzept und die Langzeitsicherheit, d.h. ihre Mach- und Umsetzbarkeit betrachtet werden, bevor sie öffentlich diskutiert wird?

Verantwortung und Kosten: Wer bezahlt die Rückholung? Über welche Instrumente ist deren Finanzierung sicher zu stellen? Wer bestimmt den Zeitpunkt, bis zu welchem die Rückholbarkeit aufrecht zu erhalten ist? Wer kümmert sich institutionell und finanziell um die lang anhaltende Überwachung?

Schrittweiser Prozess: Erfordert der schrittweise Prozess die Einführung der Reversibilität, um das Verfahren flexibel durchführen zu können? Bedingt die Einführung der Reversibilität die Rückholbarkeit?

Wenn ja, sollte dann nicht eine Rückholvorsorge (z. B. bezüglich der Behälter- oder Stollenauslegung) getroffen werden?

Sicherheit: Bleibt das Sicherheitskonzept der passiven Sicherheit erhalten oder ist die Realisierung eines Endlagers mit Option der Rückholbarkeit als ein Kompromiss zwischen Endlagersystemen zu verstehen, bei dem den sicherheitlichen Anforderungen aufgrund aktiver Maßnahmen und passiver Sicherheitseigenschaften bereits Genüge getan wird? Wenn ja, wie ist die aufgrund der jeweiligen Maßnahmen/Eigenschaften erzielbare Sicherheit einzuschätzen? Wie muss die „Option der Rückholbarkeit“ bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen gestaltet werden, damit das Primat der Sicherheit erhalten bleibt? Kann aus den Endlagerkonzepten mit der Option der Rückholbarkeit ein Sicherheitsgewinn abgeleitet werden? Wie bemisst man den jeweiligen, spezifischen Sicherheitsstatus eines Endlagersystems? Muss die Rückholbarkeit eingeführt werden, um bei der Einlagerung auf nicht Vorhersehbares reagieren zu können? Ist die Rückholbarkeit die einzige Möglichkeit, auf das Eintreten von wenig wahrscheinlichen Ereignissen mit gravierenden Auswirkungen zu reagieren, oder können solche Entwicklungen durch eine optimierte Erkundung bereits ausgeschlossen werden?

Muss die Einführung einer Rückholoption/Reversibilität in ein Endlagerprogramm frühzeitig, d.h. vor der Planungsphase erfolgen, da diese Entscheidung tief in das Endlagerkonzept und seine Entwicklung eingreift? Für welche Zeiträume ist die Rückholbarkeit vorzusehen? Ist bekannt, welche technischen Implikationen diese Entscheidung auslöst (siehe bzgl. sicherheitstechnischer Einzelfragen auch BfS 2005; IAEA 2009)? Welche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten müssen dazu initiiert werden?

Rechtsfragen: Sollte die Möglichkeit einer Rückholung rechtlich verankert werden, und wenn ja, für wie lange? Wer bleibt verantwortlich für Überwachung und Rückholung nach Verschluss des Endlagers?

Kernmaterialüberwachung: Wann können Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung beendet oder wenigstens verringert werden? Wie muss die Kernmaterialüberwachung für ein Endlager mit Rückholoption festgelegt werden? Lässt sich die Rückholbarkeit auf Befugte beschränken, oder können auch Unbefugte auf diesem Weg in den Besitz von radioaktivem Material gelangen?

4 Referenzen

- Appel D., Kreusch J., Neumann W. (2001): Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle – Abschlussbericht Gruppe Ökologie im Auftrag des BMBF und des BMWi, 17 S.
- Bechthold W., Smailos E., Heusermann S., Bollingerfehr W., Bazargan-Sabet B., Rothfuchs T., Kamlot P., Grupa J., Olivella S., Hansen F.D. (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project)”, Final Report, EUR 20621 DG Research, Brussels.
- BfS (2005): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich – Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. Salzgitter 04.11.2005
- BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland: Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover/Berlin, April, 2007
- Biurrun E., Engelmann H.-J., Brennecke P., Kranz H. (2000): Safety and Safeguards Aspects on Retrievability: a German Study, Beitrag in IAEA-TECDOC-1189.
- Blommaert W. (2010): Reflections on Flexibility, Reversibility, Retrievability and Recoverability by the Belgian nuclear safety authority, Vortrag auf der R&R-Tagung der NEA, Reims, 14.-17. Dezember 2010, FANC, Belgien.
- BMU (2008): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 03. Juni 2008.
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 30. September 2010.
- Closs, K.D. (1980): KfK 3000, Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und Beurteilung ihrer Realisierbarkeit, Studie "Entsorgungsalternativen". Kernforschungszentrum Karlsruhe, September 1980
- Engelmann, H.-J., Lommerzheim, A., Biurrun, E., Hubert, R., Pöhler, M. (1995): Untersuchung der Nichtrückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, Studie für das BMWi unter Förderkennzeichen 02E8371, Schlussbericht der DBE.
- Engelmann, H.-J.; Biurrun, E.; Filbert, W.; Khamis, M.; Lempert, J.P.; Müller-Hoeppe, N.; Niehues, N.; Wahl, A. (1996): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Endlagerkonzepte und Einlagerungstechniken für ausgediente Brennelemente. - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE), Peine, DEAB T 70, 47 S.
- ESDRED (2009): ESDRED (Contract Number: FI6W-CT-2003-508851), Deliverable 8 of Module 2 – WP7, Evaluation and Final Report, W. Bollingerfehr, W. Filbert, J.-M. Bosgiraud, B. Haverkate.
- ESK (2009): Stellungnahme der ESK zum Entwurf des BMU „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“, 29.01.2009.
- EU (2011): Richtlinie des Rates über die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Europäische Kommission, Brüssel, 3. November 2010 (verabschiedet am 19. Juli 2011).
- Filbert W. und Engelmann J. 1998: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben, Peine, 13.03.1998.

-
- Filbert W., Bollingerfehr W., Heda M., Lerch C., Niehues N., Pöhler M., Schulz J., Schwarz T., Toussaint M., Wehmann J. (2010): Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, BMWi-Projekt FKZ 02E9854.
- GRS-247 (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Hauptband, im Auftrage des BMWi, September 2008, 96 S, ISBN 978-3-939355-22-9.
- IAEA (2000): Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in co-operation with the International Atomic Energy Agency and held in Saltsjöbaden, Sweden, 24–27 October 1999. IAEA-TECDOC-1189.
- IAEA (2009): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. IAEA NW-T-1.19, 64 S., ISBN 978-92-0-100109-2.
- NEA (2007): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste – Taking Further the RWMC Work in Relation to Stepwise Decision Making. A Proposal to the RWMC. NEA/RWMC(2007)7, 16. April 2010.
- Ziegenhagen J., Lerch C.H. (2003): Drift Emplacement”, Part 6.1 of Deliverable D6 of the BAMBUS-II project, Peine (2003).
- Ziegenhagen J., Bollingerfehr W., Skrzyppek J., Schlickerrieder L., Chapman, N., Nirvin B., Sjöblom R., Svemar, C. (2005): Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager. – Fachbericht Literaturrecherche, Z2.2.7/WS 1006/8489-2 im Auftrag des BfS. DBE Technology GmbH, Peine, 104 S.

Anhang

A1 Das deutsche Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle

In Deutschland sind für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle folgende Einlagerungskonzepte bzw. Konzeptvariationen vorgesehen (z.B. GRS-247):

- Endlagerung selbstabschirmender Behälter mit ausgedientem Kernbrennstoff in Strecken,
- Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen sowie HAW-Kokillen und CSD-C,
- Endlagerung von Brennstabkokillen sowie HAW-Kokillen und CSD-C in Transport- und Lagerbehältern (z.B. CASTOR-Behälter)

Im Weiteren wird beispielhaft die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle auf der Grundlage des Referenzendlagerkonzeptes für den Standort Gorleben (Filbert und Engelmann 1998) unter Berücksichtigung aktueller Weiterentwicklungen betrachtet.

Nach diesem Konzept wird das Endlager in Salz in einer Teufe von ca. 870 m eingerichtet. Der Zugang zu den Untertageanlagen erfolgt über zwei Schächte (Durchmesser ca. 7,5 m). Ein Schacht dient dem Personen- und Materialtransport. Der für den Transport der Abfallgebände nach Untertage vorgesehene zweite Schacht ist mit einer Förderanlage für eine Nutzlast von 85 t ausgerüstet (für die Endlagerung von Großbehältern von ca. 160 t). Am Füllort wird der Plateauwagen mit dem aufliegenden Behälter von einer Batterie-Grubenlokomotive (gleisgebunden) übernommen und über die Richtstrecke bis zu dem in Betrieb befindlichen Einlagerungsfeld und dann über einen Querschlag in die Einlagerungsstrecke gezogen.

Einlagerungsvarianten für wärmeentwickelnde Abfälle

Verbrauchte Brennelemente und verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden in separaten Endlagerfeldern eingelagert. Von den Querschlägen zwischen den Richtstrecken zweigen blinde Einlagerungsstrecken ab. Für die Einlagerung von anderen wärmeentwickelnden Abfällen (z. B. VBA-Gebinden, HTR-Kugel-Brennelementen, Brennelementen aus Forschungsreaktoren) wird davon ausgegangen, dass die gleiche Einlagerungstechnik wie für abgebrannte Brennelemente und verglaste Abfälle zum Einsatz kommt.

A2 Frühere Arbeiten in Deutschland zur Rückholbarkeit

Das Thema Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager wurde in Deutschland bislang in wenigen Untersuchungen behandelt, die nachfolgend aufgeführt und kurz diskutiert werden.

- 1) Bereits in der im Jahr 1980 publizierten „Studie Entsorgungsalternativen“ (Closs 1980) wurde das Thema Rückholung bzw. Rückholbarkeit behandelt. In der Zusammenfassung der Studie wird ausgeführt: *Neben der Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente in oberirdischen Anlagen geht die Studie auch auf die Möglichkeit einer Zwischenlagerung in einer unterirdischen Salzformation ein. Aufgrund der offenen Bohrlöcher und Strecken im Bergwerk, die aus Gründen der*

Rückholbarkeit notwendig sind, und der Bewetterung der Strecken, die aus Gründen der Wärmeabfuhr erforderlich ist, besteht eine direkte Verbindung mit über Tage. Die Vorteile, die eine geologische Formation bietet, können daher bei der Zwischenlagerung nicht in gleicher Weise genutzt werden wie bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die sicherheitstechnischen Bedenken, die gegen dieses Konzept sprechen, die höhere Strahlenbelastung des Betriebspersonals, die schwierige Rückholbarkeit sowie die späte Realisierungsmöglichkeit dieses Zwischenlagerkonzeptes (Inbetriebnahme des Zwischenlagers frühestens Ende der neunziger Jahre) lassen diese Art der Zwischenlagerung wenig attraktiv erscheinen gegenüber der oberirdischen Nass- und Trockenlagerung.

- 2) Im Zuge der Arbeiten zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente wurde unter dem Förderkennzeichen 02E8371 von DBE (Engelmann et al. 1995) eine Studie realisiert. Darin wurden die technische Realisierbarkeit sowie der erforderliche Zeit- und Arbeitsaufwand für eine unerlaubte Rückholung von Brennelementen in der Nachbetriebsphase eines Endlagers in einem Salzstock untersucht. Die Bergbautechnik für Gebirgstemperaturen bis 100 °C wird als Stand der Technik angesehen. Bei einer Abzweigung von Brennelementen durch das Auffahren eines neuen Bergwerkes beträgt der Zeitaufwand bis zur Rückholung des ersten POLLUX-Behälters ca. 19 Monate. Temperaturberechnungen dazu haben ergeben, dass bereits während der Betriebsphase des Endlagerbergwerks die ersten POLLUX-Behälter unter Temperaturen von 100 °C, die bergbautechnisch beherrschbar sind, abgekühlt sind. Da alle Behälter einer Einlagerungsstrecke in weniger als einem Monat zurückgeholt werden können, wird die Rückholung, wie thermomechanische Berechnungen gezeigt haben, durch Streckenkonvergenz oder Rissbildungen nicht beeinträchtigt. Eine Rückholung ist somit zu jeder Zeit technisch möglich, erfordert aber einen hohen zeitlichen, technischen und finanziellen Aufwand.

Ergebnisse der Studie im Einzelnen:

Es wurden zwei denkbare Verfahren für eine Rückholung von Brennelementen nach Schließung des Endlagers analysiert. Durch eine Untersuchung der technischen Realisierbarkeit sowie des hierfür erforderlichen Zeit- und Arbeitsaufwandes wurde nachgewiesen, dass für einen möglichen Abzweiger nur eine Rückholung mit Hilfe eines neuen Bergwerkes Sinn macht. Mit diesem Verfahren beträgt der Zeitaufwand bis zur Rückholung des ersten POLLUX-Behälters ca. 19 Monate. Eine Recherche des derzeitigen Standes der Bergbautechnik hat ergeben, dass Geräte und Hilfsmittel für einen Einsatz bei hohen Gebirgstemperaturen vorhanden sind. Die Obergrenze der Gebirgstemperatur, die derzeit bergbautechnisch beherrscht werden kann, beträgt ca. 100°C.

Temperaturberechnungen haben gezeigt, dass bereits während der Betriebsphase des Endlagers die ersten Behälter unter das Temperaturlimit von 100°C abgekühlt sind und dass die Anzahl der abgekühlten Behälter während der Nachbetriebsphase sehr rasch ansteigt und nach 100 Jahren bereits 500 beträgt.

Das Wiederauffahren einer Einlagerungsstrecke und die Rückholung der dort liegenden 19 Behälter erfordern einen Zeitaufwand von weniger als einem Monat.

Thermomechanische Berechnungen haben ergeben, dass in den Einlagerungsfeldern nach dem Auffahren von Rückholungsstrecken nur mäßige Konvergenzraten sowie unkritische Zugspannungen auftreten.

Die Rückholung von POLLUX-Behältern ist nach heutigem Stand der Technik zu jedem Zeitpunkt der Nachbetriebsphase möglich, erfordert aber einen sehr hohen zeitlichen, technischen und finanziellen Aufwand.

- 3) Die IAEA organisierte im Oktober 1999 ein Seminar zum Thema “Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel”. Das damals präsentierte Material wurde in IAEA (2000), veröffentlicht. Darin findet sich auch ein deutscher Beitrag (Biurrun et al. 2000). Der Beitrag definiert den Begriff der Rückholbarkeit und zeigt zwei unterschiedliche Rückholszenarien mit deren Vor- und Nachteilen auf. In einem zweiten Teil werden die Aspekte der Rückholbarkeit bezüglich der Referenzkonzepte zur Spaltstoffflusskontrolle in Deutschland aufgelistet. Der Aspekt der Spaltstoffflusskontrolle und geplante Vorkehrungen dazu werden auf der Basis deutscher Studien insbesondere für die Nachverschlussphase eines Endlagers dargestellt.

In einem dritten Teil werden die Resultate einer deutschen Rückholbarkeitsstudie der DBE (im Auftrag des BMBF) dargestellt (vgl. unter 2.).

- 4) Im Jahr 2001 veröffentlichte die Gruppe Ökologie eine durch das BMWi finanzierte Studie (Appel et al. 2001), die zu folgenden Schlüssen kommt: Ausgehend von der Darstellung der in ausgewählten Ländern diskutierten bzw. angestrebten Entsorgungsoptionen sowie ihrer jeweiligen Ziele und Begründungen wurden folgende Optionen einer qualitativen vergleichenden Bewertung unterzogen:
 - a. Zeitnahe Endlagerung mit schnellem Verschluss des Endlagers und Verzicht auf Rückholbarkeit und weitergehende Kontrollmaßnahmen,
 - b. Endlagerung mit Rückholbarkeit,
 - c. kontrollierte geologische Langzeitlagerung,
 - d. Langzeitzwischenlagerung und
 - e. Dauerlagerung.

Gemäß der Studie ist die baldige Endlagerung unter Sicherheitsaspekten allen anderen Optionen überlegen. Auch unter den damaligen Zukunftsperspektiven der Kernenergie in Deutschland wurde die baldige Endlagerung als Option erster Wahl dargestellt. Wenn aus anderen als sicherheitsorientierten (z. B. ethischen) Gründen andere Optionen als die baldige Endlagerung verfolgt werden sollten, sind gemäß der Studie Einbußen an der Sicherheit bzw. der Zuverlässigkeit des Sicherheitsnachweises in Kauf zu nehmen.

In der Zusammenfassung wird die Vorgehensweise zur qualitativen Analyse eingehend dargelegt und hinsichtlich der zu präferierenden Vorgehensweise in Deutschland der Schluss gezogen: *Für das entsorgungsstrategische Vorgehen in Deutschland ergeben sich aus der vergleichenden Bewertung und der Auseinandersetzung mit den für die einzelnen Entsorgungsoptionen ins Feld geführten Argumenten folgende Konsequenzen: An der bisher in Deutschland verfolgten baldigen Endlagerung*

sollte – entgegen der international verbreiteten Entwicklung weg von der baldigen Endlagerung und hin zu Optionen mit Überwachung/Kontrolle und Rückholbarkeit – festgehalten werden; denn die Ergebnisse der vergleichenden Bewertung zeigen deutlich: Alle anderen Entsorgungsoptionen als die baldige Endlagerung bieten weder eine höhere (Langzeit-)Sicherheit, noch sind sie ethisch widerspruchsfrei zu begründen. Vielmehr kann das Hauptziel aller Optionen, nämlich der Schutz von Mensch und Umwelt, am ehesten durch die baldige Endlagerung erreicht werden. Eine der baldigen Endlagerung vorangestellte zeitlich begrenzte und in ihren Zielen klar definierte Demonstrationseinlagerung könnte zu Akzeptanzgewinnen führen. Im Falle einer entsorgungsstrategischen Umorientierung muss man sich im Klaren darüber sein, dass diese nicht mit Sicherheitsaspekten oder ethischen Argumenten begründet werden kann, sondern mit Sicherheitseinbußen verbunden wäre. Eine solche Entscheidung wäre politischer Natur und kann allein mit – allerdings legitimen – gesellschaftlichen Forderungen begründet werden.

Diese Aussagen gelten insbesondere bei Berücksichtigung des in Deutschland vorgesehenen Ausstiegs aus der großtechnischen Kernenergienutzung. Denn dann ergeben sich für alle Optionen, die langfristig die Beibehaltung umfangreicher kerntechnischer Handlungskompetenz voraussetzen, erhebliche Begründungsschwierigkeiten. Der Ausstieg aus der Kernenergienutzung zielt ja gerade darauf ab, in einem überschaubaren Zeitraum diese Großtechnik zu beenden und eine Lösung des Entsorgungsproblems herbeizuführen. Hierfür bietet sich die Option baldige Endlagerung an.

- 5) Im Zuge der Befassung mit den „Sicherheitstechnischen Einzelfragen“ wurde von BfS ein Auftrag an DBE zur Befassung mit den Möglichkeiten und Konsequenzen einer Option Rückholung vergeben. Die Ergebnisse der Untersuchungen (Ziegenhagen et al. 2005), erarbeitet im Rahmen der Befassung mit den „Zweifelsfragen Gorleben“, sind im sog. „Synthesebericht“ des BfS dargelegt (BfS 2005). Die dort in Kap. 2.11 ff. beschriebenen Arbeiten kommen zu folgenden Ergebnissen:

2.11.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens der DBE (UA SKB und Colenco)

Eine Analyse der zugänglichen Literatur über die einschlägigen regulativen Grundlagen, Anforderungen und Empfehlungen bezüglich der Rückholung von radioaktiven Abfällen hat im Wesentlichen folgendes gezeigt:

- *Trotz langjähriger internationaler Diskussionen über die Aspekte einer Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle bestehen bis heute keine internationalen Empfehlungen oder Regelungen bezüglich der Berücksichtigung einer Rückholbarkeit in den Endlagerkonzepten. Nur in einer begrenzten Anzahl von Ländern bestehen gesetzliche Regelungen, die eine Berücksichtigung der Rückholbarkeit in den Endlagerkonzepten festlegen, ohne dass bestimmte Einzelheiten wie z. B. Zeitrahmen festgelegt sind.*
- *Übereinstimmend wird die Auffassung vertreten, dass eine im Endlagerkonzept berücksichtigte Rückholbarkeit nicht zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit des Endlagers führen darf.*

Tab. 27 [nicht aufgenommen] zeigt eine Übersicht über die gesetzlichen Regelungen bzw. sonstige nationale Festlegungen und Empfehlungen zur Rückholbarkeit in den untersuchten Ländern sowie über deren Umsetzung in geologischen Endlagerkonzepten.

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Regelungen bezüglich einer Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle.

Für alle Endlagerkonzepte gilt, dass sich mit Fortschreiten der Einlagerung von Abfallgebinden, der Verfüllung und des Verschlusses die Zugänglichkeit der Abfallgebinde verschlechtert. Deshalb wird in einer Reihe von Endlagerkonzepten eine zeitliche Verzögerung der Verfüllung und des Verschlusses des Endlagers bzw. von Teilen des Endlagers in einzelnen Etappen des Endlagerprozesses vorgesehen bzw. erwogen, um in diesen Etappen eine Rückholung zu erleichtern. Nach Verschluss eines Endlagers ist eine Rückholung zwar technisch möglich, erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand, da das Endlager neu aufgefahren werden muss, bzw. ein neues "Rückholbergwerk" zu errichten ist.

In einigen Endlagerkonzepten sind konzeptionelle bzw. technische Lösungen enthalten, die den Zugang zu den Abfallgebinden zwecks einer Rückholung erleichtern können.

Solche Lösungen sind:

- Einlagerung von einem oder wenigen Gebinden in einer Einlagerungszelle. Dadurch kann auch eine selektive Rückholung vorgenommen werden.*
- Einlagerung in Einlagerungsrohren ohne Verfüllung des Zwischenraumes zwischen Rohrwand und Gebinden bzw. zwischen den Gebinden.*
- Einlagerung der Abfallgebinde in ausgebauten Endlagerkammern bzw. Abschnitten in Endlagerkammern ohne Verfüllung. Diese Lösung wird z. B. in Schweden für schwach radioaktive Abfälle angewendet, wobei jedoch keine Absichten für eine Rückholung dieser Abfälle bestehen.*
- Spezielle Konstruktion der Verschlüsse der Einlagerungszellen, die den Rückbau der Verschlüsse erleichtert.*

Ein wesentlicher Faktor, der den Zugang zu den Abfallgebinden erschweren bzw. unmöglich machen kann, ist die Temperatur der Abfallgebinde und des umgebenden Wirtsgesteins. Entsprechende Recherchen haben ergeben, dass mit dem heutigen Stand der Technik Wassertemperaturen bis 70 °C beherrschbar sind, wobei die Gebirgstemperatur 100 °C nicht überschreiten sollte, um keine unzulässigen Spannungen durch zu hohe Temperaturgradienten zwischen den Wänden der Grubenbaue und den Wettern hervorzurufen (Engelmann et al. 1995). Dieser Faktor spielte nach den untersuchten Endlagerkonzepten nur für Endlagerkonzepte im Salz bei hohen Wärmeleistungen der endgelagerten Behälter eine Rolle. Für Endlagerkonzepte im Kristallingestein und Ton wird die maximale Temperatur am Kontakt zum Bentonit ohnehin auf 100 °C begrenzt, um die Entstehung einer Dampfphase auszuschließen und die Barrierenwirkung des Bentonits nicht zu beeinträchtigen.

Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung, die für die Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit der Endlager von Relevanz sind, können wie folgt zusammengefasst werden:

- *Verzögerung der Verfüllung und des Verschlusses von Teilen des Endlagers bzw. des Endlagers und*
- *technische Maßnahmen.*

Verzögerungen der Verfüllung und des Verschlusses für einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten würden keine wesentlichen Fragen der Betriebs- und Langzeitsicherheit aufwerfen, da für die Endlager ohnehin eine Betriebszeit von etwa 50 Jahren vorgesehen ist. Falls sich diese Phase jedoch über größere Zeiträume erstreckt, wird in den entsprechenden Endlagerkonzepten auf Folgendes hingewiesen:

- *Die Langzeitstabilität der Grubenbauten kann durch entsprechende Konstruktion und Instandhaltung gewährleistet werden. Es muss dabei beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der Dauer der Offenhaltungsphase sich das Risiko unsachgemäßer Instandhaltung vergrößert, wodurch das Risiko einer Instabilität der offenen Grubenräume erhöht wird.*
- *Bei Endlagern in Ton kann es durch Konvergenz der unverfüllten Grubenräume zur Beeinträchtigung der Stabilität der Grubenräume kommen, was bei nicht ausreichender Instandhaltung zum Einbrechen von Strecken und damit zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtsgesteins und zur beschränkten Zugänglichkeit führen kann.*
- *Es kann zu einer Beeinflussung der chemischen und physikalischen Stabilität von Verfüllungen und Verschlüssen bei Kontakt mit der Grubenluft durch das Offenhalten einzelner Grubenabschnitte kommen.*
- *Bei einem Endlager in Ton ist zu berücksichtigen, dass durch chemische und hydraulische Prozesse, die durch Zutritt von Sauerstoff bzw. durch Trocknen des Wirtsgesteins aufgrund der lang anhaltenden Bewitterung eintreten können, der Ton versauern kann, was Veränderungen der Radionuklidmigrationseigenschaften verursachen kann.*
- *Es besteht erhöhte Korrosionsgefahr für Endlagerbehälter und metallische Konstruktionselemente der Endlagerräume durch Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit.*
- *Es kann zu möglichen Veränderungen der hydraulischen Bedingungen infolge der Entwicklung einer ungesättigten Zone im Wirtsgestein durch längere Drainage kommen.*
- *Es besteht die Möglichkeit der Karbonatisierung von Verfüllmaterial in Gebinden mit schwach- und mittelaktiven Abfällen sowie Ausfällung von Karbonaten an Mörtel-, Strecken- und Kammerausbauten sowie Mörtelverfüllungen.*
- *Mikrobielle Aktivität und Bildung von Biofilmen ist möglich.*

-
- *Das Risiko von Störfällen, wie Feuer, Eindringen von Grundwasser u. a. wird erhöht.*
 - *Das Risiko von unbefugtem Eindringen in das Endlager und Missbrauch wird erhöht.*
 - *Die Einhaltung der Safeguards-Anforderungen ist für den endgelagerten Kernbrennstoff zu gewährleisten.*

Technische Maßnahmen wie die Erhöhung der Stabilität und Korrosionsfestigkeit von Endlagerbehältern tragen zur Erhöhung der Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers bei. Andere Maßnahmen, wie z. B. das Endlagern von Abfallgebinden in unverfüllten Röhren oder unverfüllten Kammern, erleichtern den Zutritt von Grundwasser zu den Abfallgebinden, was die Radionuklidmigration begünstigen kann.

Ein entscheidender Kostenfaktor einer Rückholbarkeitsoption wird durch ein verlängertes Offenhalten von Endlagerteilen oder des Endlagers insgesamt verursacht. Möglich sind erhöhte Aufwendungen für das Monitoring nach Verschluss des Endlagers, für die Gewährleistung des physischen Schutzes der eingelagerten Abfälle und die Einhaltung der Safeguardsanforderungen.

Die Ergebnisse der Betrachtung generischer Endlager in Deutschland werden im Folgenden für die unterschiedlichen Wirtsgesteine dargestellt. Dabei sind allgemein keine größeren Unterschiede zwischen dem Ein-Endlager-Konzept oder zwei getrennten Endlagern für wärmeentwickelnde und vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle festzustellen.

Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle erfolgt in allen Varianten in räumlich voneinander getrennten Bereichen des Grubengebäudes. Grundsätzlich sind keine signifikanten Unterschiede bei getrennten Endlagern zu den hier diskutierten Aspekten der Sicherheitsrelevanz einer Rückholbarkeit erkennbar.

Anschließend erfolgen die Behandlung von Salz-, Tongestein- und Kristallin-Systemen sowie eine Befassung mit Endlagern unter Tonüberdeckung und alternativen Ansätzen wie Demonstrationsphase, Pilotabschnitt und Monitoring.

- 6) Im Rahmen des ESDRED-Projektes (ESDRED 2009) befasste sich die DBE ein weiteres Mal mit dem Thema Rückholung / Rückholbarkeit. Die unter Leitung der NGR durchgeführte Studie umfasste die folgenden zwei Aufgaben:
 1. Erstellung einer Übersicht aller Aspekte zur Rückholbarkeit in den gegenwärtigen Entsorgungskonzepten der im ESDRED-Projekt beteiligten Länder,
 2. Darstellung zweier spezifischer Rückholbarkeitsstudien mit zwei unterschiedlichen zugrunde gelegten Entsorgungskonzepten.

Die Studie verweist darauf, dass die gegenwärtigen Entsorgungskonzepte mit Endlagern im geologischen Untergrund ohne Rückholung geplant sind, dass aber der Aspekt der Rückholbarkeit hinsichtlich Akzeptanz einer Entsorgungslösung und Erhöhung der Flexibilität als zunehmend wichtig angesehen wird. Rückholbarkeit fordert die Reversibilität einzelner Arbeitsschritte, welche nur unter Einbau geeigneter technischer Maßnahmen in die Lagerauslegung erreicht werden kann.

Der Vergleich der nationalen Entsorgungskonzepte und deren Ausrichtung auf Belange der Rückholbarkeit (Aufgabe 1) ergaben, dass eine Reihe von nationalen Anforderungen vorhanden ist, die den Grad der Rückholbarkeit in der Endlagerung bis zum Verschluss regeln. Der Bericht hält fest, dass Deutschland an zukünftige Endlager keine Anforderungen bezüglich Reversibilität oder Rückholbarkeit stellt, während andere Nationen diese sogar auf Gesetzesstufe fordern (z. B. Frankreich). Im Mittel haben viele Länder Anforderungen, nach denen die Rückholung der Abfälle während des Lagerbetriebs vorgesehen werden soll, jedoch ohne dafür das Design des Lagers nachhaltig zu ändern.

Eine im Rahmen von Aufgabe 2 erfolgte Durchsicht des französischen Konzepts (gesetzliche Vorgabe von Reversibilität der Einlagerungsschritte) kommt zum Schluss, dass das französische Lagerkonzept die gesetzliche Vorlage effektiv umgesetzt hat. Zum deutschen Endlagerkonzept (mit Lagerung der Abfälle in vertikalen Bohrlöchern) wurde festgehalten, dass das Konzept generell dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Es wurden in diesem Zusammenhang aber auch spezifische Kommentare bezüglich Auffahren des Endlagers in Salz, Einlagerungstechnik und die Möglichkeiten der Rückholbarkeit der Behälter formuliert. Es wird angefügt, dass die Berücksichtigung dieser Kommentare in der Auslegung der Anlage ohne große Modifikationen im Lagerdesign umgesetzt werden könne.

Das Sicherheitskonzept der vertikalen Lagerung der Abfälle im deutschen Konzept ist auf eine schnelle und permanente Isolation der Abfälle im Salz ausgerichtet. In der Studie wurden daher umsetzbare Ideen gesucht, wie dieses nicht auf Rückholbarkeit ausgerichtete Konzept dennoch reversible Elemente einbauen könne. Die Resultate der Studie wurden 2007 veröffentlicht, die Dokumente sind jedoch nur ESDRED-Partnern zugänglich.

Die vorstehenden Beispiele zeigen, dass die bisherige Befassung deutscher Institutionen (Forschungsstellen) mit dem Thema Rückholung / Rückholbarkeit praktisch ausschließlich in Form von Machbarkeits- oder Desk-Studien erfolgte. Experimentelle Untersuchungen zur Handhabung abgelagerter Endlagerbehälter wurden praktisch nicht realisiert.

A3 Bestrebungen zur Rückholbarkeit / Reversibilität in anderen Ländern

Die Rückholbarkeit ist ein Thema „en vogue“. Die vom 14. Bis 17. Dezember 2010 in Reims abgehaltene Konferenz zu diesem Thema ist Ausdruck davon. Ausgehend von den Beiträgen zu dieser Konferenz werden im Folgenden die Bestrebungen in Richtung Rückholbarkeit und Reversibilität anderer Länder dargestellt. Prinzipiell wurde an der Konferenz unterschieden zwischen *reversibility* (Fähigkeit, eine Entscheidung rückgängig zu machen), *retrievability* (Rückholbarkeit) und *removeability* bzw. *recoverability* (Bergungsfähigkeit).

Diverse internationale Endlagerkonzepte sehen eine Rückholbarkeit der Abfallgebinde vor, nur in wenigen ist jedoch eine Rückholbarkeit auf Gesetzesstufe verankert. Oft wurden nur Meinungen, Absichtserklärungen und Wünsche vorgebracht. Allen schien die Option Rückholbarkeit mehr oder weniger Unwohlsein zu verursachen. Die Berücksichtigung der Rückholbarkeit wird letztendlich als Mittel angesehen, die Realisierung eines Endlagers zu erleichtern, da ja nichts „Endgültiges“ geschaffen werde und spätere Generationen bei Bedarf die Abfälle umlagern und/oder als Rohstoffe nutzen könnten und ihnen so Optionen offen gelassen werden.

Die Konsequenzen der Rückholbarkeit bezüglich der Langzeitsicherheit wurden in bescheidenerem Umfang diskutiert. In Reims wurde jedoch oft betont, dass die Option der Rückholung keinesfalls die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen dürfe.

Betrachtete Zeiträume, über die die Abfälle rückgeholt werden können, sind dabei oft bewusst nicht oder nur unklar spezifiziert. Man geht im Allgemeinen davon aus, dass über den Verschlusszeitpunkt des Endlagers hinaus nur relativ kurze Zeiträume berücksichtigt werden können, in denen Informationen zum Endlager weitergegeben werden können und die technischen Möglichkeiten zur Rückholung noch gegeben sind. Gerade die Betonung der Notwendigkeit des schrittweisen Vorgehens mit der jeweiligen Möglichkeit der Revision der Entscheidung bis zum Verschluss des Endlagers offenbart eine zögerliche Haltung und macht eine gewisse Verunsicherung deutlich, die nur durch mehr Erkenntnisse über intensive Forschungsarbeiten beseitigt werden kann.

Für die einzelnen Länder lassen sich die folgenden Fakten ableiten:

Belgien

Im Jahr 1998 entschied die Regierung, dass die Rückholbarkeit eine Bedingung sei, die aber keinesfalls die Auslegung des Endlagers dominieren dürfe.

Der Begriff “reversibility” ist mit der Betriebsphase des Endlagers verknüpft, d.h. Reversibilität wird gefordert, bis ein Versatz eingebracht und das Endlager versiegelt worden ist. Der Begriff “retrievability” wird ebenfalls mit der Betriebsphase verknüpft, aber für den Fall, in dem bereits Versatz eingebracht und Sperrbauwerke errichtet sind und lediglich die Schächte und Strecken noch offen stehen. Der Begriff gilt auch für die Phase nach dem Verschluss, solange die Integrität der Behälter vorausgesetzt werden kann. Über diesen Zeitpunkt der Behälterintegrität hinaus, wird von “recoverability” gesprochen. Die Abfälle sind dann weiter rückholbar, aber nur unter größerem technischem (unter anderem weil strahlenschutzbedingtem) Aufwand.

Finnland

Durch das Parlament wurde 2001 festgelegt, dass ab dem Jahr 2020 eingelagert werden darf, unter der Voraussetzung der Möglichkeit der späteren Öffnung zwecks Rückholung. Die berücksichtigte Option der Rückholbarkeit darf die Sicherheit nicht gefährden. Die “retrievability“ soll die Möglichkeit der Behandlung

des Abfalls nach Verfügbarkeit alternativer Technologien ermöglichen und ist daher eine Bedingung für die Lizenzierung eines Endlagers.

Frankreich

In Frankreich ist die Rückholbarkeit seit 2006 gesetzlich festgeschrieben: Ein Endlager muss für mindestens 100 Jahre reversibel sein. Dabei folgt diese Forderung keinen technischen Gründen, sondern gesellschaftlich-ethischen.

Aufgrund dieser Vorgaben wurde das Lagerdesign angepasst. Die horizontalen Einlagerungsstrecken werden gemäß aktuellem Einlagerungskonzept mit Stahlröhren versehen, aus denen die Abfallkokillen ohne zusätzliche bergbautechnische Maßnahmen wieder zu entnehmen sind. Dazu wurden Tests durchgeführt, um eine Rückholung zumindest prinzipiell zu demonstrieren.

England (UK)

Die Entscheidung zur Option Rückholung wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, an dem die beteiligten Parteien zusammen mit den lokalen Organisationen dies dann festlegen. Voraussetzung für die Berücksichtigung der Rückholbarkeit ist, dass die Auslegung des Endlagers die Rückholung nicht unmöglich macht.

Japan

Gemäß Aussagen an der Konferenz ist die Reversibilität und Rückholbarkeit Teil der Sicherheitskommunikation, die sicherstellt, dass alle beteiligten Organisationen und Gruppen Vertrauen („confidence“) in die Sicherheit der Anlage und das dafür angepasste Design gewinnen und darin übereinstimmen, dass nach Verschluss keine weitere Rückholung mehr notwendig ist. Der Zeitraum für die Rückholung beschränkt sich auf die Betriebsphase bis zum Verschluss.

NEA

Das NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC) nennt in NEA (2007) zum Thema „Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste“ explizit keine zu betrachtenden Zeiträume. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei einem Verzicht auf die Verfüllung und Versiegelung des Endlagers für Zeiträume > 100 Jahre das Risiko wächst, dass organisatorische, finanzielle Maßnahmen oder auch die technischen Gegebenheiten zum Verschluss des Endlagers verloren gehen können. Zudem besteht bei langfristigem Offenhalten von Teilen des Endlagers die Möglichkeit eines Wasserzutritts durch Hohlräume oder auch die Gefahr eines unautorisierten Zugriffs auf das eingelagerte hochradioaktive Material.

Die Rückholung des Abfalls wird in jedem Fall mit der Zeit aufwändiger. Konvergenzvorgänge verschließen in den Wirtsgesteinen Ton und Salz früher oder später die Hohlräume oder bringen Zugangstunnels zum Einstürzen. Andererseits, so argumentiert die NEA, kühlen wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei Wartezeiten über ca. 200-300 Jahre deutlich ab, bedingt durch den Zerfall der relativ kurzlebigen Spaltprodukte. Die technische Handhabung der Abfälle würde eventuell erleichtert, einerseits wegen

geringerer Temperaturbelastung der Einlagerungsgeräte, andererseits wegen der deutlich verringerten Strahlenbelastung des Personals. Inwiefern die Konsistenz des abgebrannten Kernbrennstoffs nach mehreren hundert Jahren Alterung im eigenen Strahlenfeld und durch den Einfluss von He-Entwicklung im Material eine Wiederaufarbeitung und eine anschließende Behandlung durch Partitioning & Transmutation erlauben würde, ist derzeit nicht bekannt.

Schweden

Das skandinavische Konzept setzt primär auf langlebige Kupferbehälter, die einen langen Einschluss des Abfalls garantieren sollen (> 10.000 Jahre). Eine Rückholbarkeit wird weder gesetzlich gefordert noch ausgeschlossen, die Option ist im Regelwerk nicht vorhanden.

Dennoch hat die SKB in einem 1:1-Versuchen gezeigt, dass die Rückholung eines Abfallbehälters prinzipiell durch eine *in-situ* Aufschlammung der Bentonitbarriere technisch möglich ist (Abb. 4).

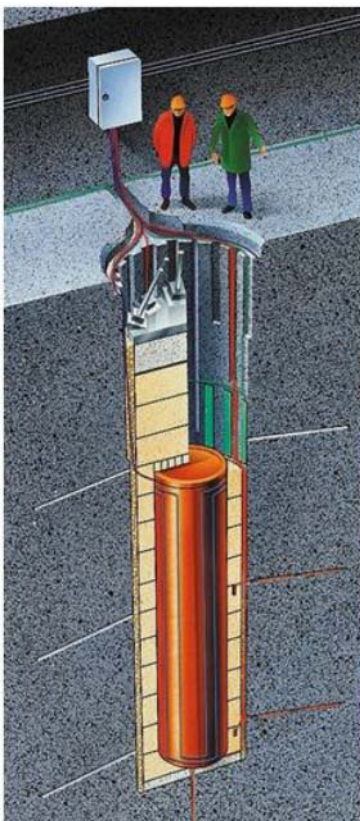


Abb. 4 Technische Demonstration der Rückholung eines KBS-3 Behälters aus einem Bohrloch (SKB, 2006)

Schweiz

In der Schweiz ist eine „Rückholung ohne großen Aufwand“ gesetzlich gefordert. Die Techniken der Rückholung sind zu demonstrieren, bevor die ersten Abfälle eingelagert werden. Die Maßnahmen zur Rückholung dürfen die Langzeitsicherheit des Lagers nicht beeinträchtigen.

Zur Entscheidungsfindung, wann die Rückholung ohne großen Aufwand aufgegeben und das Lager verschlossen wird, dient ein Pilotlager, in dem die Lagerentwicklung modellhaft durch ein intensives Monitoringprogramm verfolgt wird. Der Entscheid über die Dauer der Beobachtungsphase, in der die Rückholung ohne großen Aufwand möglich ist, wird zukünftigen Generationen überlassen. Dazu werden die Zugangsbauwerke offen gehalten, während die Einlagerungsbereiche bereits verfüllt und versiegelt sind. Erst bei Genehmigung des vollständigen Verschlusses werden die Zugangsbauwerke verfüllt (Abb. 5). Ab dann ist die Rückholung der Abfälle nur noch mit erhöhtem (und weiter zunehmendem) Aufwand möglich.

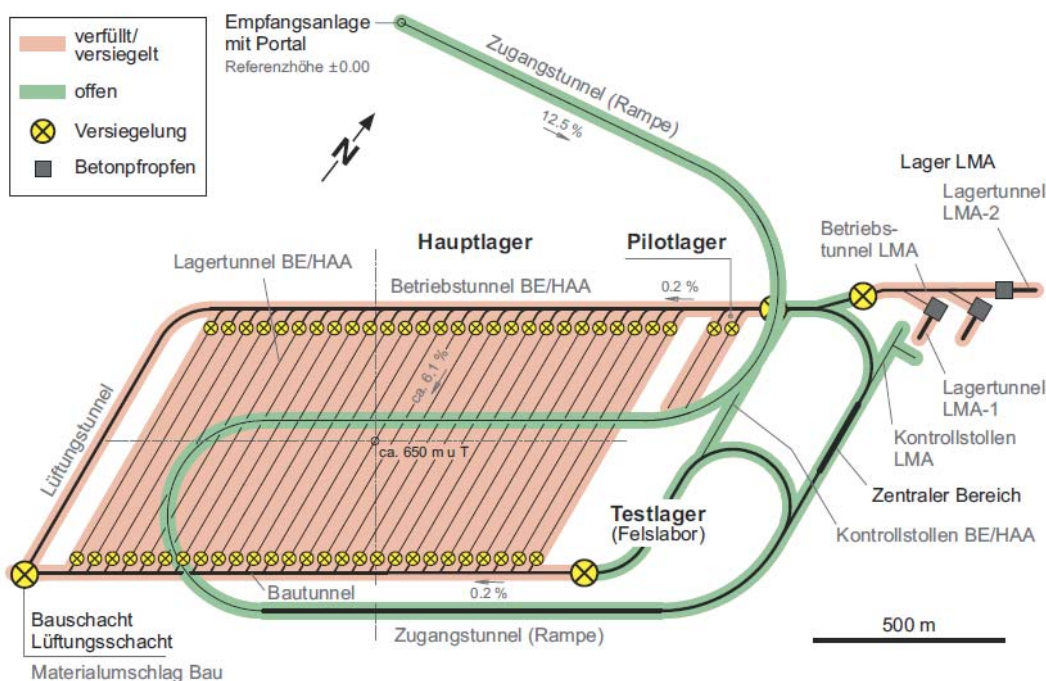


Abb. 5 Zustand des Endlagers in der Beobachtungsphase (Zeitraum zwischen abgeschlossener Einlagerung und Verschluss der Anlage, aus Nagra Technischem Bericht NTB 02-02).

USA

Das US-Programm berücksichtigte Belange zu „revision“ und „retrieval“ während zweier Phasen: Einerseits für die Standortauswahl (1986-87) und andererseits für die Standortempfehlung (2002). Gesetzlich wird aus Gründen der Sicherheit und der Ökonomie eine Rückholbarkeit gefordert. Einerseits regelt die NRC die Zeitdauer, während der aus Sicherheitsgründen die Rückholbarkeit möglich sein soll. Andererseits wird das Endlager als endgültig angesehen, ohne die Notwendigkeit, den Abfall wieder zu entnehmen. Seitens des DOE wird eine Überwachung nach dem Verschluss gefordert, während die NRC keine Rückholbarkeit

vorsieht. Es wird nur angedeutet, dass die Möglichkeit der Rückholung noch eine gewisse Zeit nach dem Verschluss bestehen bleiben sollte.

Grundsätzlich werden die Konzepte der Reversibilität und Rückholbarkeit eher als bedeutsam im Zusammenhang mit Erreichung der öffentlichen Zustimmung zu einem Endlager in tiefen geologischen Formationen gesehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in keinem Rückholbarkeitskonzept Zeiträume > 200 Jahre betrachtet werden. In den meisten Planungen gehen die Überlegungen einige Jahrzehnte über den Zeitraum des geplanten Endlagerbetriebs hinaus.

A4 Tabellen zu Möglichkeiten und Konsequenzen einer Rückholung

In den folgenden vier Tabellen sind Möglichkeiten und Konsequenzen einer Rückholung von Behältern für wärmeentwickelnde Abfälle am Beispiel eines Endlagersystems in steilstehenden Salinarstrukturen (Salzdome) während verschiedener Zeiträume aufgezeigt. Ähnliche Zeitabläufe und entsprechende Konsequenzen können modifiziert auch für die Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen aufgestellt werden.

- Tabelle 1: 0 - 50 Jahre
- Tabelle 2: 50 – 100 Jahre
- Tabelle 3: 100 – 500 Jahre
- Tabelle 4: > 500 Jahre

Zeitphase	Konzept ohne Rückholung	Zu erwartende Prozesse (ohne Rückholung)	Auswirkung auf die Möglichkeit einer Rückholung	Maßnahmen zur Gewährleistung einer Rückholung	Zu erwartende Prozesse (bei Rückholbarkeit)	Konsequenzen für Langzeitsicherheit	Bemerkungen
0 - 50a	ca. 10 a Abklingzeit Streckenlagerung von Pollux-Behältern, ggf. Bohrlochlagerung (Kokillen)	Aufheizung des Einlagerungsbereiches, Anstieg der Temperatur an den Behälterwandungen, Temperaturanstieg im Kontaktbereich zum Wirtsgestein auf maximal 200°C (sicherheitskonzeptionelle Grenztemperatur).	Temperatur im Einlagerungsbereich überschreitet betriebliche Grenztemperatur für maschinelle bzw. manuelle Rückholmaßnahmen erheblich. Arbeitsmittel und Infrastruktur zur Rückholung von Behältern prinzipiell vorhanden, Betriebskonzept zum Auffahren versetzter Strecken und der Bergung von Polluxbehältern muss vor Einlagerung entwickelt werden. Eine Rückholung von Kokillen aus Einlagerungsbohrlöchern ist technisch fraglich.	Zwischenlagerzeit auf > 50 a erhöhen und/oder entsprechend geringere Behälterbeladung, um Temperaturbegrenzung der Behälteroberfläche auf < 100°C zu gewährleisten. Eine betrieblich akzeptable Arbeitstemperatur (inkl. Bewetterung) von maximal 70°C muss erreicht werden.	a) Geringere Behältertemperatur reduziert die Geschwindigkeit der Konvergenz der Einlagerungsstrecken bzw. der Versatzkompaktion ca. um den Faktor 50 – 100. b) Im Fall von thermisch begründeter geringerer Behälterbeladung steigt die Behälteranzahl und damit das erforderliche Volumen der Einlagerungsbereiche um ca. den Faktor 2 an.	a) Wahrscheinlichkeit früher Lösungszutritte (z. B. aus unentdeckten Lösungstaschen) zu den Abfallbehältern möglich; dadurch wäre ggf. eine frühe, erhöhte Behälterkorrosion und höhere Gasbildung verbunden. Eine erhöhte Gasbildungsrate kann die Konvergenzgeschwindigkeit weiter drosseln. b) Erheblich größerer Flächenbedarf der Einlagerungsbereiche, damit erhöhte Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens. (je größer der Flächenbedarf des Endlagers, desto aufwändiger der Langzeitsicherheitsnachweis)	Im Fall geringerer Behälterbeladung erhebliche Kostensteigerung durch zusätzlich erforderliche Auffahrungen und den Anstieg der Behälteranzahl. Möglicherweise stehen erste Pilotanlagen für Partitioning & Transmutation bereits zur Verfügung. Auch diese Anlagen würden jedoch wieder radioaktive Abfälle verursachen.

Zeitphase	Konzept ohne Rückholung	Zu erwartende Prozesse (ohne Rückholung)	Auswirkung auf die Möglichkeit einer Rückholung	Maßnahmen zur Gewährleistung einer Rückholung	Zu erwartende Prozesse (bei Rückholbarkeit)	Konsequenzen für Langzeitsicherheit	Bemerkungen
50 – 100 a	Abschluss der Einlagerung und Endlagerverschluss	<p>Weiteres Aufheizen der Einlagerungsbereiche, Erreichen der Maximaltemperatur an den Behälterwandungen, Temperaturanstieg im Kontaktbereich zum Wirtsgestein auf maximal 200°C.</p> <p>Mechanische Stabilität ist für alle Behältertypen zu unterstellen. Gasdichtheit nur für Polluxbehälter zu unterstellen.</p>	<p>Ende der Möglichkeit der Rückholung aus dem laufenden Einlagerungsbetrieb heraus</p> <p>a) vor Verschluss: Arbeitsmittel und Infrastruktur zur Rückholung von Behältern prinzipiell vorhanden; eine Rückholung von Kokillen in Einlagerungsbohrlöchern technisch fraglich.</p> <p>b) Nach Verschluss: Prinzipiell Neuauf-fahrung des Bergwerks und der Einlagerungsbereiche erforderlich. Guter Informationserhalt zur Lage der Behälter notwendig; thermisch bedingte Dislokation von Behältern erschwert deren Ortung und Bergung.</p>	<p>Erhalt der übertägigen Infrastruktur;</p> <p>a) Bohrlochlagerung: Sicherstellung des Zugangs bis zu den abgedämmten Einlagerungsbereichen / Bohrlochstopfen</p> <p>b) Streckenlagerung: Sicherstellung des Zugangs über die Schächte bis zum schachtseitigen Ende der Streckenabdichtungen, (keine erhebliche Erleichterung der Rückholbarkeit)</p> <p>Arbeitsmittel zur Rückholung von Behältern müssen vorgehalten werden oder kurzfristig beschaffbar sein.</p> <p>Weitere Maßnahmen: Ggf. Verrohrung von Bohrlöchern, stärkere, ggf. korrosionsgeschützte Behälterwandungen für Kokillen.</p>	<p>Zu a) Hohlraumkonvergenz: Technischer Aufwand für Offenhaltung und ggf. Aussteifung der untertägigen Infrastrukturbereiche (Richtstrecken, Querschläge, Infrastrukturbereich, Schächte (u.a. Nachreißen der Konturen erforderlich), sofern ein Offenhalten für notwendig erachtet wird.</p> <p>Zu b) geringerer Aufwand: nur Offenhaltung der Schachtanlagen</p>	<p>Je nach Material für einen etwaigen Hohlraumausbau: (zusätzliche Metallmassen = zusätzliche korrosionsbedingte Gasbildung, sofern ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung steht (wenig wahrscheinlich)); <i>Spritzbetonausbau führt potentiell zu alkalischen Verhältnissen (mobilisationsbegünstigend)</i>, Gebirge läuft auf den Hohlraumausbau und verschließt relativ schnell Risse und Porositäten in der Auflockerungszone als bei kompaktierbarem Versatz.</p>	<p>Kosten für Offenhaltung der untertägigen Infrastrukturbereiche und für den Erhalt der übertägigen Infrastruktur im Bereich einiger 10 Mio. €/a.</p> <p>Möglicherweise gibt es dannzumal bereits industriereife Anlagen für Partitioning & Transmutation. Auch diese Anlagen würden jedoch wieder radioaktive Abfälle verursachen.</p>

Zeitphase	Konzept ohne Rückholung	Zu erwartende Prozesse (ohne Rückholung)	Auswirkung auf die Möglichkeit einer Rückholung	Maßnahmen zur Gewährleistung einer Rückholung	Zu erwartende Prozesse (bei Rückholbarkeit)	Konsequenzen für Langzeitsicherheit	Bemerkungen
100-500 a	Keine Maßnahmen, ggf. beschränktes Monitoring über 100 Jahre hinaus, Informationserhalt;	Erreichen der Maximaltemperatur im Wirtsgestein, maximale Temperaturspannungen in der Salzstruktur. Vollständiger Verlust der mechanischen Stabilität der Kokillen. Mechanische Stabilität für Pollux-Behälter weiterhin zu unterstellen, Gasdichtheit nicht mehr gewährleistet. Abschluss der Konvergenz, Versatzkompaktion und der Verheilung der Auflockerungszonen, Funktionstüchtigkeit der Schacht- und Streckenverschlüsse kann unterstellt werden. Kein Einfluss externer natürlicher Phänomene auf das Endlagersystem	Fortgeschrittene thermisch bedingte Dislokation von Behältern erschwert Ortung und Bergung von Behältern; Bergung von Kokillen nach heutigem Stand der Technik nur noch als „Re-Mining“ möglich Ende realistischer Möglichkeiten, den Strecken- und Schachtausbau aufrecht zu halten; Endlagerverschluss erforderlich.	„Re-Mining“ erforderlich; Bergungsrisiken bzgl. der Behälterortung und der Behälterintegrität nehmen zu. Umfangreiche Sondierungs- und Strahlenschutzmaßnahmen im Fall eines „Re-Mining“ erforderlich.	Bei Ausbau noch kein vollständiger Abschluss der Konvergenz, Versatzkompaktion und der Verheilung der Auflockerungszonen;	Noch keine vollständige Dicht- und Stützwirkung des Versatzes; Anforderungen an Schacht- und Streckenabdichtungen bestehen länger als bei Konzepten ohne Rückholungsoption; Falls der Ausbau nicht vor Verschluss entfernt wird können Effekte auftreten, wie für Zeitraum 50-100a beschrieben.	Sehr hohe Kosten für Re-Mining und Bergung; finanzielle Zuständigkeiten für Maßnahmen möglicherweise gegeben, aber nicht mehr garantiert.

Zeit-Phase	Konzept ohne Rückholung	Zu erwartende Prozesse (ohne Rückholung)	Auswirkung auf die Möglichkeit einer Rückholung	Maßnahmen zur Gewährleistung einer Rückholung	Zu erwartende Prozesse (bei Rückholbarkeit)	Konsequenzen für Langzeitsicherheit	Bemerkungen
> 500 a	Keine Maßnahmen; Informationserhalt kann nicht mehr unterstellt werden.	<p>> 1000 a: Rückgang der Wärmeproduktion, natürliche geothermische Gradienten stellen sich wieder ein.</p> <p>> 1000 a: Zunehmende Möglichkeit Ausfall der mechanischen Integrität aller Behälter zu erwarten.</p> <p>> 10.000 a: Schacht- und Streckenverschlüsse in ihrer Dichtwirkung durch kompaktierten Versatz und Wirtsgestein ersetzt. Strahlungsbedingte Veränderungen im Abfall, Fixierungsmittel oder Abfallbehälter halten weiter an; bei Lösungskontakt mit Abfällen: Diffusionsdominierter Radionuklidtransport.</p> <p>≥ 100.000 a: Kaltzeit mit Permafrost und Inlandeisüberföhrung wahrscheinlich.</p>	Möglichkeit und Intention der Rückholung aufgrund des Informationsverlustes zur Existenz des Endlagersystems obsolet.	<p>Möglichkeit und Intention der Rückholung aufgrund des Informationsverlustes zur Existenz des Endlagersystems längerfristig obsolet.</p> <p>Prognosen über die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten im Zeitraum > 500a werden völlig spekulativ.</p>	Konvergenz, Versatzkompaktion und Verheilung der Auflockerungszonen möglicherweise abgeschlossen.	<p>Falls Ausbau nicht entfernt wird: Effekte wie für Zeitraum 50-100 a beschrieben.</p> <p>Beginn der Möglichkeit unbeabsichtigter menschlicher Eingriffe in das Endlagersystem aufgrund des Informationsverlustes.</p>	-