

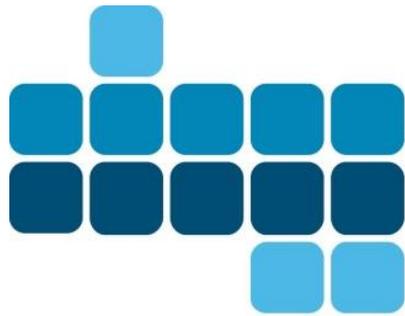
Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

ENTRIA-Bericht-2015-01
Darstellung von Entsorgungsoptionen

Verfasser: Dr. Detlef Appel, Dipl-Geol. Jürgen Kreusch,
Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 40</p>



ENTRIA

ENTSORGUNGSOPTIONEN FÜR RADIOAKTIVE RESTSTOFFE:
INTERDISZIPLINÄRE ANALYSEN UND
ENTWICKLUNG VON BEWERTUNGSGRUNDLAGEN

ENTRIA-Bericht-2015-01

„Darstellung von Entsorgungsoptionen“

Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung

Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung

Modul 1: Entsorgungsoptionen und –systeme

Detlef Appel, Jürgen Kreusch, Wolfgang Neumann

Kontakt

Dr. Detlef Appel
PanGeo – Geowissenschaftliches Büro
Ibykusweg 23
30629 Hannover
0511 / 95 86 710
appel-pangeo@t-online.de

Dipl.-Geol. Jürgen Kreusch
Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann
intac GmbH
Kleine Düwelstr. 21
30171 Hannover
0511 / 85 30 55
jkreusch@intac-hannover.de
wneumann@intac-hannover.de

Leibniz Universität Hannover
Christian Tzschentke
Herrenhäuser Str. 2
30419 Hannover
0511 / 762 – 14322
www.entria.de
info@entria.de

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

ENTRIA wird vom BMBF unter den Kennzeichen 02S9082 A bis F gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

ENTRIA-Bericht-2015-01: Darstellung von Entsorgungsoptionen. Detlef Appel, Jürgen Kreusch und Wolfgang Neumann, Hannover

Inhalt

Teil A Erläuterungsbericht

1	Ziele des Berichts	A - 1
2	Vorgehensweise und Darstellung	A - 3
2.1	Behandelte Entsorgungsoptionen	A - 3
2.2	Datenblätter	A - 5
2.3	Operative Phasen der Entsorgungsoptionen	A - 7
3	Begriffe	A - 13
4	Quellen Teil A	A - 17

Teil B Datenblätter

Datenblatt ELo

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit"

Datenblatt Elm

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit"

Datenblatt LzL

Darstellung der Entsorgungsoption "Langzeitige Lagerung der Abfälle in Bauwerken"

Datenblatt DLg

Darstellung der Entsorgungsoption „Dauerlagerung der radioaktiven Abfälle“

Datenblatt sEO

Darstellung der „sonstigen Entsorgungsoptionen“

Datenblatt kpV

Darstellung der „konservativ-pragmatische Vorgehensweise“

Datenblatt P&T

Abtrennung und Umwandlung (Partitioning & Transmutation - P&T)

Datenblatt Abfälle

Kategorisierung der Abfälle in Deutschland

Teil A Erläuterungsbericht

1 Ziele des Berichts

Im vorliegenden Arbeitsbericht zum ENTRIA-Transversalprojekt "Interdisziplinäre Risikoforschung" werden Ziele und charakteristische Merkmale ausgewählter Entsorgungsoptionen dar gestellt, die seit Beginn der Entsorgungsdiskussion in den 1950er und 1960er Jahren immer wieder im Brennpunkt der fachlichen und gesellschaftlichen Auseinandersetzung um die Entsorgung hochradioaktiver bzw. wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle standen. Diese Optionen decken auch die Bandbreite der heute weltweit verfolgten bzw. diskutierten Entsorgungsansätze im Hinblick auf ihre technischen Merkmale und die angestrebten Ziele weitgehend, allerdings im Detail nicht vollständig, ab und umfassen als spezielle Fälle auch die drei im ENTRIA-Vorhaben im Vordergrund der Betrachtung stehenden Entsorgungsoptionen "Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit", "Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit" sowie "Oberflächenlagerung" (im Sinne langzeitiger Lagerung in Bauwerken an der Erdoberfläche).

Ziel der Ausweitung der Optionsdarstellung im Transversalprojekt "Interdisziplinäre Risikoforschung" über die drei ENTRIA-Optionen hinaus ist die Identifizierung, Beurteilung und gegebenenfalls Berücksichtigung von Optionen bzw. Varianten von Optionen, die insbesondere hinsichtlich ihrer risikorelevanten Merkmale eine Ergänzung zu den drei ENTRIA-Optionen darstellen können oder einen relativierenden Blick auf die Risiken bei den ENTRIA-Optionen erlauben. Hierzu gehören auch aus fachlicher Sicht exotisch anmutende Optionen. Damit wird gleichzeitig ein Beitrag zur Überprüfung der Gründe für die derzeit geringere Bedeutung der im Vorhaben nicht berücksichtigten Optionen geleistet.

Der Arbeitsbericht soll dazu beitragen, unter den am Transversalprojekt Beteiligten ein gemeinsames Verständnis über die verschiedenen Entsorgungsoptionen zu entwickeln. Er bildet darüber hinaus eine wesentliche Grundlage für die im weiteren Verlauf des Transversalprojekts vorgesehene bzw. mögliche

- Ausdehnung der Betrachtungen auf Entsorgungsoptionen, die über die drei ENT-RIA-Optionen hinausgehen, bzw. auf wichtige Varianten oder Ergänzungen von Optionen,
- integrale Darstellung der gesamten Entsorgungskette der hochradioaktiven bzw. wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle entsprechend den genannten Optionen einschließlich etwaiger ergänzender Behandlungsschritte für Abfälle (z.B. thermische Behandlung Organik haltiger Abfälle oder Transmutation langlebiger Nuklide),
- umfassende Auseinandersetzung mit den wesentlichen Risiken (einschließlich ihrer Wahrnehmung), die mit verschiedenen Entsorgungsoptionen verbunden sind, als Grundlage für die Beurteilung und den risikobezogenen Vergleich der Entsorgungsoptionen.

Einen Überblick über die Bandbreite der seit geraumer Zeit hauptsächlich diskutierten Entsorgungs- bzw. Lageroptionen für radioaktive Abfälle und die Hauptphasen ihrer Umsetzung gibt Abb. A-1 in Kap. 2.3.

2 Vorgehensweise und Darstellung

2.1 Behandelte Entsorgungsoptionen

Drei Entsorgungsoptionen aus der in Kap. 1 dargestellten Bandbreite diskutierter Optionen werden in Teil B dieses Arbeitsberichts anhand **nationaler Entsorgungskonzepte beispielhaft** erläutert. Dabei handelt es sich um Entsorgungsstrategien, die einerseits grundsätzlich den im ENTRIA-Projekt im Vordergrund stehenden Hauptoptionen entsprechen und andererseits derzeit in nationalen Entsorgungsprogrammen umgesetzt werden oder wahrscheinlich als Grundlage für die geplante Umsetzung dienen werden. Als Beispiele für die ENTRIA-Optionen dienen:

- Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen entsprechend der bis 2010 gültigen Endlagerplanung in Deutschland (s. dazu unten) als Beispiel für die Option Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (Kurzbezeichnung: Entsorgungsoption ELo); dieses Vorgehen ist 2010 mit den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) um allgemeine Vorgaben zu Rückholbarkeit, Bergbarkeit und Monitoring („Kontroll- und Beweissicherungsprogramm“) ergänzt worden, worauf in der Darstellung ebenfalls eingegangen wird,
- die in der Schweiz als Entsorgungsstrategie (für alle Arten radioaktiver Abfälle) gesetzlich vorgeschriebene "geologische Tiefenlagerung" (in tiefen geologischen Formationen) als Beispiel für die Option Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (Kurzbezeichnung: Entsorgungsoption Elm),
- die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle im bestehenden niederländischen Zwischenlager (COVRA) als Beispiel für die Option "Langzeitige Lagerung" im Sinne langfristiger Lagerung der Abfälle in Bauwerken an der Erdoberfläche (Kurzbezeichnung: Entsorgungsoption LzL; hier wird auch kurz auf die untertägige Langzeitlagerung in Bergwerken, Tunneln oder Kavernen eingegangen).

Diese Konzepte decken hinsichtlich wichtiger risikorelevanter Merkmale die ENTRIA-Optionen "Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit", "Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit" und "Oberflächenlagerung" ab. Sie bieten die

Möglichkeit, die operativen und sicherheitlichen Charakteristika der Optionen mit den damit verfolgten Zielen anhand gut dokumentierter konkreter Fälle beispielhaft zu beschreiben. Die Beispiele sind nicht identisch mit den in den ENTRIA-Vertikalprojekten erarbeiteten Referenzkonzepten, anhand derer sicherheitstechnische Aspekte der Optionen in den Vertikalprojekten untersucht werden und die auch für exemplarische Bewertungen innerhalb der Transversalprojekte genutzt werden sollen.

Anders als es in der Konzeptbezeichnung "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" zum Ausdruck kommt, wird eine Entsorgungsoption, die frei ist von jeglichen Elementen der Rückholbarkeit bzw. Rückholung von Abfällen und des Monitorings, nach gegenwärtiger Kenntnis allerdings nirgendwo umgesetzt oder geplant. Das in Deutschland bis 2010 verfolgte Vorgehen bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen entsprach in wichtigen Aspekten dieser Option, seither bestehen aber gewisse Anforderungen zu Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit von Abfällen und zu Monitoring (BMU 2010: „Kontroll- und Beweissicherungsprogramm“). Das heute verbindliche Vorgehen wurde als Beispiel für die Option "Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" gewählt, wobei in der Darstellung auf die Unterschiede zu der zuvor verfolgten "reinen" Option ohne Rückholbarkeit und Monitoring bzw. Überwachung eingegangen wird.

Das in Deutschland bis 2010 praktizierte Vorgehen bei der Entsorgung hochradioaktiver bzw. wärmeentwickelnder Abfälle in Deutschland war - abgesehen vom durchgängig verfolgten übergeordneten Ziel der passiv sicheren Endlagerung in einem Salzstock ohne Überwachung und Berücksichtigung der Rückholbarkeit von Abfällen - im Laufe der Zeit durch eine Reihe gravierender Veränderungen in wichtigen sicherheitstechnischen Aspekten des ursprünglich vorgesehenen und angekündigten Entsorgungsweges gekennzeichnet. Dieses Vorgehen wich von dem in anderen nationalen Entsorgungsstrategien mit - in der Regel - geplantem Verlauf, deutlich ab und wird auf Grund seiner Besonderheiten als eigenständige deutschlandspezifische Vorgehensweise unter der Bezeichnung "konservativ-pragmatische Vorgehensweise" (Kurzbezeichnung kpV, s. Datenblatt kpV) behandelt.

Neben den bisher genannten Entsorgungsoptionen bzw. Vorgehensweisen wird im Datenblatt DLg ausführlich die zeitlich nicht definierte bzw. - sofern nicht irgend-

wann eine andere Entsorgungsoption umgesetzt wird - zeitlich praktisch unbegrenzte Dauerlagerung (Kurzbezeichnung DLg) der Abfälle beschrieben, die auch unter der Bezeichnungen "Hüten" oder "Hüteprinzip" bekannt ist.

Zur Abrundung dient schließlich das Datenblatt sEO, in dem „sonstige Entsorgungsoptionen“ kurz dargestellt werden. Es handelt sich dabei um teilweise "exotisch" anmutende Optionen, die in der Vergangenheit als Alternative zu herkömmlichen Entsorgungsoptionen diskutiert und zum Teil auch untersucht worden sind.

2.2 Datenblätter

Der vorliegende Arbeitsbericht ist so strukturiert, dass er im Bedarfsfall in einfacher Weise um weitere Entsorgungsoptionen, Optionsvarianten oder Optionsergänzungen sowie um optionsunabhängige Behandlungsschritte für Abfälle und weitere Beurteilungsgrundlagen ergänzt werden kann. Zu letzteren gehören beispielsweise Informationen über die im ENTRIA-Projekt im Vordergrund stehenden wärmeentwickelnden Abfälle und solche nicht wärmeentwickelnden Abfälle, die mangels Entsorgungsalternative möglicherweise zusätzlich in das in Deutschland geplante Endlager für stark wärmeentwickelnde Abfälle eingelagert werden müssen. Die Darstellungen der Optionen und ihrer Merkmale sowie der weiteren Beurteilungsgrundlagen können im weiteren Projektverlauf ergänzt, zunehmend detailliert und - soweit möglich - auch quantitativ beschrieben werden. Sie werden daher in Form von Datenblättern dargestellt, deren aktuelle Fassungen in Teil B dieses Berichts zusammengestellt sind. Ihr Inhalt kann im weiteren Projektverlauf auf einfache Weise verändert werden, ohne dass die Grundstruktur des Berichts grundlegend verändert werden muss.

Datenblätter zu Optionen bzw. Vorgehensweisen

Diese Datenblätter sind zunächst auf die in Kap. 2.1 genannten Entsorgungskonzepte mit den Kurzbezeichnungen ELo, Elm, LzL, DLg und SEo sowie die frühere konservativ-pragmatische Vorgehensweise in Deutschland (kpV) beschränkt. Im weiteren Projektverlauf können sich durch die Berücksichtigung weiterer Optionen bzw. als Folge neuer Konzeptentwicklungen Ergänzungen und Veränderungen ergeben.

Die Datenblätter zu den Optionen bzw. Vorgehensweisen enthalten - soweit entsprechende Informationen verfügbar sind - jeweils folgende Angaben:

- Vorbemerkung
- Wesentliche Merkmale und Ziele
- Mögliche Varianten und Ergänzungen
- Begründung
- Gewährleistung der Sicherheit
- Proliferation, Safeguards
- Ungewissheiten und Risiken
- Generelle Vor- und Nachteile
- Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen
- Phasengliederung (s. dazu Kap. 2.3)
- Offene Fragen
- Datenblattbezogene Quellen

Die Darstellungen beziehen sich vorrangig auf derzeit wesentlich erscheinende sicherheitsorientierte naturwissenschaftlich-technische Aspekte. Inwieweit ethische, gesellschaftliche, ökonomische bzw. rechtliche Gesichtspunkte zu behandeln sind, bleibt zu klären. Die Darstellungen bestehen im gegenwärtigen Projektstadium vor allem aus kurzen zusammenfassenden Textpassagen. Sie können gegebenenfalls im weiteren Projektverlauf ergänzt bzw. detailliert werden. Auch Veränderungen der Struktur können künftig sinnvoll oder erforderlich sein.

Neben den bei der Darstellung der Entsorgungsoptionen berücksichtigten charakteristischen Eigenschaften in den zugehörigen Datenblättern werden in Kap. 2.3 ausführlicher auch die operativen Phasen dargestellt, in denen die verschiedenen Optionen durch bestimmte vergleichbare planungs- und umsetzungsbezogene Aktivitäten gekennzeichnet sind und in denen sie bestimmte Funktionen erfüllen bzw. erfüllen müssen.

Datenblatt zu Optionsergänzungen

Das bisher einzige Datenblatt dieser Kategorie behandelt Abtrennung und Transmutation und geht dabei insbesondere auf Vor- und Nachteile dieser Technologie sowie ihre Perspektiven für die Entsorgung, insbesondere Endlagerung, Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle ein (Datenblatt P&T).

Datenblatt Abfälle

Das Datenblatt Abfälle enthält die Kategorisierung der radioaktiven Abfälle in Deutschland. Kurz gefasst handelt es sich bei den im Projekt ENTRIA im Vordergrund stehenden hochradioaktiven bzw. wärmeentwickelnden Abfällen um bestrahlte Brennelemente aus Leistungs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren, Abfällen aus der Wiederaufarbeitung und solchen Abfällen, die aus verschiedenen Gründen nicht in das für schwach- und mittelradioaktive (vernachlässigbar Wärme entwickelnde) Abfälle vorgesehene Endlager Konrad eingelagert werden können. Im weiteren Projektverlauf können sich auch im Datenblatt Abfälle Ergänzungen und Veränderungen ergeben, beispielsweise durch Ergebnisse des in Arbeit befindlichen Nationalen Entsorgungsprogramms (BMUB 2015) oder mögliche Empfehlungen der Kommission "Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" nach § 3 Standortauswahlgesetz (StandAG 2013).

2.3 Operative Phasen der Entsorgungsoptionen

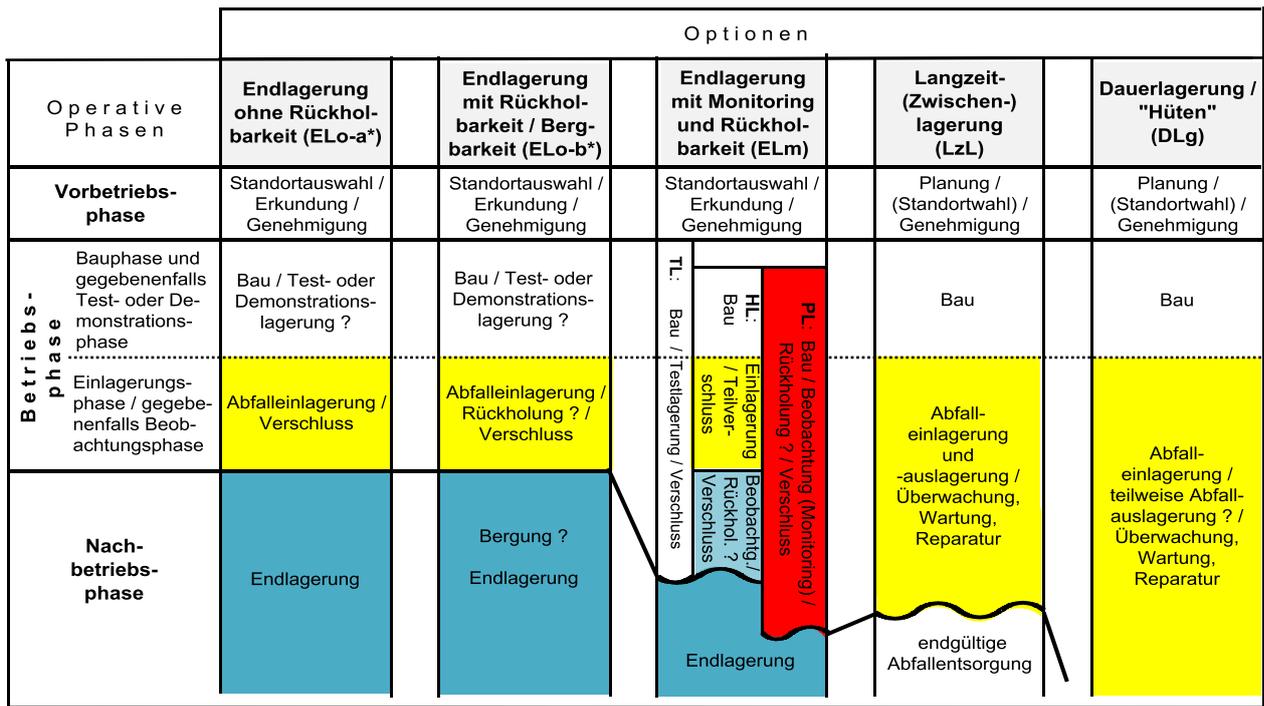
Die betrachteten Entsorgungsoptionen bzw. ihre Varianten sind jeweils durch eine charakteristische zeitliche Entwicklung hinsichtlich Planung, Bau und Betrieb sowie Stilllegung entsprechender Anlagen und der Zeit danach gekennzeichnet. Im Verlauf dieser Entwicklung können sich neben den Aktivitäten auch wichtige Eigenschaften und (Sicherheits-)Funktionen, aber auch die mit einer Anlage verbundenen Ungewissheiten und Risiken ändern. Diese charakteristischen Veränderungen sind bei der Darstellung der Optionen und Varianten und bei ihrer vergleichenden Beurteilung zu berücksichtigen. Andererseits weisen die Optionen strukturelle Gemeinsamkeiten im Verfahrensablauf auf, die sich aus den Gesetzmäßigkeiten von Planung, Entwicklung und Umsetzung von komplexen Projekten wie Endlagern ergeben.

Deshalb ist es sinnvoll, eine für alle Optionen gültige **operative Phasengliederung** mit ihren jeweiligen spezifischen technischen und sicherheitlichen Funktionen sowie Meilensteinen der Lagerentwicklung und der dabei erforderlichen entsorgungsstrategischen bzw. verfahrensbezogenen Entscheidungen (insbesondere beim Übergang von einer Phase in die andere) anzuwenden (s. Abb. A-1). Mittels dieser Gliederung und der entsprechend strukturierten Beschreibung der Optionen lässt sich eine Betrachtungsfläche oder Matrix aufspannen, innerhalb derer sich die Si-

cherheitsfunktionen, Ungewissheiten, Risiken, Entscheidungen usw. der verschiedenen Optionen bzw. Varianten in vergleichbarer Weise phasenbezogen positionieren lassen. Dies ist eine wesentliche Grundlage für die vergleichende risikobasierte Darstellung und Bewertung der Entsorgungsoptionen und dient außerdem deren Klarheit und Nachvollziehbarkeit.

Als für alle Optionen übergreifend gültige Phasen werden hier **Vorbetriebsphase, Betriebsphase und Nachbetriebsphase** unterschieden. Maßgeblich für die Unterscheidung und Abgrenzung dieser Phasen ist die Betriebsphase, weil die für eine Option charakteristischen betrieblichen Aktivitäten, insbesondere der Umgang mit radioaktiven Abfällen, und die für die Erreichung der mit einer Option angestrebten Ziele maßgeblichen Aktivitäten im Lager vor allem in dieser Phase stattfinden.

Im Detail sind andere Phasengliederungen als die nachfolgend beschriebene möglich. Beispielsweise wird die Monitoring- bzw. Beobachtungsphase auch als erste Teilphase der Nachbetriebsphase aufgefasst (z.B. ESK 2012). Die spezifischen Aktivitäten, die den einzelnen Optionen zuzuschreiben sind, werden dadurch nicht grundlegend verändert.



Hauptbeitrag zur Sicherheit (Betriebs- und Nachbetriebsphase)

- Technische Barrieren und Maßnahmen ("aktiv")
- (Geo)technische Barrieren und Maßnahmen ("i.W. aktiv")
- (Geo)technische Barrieren / erleichterte Rückholung (i.W. "passiv")
- Geologische Barriere ("passiv")
- mögl. Überschneidung Bau- und Einlagerungstätigkeit
- Phasenübergang nicht festgelegt
- ~ Ende der Betriebsphase vorab zeitlich nicht definiert
- TL Testlager HL Hauptlager PL Pilotlager

Abb. A-1 Operative Phasen derzeit diskutierter Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle mit Angabe zugehöriger betrieblicher Aktivitäten, der wesentlichen sicherheitstragenden Elemente und der Art ihrer sicherheitlichen Wirkung

Erläuterungen zu Phasen in Kap. 2.3 u. Datenblättern ELo, ELm, LzL, DLg

* ELo-a / * ELo-b: Vorgehen in Deutschland bis 2010 / seit 2010

Zur Veranschaulichung der Phasengliederungen der in Teil B dieses Arbeitsberichts behandelten Optionen und der zugehörigen Aktivitäten enthalten die Datenblätter ELo, ELm, LzL und DLg Abbildungen, in denen sich auch phasenbezogene Angaben zur Art der Sicherheitsgewährleistung (aktiv / passiv) sowie zu Monitoring- und Beweissicherungsmaßnahmen und die für eine etwaige Abfallrückholung angesetzte Zeitspanne finden. Die Abbildungen weisen zur Erleichterung des Vergleichs der Phasenabfolge und der wichtigsten Aktivitäten in den einzelnen Phasen eine übereinstimmende inhaltliche und formale Struktur auf. Ein direkter Vergleich der Optionen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Phasen und der über diese Zeit mit den spezifischen Aktivitäten bzw. Lagerentwicklungen in den Phasen verbundenen Risiken ist damit nicht möglich.

Vorbetriebsphase

Als Vorbetriebsphase wird die Zeitspanne bezeichnet, in der diejenigen Arbeiten geleistet und diejenigen entsorgungsstrategischen und verfahrensbezogenen Entscheidungen getroffen werden, die vor dem Beginn jeglicher lagerbezogener betrieblicher Aktivitäten liegen (müssen). Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung der Entsorgungsoption, die Standortauswahl und - falls geboten - die Standorterkundung, der Eignungsnachweis und die Standortentscheidung sowie das möglicherweise in Genehmigungsschritte aufgegliederte Genehmigungsverfahren.

Bei den Endlageroptionen wird die Vorbetriebsphase entsprechend unterteilt in die Unterphasen Standortauswahl und -erkundung sowie Eignungsnachweis. Sie endet formal mit Erteilung derjenigen Genehmigung, die Voraussetzung für die Einleitung der Anlagenerrichtung und damit der Betriebsphase ist.

Dauer der Vorbetriebsphase: >10a (einige Jahrzehnte).

Betriebsphase

In der Betriebsphase finden die optionsbezogenen betrieblichen Aktivitäten statt. Hierzu gehören alle Aktivitäten zwischen Baubeginn des Lagers und seinem endgültigem Verschluss (bei Endlagern einschließlich der Zugangswege), insbesondere solche, bei denen mit den einzulagernden radioaktiven Abfällen umgegangen wird. Bei Langzeit- oder Dauerlagern endet die Betriebsphase mit der Stilllegung und dem Abbau (einschließlich Dekontamination) des Lagers.

Die Bauphase wird deswegen in die Betriebsphase einbezogen, weil bei den Endlagern sowohl die Auffahrung von Einlagerungsbereichen als auch die Einlagerung von radioaktiven Abfällen schrittweise erfolgen werden bzw. können, so dass es in einem Lager gleichzeitig, aber an verschiedenen Orten, zur Auffahrung bzw. Einrichtung von Einlagerungsbereichen, zur Einlagerung von Abfällen und zum Verschluss von beschickten Einlagerungsbereichen kommen kann. Entsprechend können bei Oberflächenanlagen (Langzeit- bzw. Dauerlager) verschiedene Module eines Lagers zeitlich parallel errichtet oder hergerichtet bzw. bereits mit Abfall befüllt werden. Daher wird im vorliegenden Bericht davon abgesehen, den Zeitpunkt des Einlagerungsbeginns als Beginn der Betriebsphase zu definieren.

Ebenfalls in die Betriebsphase gehören Aktivitäten, mit denen vor Ort in einem Lager die technisch zuverlässige Beherrschung z.B. von Einlagerungs- und Rückho-

lungstechniken demonstriert werden soll. Dabei können Tests (im Sinne von In-situ-Versuchen, z.B. zum Verhalten von Barrieren) in dafür ausgewiesenen Bereichen außerhalb des späteren Einlagerungsbereiches eines Lagers durchgeführt werden. Das genaue Vorgehen in den nationalen Programmen unterscheidet sich entsprechend den jeweiligen technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen.

Bei der Endlagerung kann zu Beginn, wie beispielsweise bei dem in Schweden geplanten Endlager, die Demonstrationseinlagerung eines bestimmten Anteils der vorgesehenen Abfallmenge (PAPP 1999, SKB 2011) oder, wie in Frankreich, von Dummy-Behältern (ohne radioaktives Inventar, ANDRA 2014) erfolgen. In anderen nationalen Programmen ist der Betrieb eines Untertagelabors am Lagerstandort bzw. in der Lagerregion vorgesehen (z.B. Schweiz: Testlager) bzw. bereits aufgenommen worden (z.B. Belgien, Finnland, Frankreich). Beim bei der Endlagerung mit Monitoring und Rückholbarkeit geplanten Vorgehen können Einlagerungs-, Verschluss- und Rückholungstechniken demonstriert und optimiert werden oder in-situ-Tests zu Beschaffenheit und Verhalten von geologischen bzw. geotechnischen Barrieren (ohne radioaktive Abfälle) bis über den Verschluss des eigentlichen Einlagerungsbereichs hinaus durchgeführt werden.

Ebenfalls in die Betriebsphase gehören Aktivitäten, mit denen vor Ort in einem Lager die technisch zuverlässige Beherrschung z.B. von Einlagerungs- und Rückholungstechniken demonstriert werden soll. Dies könnte bis zur Demonstrationseinlagerung eines bestimmten Anteils der vorgesehenen Abfallmenge gehen.

Nach dem Verschluss sind innerhalb eines Endlagers keine betrieblichen Aktivitäten mehr möglich. Bis dahin müssen daher alle Aktivitäten, die mit der Zweckbestimmung des Lagers (Einlagerung, u.U. Auslagerung von Abfällen, dauerhaft sicherer Einschluss der Abfälle) und entsprechenden Nachweisen verbunden sind, abgeschlossen sein. Dies gilt auch für Monitoring-Aktivitäten, die auf die Absicherung des Langzeitsicherheitsnachweises bzw. die Reduzierung entsprechender Ungewissheiten abzielen.

Bei den Endlageroptionen nimmt der technische Aufwand für die Rückholung (von Teilen) der Abfälle wegen des Verschlusses einer zunehmenden Zahl von Einlagerungsbereichen zu, bis schließlich (spätestens nach vollständigem Verschluss des Lagers) der Einsatz von Bergbautechnik erforderlich wird. Rückholbarkeit von Abfäl-

len im Sinne der geplanten Möglichkeit zur Rückholung ist daher üblicherweise auf die Betriebsphase beschränkt.

Die Betriebsphase wird unterteilt in den Bau des Lagers, die optionskonforme Einlagerung (und gegebenenfalls Auslagerung) der Abfälle, gegebenenfalls längerfristige Beobachtung des Abfalls bzw. Überwachung des Lagers mittels Monitoringmaßnahmen sowie den Verschluss und die Stilllegung (Endlager) bzw. die Stilllegung und den Abbau des Lagers (Langzeit- und Dauerlager). Soweit Monitoring vorgesehen oder notwendig ist, sollte es vor dem Lagerbau begonnen werden.

Bei Endlagern kann das Monitoring zur Beantwortung bestimmter Fragen als eigenständige Monitoring- oder Beobachtungs-Subphase der Betriebsphase über den für die Einlagerung der Abfälle und den Verschluss der Einlagerungsbereiche erforderlichen Zeitraum deutlich hinausgehen. Je nach Zielsetzung und den Ergebnissen des Monitorings ist in festgelegten Abständen zu entscheiden, ob es weiter fortgesetzt werden soll, ob das Lager endgültig verschlossen werden soll oder ob Teile der Abfälle oder alle Abfälle rückgeholt werden sollen bzw. müssen. Die Betriebsphase endet nach dem vollständigen Verschluss des Lagers.

Bei Langzeitlagern und Dauerlagern sind Überwachung sowie Wartungs- und gegebenenfalls Reparaturmaßnahmen zur Aufrechterhaltung der ordnungsgemäßen Lagerfunktion zwingend notwendig.

Dauer der Betriebsphase: Bei Endlagern mehrere Jahrzehnte, bei den Endlageroptionen mit Beobachtungsphase und bei Langzeitlagern bis zu einigen Jahrhunderten, bei Langzeitlagern mehrere Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte, bei Dauerlagern unbestimmt bzw. unbegrenzt (s. 2.1).

Nachbetriebsphase

Die Nachbetriebsphase beginnt nach dem vollständigen Lagerverschluss (Endlager, daher dort auch als Nachverschlussphase bezeichnet), durch den die Endlager in den passiv sicheren Zustand überführt werden. Die Fortführung von in der Betriebsphase begonnenen Monitoring- und anderen Überwachungsmaßnahmen ist in der Nachbetriebsphase - nach heutigem Stand der Technik - nicht möglich. Sie dürfen daher für die Nachbetriebsphase konzeptionell nicht mehr vorgesehen werden oder gar erforderlich sein. Zu Beginn der Nachbetriebsphase können allerdings Monitoringmaßnahmen, die zum Teil bereits in der Betriebsphase zum Einsatz kom-

men, in veränderter Form und mit veränderter Zielsetzung (z.B. Beweissicherung Umweltmedien) aufgenommen bzw. fortgesetzt werden.

Zeitdauer der Nachbetriebsphase: "unbegrenzt". Der Nachweis der sicheren Endlagerung erstreckt sich in Deutschland auf ca. 1 Mio Jahre. Für die Monitoringphase, in der die Rückholung von Abfällen möglich ist, werden mehrere Jahrzehnte bis zu einigen Jahrhunderten ins Auge gefasst.

Bei Langzeitlagerung und Dauerlagerung gibt es entsprechend der Zielsetzung der Lagerung keine Nachbetriebsphase, da die Stilllegung die vollständige Auslagerung des Abfalls und die Dekontamination der geleerten Anlage voraussetzt und der Betrieb voraussichtlich mit dem Abbau der Anlage endet.

3 Begriffe

Im Folgenden werden Begriffsdefinitionen und kurze Erläuterungen zu den Inhalten wichtiger und im Arbeitspapier häufig auftauchender Begriffe in Anlehnung an BMU (2010) gegeben.

Barriere: Natürliche oder technische Komponente einer Entsorgungsoption, die eine wesentliche Sicherheitsfunktion (s. Sicherheitsfunktion) wahrnimmt. Dazu gehören z.B. Abfallbehälter, Verschlussbauwerke, der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) und die den ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten.

Beobachtung: s. Monitoring.

Bergung: Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Endlager in einem Notfall.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG): Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

Endlagersystem: Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk, dem ewG und den den ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis

zur Erdoberfläche, soweit sich sicherheitstechnisch bedeutsam und im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind.

Kontrolle: s. Monitoring.

Monitoring: Beobachtung bzw. Überwachung von Sicherheitsfunktionen des Lagers mittels technischer Gerätschaften. Ziel des Monitorings ist das Erkennen nicht auslegungsgemäßer bzw. nicht vorhergesehener Betriebszustände, die Verbesserung des Systemverständnisses, die Bestätigung bzw. Falsifizierung der Funktion der Sicherheitselemente bzw. die Bestätigung des Langzeitsicherheitsnachweises (Endlager in tiefen geologischen Formationen, insbesondere bei Vorkehrungen zur Rückholbarkeit). Die Ergebnisse des Monitorings bilden eine Grundlage für die Entscheidung über den endgültigen Verschluss des Lagers bzw. die etwaige Rückholung der Abfälle (s. auch die weiteren Anmerkungen zu Monitoring am Ende des Kapitels).

Nachweiszeitraum: Zeitraum, für den die Langzeitsicherheit nachzuweisen ist.

Reversibilität: Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Verfahrensschritte der Lagerentwicklung (üblicherweise beschränkt auf die Zeit bis zum Ende der Betriebsphase).

Rückholbarkeit: Die (vorgesehene) technische Möglichkeit zur Rückholung von Abfällen aus einem Endlager (in der Regel beschränkt auf die Betriebsphase).

Rückholung: Die tatsächliche Auslagerung von Abfällen aus einem Endlager.

Sicherheit, aktive: Sicherheit, insbesondere Langzeitsicherheit, eines Lagers, die sich maßgeblich oder ausschließlich auf die technischen Barrieren des Lagersystems und Maßnahmen zur Gewährleistung ihrer Schutzfunktion für Mensch und Umwelt (Überwachung, Wartung, Reparatur) stützt.

Sicherheit, passive: Sicherheit, insbesondere Langzeitsicherheit, eines Endlagersystems, die aus den besonders günstigen dauerhaften einschlusswirksamen Eigenschaften der geologischen und geotechnischen Barrieren (in Deutschland gemäß BMU 2010 insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) sowie der technischen Barrieren eines Endlagersystems abgeleitet wird und die Maßnahmen zur Gewährleistung ihrer Schutzfunktion für Mensch und Umwelt (Überwachung, Wartung, Reparatur) nachweislich nicht erfordert. Die für die Sicherheit relevanten Si-

cherheitsfunktionen der Barrieren beruhen auf Naturgesetzen, deren Gültigkeit bzw. Anwendbarkeit allerdings für jedes Endlagersystem zu belegen ist.

Sicherheitsfunktion: Ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen in der Betriebsphase und im Nachweiszeitraum gewährleistet.

Überwachung: s. Monitoring.

Anmerkungen zu Monitoring (s. auch oben Monitoring):

Monitoringmaßnahmen im oben genannten Sinne sind auf die Betriebsphase beschränkt. Die Überwachung von Umweltmedien in der Nachbetriebsphase (Beweissicherung Umwelt) erfolgt mit anderer Zielsetzung und ist nicht Teil des Monitorings im hier gemeinten Sinne.

Die von Monitoringmaßnahmen erwarteten oder erhofften Ergebnisse zur Funktionsbestätigung der Sicherheitselemente von geplanten Endlagern dürfen die sorgfältige umfassende Standorterkundung und die Bewertung der dabei erzielten Ergebnisse als Grundlage im Rahmen von Sicherheitsnachweisen für die Projektumsetzung bzw. -genehmigung nicht einschränken oder gar ersetzen.

Bezug zu ähnlichen Begriffen (insbesondere Beobachtung, Kontrolle, Überwachung): Als Folge der in den letzten Jahren zunehmenden (internationalen) Diskussion über "Monitoring" und der zunehmenden Aktivitäten in Forschung und Entwicklung zu diesem Thema hat sich der Begriff "Monitoring" als umfassende Bezeichnung für die Informationserhebung und -bewertung mit sehr unterschiedlicher Zielsetzung auf technischer, aber auch gesellschaftlicher Ebene, etabliert. Die Verwendung der mit teilweise unterschiedlichen begrifflichen Inhalten und Zielsetzungen der gemeinten Aktivitäten verbundenen "herkömmlichen" Begriffe, wie Beobachtung, Kontrolle und Überwachung, ist dabei in den Hintergrund getreten. Teilweise werden diese Begriffe heute (fast) synonym verwendet.

Für die weitere gemeinsame Projektarbeit wäre die Verständigung auf bestimmte Bedeutungen hilfreich. Eine in diese Richtung zielende Definition bzw. Abgrenzung

wird im vorliegenden Bericht nicht geleistet. Die Verwendung der genannten Begriffe orientiert sich vielmehr am in der Diskussion über die behandelten Entsorgungsoptionen derzeit "üblichen" Vokabular. Ein möglicher Ansatz für eine gemeinsame Begriffsverwendung könnte in einer zweistufigen Differenzierung der beiden bedeutungsgleichen Begriffspaars Monitoring / Beobachtung, und zwar durch

1. die Ergänzung der Begriffe Monitoring / Beobachtung mit dem Zweck bzw. dem Ziel der entsprechenden Aktivität und (falls sinnvoll) .
2. Angabe der Art und Weise, in der Monitoring / Beobachtung erfolgen.

4 Quellen Teil A

ANDRA - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (2014): Follow-up of the Cigéo project by Andra after public debate. Changes to the project following the public debate.- <http://www.cigeo.com/en/calendar-public-debate/follow-up-of-the-cigeo-project>.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Stand 30. September 2010.- http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmuimport/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf.

BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und aktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Entwurf vom 06. Januar 2015.- http://www.bundestag.de/blob/353244/cf7fb803728187f2a11da2cb9cbfe5f4/kmat_17-a-data.pdf.

EKRA - Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Schlussbericht.- Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_182456219.pdf.

ESK - Entsorgungskommission, Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. 02.09.2011.- <http://www.entsorgungskommission.de/downloads/epanlage2el19homepage.pdf>.

PAPP, T. (1999): Stepwise decision-making and options for retrieval in the Swedish KBS-3 concept.- International Seminar of Retrievability of HLW and Spent Fuel, Stockholm 24-27 October, 1999.- Vortragsmanuskript.

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB (2011): Application for licence under the Nuclear Activities Act for construction, ownership and operation of a nuclear facility for the final disposal of spent nuclear fuel and nuclear waste.-
<http://www.skb.se/0b37e015-be28-49dc-b48e-55efd065ecb7.fodoc>.

StandAG - Standortauswahlgesetz (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 23. Juli 2013.-
http://www.juris.de/jportal/docs/news_anlage/gportal/bilder/bgbl1/bgbl113s2553.pdf.

Teil B - Datenblätter

I. Optionen

Datenblatt ELo

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit"

Datenblatt Elm

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit"

Datenblatt LzL

Darstellung der Entsorgungsoption "Langzeitige Lagerung der Abfälle in Bauwerken"

Datenblatt DLg

Darstellung der Entsorgungsoption „Dauerlagerung der radioaktiven Abfälle“

Datenblatt sEO

Darstellung der „sonstigen Entsorgungsoptionen“

II. Vorgehensweisen

Datenblatt kpV

Darstellung der „konservativ-pragmatischen Vorgehensweise“

III. Technologien

Datenblatt P&T

Abtrennung und Umwandlung (Partitioning & Transmutation - P&T)

IV. Inventar

Datenblatt Abfälle

Kategorisierung der Abfälle in Deutschland

I. Optionen

Datenblatt ELo

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (ELo)

ELo - Vorbemerkung

Die Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (ELo) orientiert sich an dem bis zum Jahr 2010 in Deutschland verfolgten Entsorgungskonzept. Sie wird entsprechend der in Berichtsteil A, Kap. 2.2 vorgegebenen Struktur abgearbeitet. Im Bedarfsfall kann sie in den weiteren Arbeitsschritten des Transversalprojektes detaillierter ausgearbeitet werden.

In Deutschland waren und sind konkrete Maßnahmen zur Rückholung von Abfällen aus dem Endlager nicht vorgesehen. So enthalten beispielsweise die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (BMI 1983) keine Hinweise auf die Rückholbarkeit der Abfälle. Unter Pkt. 7.4 wird lediglich gefordert, dass bei signifikanten Abweichungen thermomechanischer Reaktionen und gebergsmechanischer Vorgänge von den Ergebnissen der zugrunde liegenden Sicherheitsanalyse gegebenenfalls der weitere Betrieb zu modifizieren sei.

Der Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle der Entsorgungskommission kommt in einem Diskussionspapier (ESK 2011) zu der Feststellung, dass ein Endlagerkonzept mit Rückholbarkeit der Abfälle und mit Offenhalten des Endlagers über längere Zeiträume dem bisherigen Vorgehen in Deutschland fundamental widerspricht. Rückholbarkeit wird nur im Rahmen einer zeitlich begrenzten Beobachtungsphase als sinnvoll angesehen, um negative Auswirkungen des Offenhaltens auf die Langzeitsicherheit auszuschließen.

In den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU (2010) wird die **Rückholbarkeit** der Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers gefordert, wobei etwaige Maßnahmen zur Gewährleis-

tung der Rückholbarkeit die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen dürfen (BMU 2010, Pkt. 8.6). Darüber hinaus muss für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers die Handhabbarkeit der Abfallbehälter für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein, um eine eventuell erforderliche **Bergung** aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager zu erleichtern (BMU 2010, Pkt. 8.6).

Unabhängig davon wird für die Zeit des Einlagerungsbetriebs und der Stilllegung des Endlagers sowie für einen begrenzten Zeitraum nach der Stilllegung ein Kontroll- und Beweissicherungsprogramm gefordert (BMU 2010, Pkt. 7.4), mit dem nachgewiesen werden soll, dass die Eingangsdaten, Annahmen und Aussagen der für diese Zeitspanne durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsnachweise eingehalten werden. Erfasst werden sollen insbesondere die Auswirkungen der thermomechanischen Reaktionen des Gebirges auf die wärmeentwickelnden Abfälle, die technischen Maßnahmen sowie die gebirgsmechanischen Vorgänge. Die Messungen zur Beweissicherung sollen den Ausgangszustand und die Entwicklung der Aktivitätskonzentration in Quell- und Grundwässern, Böden, Gewässern und in der Luft im Einflussbereich des Endlagers erfassen.

Trotz dieser neuen und (mit Ausnahme der Messungen zur Beweissicherung) weitgehend unklaren Anforderungen gilt für Deutschland weiterhin das Ziel, die Endlagerung der Abfälle zügig umzusetzen. Rückholung und Bergung der Abfälle sollen nur in Ausnahmesituationen zum Tragen kommen. Genaue Bedingungen dafür sind bisher allerdings nicht festgelegt worden. In der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist erstmals eine Konzeptplanung zur Rückholung von Abfallgebänden aus Einlagerungsstrecken und aus von Strecken ausgehenden vertikalen und horizontalen Bohrlöchern entwickelt worden (GRS 2013).

In der folgenden Darstellung der Option ELo steht die in Deutschland bis 2010 verfolgte Endlagerung ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit bzw. Rückholung von Abfällen im Vordergrund. Wo sich durch die seither bestehenden Forderungen zu Rückholbarkeit bzw. Bergung und Monitoring in den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) Abweichungen von diesem Ansatz ergeben, wird darauf eingegangen (entsprechende Passagen sind durch kursive Schrift gekennzeichnet).

Die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit ist die konzeptionell und hinsichtlich der konkreten Umsetzung am weitesten entwickelte Entsorgungsoption; denn sie ist über Jahrzehnte von vielen nationalen Entsorgungsinstitutionen allein oder bevorzugt verfolgt und untersucht worden. Über die Demonstration einzelner Umsetzungsschritte ist die Implementierung bis heute allerdings nicht hinausgekommen. Erfahrungen mit der realen Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle liegen weltweit nicht vor. Erfahrungen zu Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle sind nur eingeschränkt übertragbar und keineswegs nur positiv. Das gilt auch und insbesondere für Deutschland. Nicht alle Sicherheitsbedenken, die gegen die Option ELo vorgebracht werden, sind bereits (vollständig) ausgeräumt. Dies betrifft insbesondere die Langzeitverlässlichkeit der Funktion geologischer und geotechnischer Barrieren und die entsprechenden Nachweise.

ELo - Wesentliche Merkmale und Ziele

Der **Kern** der Option "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" besteht darin, die Abfälle in ein Endlager in geeigneten tiefen geologischen Formationen zu verbringen und sie dort geordnet und endgültig, also ohne die Absicht der Rückholung, einzulagern. Eine sicherheitstechnische Notwendigkeit für Monitoringmaßnahmen wird nicht gesehen; allerdings enthalten alle derzeit in Entwicklung bzw. Umsetzung befindlichen Endlagerprogramme Elemente zu Rückholbarkeit und Monitoring (s. Teil A, Kap. 2.1).

In Deutschland wird gemäß Vorschlag des AKEND (2000) der Einschluss der Abfälle im "einschlusswirksamen Gebirgsbereich" (ewG) angestrebt. Das ist derjenige Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Versatz, Abschlussbauwerke u.a.) den Einschluss der Abfälle für rund eine Million Jahre sicherstellt (BMU 2010, Kap. 2.). Dazu sind eine zielgerichtete Standortauswahl und Endlagerauslegung zwingend erforderlich. Im Rahmen der Standortauswahl sind alle Barrieren zu erfassen und zu beurteilen, die in irgendeiner Weise zum Einschluss der Abfälle bzw. zu dessen dauerhaftem Erhalt beitragen. Hierzu gehören auch diejenigen Barrieren, die den ewG gegen äußere Einwirkungen, etwa den Zutritt von Grundwasser, schützen müssen.

Sobald ein Einlagerungsbereich (Einlagerungskammer, Einlagerungsstrecke, Bohrloch) mit Abfällen gefüllt ist, werden die Resthohlräume des Einlagerungsbereichs

zügig verfüllt und der Zugang wird abgedichtet. Nachdem alle Einlagerungsbereiche entsprechend verfüllt worden sind, werden auch die verbliebenen Infrastrukturräume und die Zugänge zum Endlagerbergwerk (Schächte, Rampen) verfüllt und langzeitsicher abgedichtet. Danach wird das Endlager sich selbst überlassen und geht in den wartungsfreien und passiv sicheren Zustand über.

Das **Hauptziel** der Option ELo besteht also darin, die Einhaltung der in BMU (2010, Kap. 3. u. 4.) vorgegebenen Schutzziele und Sicherheitsprinzipien durch passiv sichere Isolation der Abfälle in tiefen geologischen Formationen, und zwar im ewG, zu gewährleisten. Der Nachweis der Langzeitsicherheit (Nachweiszeitraum) ist für ca. eine Million Jahre zu führen (BMU 2010, Kap. 7.2).

Das Endlager ist folglich so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der Abfälle in der Nachbetriebsphase (Nachverschlussphase) keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten durch die Gesellschaft erforderlich werden (BMU 2010, Pkt. 4.6). Im angestrebten passiv sicheren Zustand wird ein entscheidender Vorteil der Option ELo gegenüber Optionen mit aktiver Gewährleistung der Sicherheit gesehen, weil der Prognose der Entwicklung der natürlichen und geotechnischen Barrieren, im deutschen Konzept speziell des ewG, erheblich geringere Ungewissheiten zugeschrieben werden als der Prognose der gesellschaftlichen Entwicklung. Im Sinne der raschen Herbeiführung des passiv sicheren Zustands soll das Endlager daher direkt nach Einlagerung aller dafür vorgesehenen Abfälle verschlossen werden. Damit endet die Betriebsphase. Da die Rückholung von Abfällen kein Bestandteil der Option ELo ist, ist weder in der Betriebs- noch in der Nachbetriebsphase ein darauf gerichtetes Monitoring notwendig.

*Abweichend von diesem Vorgehen muss in Deutschland seit Verabschiedung der Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) die **Rückholung** der Abfallbehälter bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen möglich sein. Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholung dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen. Zur Bergung der Abfallbehälter im Notfall muss deren Handhabbarkeit für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Stilllegung gegeben sein (BMU 2010, Pkt. 7.4 u. 8.6). Aussagen darüber, welche Befunde im Endlager eine Rückholung oder Bergung erforderlich machen würden, finden sich nicht in BMU (2010).*

In BMU (2010, Pkt. 7.4) wird zwar ein Kontroll- und Beweissicherungsprogramm gefordert, jedoch ohne Angabe der genauen Ziele und Anforderungen sowie der vorgesehenen Dauer des Programms ¹⁾. Ein expliziter Bezug zur Rückholung bzw. Bergung der Abfälle ist nicht erkennbar. Offen bleibt auch, wie weit das Programm über die Stilllegung des Endlagers hinaus betrieben werden soll; nach BMU (2010) schließt diese den Lagerverschluss ein.

ELo - Mögliche Varianten und Ergänzungen

Die heute in Deutschland verfolgte Variante der Option ELo weist nach Ergänzungen der früher gültigen Anforderungen um Aspekte der Überwachung des Lagers sowie von Rückholung und Bergung der Abfälle in BMU (2010) Merkmale der Option EIm auf. Letztlich führen diese Ergänzungen zu einem anderem Konzept (s. Datenblatt EIm).

Bereits vorgesehene bzw. praktizierte Konzeptergänzungen bestehen (nicht nur) für die Option Endlagerung ohne Monitoring und Rückholbarkeit beispielsweise in der Einführung einer vorgeschalteten Testphase mit Tests zur Absicherung des Systemverständnisses und der Verbesserung der Aussagekraft von Sicherheitsaussagen (z.B. geplantes Endlager in Bure, Frankreich – Option EIm) oder in der vorgeschalteten Demonstration der Beherrschung der Einlagerungs- und Rückholungstechnik (z.B. Schweden, Frankreich).

Die Vorschaltung von Abtrennung und Umwandlung (P&T) langzeitsicherheitsrelevanter Radionuklide wären als Konzeptergänzung ebenfalls denkbar; es ist derzeit jedoch nicht erkennbar, ob P&T überhaupt zur Einsatzreife gelangen und Bedeutung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erlangen wird (s. Datenblatt P&T).

¹⁾ Der Themenkomplex Monitoring / Überwachung / Rückholung soll laut StandAG (2013) im Vorfeld des in Deutschland geplanten Standortauswahlverfahrens durch die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe aufgearbeitet werden.

ELo - Begründung

Die Begründung der "sofortigen" Endlagerung ohne Monitoring (aber mit Kontroll- und Beweissicherungsprogramm) und der nur theoretischen Möglichkeit der Rückholung bzw. Bergung von Abfällen ergibt sich letztlich aus der Erkenntnis, dass das Risiko einer Fehlprognose hinsichtlich der langfristigen Entwicklung der geologischen und geotechnischen Barrieren eines Endlagersystems bei Auswahl eines geeigneten Standortes und konsequent sicherheitstechnisch ausgerichteter Entwicklung des Lagerkonzeptes deutlich geringer ist als das Risiko von Fehlprognosen über die langfristige gesellschaftliche (einschließlich wirtschaftliche und technisch-wissenschaftliche) Entwicklung. Zudem können bei der Option ELo die Kenntnisse über das Endlager verloren gehen, ohne dass dadurch die passive Sicherheit betroffen ist (Das Risiko aus zukünftigem absichtlichem oder unabsichtlichem menschlichem Eindringen in das Endlager bleibt bestehen).

Bei sorgfältiger Standortauswahl und -bewertung soll die Prognose der langfristigen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems, speziell des ewG, auf einem umfassenden Verständnis seiner geologischen und sonstigen Barrieren beruhen. Die Geschwindigkeit der geologischen Veränderungen und Stoffströme ist bei guter Standortauswahl sehr gering gegenüber den nachgewiesenermaßen sehr dynamischen Gesellschaftssystemen (z.B. BUSER 1998 u. 2014, BALTES & KINDT 2000). Die Langzeitsicherheit kann zwar nicht naturwissenschaftlich exakt nachgewiesen werden, es kann aber unter Berücksichtigung aller Merkmale bzw. Indizien der geologischen Verhältnisse ein vertrauenswürdiger Plausibilitätsnachweis geführt werden. Ein Nachweis durch Überprüfung der getroffenen Annahmen durch die zukünftige Realität kann wegen der langen Zeiträume nicht geliefert werden.

Die Endlagerung in geeigneten passiv wirkenden geologischen Formationen soll somit der Gewährleistung und dem Nachweis der Langzeitsicherheit dienen. Hinzu treten nach Verschluss des Endlagers Vorteile hinsichtlich der Betriebssicherheit (Beschäftigte, Anwohner) und der Kernmaterialüberwachung auf.

ELo - Gewährleistung der Sicherheit

Die **Langzeitsicherheit (Nachbetriebsphase)** eines ohne Berücksichtigung von Rückholbarkeit der Abfälle und Monitoringmaßnahmen geplanten Endlagers, soll - beginnend mit Beendigung der Einlagerung bzw. Verschluss des Endlagers - durch passiv sichere geologische, geotechnische und technische Barrieren erreicht werden.

Die **Sicherheit während der Betriebsphase** soll durch die Auslegung der Einrichtungen für die Einlagerung der Abfälle und für den Betrieb des Bergwerks sowie durch ein organisatorisches Sicherheitsmanagement gewährleistet werden. Der Betriebszeitraum soll optimiert werden. Das bedeutet einen möglichst kurzen Einlagerungszeitraum und den sukzessiven Verschluss von Einlagerungsbereichen, Zugangsstrecken usw. nach der Abfalleinlagerung.

Strahlenbelastung im Normalbetrieb

Für das Betriebspersonal entstehen Strahlenbelastungen während der Einlagerung. Sie entstehen - über den gesamten Einlagerungszeitraum betrachtet - durch die notwendige Handhabung aller Abfallgebinde bei ihrer Einlagerung. Dazu gehören Strahlenbelastungen durch Hantierung mit den Abfallgebänden (z.B. Ent- und Beladung, innerbetrieblicher Transport) und bei ihrer Einlagerung in Kammern, Strecken oder Bohrlöchern. Diese Strahlenbelastungen werden zeitlich und damit in ihrer Höhe begrenzt durch das zügige Versetzen der einzelnen Einlagerungshohlräume, sobald sie gefüllt sind. Wenn nach Abschluss der Betriebsphase alle Hohlräume des Bergwerks verfüllt sind, tritt keine Strahlenbelastung für Beschäftigte mehr auf. Monitoringmaßnahmen können dann nur noch übertägig stattfinden bzw. von der Erdoberfläche aus betreut werden und sind nicht mit Strahlenbelastungen durch die endgelagerten Abfallgebinde verbunden.

Die am Standort wohnende Bevölkerung wird - abgesehen vom Antransport der Abfälle - über die Abwetter aus dem Bergwerk durch radioaktive Freisetzungen belastet (an denen auch solche aus den aufgeschlossenen Gesteinen beteiligt sind). Ursprung sind alle Abfallgebinde, und zwar solange ihre Lagerorte noch nicht versetzt sind. Nachdem die letzte Einlagerungskammer versetzt ist, tritt im Normalfall für die Bevölkerung keine von den Abfällen ausgehende Strahlenbelastung mehr auf.

Betriebssicherheit und Strahlenschutz

Das Bergwerk ist bis zum Verschluss des Endlagers in Betrieb. Übertägige Störfälle durch Einwirkungen von innen und außen sind nur während des Einlagerungsvorgangs möglich und können nur die zum Zeitpunkt eines Störfalls in der Anlieferung, im übertägigen Pufferlager bzw. auf dem Weg nach untertage befindlichen Gebinde betreffen. Untertage sind während der Einlagerung mit Ausnahme besonderer Störfälle (z.B. Wassereinbruch) nur Störfälle durch Einwirkungen von innen möglich. Davon können immer nur jeweils die Abfallgebände betroffen sein, die sich zum Eintrittszeitpunkt im Einlagerungsprozess bzw. in einem noch nicht versetzten Einlagerungsbereich befinden. Nach dem Verschluss des Endlagers sind keine Störfälle im Sinne der Strahlenschutzverordnung mehr möglich.

ELo - Proliferation, Safeguards

Mit Proliferation und Safeguards-Maßnahmen verbundene Risiken und Tätigkeiten werden bei der Option ELo dadurch minimiert, dass die Abfälle möglichst zügig endgelagert werden, die Einlagerungsfelder schnell verfüllt und verschlossen werden und Maßnahmen zur Rückholung der Abfälle nicht vorgesehen sind (zu Deutschland s. Vorbemerkung). Nach dem endgültigen Verschließen der Zugangsstrecken sowie der Schächte oder Rampen ist die unerkannte Entwendung von radioaktiven Stoffen nicht mehr möglich. In Deutschland liegt ein Safeguards-Referenzkonzept für ein Referenz-Endlagerkonzept in einer Salzgesteinsformation vor (KRANZ 2001). Dieses kann durch Modifikation auf andere Geosystemtypen übertragen werden.

ELo - Ungewissheiten und Risiken

Das Konzept der geologischen Tiefenlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit besitzt folgende Ungewissheiten / Risiken:

- Unsicherheiten, die sich aus der langfristigen Prognose des Endlagersystems, speziell des ewG, ergeben. Nachdem das Endlager endgültig verschlossen worden ist, unterliegt es bei richtiger Standortauswahl und -bewertung der geringen prognostischen Ungewissheit, die sich aus der Entwicklung des Endlagersystems ergibt.

- Ein im strengen Sinne naturwissenschaftlicher Nachweis der Langzeitsicherheit ist nicht möglich (s. ELo – Begründung). Es existieren allerdings Methoden für einen umfassenden "Plausibilitätsnachweis" der Langzeitsicherheit.
- Da Monitoring (insbesondere sicherheitsrelevanter Funktionen des Endlagersystems) nicht vorgesehen ist, werden die unvermeidlichen Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung des Endlagersystems bzw. der Funktion einzelner Barrieren noch erhöht; denn es besteht möglicherweise keine Möglichkeit, die Fehlerhaftigkeit des Langzeitsicherheitsnachweises bzw. die Sicherheit gefährdende Vorgänge im Endlagersystem, wenn überhaupt, frühzeitig festzustellen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen (bis hin zur Rückholung der Abfälle) einzuleiten. Die in BMU (2010) für Deutschland geforderten Kontroll- und Beweissicherungsmaßnahmen gehen nicht auf damit verbundene grundlegende Fragen (Umsetzung, genaue Ziele, Dauer) ein.
- Die öffentlichen Diskussionen über die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Vergangenheit legen die Schlussfolgerung nahe, dass der Verzicht auf Rückholbarkeit die Akzeptanz der Endlagerung generell und insbesondere am vorgesehenen Standort deutlich einschränkt.

ELo - Generelle Vor- und Nachteile

Vorteile

- Bei richtiger Standortauswahl und Endlagerauslegung, in Deutschland insbesondere bei sorgfältiger Dimensionierung, Beurteilung und Nutzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) besteht die Aussicht, ein langfristig passiv-sicheres Endlagersystem mit sehr geringen und langsamen Stoffumsätzen sowie guten Prognosemöglichkeiten für seine zukünftige Entwicklung zu erreichen. Damit kann die Langzeitsicherheit gewährleistet werden, wenn ein entsprechender Plausibilitätsnachweis möglich ist.
- Keine Abhängigkeit von langfristiger Überwachung / langfristigem Monitoring und sonstigen Maßnahmen, deren Durchführung aus Sicherheitsgründen gewährleistet werden müsste bzw. durch die die Entwicklung des passiv-sicheren Abfalleinschlusses verzögert bzw. beeinträchtigt werden könnte.

- Die unvermeidlichen radiologischen Belastungen während der Betriebszeit können durch eine Optimierung des Endlagerbetriebs mit rascher Verfüllung und Abdichtung von Einlagerungsfeldern gering gehalten werden.
- Veränderungen des Zustands der Abfälle und der Integrität der Behälter sind bei der Option ELo (im deutschen Konzept) nach Verschluss des Endlagers bzw. Erreichung des passiv-sicheren Zustands sicherheitstechnisch nicht mehr relevant.
- Strahlenbelastungen von Personal und Bevölkerung sowie Störfallrisiken beschränken sich auf den Zeitraum der Einlagerung der Abfälle,
- Der Verzicht auf Maßnahmen zur Rückholbarkeit von Abfällen verringert das Ausmaß von Safeguards-Maßnahmen bzw. Proliferationsprobleme.
- Durch Verzicht auf Rückholbarkeit werden die damit potenziell verbundenen sicherheitstechnischen Schwachstellen vermieden (z.B. nachteilige gebirgsmechanische Konsequenzen längeren Offenhaltens des Endlager-Bergwerks).
- Keine Belastungen zukünftiger Generationen durch die Verpflichtung zur Kontrolle der Abfälle und zur Aufrechterhaltung der Rückholbarkeit.

Nachteile

- Ohne Monitoring und Rückholbarkeit von Abfällen besteht keine Möglichkeit zum Eingriff in das Endlagersystem, falls sich der Nachweis der Langzeitsicherheit wider Erwarten doch als falsch erweisen sollte (und dies auch bemerkt werden sollte).
- Die Handlungsspielräume zukünftiger Generationen werden durch den Verzicht auf Rückholbarkeit eingengt, etwa für den Fall, dass bessere Entsorgungsmöglichkeiten entwickelt werden sollten.

ELo - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen

Mit der Option ELo wird versucht, die Anforderungen und Erwartungshaltungen der Gesellschaft insoweit zu erfüllen, als der (langfristigen) **Sicherheit** bei der Endlagerung **absolute Priorität** eingeräumt wird. Erst **nachgeordnet** werden sonstige **ethische und andere gesellschaftliche** Überlegungen berücksichtigt:

- Einhaltung des Verursacherprinzips (bis zu einem gewissen Grad) und der Forderung nach Nachhaltigkeit durch die gerechte Verteilung der aus der Entsorgung resultierenden Lasten zwischen den Generationen, zudem Vermeidung unangemessener Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.
- Bei passiv sicherer Endlagerung auf lange Sicht keine Belastung zukünftiger Generationen zur Aufrechterhaltung der Sicherheit.
- Ob es durch dieses Konzept zu einem Erhalt nennenswerter Handlungsspielräume für nachfolgende Generationen kommen könnte, ist schwer abzuschätzen. Die in **ELo - Wesentliche Merkmale und Ziele** (s.o.) genannten Vorgaben zu Monitoring und Rückholbarkeit in BMU (2010) bedeuten mangels konkreter Ausgestaltung keine Erweiterung des Handlungsspielraums künftiger Generationen.
- Erhöhung der Akzeptanz insbesondere während des Standortauswahlverfahrens durch gesellschaftliche Beteiligung und Gerechtigkeit / Fairness gegenüber den am Prozess Beteiligten.

In Deutschland sind umsetzungsfähige Ansätze für gesellschaftliche Beteiligung an der Standortauswahl für ein Endlager erstmals in AKEND (2000) formuliert worden. Im Standortauswahlgesetz für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle v. 27.06.2013 (StandAG 2013) sind entsprechende Ankündigungen enthalten: So sollen bei der Umsetzung des letztlich gewählten Entsorgungskonzeptes gesellschaftliche Anforderungen berücksichtigt werden. Insbesondere soll die Bevölkerung bei wichtigen Entscheidungen im Verlauf des Verfahrens, z.B. bei Standortauswahl und Entwicklung des Endlagerkonzeptes, beteiligt werden.

Die genannten "Vorzüge" der Option ELo aus gesellschaftlicher und ethischer Sicht (Verantwortung der heutigen und der unmittelbar nachfolgenden Generation für die Entsorgung der Abfälle gemäß Verursacherprinzip, keine unangemessene Belastung künftiger Generationen durch die Entsorgung der Abfälle) sind nicht vorrangig aus ethischen Prinzipien wie Fairness und Gerechtigkeit abgeleitet worden, sondern ergeben sich zwangsläufig aus der Überzeugung, dass die Langzeitsicherheit eines Endlagers zuverlässiger durch sorgfältig ausgewählte geologische und geotechnische Barrieren gewährleistet wird als durch gesellschaftliche Kontrolle.

Zudem sollen über die Einhaltung von Schutzziele und Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) allgemeine ethische Ansprüche berücksichtigt bzw. erfüllt werden. Hierzu gehören z.B. die Vermeidung von Belastungen zukünftiger Generationen, die über die für heutige Generationen akzeptierten hinausgehen, Offenhaltung von Handlungsmöglichkeiten für künftige Generationen (bedeutet aber für diese zwangsläufig gleichzeitig eine Belastung) und intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit (sofern sie nicht zu Lasten der Sicherheit geht).

ELo - Phasengliederung

Die Gliederung der operativen Phasen der Option ELo (Abb. ELo-1) ist der optionsunabhängigen Phasengliederung in 2.3 vergleichbar.

Vorbetriebsphase

Die Vorbetriebsphase besteht aus zwei aufeinander folgenden Schritten: Standortauswahl und -erkundung sowie dem formalen Eignungsnachweis für den höchstrangigen Standort. Der Eignungsnachweis ist mit der Darlegung eines Sicherheits- und Endlagerkonzepts verbunden, das bis zu diesem Zeitpunkt zu erarbeiten ist. Bereits die Standortauswahl muss aber auf konzeptionellen Überlegungen fußen (s.u.).

Bei Standortauswahl und -erkundung sind zunächst grundlegende Fragen zu klären und darauf aufbauend Entscheidungen zur Ausgestaltung des Entsorgungskonzepts und zu seiner Umsetzung zu treffen. Dazu gehören z.B. die Klärung, ob bzw. auf welche Weise Rückholbarkeit/Reversibilität verfolgt werden sollen, das grundsätzliche Endlager- und Sicherheitskonzept und die einzulagernden Abfälle; denn die Entscheidungen zu diesen Fragen berühren auch die Standortauswahl.

Zu klären ist weiterhin, auf welche Art und Weise eine wirksame (auch institutionell abgesicherte) Öffentlichkeitsbeteiligung während des Auswahl- und Erkundungsverfahrens (gegebenenfalls auch darüber hinaus) gewährleistet werden kann, wie Standortregionen festzulegen sind usw.. Auch das Suchverfahren selbst (Ziel, Kriterien, Schritte, Methodik des Vergleichs, Unsicherheiten usw.) muss entwickelt und festgelegt werden. Die befriedigende und möglichst einvernehmliche Lösung dieser Grundsatzfragen ist Voraussetzung für einen geordneten Ablauf der gesamten Vorbetriebsphase und der darauf folgenden Phasen.

Ist im Auswahlverfahren die Entscheidung für den Standort höchster Priorität getroffen worden, muss für diesen ein (formaler) Eignungsnachweis erarbeitet werden. Dazu müssen rechtzeitig Anforderungen sowohl an die Nachweisführung als auch an den Standort und das technische Konzept vorliegen. Insbesondere muss im deutschen Konzept der Nachweis erbracht werden, dass der ewG die an ihn gestellten strengen Anforderungen erfüllt. Am Ende dieses Schrittes sollte eine Genehmigung für den Standort stehen und eine legislatorische Zustimmung für ihn vorliegen.

Betriebsphase

Die Betriebsphase gliedert sich in die Teilphasen Bau und Einlagerung und die Teilphase Verschluss (s. Abb. ELo-1).

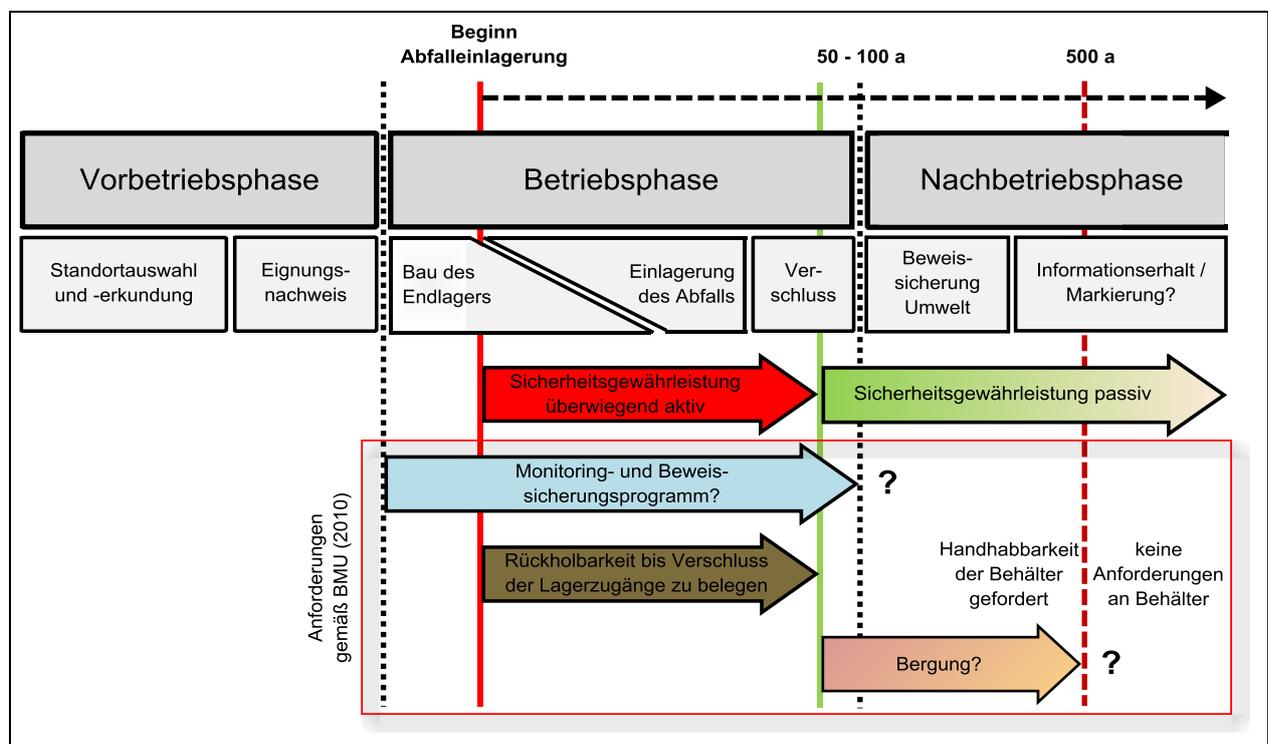


Abb. ELo-1 Operative Phasen der Entsorgungsoption ELo - "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (Beispiel Deutschland bis 2010) mit Informationen zu zugehörigen Aktivitäten und zur Art der Sicherheitsgewährleistung

Angaben zu Monitoring und Beweissicherung sowie zu Rückholbarkeit bzw. Bergung von Abfällen entsprechend den Anforderungen in BMU (2010)

Während der Bauphase wird das Endlager errichtet. Dabei können parallel zur Auf- fahrung von Einlagerungsbereichen in fertig gestellten Feldesteilen bereits Abfälle

eingelagert werden. Wenn ein Bereich befüllt ist, wird er verfüllt und abgedichtet. Sind alle vorgesehenen Abfälle eingelagert, werden die Resthohlräume des Endlagers verschlossen und abschließend die Zugangswege (Schächte, Rampen) abgedichtet. Mit diesem Verschluss des Endlagers endet die Betriebsphase.

Während der Betriebsphase ist darauf zu achten (ohne Monitoringmaßnahmen im eigentlichen Sinne) und sicher zu stellen, dass das Endlagersystem (Sicherheitsfunktionen, Prozesse usw.) keine offensichtlichen sicherheitsrelevanten Schwachstellen aufweist. Sollte dies doch der Fall sein, muss die Entscheidung getroffen werden, ob Bau und Einlagerung fortgesetzt werden soll oder ob die bereits eingelagerten Abfälle zurückgeholt werden müssen. Dies gilt, obwohl Rückholung nicht vorgesehen ist. Es muss daher zu Beginn der Betriebsphase klar sein, welche Bedeutung die einzelnen Sicherheitsfunktionen für das Funktionieren des gesamten Endlagersystems besitzen.

*In den deutschen Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) wird in Punkt 7.4 gefordert, dass ein **Kontroll- und Beweissicherungsprogramm** während der Betriebsphase und in einem begrenzten Zeitraum nach der Stilllegung umgesetzt werden muss. Damit ist nachzuweisen, dass Eingangsdaten, Annahmen und Aussage der Sicherheitsanalysen usw. eingehalten werden. Unter Pkt. 8.6 der Sicherheitsanforderungen wird gefordert, dass in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein muss. Diese Vorgaben, ihre genauen Ziele und Begründungen bleiben vage. Dasselbe gilt im Hinblick auf die Dauer des Programms, dessen Fortsetzung über die Stilllegung (d.h. auch Verschluss) hinaus zweifelhaft ist (s. dazu Vorbemerkung). Ob das geforderte Kontroll- und Beweissicherungsprogramm negative Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers hat, ist unklar.*

Regelungen bzw. Entscheidungskriterien, um die **Entscheidung über eine Abfallrückholung** während der Betriebsphase belastbar und einvernehmlich treffen zu können, liegen noch nicht vor. Auch Tiefe und Art der Beteiligung der Gesellschaft an den Entscheidungen ist noch nicht festgelegt.

Die wesentliche Entscheidung am Ende der Betriebsphase besteht darin, anhand vorliegender Daten / Erkenntnisse usw. festzustellen, ob das Endlagersystem bzw. seine Sicherheitsfunktionen wie geplant funktionieren oder ob Zweifel an der Funk-

tion bestehen. Fällt die Entscheidung positiv aus, wird das Endlager verschlossen und sich selbst überlassen.

Nachbetriebsphase

Nach dem Verschluss des Endlagers beginnt die Nachbetriebsphase. Eine Rückholung der Abfälle ist dann nicht mehr vorgesehen, und Entscheidungen sind dann nicht mehr zu treffen.

In der Nachbetriebsphase geht das Endlagersystem Schritt für Schritt in den passiv sicheren Zustand über. Danach sind keine Maßnahmen mehr zur unmittelbaren Gewährleistung der Sicherheit vorgesehen. Allerdings wird - wie bei allen umweltrelevanten Projekten - zunächst eine Beobachtung der Umweltmedien im Umfeld des Endlagers stattfinden (Beweissicherung Umwelt). Diese darf nicht mit Monitoringmaßnahmen zur Beobachtung der Endlagerentwicklung (s. dazu Datenblatt ELM) verwechselt werden.

Zusätzlich sind Maßnahmen zum Informationserhalt über das Endlager zu ergreifen, mit denen das Wissen über die Existenz des Endlagers so lange wie möglich aufrecht erhalten wird. Als eine besondere Maßnahme wird in einigen Projekten über die Möglichkeit der Markierung des Endlagers nachgedacht (BUSER 2010). Für geologische Tiefenlager in der Schweiz ist die Markierung bereits vorgesehen.

Laut Sicherheitsanforderungen (BMU 2010, Pkt. 7.4) ist das Kontroll- und Beweissicherungsprogramm in einem begrenzten Zeitraum auch nach der Stilllegung, also in der der Nachbetriebsphase entsprechenden Nachverschlussphase weiterzuführen. Generelles Ziel ist der Nachweis, dass die Eingangsdaten, Annahmen und Aussagen der für diese Phase durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsnachweise eingehalten werden. Wie dieses Kontroll- und Beweissicherungsprogramm aussehen soll, welche Größen ermittelt werden sollen, wie lange es dauern soll, anhand welcher Kriterien Maßnahmen zu treffen sind usw. ist unklar. Diese Unklarheiten betreffen insbesondere die Forderung nach Fortführung des Programms über die Stilllegung hinaus; denn dann ist das Endlager definitionsgemäß bereits verfüllt.

ELo - Offene Fragen

Bei der Option Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (ELo) bestehen keine grundsätzlichen bzw. strategischen offenen Fragen. Die Option wurde über Jahre entwickelt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile, der mit ihrer Umsetzung verbundenen Risiken und möglicher Varianten bzw. Ergänzungen umfassend, auch kontrovers, diskutiert. Klärungsbedarf besteht noch im Hinblick auf die optimierte Umsetzung der Option unter Beachtung verschiedener Rahmenbedingungen, z.B. unterschiedliche Wirtsgesteinstypen, Notwendigkeit der gemeinsamen Endlagerung verschiedener Arten radioaktiver Abfälle.

Sicherheitsrelevante offene Fragen bestehen vor allem bei einzelnen Elementen der Option, etwa der zeitabhängigen Funktion von Verschlüssen, sowie bei Varianten der Option, durch die ihre sicherheitlichen Vorteile aufgehoben oder zumindest gemindert werden können. Hierzu gehören auch Maßnahmen zur etwaigen Rückholung der Abfälle und des langzeitigen Monitorings. Darauf beziehen sich die folgenden Fragen, und zwar explizit auf die in Deutschland seit 2010 bestehenden Forderungen nach Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit der Abfälle und nach einem Kontroll- und Beweissicherungsprogramm (BMU 2010):

- *Die Ausführungen in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle zum geforderten Kontroll- und Beweissicherungsprogramm (BMU 2010, Pkt. 7.4) sind unklar. So ist eine Aufteilung in ein Kontrollprogramm und ein Beweissicherungsprogramm mit jeweils spezifischen Aufgaben und entsprechenden Merkmalen nicht erkennbar.*
- *Es bleibt unklar, mit welchem Ziel und wie lange das Kontroll- und Beweissicherungsprogramm nach der Stilllegung fortgeführt werden soll und welchen Bezug es zu der Möglichkeit der Rückholung oder der Bergung für 500 Jahre hat.*
- *Es bleibt unklar, welche Messgrößen herangezogen werden, um über die Rückholung bzw. Bergung zu entscheiden. Zu den notwendigen Entscheidungskriterien gibt es keine Aussagen. Auch bleibt unklar, ob sich die Forderung nach Rückholbarkeit auf das gesamte Inventar und / oder auf einzelne Behälter bezieht.*
- *Mögliche negative Einflüsse durch das Kontroll- und Beweissicherungsprogramm auf die (Langzeit-)Sicherheit sind bisher nicht betrachtet worden.*

- *Wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems im Verlauf von 500 Jahren dürften nach den Anforderungen an die langzeitige Endlagersicherheit und den entsprechenden Nachweis in BMU (2010) nicht zur Notwendigkeit der Rückholung oder Bergung von Abfällen führen. Es stellt sich daher die Frage, warum gerade diese Entwicklungen entscheidend für eine Bergungsmöglichkeit sein sollen. Die wahrscheinlichen Entwicklungen werden bereits vor Einlagerung der Abfälle identifiziert und festgelegt - entsprechendes müsste dann auch für die Entscheidung über die Bergung stattfinden.*

Sinnvolle Modifizierungen der Option ELo könnten auf den Zugewinn von Erkenntnissen zur Funktion der Barrieren des Endlagers und des Endlagersystems insgesamt und die Überwindung der nur begrenzten gesellschaftlichen Akzeptanz gerichtet sein. In diesen Zusammenhängen ergeben sich beispielsweise folgende Fragen:

- Kann ein auf die Betriebsphase begrenztes "Mindest-Monitoring-Programm" im Endlager entwickelt und umgesetzt werden und können dessen Ergebnisse dazu beitragen, das Vertrauen in die bis zum Verschluss durchzuführende (regelmäßig wiederkehrende) Bewertung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen zu stärken?
- Sollte bei der Entwicklung und Umsetzung der Option ELo von der Konzeptentwicklung über die Standortauswahl bis zur Nachbetriebsphase an wichtigen Haltepunkten, die mit grundlegenden Entscheidungen zusammentreffen, der Entscheidungsprozess öffentlich diskutiert und Festlegungen für das weitere Vorgehen getroffen werden? Wenn ja, könnte in diesem jahrzehntelangen Verfahren auch auf Fortentwicklungen in Wissenschaft und Technik sowie auf gesellschaftliche Belange Rücksicht genommen werden.

ELo - Datenblattbezogene Quellen

- BALTES, B. & KINDT, A. (2000): Rückholbarkeit von langlebigen radioaktiven Abfällen aus geologischen Endlagern.- Bericht GRS - A - 2774.- Köln, September 2000
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2005): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz,- Bericht BfS-17/05, Salzgitter, November 2005
- BMI (1983) - Bundesministerium des Inneren: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk.- GMBI, 1983, S. 220
- BMU (2010) - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Stand 30. September 2010.- http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf
- BUSER, M. (1998): "Hüte"-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblick.- Im Auftrag der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
- BUSER, M. (2010): Literaturstudie zum Stand der Markierung von geologischen Tiefenlagern.- Im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie (BFE), Bern, Mai 2010 - <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/19773.pdf>
- BUSER, M. (2014): „Hüten“ versus „Endlagern“: Eine Standortbestimmung 2014.- Expertenbericht, im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearinspektorats, http://static.ensi.ch/1411369298/hueten_vs_endlagern_2014-ensi_marcos_buser.pdf
- ESK – Entsorgungskommission - Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier, 02.09.2011 -

<http://www.entsorgungskommission.de/downloads/epanlage2el19homepage.pdf>

GRS (2013) – Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Bericht GRS-290, März 2013,
<http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-290.pdf>

KRANZ, H. (2001): Überlegungen zum deutschen Konzept für die Spaltstoffflusskontrolle bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Kernbrennstoffen in Endlagerbüchsen.- BfS-interner Bericht (ET-IB-120, Juni 2001), Salzgitter [zit. Nach BfS 2005]

StandAG – Standortauswahlgesetz (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 23. Juli 2013 -
http://www.juris.de/jportal/docs/news_anlage/gportal/bilder/bgbl1/bgbl113s2553.pdf

I. Optionen

Datenblatt ELM

Darstellung der Entsorgungsoption "Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (ELM)

ELM - Vorbemerkung

Für die Darstellung und Erläuterung der Entsorgungsoption "Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (ELM) wurde das **Schweizer Konzept der geologischen Tiefenlagerung** als Beispiel gewählt. Es ist das differenzierteste der derzeit verfolgten Endlagerkonzepte mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit und zudem gut dokumentiert. Das Konzept beruht auf der im Jahr 2000 unter der Bezeichnung "Kontrollierte geologische Langzeitlagerung" entwickelten Entsorgungskonzept für die radioaktiven Abfälle der Schweiz (EKRA 2000) und ist im Kernenergiegesetz der Schweiz (KEG 2003) unter der Bezeichnung "geologische Tiefenlagerung" als Entsorgungsstrategie verbindlich vorgegeben. Derzeit läuft das Standortauswahlverfahren für das geologische Tiefenlager (Sachplan geologische Tiefenlager) mit umfangreicher Beteiligung der Öffentlichkeit.

Im Hinblick auf den aktuellen **Entwicklungs- bzw. Umsetzungsstand** weist die Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit Übereinstimmungen mit der Option ELo auf. Dies gilt insbesondere für die Ansätze zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit in der Nachbetriebsphase. Zur Umsetzung der zusätzlich geplanten Maßnahmen zur zeitlich beschränkten Lagerbeobachtung und zur etwaigen Rückholung von Abfällen werden in den nationalen Entsorgungsprogrammen teilweise unterschiedliche, vielfach eher noch unklare Ansätze verfolgt. Ein alle Aspekte umfassender, gesicherter Entwicklungsstand der Option ELM ist daher derzeit weder in nationalen Lagerprojekten noch international zu erkennen.

ELm - Wesentliche Merkmale und Ziele

Das Konzept der geologischen Tiefenlagerung verbindet die Vorteile der passiv sicheren Endlagerung mit der Möglichkeit der Reversibilität einmal gefällter Entscheidungen und damit auch der Rückholbarkeit der Abfälle. Das **Hauptziel** des Konzepts besteht letztlich darin, den Schutz von Mensch und Umwelt vor den von radioaktiven Abfällen ausgehenden Auswirkungen durch passiv sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen zu gewährleisten. In der Schweiz gilt das Konzept nicht nur für hochradioaktive Abfälle, sondern auch für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Es besteht die Möglichkeit, dafür zwei getrennte Endlager (für hochradioaktive und langlebige mittelradioaktive bzw. schwachradioaktive und kurzlebige mittelradioaktive Abfälle) zu errichten oder nur eines ("Kombilager").

Bevor das Lager in diesen Endlagerzustand überführt wird, sollen für einen noch festzulegenden Zeitraum (mehrere Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte) Überwachungsmaßnahmen im Lager vorgenommen werden: Durch Beobachtung eines Teils der Abfälle und der geologischen Barriere des Endlagersystems sollen das Verständnis der Entwicklung des Endlagersystems verbessert und die mit dem Nachweis der Langzeitsicherheit verbundenen Ungewissheiten reduziert werden. Bei unerwarteter Fehlfunktion des Endlagersystems während der Beobachtungsphase (s. Abb. ELm-2) können Maßnahmen bis hin zur Rückholung der Abfälle ergriffen werden.

Für die Entscheidungen über solche Maßnahmen bzw. - bei Bestätigung des erwarteten Systemverhaltens - über den endgültigen Verschluss des Lagers mit passiv sicherem Einschluss der Abfälle ist die demokratische Teilhabe der Gesellschaft vorgesehen. Ethische Grundsätze werden insoweit berücksichtigt als z.B. zukünftige Generationen durch die während der Lagerbeobachtung erforderlichen Aktivitäten und den in der Zukunft liegenden Lagerverschluss (zumindest finanziell) nicht belastet werden sollen. Dazu sind Maßnahmen zur Sicherstellung der Finanzierung getroffen worden.

Langzeitsicherheit reduziert werden. Das Pilotlager bleibt über den für die Einlagerung der Abfälle im erforderlichen Hauptlager erforderlichen Zeitraum hinaus zur Überwachung zugänglich und wird erst dann vollständig verschlossen, wenn die Entscheidung zur Beendigung der Überwachung gefallen ist.

- Das **Hauptlager** nimmt den größten Teil der Abfälle auf. Die einzelnen Feldesteile werden nacheinander bedarfsweise aufgefahren und nach Abfalleinlagerung rasch verfüllt, um dafür den Übergang in den passiv sicheren Zustand einzuleiten. Nach Versiegelung des Pilotlagers werden noch offene Hohlräume des Hauptlagers (Zugangsstrecken, Schächte usw.) verschlossen. Damit ist das Tiefenlager insgesamt für die Entwicklung des passiv sicheren Zustands vorbereitet.

Zusammenfassend weist die in der Schweiz vorgeschriebene Entsorgungsoption geologische Tiefenlagerung folgende charakteristische Merkmale auf:

- Zeitlich begrenzte Kontrolle: Überwachung der Abfälle und sicherheitsrelevanter Prozesse durch gezieltes Monitoring zur Stärkung des (auch gesellschaftlichen) Vertrauens in die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung und der entsprechenden Nachweise. In dieser Phase aktive Gewährleistung der Sicherheit. Bestätigen die Beobachtungsergebnisse das prognostizierte Systemverhalten wird das Tiefenlager schrittweise in ein Endlager mit passiv wirkenden Sicherheitsmerkmalen überführt.
- Mit Test-, Pilot- und Hauptlager besitzt das geologische Tiefenlager eine komplexe Struktur mit unterschiedlicher Funktion der Lager. Bis zum endgültigen Verschluss des Lagers hängt seine Sicherheit wesentlich von der Kontrolle ab. Ihr Erfolg setzt voraus, dass die entscheidenden sicherheitsrelevanten Prozesse überwacht werden (können). Für den Fall, dass die Kontrollmaßnahmen unbeabsichtigt für längere Zeit unterbrochen oder sogar eingestellt werden bzw. ein unerwarteter Notfall eintritt, sollen ein "automatischer" Selbstverschluss oder vorbereitete Maßnahmen zum "Schnellverschluss" der verschiedenen Lagerteile den Wasserzutritt an die Abfälle über die Zugangsstrecken verhindern oder zumindest beschränken.
- Möglichkeit der Rückholung: Werden Entwicklungen im Lager festgestellt, mit denen nicht gerechnet wurde, können die Abfälle ohne allzu großen Aufwand re-

lativ zügig rückgeholt werden. Sie müssen dann zwischengelagert werden, bis ein neues Tiefenlager oder sonstige Optionen zur Verfügung stehen.

- Es ist eine Mitsprache / Mitwirkung der Bevölkerung bei wichtigen Entscheidungen im Verlauf des gesamten Verfahrens der Lagerentwicklung, insbesondere bei der Entscheidung zum endgültigen Verschluss des Lagers bzw. zur Rückholung (von Teilen) der Abfälle möglich.

Wie die genannten Elemente der geologischen Tiefenlagerung im Einzelnen umgesetzt werden (können) befindet sich derzeit noch in der Diskussion bzw. Entwicklung. Insofern stellen einige der Elemente derzeit eher strategische Absichten als konkrete Planungen dar.

ELm - Mögliche Varianten

Varianten drängen sich für das gezielt entwickelte Schweizer Konzept Geologisches Tiefenlager derzeit nicht auf. Vorstellbar ist, dass die Zeitspanne, während der sicherheitsrelevante Prozesse im Pilotlager beobachtet werden, variiert und über die derzeit diskutierte Zeitspanne (maximal einige Jahrhunderte) hinaus verlängert werden. Da die Sicherheit des offenen Lagers während dieser Zeitspanne wesentlich von der gesellschaftlichen Kontrolle (auch Unterhaltsarbeiten) abhängt, würde deren Ausdehnung zu entsprechend höheren Risiken bzw. Unsicherheiten führen.

Vorstellbar sind auch gewisse Veränderungen der spezifischen Funktionen, die den drei Lagerelementen zugeordnet sind. Eine weiter gehende Alternative bestünde im Verzicht auf das Pilotlager. Die dafür vorgesehene Beobachtung von Abfällen müsste dann im "Hauptlager" stattfinden, das dann auch alle Abfälle aufnehmen müsste. Eine solche Variante wies Ähnlichkeit mit dem Konzept für das am Standort Bure geplante französische Endlager auf. In Frankreich ist die Rückholbarkeit für bestimmte Abfallarten für einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren vorgeschrieben. Es sollen technische Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholung getestet und umgesetzt werden, etwa die Einlagerung in röhrenartige Einlagerungszellen aus Stahl, aus denen die zylindrischen Abfallbehälter mit geringem Aufwand zurückgeholt werden können. Die geplanten Monitoringmaßnahmen dienen daher neben der Lagerüberwachung vor allem der Erhebung der Verhältnisse in den Einlagerungszellen, um die etwaige Rückholung geordnet durchführen zu können.

ELm - Begründung

Die im Konzept der geologischen Tief Lagerung verwirklichte Verbindung der passiven Endlagerung mit einer Phase aktiver Kontrolle stellt die politisch gewollte Zusammenführung der in den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in der gesellschaftlichen Debatte in der Schweiz über den sicheren Umgang mit den radioaktiven Abfällen vertretenen und damals jeweils nicht konsensfähigen bzw. nicht vereinbaren Positionen dar. Der damals zur Entwicklung einer konsensfähigen Entsorgungslösung durchgeführte "Energiedialog Entsorgung" endete ohne das erhoffte Ergebnis (RUH 1998).

Die Begründung der geologischen Tiefenlagerung ergibt sich daher letztlich aus dem Anspruch, langfristige passive Sicherheit zu verbinden mit zeitlich begrenzten Überwachungsmaßnahmen sicherheitsrelevanter Prozesse im Tiefenlager unter gesellschaftlicher Beteiligung. Deren Ergebnisse sollen darüber entscheiden, ob das Lager endgültig verschlossen wird oder ob die Abfälle rückgeholt werden müssen. Die Entscheidung über die Rückholbarkeit (bzw. die Gewährleistung von Reversibilität über einen festzulegenden Zeitraum) dient auch der Stärkung der Bereitschaft zur Zustimmung zum Lager in der Öffentlichkeit / Gesellschaft und bedingt daher letztlich auch deren Mitbestimmung bei zu treffenden Entscheidungen.

ELm - Gewährleistung der Sicherheit

Langfristige Sicherheit soll durch passiv sichere geologische Barrieren erreicht werden. Eingriffe oder Wartungsarbeiten sind in dieser Phase nicht (mehr) erforderlich.

Kurzfristige Sicherheit wird durch das Monitoring bzw. die Überwachung sicherheitsrelevanter Elemente des Lagersystems und in ihnen ablaufender Prozesse gewährleistet. Darüber hinaus soll damit gezeigt werden, dass die Entwicklung des Tiefenlagersystems den prognostizierten Verhältnissen und Prozessen entspricht. Ist dies der Fall, wird das Tiefenlager verschlossen und sich selbst überlassen (Übergang in die passiv sichere Endlagerphase). Während der Betriebsphase ist die etwaige Abfallrückholung dadurch erleichtert, dass die Zugangswege zu den Abfällen teilweise noch nicht verfüllt sind.

Die Dauer der Überwachungsphase ist noch nicht festgelegt, soll aber jedenfalls mehrere Jahrzehnte umfassen. Die Lagersicherheit soll und muss in dieser Zeit ak-

tiv aufrechterhalten werden. Für den Fall, dass die Abfälle insgesamt oder bestimmte Anteile davon zurückgeholt werden sollten, ist derzeit noch offen, was anschließend mit ihnen geschieht (wahrscheinlich Umkonditionierung, Zwischenlagerung, möglicherweise P&T mit folgender Endlagerung).

Strahlenbelastung im Normalbetrieb und bei Rückholung

Für das Betriebspersonal resultieren Strahlenbelastungen aus der Einlagerung der Abfälle in das Pilot- und das Hauptlager. Dazu können - über den gesamten Einlagerungszeitraum betrachtet - alle Abfallgebinde bei ihrer notwendigen Handhabung beitragen. Der größte Teil der Abfallgebinde verursacht nach ihrer Einlagerung und ihrem Versatz bzw. der Verfüllung / Abdichtung der jeweiligen Einlagerungskammern bzw. Feldesteile praktisch keine Strahlenbelastung mehr. Im Falle der Rückholung treten für das Betriebspersonal erneut Strahlenbelastungen durch die Handhabung der betroffenen Abfallgebinde auf.

Die am Standort wohnende Bevölkerung wird - außer durch den Antransport der Abfälle - durch radioaktive Freisetzungen aus dem Bergwerk mit den Abwettern belastet. Ursprung der Belastung sind die jeweils im Einlagerungsvorgang befindlichen Abfälle und die noch nicht (vollständig) versetzten bzw. abgedichteten Abfälle im Pilotlager und im Hauptlager. Bewetterungsmaßnahmen, zumindest von Teilen des Bergwerks, sind so lange erforderlich, wie im Hauptlager und/oder Pilotlager Überwachungsaufgaben wahrgenommen werden. Danach tritt im Normalfall keine Strahlenbelastung für die Bevölkerung mehr auf. Im Falle der Rückholung muss die Bewetterung so lange fortgesetzt bzw. wieder aufgenommen werden, bis zu bergenden Abfälle rückgeholt sind. Dies hätte wiederum Strahlenbelastungen der Bevölkerung zur Folge.

Betriebssicherheit

Das Bergwerk ist bis zum Abschluss der Überwachung des Pilotlagers in Betrieb. Übertägige Störfälle durch Einwirkungen von innen und außen sind nur während der Einlagerung möglich und können nur die zum Zeitpunkt eines Störfalls in Anlieferung, im Pufferlager bzw. auf dem Weg nach untertage befindlichen Gebinde betreffen. Untertägig sind während der Einlagerungsphase mit Ausnahme besonderer Störfälle (z.B. Wasserzutritt) nur Störfälle durch Einwirkungen von innen möglich. Davon können immer nur die Abfallgebinde betroffen sein, die sich zum Eintrittszeitpunkt im Einlagerungsprozess bzw. in einem noch nicht versetzten Einlage-

rungsbereich befinden. Sind alle Einlagerungskammern des Hauptlagers verschlossen, sind nur Störfälle durch Einwirkungen von innen und nur mit Folgen für die Gebinde im Pilotlager möglich, sofern dieses noch nicht vollständig versetzt und versiegelt ist. Ist das Bergwerk verschlossen, sind keine Störfälle im Sinne der Strahlenschutzverordnung mehr möglich. Eine eventuelle Rückholung von Abfällen wäre mit einem Störfallrisiko entsprechend dem bei der Einlagerung behaftet.

ELm - Proliferation, Safeguards

Aspekte von Proliferation und Safeguards sind von großer Bedeutung, solange das Pilot- und das Hauptlager nicht endgültig verschlossen und die Zugangsstrecken sowie Schächte bzw. Rampen nicht endgültig verfüllt worden sind. Die erforderlichen Safeguardsmaßnahmen müssen umgesetzt werden. Die in dieser Zeit erleichterte Rückholung der Abfälle kann - im Gegensatz zur Situation bei verfülltem Bergwerk - u.U. zu einem verschärften Problem hinsichtlich der Proliferationsrisiken führen.

ELm - Ungewissheiten und Risiken

In EKRA (2000 u. 2002 [Anhang, Kap. 2.2f]) wird das Konzept der geologischen Tiefenlagerung detailliert beschrieben. Daraus lassen sich folgende **Ungewissheiten** der Option ableiten, die im Wesentlichen das Pilotlager betreffen, ohne dass Auswirkungen auf das Hauptlager vollständig ausgeschlossen werden können:

- Generell: Unsicherheiten bzw. Risiken, die während der noch festzulegenden Dauer des Monitorings / der Kontrolle des Tiefenlagers, insbesondere des Pilotlagers, auftreten können. Da die Durchführung aktiver Sicherheitsmaßnahmen von gesellschaftlicher Stabilität abhängig ist, besteht insbesondere die Unsicherheit, ob während gesellschaftlicher Krisen / Umbrüche die unerlässliche Überwachung des noch offenen Endlagers im erforderlichen Umfang und in der erforderlichen Art und Weise durchgeführt werden kann. Die resultierenden direkt sicherheitsbezogenen Risiken und das Risiko falscher Entscheidungen nehmen mit der Dauer des Monitoringzeitraums zu.
- Gegen etwaige sicherheitskritische Konsequenzen einer ungewollten oder gewollten Reduzierung oder Beendigung der Beobachtungsmaßnahmen ohne gleichzeitigen Lagerverschluss ist die Etablierung von Selbstverschlusseinrichtungen bzw. Maßnahmen für einen Schnellverschluss vorgesehen. Ob solche Einrichtungen

und Maßnahmen hinreichend zuverlässig umsetzbar sind und ob sie letztlich ihren Zweck erfüllen würden, ist offen

- Die wegen der zusätzlichen Beobachtungsphase lange Dauer der Betriebsphase mit Offenhaltung von Teilen des Endlagerbergwerks führt in Abhängigkeit von Gesteinseigenschaften, Tiefenlage des Endlagers und Art und Umfang der Ausbaumaßnahmen zu gebirgsmechanischen Konsequenzen (Auflockerungszone), aus denen sich Funktionsbeeinträchtigungen der geologischen und geotechnischen Barrieren bzw. Verzögerungen beim Erreichen der vollen Barrierefunktion ergeben können.
- Speziell: Aus der erleichterten Zugänglichkeit des Lagers und der Rückholbarkeit der Abfälle können sich Ungewissheiten und Sicherheitsrisiken ergeben. Dazu können beispielsweise die Offenhaltung von Hohlräumen des Tiefenlagers mit erhöhter Gefährdung von Wasserzutritten oder sonstigen Gefährdungen, das (Nicht-)Funktionieren von Verschlüssen / Abdichtungen usw. beitragen. Auch ein erhöhtes Proliferationsrisiko ist zu beachten.
- In Abhängigkeit von der Länge des Monitoring-Zeitraums nimmt die Ungewissheit zu, ob die erhobenen Messwerte korrekt sind. Es muss davon ausgegangen werden, dass im Zeitverlauf des Monitorings die Funktionsfähigkeit von Messgeräten abnimmt. Von ihrem zuverlässigen Funktionieren hängt letztlich ab, ob unzulässige Lagerzustände festgestellt werden können und welche Maßnahmen getroffen werden sollen bzw. müssen (Befunde: falsch positiv, falsch negativ - wie man damit umgeht, ist letztlich noch offen),
- Die vorrangige Überwachung von Abfallbehältern und deren Wechselwirkungen mit dem Nahfeld und dem Wirtsgestein soll frühzeitig etwaige ungünstige Entwicklungen des Lagersystems kenntlich machen. Zudem sollen prognostische Modellannahmen zum langfristigen Verhalten des Tiefenlagers verifiziert werden. Es ist ungewiss, inwieweit dies über entsprechend lange Zeiträume tatsächlich möglich ist.
- Nachdem das geologische Tiefenlager endgültig verschlossen worden ist, unterliegt es bei richtiger Standortauswahl und Standortuntersuchung der (im Vergleich zu gesellschaftlichen Entwicklungen eher geringen) prognostischen Unge-

wissheit, die sich aus der Entwicklung des Endlagersystems, insbesondere der geologischen und geotechnischen Barrieren, ergibt.

Die kurz angesprochenen Probleme / Ungewissheiten führen zu **Risiken**, die ihrerseits zu falschen Entscheidungen führen können, die mit der Überwachung gerade vermieden werden sollen: Z.B. das Risiko eines aus unvorhersehbarer gesellschaftlicher Entwicklung resultierenden unzureichenden oder gar aufgegebenen Monitorings bei noch teilweise unverfülltem bzw. unversiegeltem Zustand des Tiefenlagers. Des weiteren Risiken für Fehlentscheidungen, die sich aus fehlender Eindeutigkeit gewonnener Befunde (falsche oder richtige Messwerte?) ergeben können; oder Risiken, die aus (fehlerhaften) Prognosen zur Entwicklung des Endlagersystems entstehen können, usw.. Die zugrunde liegenden Ungewissheiten müssen aufgearbeitet bzw. aufgelöst werden. Zumindest ist ihre sicherheitliche Bedeutung zu beurteilen und zu klären, wie mit nicht ausräumbaren Ungewissheiten umzugehen ist.

ELm - Generelle Vor- und Nachteile

Vorteile

- Verknüpfung eines langfristig passiv sicheren (End-)Lagersystems mit der zeitlich begrenzten Überwachung / Kontrolle des Lagers und der Möglichkeit, die Abfälle bei Bedarf zurückzuholen (also auch Reversibilität aller Maßnahmen bis zum Ende der Phase der Überwachung).
- Kernstücke des Tiefenlagers sind das Hauptlager und das Pilotlager, die beide räumlich und hydraulisch voneinander getrennt sind. Das Pilotlager dient vor allem dem Monitoring sicherheitsrelevanter Prozesse, die unmittelbar aus der der Entwicklung der Abfälle und Abfallbehälter resultieren. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Hauptlager ist allerdings jeweils zu belegen. Auf Grundlage der Ergebnisse der Überwachung können notwendige Eingriffe im Hauptlager (und Pilotlager) vorgenommen werden bis hin zur (noch) relativ einfachen Rückholung aller eingelagerten Abfälle.
- Ein umfassender öffentlicher Diskurs und die Einbindung der betroffenen und interessierten Bevölkerung in die Entscheidungen über das weitere Vorgehen auf Grundlage von Monitoringergebnissen sind wichtige Voraussetzungen für einen erfolgreichen Entscheidungsprozess bis zum endgültigen Verschluss des Lagers

und für die Akzeptanz von Maßnahmen als Reaktion auf ungünstige Monitoringergebnisse.

- Berücksichtigung ethischer Anforderungen, v.a. Gerechtigkeit / Fairness des Vorgehens in den Entscheidungsprozessen bei der Standortauswahl und der eventuellen Rückholung der Abfälle, Einhaltung des Verursacherprinzips, Reversibilität des Handelns, Generationengerechtigkeit.
- Die Möglichkeit des Zugriffs auf Kernbrennstoffe durch Anlagenfremde ist bis zum endgültigen Verschluss stark eingeschränkt, danach ist der Zugriff nur noch mit außerordentlichem Aufwand möglich.

Nachteile

- Generell: Die oben aufgeführten Vorteile der Lagerbeobachtung kommen nur dann zum Tragen, wenn die in dieser Phase zur Aufrechterhaltung der Sicherheit erforderlichen Maßnahmen tatsächlich in der erforderlichen Qualität und im erforderlichen Umfang durchgeführt werden. Eine langfristige Garantie gibt es dafür wegen mangelnder Prognostizierbarkeit der gesellschaftlichen Entwicklung nicht.
- Der verlängerte Zeitraum des Offenhaltens von bergmännisch geschaffenen Hohlräumen kann durch Auflockerung des Gebirges um die Hohlräume, Austrocknungseffekte (Tonstein) sowie durch (noch) nicht voll funktionsfähige Dichtungsbauwerke und (noch) nicht voll funktionsfähiges Versatzmaterial zu Einschränkungen der Sicherheit, auch der Langzeitsicherheit, führen. Dem kann wahrscheinlich allenfalls durch größeren technischen Aufwand bei der gebirgsmechanischen Herrichtung des Lagers begegnet werden.

ELm - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen

Mit der Option ELm wird versucht, die zum Teil sehr widersprüchlichen Anforderungen und Erwartungshaltungen der Gesellschaft zur Entsorgung radioaktiver Abfälle möglichst weitgehend zu erfüllen (EKRA 2000, 2002). Dazu tragen vor allem folgende (z.T. ethische) Grundüberlegungen bei:

- Erhaltung des Handlungsspielraums für jede Generation durch die **Reversibilität der Entsorgungsmaßnahmen** (zeitlich begrenztes Monitoring mit Möglichkeit der Überprüfung des Verhaltens des Lagersystems und gegebenenfalls Rückho-

lung). Andererseits auf lange Sicht **keine Belastung zukünftiger Generationen** durch passiv sichere Endlagerung.

- **Einhaltung des Verursacherprinzips** und der Forderung nach Nachhaltigkeit durch die gerechte Verteilung der resultierenden Lasten der Entsorgung zwischen den Generationen und Subgruppen; zudem Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen (Bereitstellung finanzieller Ressourcen).
- Erhöhung der Zustimmung zum eingeschlagenen Entsorgungsweg durch Gewährleistung von **Gerechtigkeit / Fairness** des Vorgehens gegenüber allen am Prozess Beteiligten. Daraus folgt insbesondere ein umfassender öffentlicher Diskurs über die Vor- und Nachteile verschiedener Entsorgungsoptionen sowie die **Beteiligung der Bürger** an wesentlichen Entscheidungen bei Umsetzung der getroffenen Entsorgungsoption (demokratische Teilhabe an Entscheidungen).

Die Option ELm erfordert demnach eine kontinuierliche Einbeziehung der Bürger die Entscheidungsprozesse und Teilhabe an den zu treffenden Entscheidungen, zumindest bis entschieden worden ist, das Tiefenlager endgültig zu verschließen und in den passiv sicheren Zustand übergehen zu lassen. Bis zu diesem noch festzulegenden Zeitpunkt liegt allerdings eine (zeitliche, materielle usw.) Belastung derjenigen Generationen vor, die an Entscheidungsprozessen beteiligt sind. Zudem ist festzuhalten, dass bei über einen längeren Zeitraum offenem Tiefenlager auch eine insgesamt höhere radioaktive Belastung der Beschäftigten und der Anwohner stattfindet, für deren Hinnahe Überzeugungsarbeit zu leisten ist.

ELm - Phasengliederung

Die Phasengliederung für die Option Elm ist Abb. ELm-2 zu entnehmen.

Vorbetriebsphase

Die "optionsunabhängig definierte" Vorbetriebsphase besteht aus den Teilen Standortauswahl und Erkundung sowie dem Eignungsnachweis für den identifizierten relativ besten Standort (s. Abb. ELm-2). Derzeit läuft mit dem Sachplanverfahren geologische Tiefenlager das Standortauswahlverfahren, an dessen Ende die abschließende Erkundung des letztlich gewählten Standortes und die Detailplanung für die Umsetzung des Konzeptes geologisches Tiefenlager stehen.

Dem entspricht die in EKRA (2002) beschriebene Entwicklungsphase "Erkundung und Planung", in der entsprechend dem rechtlichen Projektrahmen die Bewilligung vorbereitender Handlungen sowie die Baubewilligung anstehen. In der "Erkundungs- und Planungsphase" werden u.a. die zur Standortcharakterisierung und für die Sicherheitsanalysen erforderlichen Standortuntersuchungen durchgeführt. Sie endet mit der nuklearen Baubewilligung.

Die strategischen Festlegungen zum Konzept geologische Tiefenlagerung sind bereits im Vorfeld der Vorbetriebsphase getroffen worden. Wichtige Einzelheiten sind jedoch im Sinne einer operativen Konkretisierung der strategischen Vorgaben noch zu klären und - bei positivem Erkundungsergebnis - umzusetzen. Insbesondere stehen die Auslegung und Positionierung von Test-, Pilot- und Hauptlager an. Zu klären bleibt spätestens bis zur Erteilung der Baubewilligung auch, welche Überwachungsmaßnahmen mit welcher genauen Zielsetzung und über welchen Zeitraum (näherungsweise) durchgeführt werden sollen, in wie weit die Ergebnisse übertragbar sind und wie die Gesellschaft in die iterative Bewertung der Monitoringergebnisse und ihre Umsetzung in Entscheidungen (weiter untersuchen / endgültig verschließen / Abfall zurückholen usw.) einbezogen werden soll.

Entsprechendes gilt auch für die Fragen nach der inhaltlichen Ausgestaltung der Kriterien, anhand derer Maßnahmen eingeleitet werden müssen, sowie nach Messmethoden und -geräten, die über entsprechend lange Zeiträume funktionsfähig bleiben, sowie nach den zu überwachenden Messgrößen. Diese Aspekte müssen vorher behandelt und bei der Entwicklung des Überwachungsprogramms berücksichtigt werden, damit nicht eine Vorgehensweise etabliert wird, die sich später womöglich nicht in der ursprünglich gewünschten Art umsetzen lässt.

Beim Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) laufen derzeit Projekte mit externer Beteiligung, in denen Antworten auf die genannten und weiteren mit dem Monitoringprogramm verbundene Fragen gesucht werden.

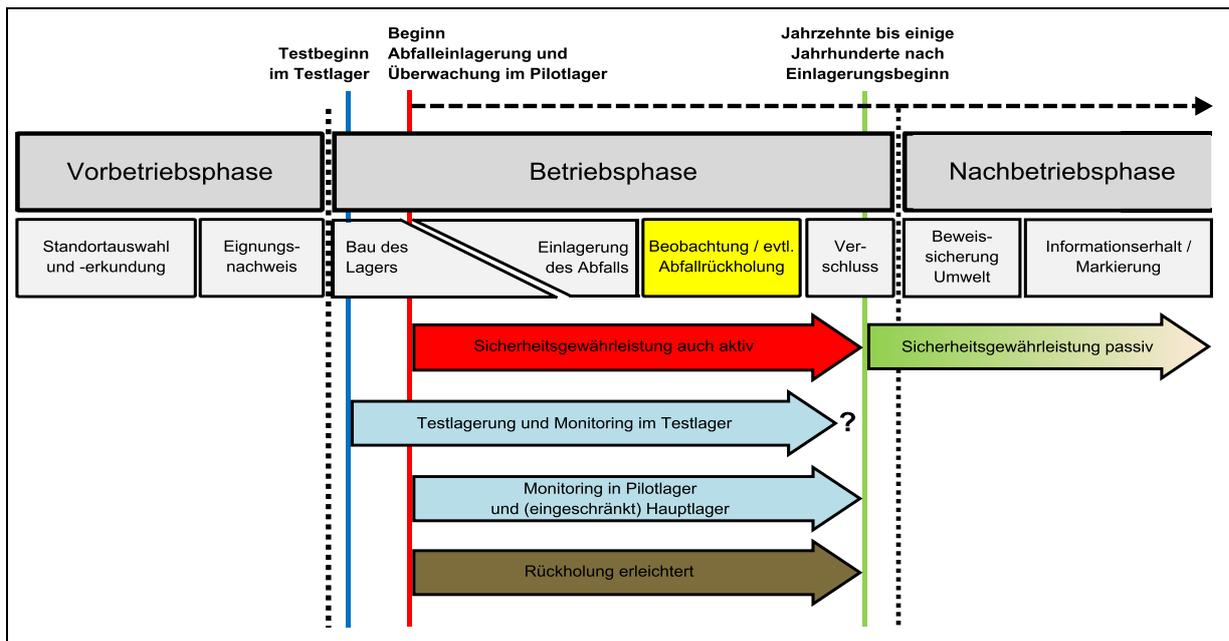


Abb. ELM-2 Operative Phasen der Entsorgungsoption Elm - "Endlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit" (Beispielkonzept geologisches Tiefenlager) mit zugehörigen Aktivitäten und Informationen zur Art der Sicherheitsgewährleistung sowie zur Dauer von Monitoring und erleichteter Rückholung

Betriebsphase

Die Betriebsphase besteht aus vier Teilphasen (s. Abb. ELM-2): Bau des Lagers, Einlagerung des Abfalls, Monitoring / eventuell Abfallrückholung und Verschluss. Lagerbau und Abfalleinlagerung laufen wegen der sukzessiven Auffahrung und Befüllung von Einlagerungsbereichen mit dem nachfolgenden Verschluss zeitweilig parallel. Das Monitoringprogramm wird bereits in der Vorbetriebsphase gestartet.

Inhaltlich entspricht diese Gliederung derjenigen in EKRA (2002), wo sich die Betriebsphase in Bauphase einerseits und Betriebs- und Beobachtungsphase andererseits gliedert. Sie beginnt mit der Rahmenbewilligung und endet mit dem Entscheid zum Verschluss des Tiefenlagers. Da in der Schweiz ein mehrstufiges Genehmigungsverfahren vorgeschrieben ist, ist eine solche Untergliederung der Betriebsphase formal sinnvoll. In EKRA (2002, Abb. 2) enden Beobachtung und Kontrolle im Pilotlager am Ende der Betriebsphase. Formal endet die Beobachtungsphase (und damit auch die Betriebsphase) nach EKRA (2002) dann, wenn der Entscheid zum Verschluss gefällt wurde.

Während der Betriebsphase werden Testlager, Pilot- und Hauptlager errichtet und betrieben. Mit Beginn der Einlagerung der Abfälle in Hauptlager und Pilotlager setzt die Überwachung ein. Es stellen sich dabei mindestens folgende Fragen:

- Welche Bedeutung besitzen die einzelnen **Sicherheitsfunktionen** für das Funktionieren des Gesamtsystems der geologischen Tiefenlagerung? Dies gilt sowohl für die "klassischen" Sicherheitsfunktionen bei der geologischen Endlagerung (Funktionen von Behälter, Versatz, geologische Barrieren usw.) als auch für das über mehrere Jahrzehnte oder sogar einige Jahrhunderte (?) andauernde Monitoring, durch das Handlungssicherheit erhöht werden soll.
- Beim Monitoring stellen sich u.a. die Fragen, die bereits in Abschnitt ELM-10 (Vorbetriebsphase, drittletzter Absatz) angerissen werden. Weitere Fragen betreffen neben der Dauer des Offenhaltens des Lagers und seines Verschlusses beispielsweise die Vorbereitung auf eine die Überwachung des Lagers in Frage stellende gesellschaftliche Krise. In EKRA (2000) wurden dazu die Ideen des **Schnellverschlusses** und des **Selbstverschlusses** des Tiefenlagers entwickelt (s. auch Abb. ELM-1). Für den Selbstverschluss, der bei verloren gegangener Kontrolle selbsttätig zum Verschluss von Lagerzugängen führen sollte, haben sich bis heute keine ausreichenden Entwicklungsperspektiven ergeben.
- Im Sinne des Schnellverschlusses werden jedoch in der Richtlinie ENSI-G03 für den Fall, dass ein ordnungsgemäßer Verschluss in Frage gestellt ist, technische und betriebliche Vorkehrungen für einen **temporären Verschluss** gefordert. Damit sollen die Einlagerungsbereiche eines geologischen Tiefenlagers während der Betriebsphase jederzeit rasch in den passiv sicheren Zustand überführt werden können. Das Funktionieren der Vorkehrungen ist in Testbereichen des Lagers vor Einlagerung der Abfälle zu zeigen. Die Vorkehrungen dürfen die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

Ob durch das letztlich umsetzbare und gewährleistbare Monitoringprogramm und die damit erhofften Erkenntnisse insgesamt gegenüber der herkömmlichen Endlagerung radioaktiver Abfälle eine Verbesserung der Sicherheit des Endlagersystems erreicht werden kann, muss durch einen abwägenden Vergleich ermittelt werden. Dieser muss u.a. die durch Monitoring bedingten etwaigen Einbußen an Sicherheit (u.a. komplexeres Endlagersystem, längere Offenhaltung, insgesamt höhere Frei-

setzung / radiologische Belastung im Normal- und Störfallbetrieb usw.) einerseits und ein etwaiger Gewinn an Sicherheit für die Nachbetriebsphase (u.a. durch Indikatoren gestützte Hinweise auf vorgesehene Systemverhalten, mögliche Reaktion auf unvorhergesehene kritische Entwicklungen / Ereignisse, Berücksichtigung gesellschaftlicher Anforderungen) umfassen.

Ein solcher Vergleich könnte mit Bezug auf die bekannten Sicherheitsfunktionen durchgeführt werden (auch mit Blick auf Unsicherheiten / Ausfallrisiko im Zeitverlauf usw.). Hinzu kommen die durch Überwachung / Monitoring gegebenen aktiven Sicherheitsfunktionen, die sich zum einen auf die gesellschaftlichen Verhältnisse, zum anderen auch auf die Messtechnik usw. beziehen müssen.

Insgesamt erscheint ein auf Grundlage eines um Monitoring erweiterten Begriffs von Sicherheitsfunktionen beruhender **risikobasierter qualitativer Bewertungsansatz** unter Einbeziehung menschlichen Handelns zur Bewertung der Option(en) denkbar.

In der Teilphase "Bauphase" nach EKRA (Bau des Tiefenlagers) werden - neben verschiedensten Bewilligungen - Test-, Pilot- und Hauptlager errichtet. Im zuerst in Betrieb genommenen Testlager werden (im Sinne eines standortbezogenen Untertagelabors) frühzeitig Untersuchungen aufgenommen und Tests durchgeführt. Im Pilot- und Hauptlager werden nach dem Bau erste Tests / Überwachungen vorgenommen. Die Teilphase "Betrieb und Beobachtung" entspricht ungefähr den Teilphasen Einlagerung und Monitoring gemäß Abb. ELM-2. Sie beginnt mit der Einlagerung von Abfällen in Test- und Hauptlager. Die geplanten Lagerkavernen des Hauptlagers werden etappenweise aufgefahren und nach Einlagerung von Abfällen schnell verfüllt und versiegelt. Verfüllte Lagereinheiten werden in das Überwachungsprogramm einbezogen. Das Pilotlager bleibt bis zur Bewilligung zum Lagerverschluss in Betrieb. Die Entscheidung zum Verschluss des Lagers ist mit demokratischer Mitsprache zu treffen. Derzeit ist u.a. offen, wie die demokratische Mitsprache der Bevölkerung über lange Zeiträume gewährleistet werden soll und wie die Kriterien zum Verschluss abgeleitet werden.

Nachbetriebsphase

Die Nachbetriebsphase besteht aus zwei Teilphasen: Eine frühe Teilphase mit Beweissicherung hinsichtlich der Umweltmedien und eine darauf folgende Teilphase,

für die der Informationserhalt über das verschlossene Lager angestrebt wird (diskutiert werden Zeiträume bis zu 500 Jahren) bzw. zumindest Warnhinweise (Markierung) auf die Existenz des Lagers gegeben werden (s. Abb. ELM-2).

Nach dem Verschluss befindet sich das geologische Tiefenlager in der Nachverschlussphase (EKRA 2002, KEG 2003); sie entspricht der Nachbetriebsphase gemäß Abb. ELM-2. Eine Rückholung der Abfälle ist dann nicht mehr vorgesehen, die Sicherheit wird allein durch passive Barrieren gewährleistet. Eine bergmännische Rückholung der Abfälle wäre aber mit entsprechendem Aufwand und bei Vorhandensein technischer und sonstiger Ressourcen möglich.

Für das geologische Tiefenlager ist die Überwachung der Umweltmedien in seinem Umfeld vorgeschrieben (ENSI-G03). Sie soll vor Errichtung der Untertagebauwerke aufgenommen werden, damit für die Beweissicherung genügend aussagekräftige Daten zur Verfügung stehen. Sie muss bis zur Entlassung des geologischen Tiefenlagers aus der Kernenergiegesetzgebung fortgeführt werden.

Zur Nachbetriebsphase ergeben sich Fragen zur Entwicklung der Sicherheitsfunktionen und ihrer Robustheit usw. im Zusammenhang mit möglichen Entwicklungsszenarien. Insbesondere ist zu prüfen, ob das vorausgegangene Monitoring oder die Anlage und der langjährige Betrieb mehrerer Lager negative Einflüsse auf die Langzeitsicherheit haben können. Für eine erste qualitative zeitabhängige und risikobasierte Bewertung der Nachbetriebsphase sollten zuerst die Sicherheitsfunktionen herangezogen werden.

ELM - Offene Fragen

Fragen zur Entsorgungsoption ELM treten vor allem im Zusammenhang mit der Phase der Beobachtung von Abfällen im Pilotlager bzw. weitergehenden Monitoringmaßnahmen im Lager insgesamt auf. Sie betreffen insbesondere Aspekte, die bereits in den Abschnitten ELM – Ungewissheiten und Risiken und ELM - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen schon angesprochen worden sind:

- Auf Grund welcher konkreten Messwerte / Prozessabläufe soll über die Rückholung entschieden werden? Anhand welcher Kriterien?

- Welche Möglichkeiten bestehen überhaupt, Messwerte / Prozessabläufe langfristig sicher zu erheben? Wie erkennt man falsche Messwerte?
- Welche räumliche und zeitliche Repräsentativität der Messwerte ist erforderlich?
- Können spät einsetzende und langsame Veränderungen zuverlässig erfasst werden?
- Welche (z.B. gebirgsmechanischen) sicherheitsrelevanten Nachteile können aus Monitoring über lange Zeiträume und der Aufrechterhaltung der Rückholbarkeit der Abfälle resultieren?
- Wie gelingt es, die Abwägung zwischen den sicherheitsgerichteten Vor- und Nachteilen zeitnaher Endlagerung und Endlagerung mit Monitoring und Rückholbarkeit methodisch zu bewältigen? Welche Rolle können dabei Sicherheitsfunktionen spielen? Wie kann man die mit langzeitiger Sicherheitsgewährleistung durch gesellschaftliche Kontrolle (Monitoring) verbundenen Risiken in einen möglichen Vergleich über Sicherheitsfunktionen einbinden?
- Wie sind Umsetzbarkeit und Wirkung zuverlässiger Selbstverschlusseinrichtungen bzw. von Maßnahmen zum Schnellverschluss des Lagers in der Beobachtungsphase sicher zu stellen.

Angesichts der Tatsache, dass die Entwicklung des Konzeptes der geologischen Tiefenlagerung letztlich auf gesellschaftliche Anforderungen an die Entsorgung radioaktiver Abfälle zurückgeht, sind neben diesen eher methodischen bzw. technischen Aspekten für die erfolgreiche Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung insbesondere folgende gesellschaftliche Fragen von Bedeutung und nicht abschließend geklärt:

- Wer entscheidet über die Rückholung? Zweifellos sind hier zunächst die Sicherheitsbehörden, insbesondere das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat gefordert. Wie aber wird die Bevölkerung eingebunden? Wie ist die demokratische Mitsprache über die in Frage stehenden langen Zeiträume zu gewährleisten?
- Wie löst man die mit möglicher gesellschaftlicher Instabilität verbundenen Probleme?

- Wie soll die Bevölkerung über mehrere Jahrzehnte kontinuierlich an den Entscheidungsprozessen beteiligt werden?

ELm - Datenblattbezogene Quellen

EKRA (2002): Beitrag zur Entsorgungsstrategie für die radioaktiven Abfälle in der Schweiz.- Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Bern, Oktober 2002.-

http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_5031486.pdf.

EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Schlussbericht.- Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Bern, 31. Januar 2000.-

http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_182456219.pdf.

ESK-EL - Entsorgungskommission, Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (2011): Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. 02.09.2011.-

<http://www.entsorgungskommission.de/downloads/epanlage2el19homepage.pdf>.

Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, SR 732.1.-

<http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20010233/200901010000/732.1.pdf>.

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat - ENSI (2009): ENSI-G03 - Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis - Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen.-

http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_168693457.pdf.

RUH, H. (1998): Energie-Dialog Entsorgung. Schlussbericht des Vorsitzenden zu Händen des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.- Bundesamt für Energie, Bern.

I. Optionen

Datenblatt LzL

Darstellung der Entsorgungsoption "Langzeitige Lagerung der Abfälle in Bauwerken" (LzL)

LzL - Vorbemerkung

Für die Darstellung und Erläuterung der Entsorgungsoption "Langzeitige Lagerung der Abfälle in Bauwerken" (LzL) wurde das **niederländische Lager für radioaktive Abfälle (HABOG)** als Beispiel gewählt. Im Lagerkomplex befindet sich auch eine Anlage für hochradioaktive Abfälle. Soweit bekannt, ist dies - zumindest in Europa - das einzige Lagerkonzept, das mit der Zielsetzung der Langzeitlagerung von hochradioaktiven Abfällen für ca. 100 Jahre entwickelt und umgesetzt wurde. Zu beachten ist, dass im HABOG keine bestrahlten Kernbrennstoffe aus Leistungsreaktoren gelagert werden.

Bei der nachfolgend beschriebenen Option „Langzeitige Lagerung“ handelt es sich definitionsgemäß um eine Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle für einen begrenzten Zeitraum, nach dem ein weiterer Entsorgungsschritt erfolgen soll. Die Langzeitlagerung ist also eine **vorläufige Entsorgungslösung**, während der die Möglichkeit für technologische Entwicklungen zu sichereren Behandlungs- und Entsorgungsschritten bzw. einen sicheren endgültigen Entsorgungsweg für die Abfälle offen gehalten wird. Darin liegt der Unterschied zur Option „Dauerlagerung“, bei der die Lagerung für einen nicht festgelegten Zeitraum – möglicherweise bis alle Radionuklide weitestgehend zerfallen sind und keine weitere Entsorgung erforderlich ist – erfolgen soll (s. dazu Datenblatt DLg). Für die hochradioaktiven Abfälle kann dies eine praktisch unbegrenzte Lagerdauer bedeuten.

Das nachfolgend als Beispiel für die Option LzL beschriebene Lagerkonzept ist in den Niederlanden bereits genehmigt und umgesetzt. Insofern kann es als Stand der Technik bezeichnet werden. Es ist allerdings nur für ca. 100 Jahre konzipiert und ausgelegt, aber für diesen Zeitraum liegen noch keine praktischen Erfahrungen über das Verhalten des Systems vor.

Varianten des Konzeptes, wie zum Beispiel das deutsche Behälterlagerkonzept (s. LzL - Varianten und Ergänzungen), entsprechen in Bezug auf die lange Lagerdauer nicht dem Stand der Technik. Sie müssten zur Genehmigungsreife noch weiterentwickelt werden.

LzL - Wesentliche Merkmale und Ziele

Die Funktion eines Langzeitlagers besteht in der Lagerung der in Behältern bzw. Behältnissen eingeschlossenen Abfälle in Bauwerken (Lagern) über einen längeren Zeitraum. Das Konzept in den Niederlanden sieht 100 Jahre vor (CODÉE 2014), es wurden aber auch Zeiträume bis zu 300 Jahren (z.B. in Frankreich (SILVY 2006)) diskutiert. Zum Vergleich: Die **Zwischenlager** an den Standorten der Atomkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland sind für eine Lagerzeit von 40 Jahren genehmigt. Die Bauwerke und Behälter werden überwacht und ggf. instandgesetzt. Die Sicherheit des Lagers wird im Kern gewährleistet durch Kontrolle, Wartung und Reparatur der Behälter bzw. des Bauwerks.

Übergeordnetes **Ziel** der Option ist die Lagerung der Abfälle so lange, bis eine Lösung zu ihrer endgültigen Beseitigung oder eine sonst wie geartete - auch ökonomisch interessante - Lösung zum Umgang mit den Abfällen bekannt und umsetzbar wird. Die Zugänglichkeit der Abfälle und die Möglichkeit ihrer jederzeit unaufwändigen **Rückholung** sind daher technische Konzeptanforderungen.

In den Niederlanden ist derzeit nach Ablauf der hundert Jahre Zwischenlagerung die geologische Endlagerung vorgesehen (NEEFT 2014). Daraus resultiert ein weiteres Ziel dieser Option, nämlich die jederzeitige Rückholbarkeit der Abfälle ohne großen Aufwand. Falls eine endgültige Lösung nicht gefunden wird, könnte die Option bei langlebigen Abfällen in eine beliebig lange überwachte Lagerung der Abfälle in einem Bauwerk übergehen oder überführt werden (s. Datenblatt DLg). Letzteres ist in den Niederlanden jedoch gegenwärtig nicht geplant.

Beim in den Niederlanden umgesetzten Langzeitlagerkonzept werden die hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfälle in dünnwandige Metallbehältnisse eingebracht, jeweils fünf Metallbehältnisse werden in einige Meter tiefen Lagerschächten übereinander gestapelt. Die Zwischenräume in den verschlossenen Schächten sind zur Vermeidung von Korrosion mit Argon gefüllt. Die in den Abfällen entstehende Wärme wird durch Naturkonvektion der Luft vorbei an den aus Metall bestehenden

Schächten abgeführt. In einem weiteren Lagerbereich werden noch relativ hochradioaktive aber geringer wärmeentwickelnde Abfälle in dickwandigeren Behältern einfach übereinander gestapelt gelagert. Der Lagerraum wird mit gerichteter Luftströmung in leichtem Unterdruck gehalten. Das die Lagerbereiche umgebende Gebäude besitzt 1,7 m dicke Stahlbetonwände.

Für die gesamte vorgesehene Lagerzeit von ca. 100 Jahren werden die Dichtheit der Lagerschächte, die Temperatur der Schachtwände, die Abschirmung, der Konvektionsstrom zur Wärmeabfuhr sowie die einziehende und ausziehende Luft für den anderen Lagerbereich auf Radioaktivitätsgehalt durch Inspektionen oder Messungen überwacht (NL 2011).

Zu beachten ist, dass bei der Langzeitlagerung (100 Jahre und mehr) höhere Sicherheitsanforderungen zu stellen sind als dies für eine Zwischenlagerung (in Deutschland ca. 40 Jahre) der Fall ist, da nach heutigem Kenntnisstand mit zunehmender Dauer der Lagerung Materialschwächungen und u.a. Dichtheitsprobleme an Abfallbehältern bzw. -behältnissen auftreten können. Insbesondere für bestrahlte Kernbrennstoffe stellt sich außerdem die Frage nach deren stofflicher Entwicklung über die Lagerzeiträume.

- Die mit dem niederländischen Lagerkonzept verfolgten Ziele führen zu folgenden technischen Anforderungen bzw. daraus resultierenden Merkmalen des Lagersystems: **Einhaltung der Schutzziele** durch kontinuierliches Überwachen der Lagerung der Abfälle und die Möglichkeit, Wartungsarbeiten und Reparaturen an dem Lagerbauwerk und den Behältern bzw. Behältnissen durchzuführen.
- **Stabile gesellschaftliche Verhältnisse** und Informationsweitergabe werden dafür vorausgesetzt.
- Die Sicherheit der Elemente Bauwerk und Behälter wird durch passive Systeme gewährleistet. Dennoch benötigen diese technischen Elemente eine übergeordnete Kontrolle durch den Menschen, um ihre Funktion und damit die Sicherheit des Langzeitlagers zu gewährleisten.
- Die wichtigste (materielle) Sicherheitsbarriere gegen Einwirkungen von außen stellt im niederländischen Konzept das Gebäude dar. Bei möglichen Konzeptal-

ternativen kommen sowohl das Gebäude als auch der Abfallbehälter als wichtigste Barriere in Frage.

- Die Lagerung in Bauwerken an der Oberfläche ist in Bezug auf geologische Verhältnisse weitgehend standortunabhängig. Beachtet werden müssen die Standortverhältnisse im Hinblick auf mögliche Einwirkungen auf das Lager von außen (z.B. Hochwasser, Erdbeben). Eine deutliche Standortabhängigkeit kann sich aber aus den erforderlichen Eigenschaften des umgebenden Gesteins bei untertägigen Lagerbauwerken ergeben.

LzL - Mögliche Varianten und Ergänzungen

Varianten

Verschiedene Varianten der Langzeitlagerung in Bauwerken an der Oberfläche können daraus abgeleitet werden, dass der Schwerpunkt bei der Gewährleistung der Sicherheit gegenüber bestimmten Einwirkungen (insbesondere von außen) bevorzugt auf die Sicherheitsbarriere Behälter oder die Sicherheitsbarriere Gebäude gelegt wird.

Für die Bundesrepublik Deutschland würde wahrscheinlich ein anderes Langzeitlagerkonzept als das in den Niederlanden realisiert werden. In den Niederlanden werden hauptsächlich Wiederaufarbeitungsabfälle von Leistungsreaktoren gelagert, deren Menge aufgrund des deutlich kleineren Atomprogramms relativ gering ist. Bestrahlte Brennelemente gibt es nur in geringem Umfang aus Forschungsreaktoren. Dies kann beispielsweise hinsichtlich der Zahl der Handhabungen (die Abfälle werden in den Niederlanden aus dem Transportbehälter entnommen und in ein Behältnis verpackt) und der Bedingungen für die Inertisierung der Behälterumgebung relevant sein. Eine für die Bundesrepublik nahe liegende Variante ist die Weiterentwicklung des Konzepts der übertägigen Standort-Zwischenlager (EPRI 2012). Für eine Langzeitzwischenlagerung müsste das Grundkonzept durch zwei redundante Barrieren gegen Einwirkungen von außen mit erhöhter Robustheit ausgestattet werden. Dies ist an den norddeutschen Standorten ansatzweise realisiert (BFS 2013). Die hochradioaktiven Abfälle (einschließlich bestrahlter Brennelemente) werden dabei in dickwandigen Behältern aus Guss- oder Schmiedestahl und diese wiederum in Gebäuden mit massigen Betonwänden aufbewahrt. Die Kühlung erfolgt durch Naturkonvektion. Für eine Langzeitlagerung müssten allerdings sowohl das

Behälter- und Bauwerkkonzept (Erhöhung der Integritätsgarantie von bisher 40 Jahre auf über 100 Jahre) als auch das Überwachungskonzept weiterentwickelt werden.

Weitere denkbare Varianten wären die Lagerung der mit den Abfällen gefüllten Behälter in dickwandigen Gebäuden in Tunnelröhren oder in existierenden Bergwerken. Als Beispiel für die erstgenannte Konzeptvariante käme das zur Zwischenlagerung mittelradioaktiver Abfälle genutzte Gebäude für das ehemalige Unabhängige Nachkühlsystem in Würzgassen (PEK 2000) mit seinen über 2 m dicken Außenwänden und Zwangslüftung in Frage. Als Beispiel für das zweitgenannte Grundkonzept kann das in einem Berg auf dem Anlagengelände mit natürlicher Konvektion zur Wärmeabfuhr eingerichtete Standort-Zwischenlager Neckarwestheim dienen. Für die drittgenannte Lagervariante in existierenden Bergwerken ist kein Grundkonzept bekannt. Die Wärmeabfuhr müsste in diesem Fall über eine mechanische Lüftungsanlage erfolgen und die Atmosphäre in den Lagerbereichen müsste zur Vermeidung von Korrosion und anderen Veränderungen an den Behältern entsprechende Bedingungen erfüllen.

Immer wieder werden in der Diskussion über die Langzeitlagerung als Alternative zur Oberflächenlagerung untertägige Lager ins Gespräch gebracht. Die Möglichkeit der untertägigen Lagerung über mehrere Jahrhunderte ist zeitweilig in Frankreich untersucht, aber wegen mit zunehmender Lagerzeit erwarteter technischer und als Folge auch sicherheitlicher (letztlich gebirgsmechanisch verursachter) Komplikationen als (vorübergehende) Alternative zur Endlagerung nicht weiter verfolgt worden.

Bei für geringere Lagerzeiten vorgesehenen untertägigen Lagern könnten wie bei der übertägigen Lagerung Optionsvarianten mit unterschiedlichen Beiträgen zur Lagersicherheit durch das Untertagebauwerk (Bergwerk, Tunnel, Kaverne) oder die Behälter entwickelt werden. Die sichere Errichtung und der zuverlässig sichere Betrieb des Lagers werden durch die (vor allem gebirgsmechanischen) Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflusst; denn der geologische Rahmen des Lagers übernimmt die Schutzfunktion gegenüber möglichen Einwirkungen von außen. Die Auswahl eines geeigneten Gesteinstyps und eines geeigneten Standortes spielen im Fall der untertägigen Lagerung daher eine wichtige Rolle. Beispiele für eine untertägige Zwischenlagerung sind das „CLAB“ in Schweden, das sich in 30 m Tiefe in kristallinem Gestein befindet (SKB 2011, behälterlose Lagerung mit erzwungener Wasser-

kühlung), und das Standort-Zwischenlager in Neckarwestheim, das in Tunneln unter einer mehrere Meter mächtigen Gesteinsschicht angelegt ist (GKN 2001). Beide Zwischenlager für Brennelemente sind allerdings nicht für eine Langzeitlagerung vorgesehen und genehmigt.

Ergänzungen

Da die Langzeitlagerung nur eine vorübergehende und zeitlich begrenzte Problemlösung darstellt, erfordert sie nachgeschaltete Maßnahmen, wie die Umsetzung einer anderen Entsorgungsoption oder die Anwendung neuer Behandlungstechnologien. Eine Option dafür wäre, nach Ende der Langzeitlagerung die Abfälle der Endlagerung mit oder ohne Rückholbarkeit der Abfälle (s. Datenblätter ELM u. Elmo) zuzuführen.

Als Ergänzung der Option Langzeitlagerung wären vor- oder nachgeschaltete P&T möglich, falls diese technisch in großem Maßstab umsetzbar wären und auch umgesetzt würden. Die bei P&T anfallenden Abfälle (s. Datenblatt P&T) müssten gleichfalls end- oder zwischengelagert werden.

LzL - Begründung

Die Option Langzeitlagerung wird hauptsächlich mit der noch fehlenden bzw. nicht nachzuweisenden Langzeitsicherheit der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen und/oder deren genereller Unsicherheit begründet. Dadurch ergeben sich Zweifel, dass die Schutzziele bei der Endlagerung auf Dauer eingehalten werden können. Die längerfristige Lagerung der Abfälle in einem Bauwerk wird dagegen so eingeschätzt, dass durch die dabei mögliche gesellschaftliche Kontrolle und Reparaturmaßnahmen an den technischen Barrieren jederzeit, auch für sehr lange Zeiträume, der sichere Lagerzustand gewährleistet werden kann. Die Langzeitlagerung böte darüber hinaus die Möglichkeit, die eingelagerten Abfälle neu entwickelten besseren Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten zuzuführen.

Im Kern basiert diese Option also auf dem Vertrauen der Menschen in die langfristige Wirksamkeit der gesellschaftlichen Kontrolle bei gleichzeitigem Misstrauen gegenüber geo- und ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnissen über das langzeitige Verhalten natürlicher Barrieren und der zuverlässigen Einschätzbarkeit technischer und geotechnischer Barrieren. Hinzu kommt das Vertrauen darauf, dass innerhalb des vorgesehenen Lagerzeitraums die für die Entwicklung besserer Entsorgungs-

möglichkeiten erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten tatsächlich stattfinden werden.

LzL - Gewährleistung der Sicherheit

Die **langzeitige Sicherheit** der Option im Sinne von hundert oder wenigen hundert Jahren beruht im Kern auf kontinuierlichem aktivem Handeln der Menschen (Kontrolle, Wartung, erforderlichenfalls Reparatur usw. der Anlage). Die Notwendigkeit dazu betrifft nicht nur das Bauwerk des Langzeitlagers, sondern auch und vor allem die Behälter bzw. Behältnisse, in denen die Abfälle eingelagert sind. Bei Verlust der gesellschaftlichen Kontrolle verlieren diese Barrieren je nach Zwischenlagerkonzept zumindest nach längerer Zeit ihre Funktionsfähigkeit und damit das Lager insgesamt seine Sicherheit. Das gilt auch für die Überwachungseinrichtungen. Nach Ablauf der vorgesehenen Lagerzeiträume muss die Sicherheit der Abfälle durch eine andere Entsorgungsoption gewährleistet werden.

Strahlenbelastungen im Normalbetrieb

Für das **Betriebspersonal** resultieren Strahlenbelastungen während der Einlagerung, durch Überwachung, Instandhaltung und Reparatur über den gesamten Lagerzeitraum von 100 bis wenigen 100 Jahren, sowie bei der Auslagerung und Herstellen eines endlagerfähigen Gebindes. Von der Reparatur werden möglicherweise nicht alle Behälter bzw. Behältnisse betroffen sein, ansonsten wird die Strahlenbelastung jeweils durch alle Gebinde verursacht.

Für die **anwohnende Bevölkerung** sind Strahlenbelastungen durch die Anlieferung der Abfälle, durch zulässige Abgaben während der Lagerung, durch Reparaturarbeiten während der Lagerzeit, durch die Neukonditionierung nach Ablauf der vorgesehenen Lagerzeit (in welchem Zustand sind Glaskokillen bzw. Brennelemente nach hundert oder mehr Jahren?) und schließlich den Abtransport zum Endlager oder einer sonstigen Entsorgungseinrichtung gegeben. Je nach Lagerkonzept können potenzielle Strahlenbelastungen durch Direktstrahlung bei Aufenthalt in unmittelbarer Nähe des Lagergebäudes dazu kommen. Mit Ausnahme der Reparatur sind bei allen Belastungspfaden jeweils alle Gebinde Verursacher.

Betriebssicherheit

Die Anlage ist während der gesamten Lagerzeit über hundert oder mehr Jahre in Betrieb (in den Niederlanden ca. 100 Jahre). In dieser Zeit (während der Einlage-

nung, der gesamten Lagerzeit und der Auslagerung) sind Störfälle mit Einwirkungen auf die Behälter bzw. Behältnisse, in denen sich die Abfälle befinden, von innen und außen möglich. Die durchgängig erforderliche Kontrolle, Instandhaltung und gegebenenfalls Reparatur von Lagergebäude, Lagereinrichtungen und Behältern bzw. Behältnissen oder das Umpacken von Abfällen sind weitere potenzielle Ursachen für Störfälle. Von schweren Störfällen kann ein - im Vergleich zu Optionen mit Endlagerung - größerer Teil der Abfälle betroffen sein, da die Abfälle im Endlager großräumiger verteilt und sich zwischen den Gebinden oder Gebindegruppen wirksamere Barrieren (Gebirge, Versatz) befinden, die gegen Einwirkungen besser schützen. Außerdem muss die Kritikalitätssicherheit bei Ein- und Auslagerung aktiv durch Einhaltung bestimmter Sicherheitsvorkehrungen sowie während der gesamten Lagerzeit durch Anordnung oder Barrieren möglichst passiv gewährleistet werden.

LzL - Proliferation, Safeguards

Proliferations- und Safeguards-Aspekte spielen bei der Option Langzeitlagerung eine wichtige Rolle: Ein dauerüberwachtes Langzeitlager mit bestrahlten Kernbrennstoffen an der Erdoberfläche stellt per se eine Quelle für das Abzweigen radioaktiver Stoffe dar. In diesem Sinne kritische Aktivitäten bzw. Sachverhalte sind z.B. Handhabung der Abfälle, Reparatur geschädigter Abfallbehälter, Manipulation der elektronischen Inventarisierung, Anfälligkeit von Beschäftigten und unerkannte organisatorische Mängel. Entsprechend aufwendig sind Safeguards-Maßnahmen.

LzL - Ungewissheiten und Risiken

Die **entscheidende Ungewissheit** bei der Option Langzeitlagerung betrifft die **Beständigkeit des gesellschaftlichen Systems** (z.B. politisch und ökonomisch), die Voraussetzung für die Gewährleistung der Lagersicherheit wie auch für den weiteren Umgang mit den Abfällen nach Ablauf der Lagerfrist ist. Es kann aber nicht selbstverständlich davon ausgegangen werden, dass sich die technisch-wissenschaftliche Entwicklung genauso wie in der Vergangenheit auch in der Zukunft fortsetzt. Vielmehr zeigt allein ein Rückblick auf das letzte Jahrhundert, wie groß die Wahrscheinlichkeit für politische Änderungen, Kriege und ökonomische Krisensituationen ist. Für schwere gesellschaftliche Krisensituationen bestehen daher gravierende Zweifel, dass die überwachte Lagerung von Abfällen in Bauwerken die notwendige hohe Priorität behält. Vielmehr ist zu besorgen, dass unzureichende

oder gar fehlende Überwachung über kurz oder lang zur Freisetzung von Radionukliden führen würden.

Lagerbauwerke können sogar als **Erpressungsmittel** dienen: Behälter und Gebäude können nicht in ausreichendem Maße gegen die Einwirkung moderner bzw. in der Entwicklung fortschreitender panzer- und bunkerbrechender Waffen und Sprengstoffe ausgelegt werden.

Eine sicherheitstechnische Ungewissheit bedeutet der **Zustand der Abfälle im Behälter bzw. Behältnis** nach 100 oder mehr Jahren Lagerzeit. Unabhängig davon, welcher Entsorgungsweg nach der Langzeitlagerung eingeschlagen werden soll, müssen die Behälter geöffnet und mit den Abfällen umgegangen werden. Vom Zustand der Abfälle hängt entscheidend der Aufwand für den Umgang, einschließlich der Verhinderung von Freisetzungen, ab. Er spielt insbesondere bei Brennelementen auch für die Kritikalitätsgefahr eine Rolle. Durch Versagen von Brennstabhüllrohren und/oder Tragkorbstrukturen, können sich Kernbrennstoffe in kleineren Volumina ansammeln.

Ebenfalls mit Ungewissheit behaftet ist das **Verhalten der sicherheitstechnischen Barrieren** über lange Zeiträume. Die Behälter bzw. Behältnisse und die sie umgebenden Strukturen sind Wärme und ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die für die Wärmeableitung erforderlichen Strukturen sind ebenfalls der Wärme und außerdem in der Luft bzw. Luftfeuchtigkeit befindlichen, chemisch aggressiven Stoffen (z.B. Säuren) ausgesetzt. Durch physikalische und/oder chemische Prozesse in oder an den die Wärmeabfuhr garantierenden Strukturen besteht das Risiko des Versagens.

Die **Integrität** von auf technischen Konstruktionen beruhenden **Behältern bzw. Behältnissen**, die dicht verschlossen bleiben müssen, ist über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten **fraglich**. Es besteht das Risiko, die Abfälle während der Langzeitlagerung umpacken oder die Behälter bzw. Behältnisse im beladenen Zustand reparieren zu müssen. Ebenfalls schwierig einzuschätzen ist die Sicherheit der Inertisierung großer Volumina, wie sie zumindest bei einer Übertragung des niederländischen Konzepts auf Deutschland gegeben wären.

Aus den genannten und möglichen weiteren Ungewissheiten ergeben sich mit der Option Langzeitlager verbundene typische **Versagensrisiken**. Dies betrifft haupt-

sächlich das Versagen technischer Barrieren durch materielle Alterung, Einfluss der Radioaktivität (Strahlung und Wärme) und mangelnde Instandhaltung. Die Versagensrisiken stellen ihrerseits direkte oder indirekte Risiken im Hinblick auf die Beeinträchtigung der Mensch und Umwelt betreffenden Schutzziele bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle dar.

LzL - Generelle Vor- und Nachteile

Vorteile

- Ein (oder mehrere) in Bezug auf die geologischen Verhältnisse weitgehend standortunabhängiges Langzeitlager ist relativ schnell verfügbar.
- Das Langzeitlager bietet die Möglichkeit, die Abfälle auch nach längerer Zeit aus dem Lager zurückzuholen, wenn eine dauerhaft sichere und akzeptierte Entsorgungsoption oder eine Verwertungsmöglichkeit der Abfälle gefunden sein sollte.
- Rückholung der Abfälle ist ohne großen Aufwand jederzeit möglich.
- Möglicherweise trifft ein Langzeitzwischenlager als gesellschaftlich überwacht und gegebenenfalls reparierbares Ingenieurbauwerk in Teilen der Gesellschaft auf höhere Zustimmung (RENN et al. 2007) als die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen (aktive Gewährleistung der Sicherheit ist vielen Menschen vertraut).

Nachteile

- Bauwerk und Abfallbehälter sind relativ leicht zugänglich und stehen in direkter Nachbarschaft bzw. Verbindung mit der Biosphäre. Deshalb kann es Einwirkungen von außen geben, die die Integrität der Barrieren aufheben und zu Freisetzungen radioaktiver Stoffe führen können (z.B. natürliche Phänomene deren Heftigkeit heute noch nicht absehbar ist).
- Durch die Lagerung an der Oberfläche sind für den gesamten Zeitraum terroristische Angriffe möglich, die große Schäden durch Zerstörung oder Entwendung der Kernbrennstoffe zum Bombenbau verursachen können.
- Die erforderliche Stabilität (politisch, ökonomisch, wissenschaftlich-technisch) der überwachenden und kontrollierenden Gesellschaft kann über längere Zeiträume nicht gewährleistet werden.

- Wegen der langen Betriebszeit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Störfällen; darüber hinaus wird über lange Zeit eine Strahlenbelastung für Betriebspersonal verursacht.
- Nach heutigem Stand der Technik ist für Lagerzeiträume von mehr als einigen Jahrzehnten die Notwendigkeit von Reparatur- oder Umpackmaßnahmen zu erwarten.
- Es besteht die **Gefahr des Übergangs zur zeitlich "unbegrenzten" Lagerung** (Dauerlagerung) oder andere nicht verlässliche Optionen nutzen zu müssen, wenn nach Ablauf der genehmigten Lagerzeit (z.B. hundert Jahre) die Abfälle ausgelagert werden müssten, aber keine andere Entsorgungs- oder Verwertungsmöglichkeit gegeben ist.
- Die **endgültige Entsorgung** der Abfälle wird auf kommende Generationen **verlagert**. Damit wird das Verursacherprinzip ignoriert und die Verantwortung verlagert.
- Die Gefahr für Proliferation ist durch den relativ einfachen Zugriff auf Kernbrennstoffe über einen langen Zeitraum hoch.
- Das Gefahrenpotenzial der radioaktiven Abfälle ist bei der Langzeitzwischenlagerung durch gezielte oder versehentliche kriegerische Einwirkungen relativ leicht mobilisierbar.

Im Übrigen muss die Option LzL gegen Störfälle und Angriffe von außen und innen durch organisatorische und technische Maßnahmen abgesichert werden. Auch hierbei wird letztendlich auf gesellschaftliche Kontrolle zur Gewährleistung der Sicherheit gesetzt.

Bei Anlage eines Lagerbauwerks unter Tage gelten diese Aussagen gleichfalls; allerdings sind die Lagereinrichtungen und die Abfälle in diesem Fall gegen natürliche und zivilisatorische Einwirkungen von außen und menschliches Handeln (Terrorismus) z.T. besser geschützt. Das gilt beispielsweise im untertägigen schwedischen CLAB wegen der ca. 30 m mächtigen Hartgesteinsschicht (SKB 2011) und im Standort-Zwischenlager Neckarwestheim wegen der ebenfalls massiven Gesteinsschicht über dem Lagerbereich in Tunnelröhren (GKN 2001). Allerdings sind bei beiden Zwischenlagern die Einrichtungen zur Wärmeabfuhr nicht besser gegen die

Einwirkungen geschützt als bei Lagern an der Oberfläche. In Anlagen mit erzwungener Wasserkühlung (CLAB) besteht zusätzlich die Abhängigkeit von Stromversorgung und Wartung der Kühlvorrichtungen.

LzL - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen

In der gesellschaftlichen Diskussion über Entsorgungsoptionen spielt insbesondere die ethische Frage der Handlungsspielräume künftiger Generationen eine Rolle. In dieser Hinsicht ergibt sich ein widersprüchliches Bild: Einerseits bietet die Option LzL die Möglichkeit, die Abfälle technisch einfach aus dem Lager zu entnehmen und einer besseren Behandlungs- oder Entsorgungsmöglichkeit zuzuführen. Diesbezüglich wird durch die Option Langzeitlagerung die Handlungsfreiheit zukünftiger Generationen gewahrt. Andererseits wird ihnen die Last der dauerhaften Lagerüberwachung und -reparatur sowie der Entwicklung besserer Entsorgungsoptionen aufgebürdet. Bei der Bewertung dieser Feststellungen ist zu beachten, dass zumindest temporäre Freisetzung von Radioaktivität aus dem Lager stattfindet (Ausmaß hängt von Lagerkonzept und Abfalltyp ab) und zudem die Gefahr von Störfällen und der Proliferation besteht. Auch daraus entstehen Belastungen.

Eine künftige gesellschaftliche Entscheidung für die Option LzL würde demnach nicht zuletzt darauf beruhen, dass die Handlungsfreiheit zukünftiger Generationen höher bewertet wird als ihre zukünftigen Belastungen, die unvermeidlich damit einhergehen. Das bedeutet, die zukünftigen Generationen gewinnen Flexibilität, müssen aber die Verantwortung für die Zwischenlagerung übernehmen. Bei dieser Abwägung kommt der Sicherheit besondere Bedeutung zu. Das Ergebnis der Abwägung hängt maßgeblich davon ab, ob im Sinne von dauerhaftem Schutz von Mensch und Umwelt mehr der Entwicklung von Mensch und Gesellschaft oder den derzeitigen Kenntnissen über geologische und geotechnische Barrieren und ihr langzeitiges Verhalten vertraut wird.

Im Übrigen erfordert die Option LzL in jedem Fall eine nachfolgende endgültige Lösung für die Abfälle. Insofern ist die Option offen für Veränderungen der ethischen, sozialen oder politischen Anforderungen an die Entsorgung sowie für die Veränderung von Sicherheitsstandards. Diese Veränderungen können gegenüber dem heute geforderten Schutzniveau durchaus auch eine Verschlechterung bedeuten.

LzL - Phasengliederung

Zur Phasengliederung (s. Abb. LzL-1) und zu den in den einzelnen Phasen zu treffenden Entscheidungen kann bei der weiteren Bearbeitung bei Bedarf auf folgende Hinweise/Fragen genauer eingegangen werden:

Vorbetriebsphase

Spätestens in der Teilphase Standortauswahl müssen die für die Option LzL grundlegenden Entscheidungen bezüglich Lagerkonzept bzw. Lagervariante, Zieldefinition, zeitlicher Perspektiven, Sicherheit, Ungewissheiten, Risiken usw. getroffen werden. Dazu gehört beispielsweise die Beantwortung folgender Fragen bzw. Lösung folgender Probleme:

- Anhand welcher Kriterien wird der Standort für das Langzeitlager festgelegt, welche Anforderungen werden an den Standort gestellt (z.B. übertägiges / untertägliches Bauwerk)?
- Wie lange soll der Abfall maximal eingelagert werden?
- Wie soll die Sicherheit im Einzelnen gewährleistet werden? Welche technischen Barrieren (Gebäude, Bauwerk, Abfallbehälter) sollen in welchem Ausmaß zur Sicherheit beitragen?
- Wie soll die lückenlose (auch redundante) Überwachung gestaltet und für den vorgesehenen Zeitraum der Lagerung aufrechterhalten werden?
- Wie werden vorhandene Ungewissheiten minimiert (vor allem hinsichtlich der gesellschaftlichen Kontrolle)?
- Wie sollen innere und äußere Störfälle verhindert und Risiken ausgeschlossen oder minimiert werden?
- Gibt es Elemente passiver Sicherheit und wie wirken sie bzw. wie werden sie eingesetzt?
- Welche Sicherheitsfunktionen müssen Behälter (vollständiger Einschluss der Abfälle auch bei Einwirkungen von außen) bzw. Behältnisse (Freisetzungsbremse im Normalbetrieb) und Bauwerk bzw. Gebäude (Schutz der Behälter/Behältnisse,

geordnete störungsfreie Kühlung) erfüllen? Welche Schwachstellen und Risiken bestehen?

- Welche Maßnahmen sind zur Aufrechterhaltung der Lagerfunktionen und zum Schutz des Lagers geplant? Wo liegen dort die Schwachstellen (z.B. menschliches Versagen, zielgerichtetes Handeln)? Welche Maßnahmen zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit werden ergriffen?

Die genannten und weitere Fragen müssen vor dem Übergang in die Betriebsphase geklärt bzw. die entsprechenden Entscheidungen müssen auf einer ausreichenden Daten- und Kenntnisgrundlage getroffen werden. Hierzu gehört abschließend die Entscheidung über die Genehmigung des Vorhabens.

Betriebsphase

In der Teilphase Bau des Lagers müssen die in der Baugenehmigung festgesetzten Anforderungen an das Lagerbauwerk (auch Einrichtungen zur Kontrolle, Abfallbehälter u.a.) umgesetzt werden.

Teilphase Abfalleinlagerung: Spätestens mit Beginn der Abfalleinlagerung muss die Überwachung der Anlage gemäß Genehmigung beginnen.

Die Teilphase Auslagerung der Abfälle beginnt, wenn eine andere Entsorgungsmöglichkeit bereit steht. Stilllegung und Abbau der Anlage beginnen, nachdem die Auslagerung abgeschlossen ist.

Eine Teilphase "Verschluss", wie bei Endlagern in tiefen geologischen Formationen, gibt es bei Anlagen zur Langzeitlagerung nicht. Das Lager bleibt auch nach vollständiger Befüllung im Betriebszustand (längstens bis die genehmigte Gesamtbetriebsdauer erreicht ist); denn einen passiv sicheren Zustand gibt es konzeptbestimmt nicht.

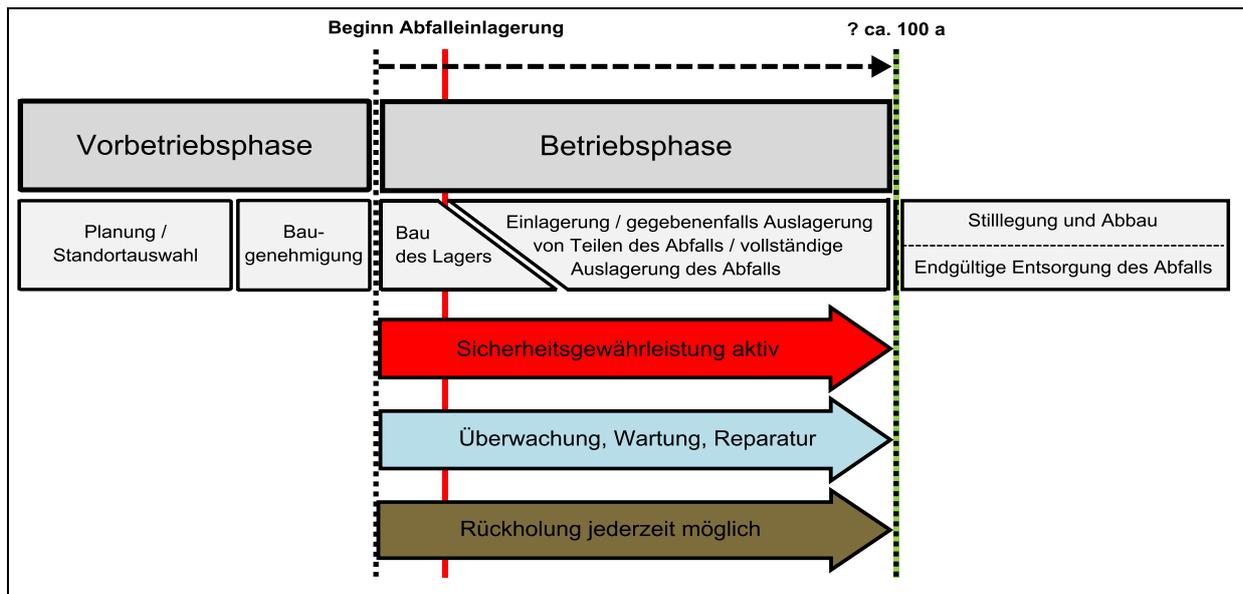


Abb. LzL-1: Operative Phasen der Entsorgungsoption "Langzeitlagerung" (Beispielkonzept COVRA) mit zugehörigen Aktivitäten und Informationen zur Art der Sicherheits-gewährleistung sowie zur Dauer von Überwachung und Rückholbarkeit

Nachbetriebsphase

Eine Nachbetriebsphase wie bei den Endlagern, die am Ende der Betriebsphase in den passiv sicheren Zustand überführt werden, existiert für die Option LzL nicht, da die längerfristige permanente aktive Überwachung des Lagers und damit der Betrieb optionsbestimmend sind. Nach Erreichen des maximal genehmigten Zwischenlagerungszeitraums (Ende Betriebsphase) ist das Lager zu leeren und zurückzubauen. Die Abfälle müssen einem anderen Entsorgungsweg zugeführt werden.

Von einer Nachbetriebsphase der Anlage könnte nur dann die Rede sein, wenn sie (nachdem das radioaktive Inventar zu einer anderen Entsorgungsmöglichkeit bzw. Verwertung abtransportiert worden ist und Kontaminationen beseitigt worden sind) nicht abgebaut wird. Vom Erhalt der Anlage (oder gar einer Folgenutzung) der konventionellen bzw. nicht kontaminierten oder dekontaminierten Anlagenteile ist bei einem Betonbauwerk nach so langer Standzeit und Betriebszeit und nach solcher Art der Nutzung nicht auszugehen.

LzL - Offene Fragen

Abgesehen von den in LzL - Phasengliederung genannten eher technischen Fragen ist die Lagerung von radioaktive Abfällen über lange Zeiträume mit gravierenden

gesellschaftlichen Ungewissheiten behaftet, die sich in folgende Fragen kleiden lassen:

- Wie wird sichergestellt bzw. wer sorgt dafür, dass Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine "bessere" Entsorgungsstrategie, um derentwillen die Langzeitlagerung als Interimslösung eingeführt worden ist bzw. wird, in dem erforderlichen Umfang und mit der erforderlichen Stringenz tatsächlich durchgeführt werden?
- Kann gewährleistet werden, dass ausreichend Personal mit der notwendigen Kompetenz über den gesamten Lagerzeitraum vorhanden ist. Kann das notwendige „Sicherheitsmanagement“ in erforderlicher hoher Qualität über lange Zeiträume gewährleistet werden? Bestehen die gesellschaftlichen und ökonomischen Voraussetzungen hierfür über die vorgesehenen Zeiträume?
- Was geschieht, wenn sich die sicherheitstechnischen oder die gesellschaftlichen Probleme der Langzeitzwischenlagerung nach längerer Lagerzeit als größer erweisen als gedacht und eine andere Option nicht zur Verfügung steht?

LzL - Datenblattbezogene Quellen

BFS – Bundesamt für Strahlenschutz (2013):

http://www.bfs.de/de/transport/zwischenlager/dezentrale_zwischenlager/dezentrale_zl_bauweise.html/printversion

CODÉE, H. (2014): Radioactive waste management in the Netherlands: Long term storage and disposal - Vortrag anlässlich eines Besuchs von ENTRIA-MitarbeiterInnen bei der COVRA in Vlissingen, 19. February 2014

COVRA - Central Organisation for Radioactive Waste (2013): Internetauftritt der Niederländischen Organisation zum Umgang mit radioaktiven Abfällen -

<http://covra.nl/>

EPRI – Electric Power Research Institute (2012): Extended Storage Collaboration Program - International Subcommittee Report, International Perspectives on Technical Data Gaps Associated With Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, Technical Report, November 2012

GKN – Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar (2001): Sicherheitsbericht GKN-Zwischenlager (GKN-ZL) - Gen.-Dok.-Nr. A4/B/2.04.14/4000, 18. Mai 2001

NEEFT, E. (2014): Dutch research programmes into geological disposal of radioactive waste.-Vortrag beim ENTRIA-Besuch bei HABOG (Vlissingen) am 14.02.2014

NEA (2006): The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste. Practices and Potentialities in OECD Countries.- NEA No. 6043,

<https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2006/nea6043-storage.pdf>

NEA (2014): Safety of Long-term Interim Storage Facilities. Workshop Proceedings. Munich, Germany, 21-23 May 2013.- NEA/CSNI/R(2013)10,

<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2013/csni-r2013-10.pdf>

NL (2011): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. 4rd National Report of the Netherlands, September 2011, 148 pages - <http://www.government.nl/files/documents-and-publications/reports/2011/10/12/joint-convention-on-the-safety-of-spent-fuel-management-and-on-the-safety-of-radioactive-waste-management/joint-convention-on-the-safety-of-spent-fuel-management-and-on-the-safety-of-radioactive-waste-management.pdf>.

IAEA (2003): The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety And Sustainability. A Position Paper of International Experts - https://www.iaea.org/sites/default/files/LTS-RW_web.pdf.

PEK - PreussenElektra Kernkraft (2000): Rückbau auf Hochtouren - Würgassen informiert Nr. 4, Februar 2000

RENN, O., SCHWEIZER, P.J., DREYER, M., KLINKE, A. (2007): Risiko: Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit, Broschiert – 24. September 2007

SILVY, J.-P. (2006): How may storage and the long term be made compatible? - CLEFS CEA - No. 53 - Winter 2005-2006 - http://www.cea.fr/english_portal/search/long%2Bterm%2Bstorage/l/en

SKB-Svensk Kärnbränslehantering AB (2011): The interim storage facility for spent nuclear fuel - 01.11.2011 - http://www.skb.se/templates/standard_25480.aspx

I. Optionen

Datenblatt DLg

Darstellung der Entsorgungsoption „Dauerlagerung der radioaktiven Abfälle“ (DLg)

DLg - Vorbemerkung

Die Entsorgungsoption „Dauerlagerung der radioaktiven Abfälle“ (DLg) wurde und wird in keinem Land verfolgt, es bestehen auch keine entsprechenden Absichten. Die Dauerlagerung ist daher nicht Stand der Technik. Es existieren auch keine aussagekräftigen Überlegungen zum technischen Konzept und demzufolge auch keine Möglichkeit zur detaillierten sicherheitstechnischen Beurteilung der Umsetzbarkeit. Die Option wird hier dennoch behandelt, weil sie hinsichtlich der angestrebten Ziele und der Art ihrer sicherheitstragenden Elemente eine Extremvariante möglicher Entsorgungsoptionen darstellt und zudem in der gesellschaftlichen Diskussion über die Entsorgung radioaktiver Abfälle immer wieder erwähnt bzw. sogar gefordert wird.

Die Option Dauerlagerung ist spätestens ab den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt worden und taucht seither mit gewissen Variationen unter verschiedenen Begriffen wie „nuclear guardianship“ (z.B. NUCLEAR GUARDIANSHIP LIBRARY ohne Datum), „Hüteprinzip“ (KREUZER 1990, 1993) oder „Pyramiden-Modell“ (DARGE 2011) in der Diskussion bzw. Literatur auf.

Unabhängig von den benutzten Begriffen ist allen Varianten gemein, dass sie wegen angenommener fehlender Stabilität geologischer Formationen von der prinzipiellen Unmöglichkeit der sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle ausgehen (z.B. KREUZER 1993). Zudem können nach Meinung von KREUZER (1993) die Unsicherheiten der Geologie nicht durch Maßnahmen wie Verpackung oder Verglasung der Abfälle ausgeglichen werden. Als einzige akzeptierbare Möglichkeit des Umgangs mit den radioaktiven Abfällen wird vielmehr die Lagerung unter permanenter gesellschaftlicher Kontrolle bis zum weitest gehenden Zerfall der Radionuklide bzw. bis zur Ent-

wicklung fortgeschrittener technischer Behandlungs- bzw. Beseitigungsmethoden gesehen.

Wegen fehlender ausreichend detaillierter technisch-wissenschaftlicher Angaben zur Option Dauerlagerung in den verfügbaren Quellen ist in den folgenden Unterkapiteln eine inhaltliche Auseinandersetzung mit der Option DLg nur mit erheblichen Einschränkungen möglich. Eine naturwissenschaftliche und ethische Auseinandersetzung mit der Option hat BUSER 1998 vorgelegt und jüngst unter Berücksichtigung der zwischenzeitlichen Entwicklungen bei der Diskussion über die Endlagerung radioaktiver Abfälle (z.B. Thema Fehlervermeidung / Fehlerkorrektur) aktualisiert (BUSER 2014).

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf das im Zusammenhang mit der Diskussion über Dauerlagerung im Fokus stehende Hüteprinzip. Auf das Konzept DARGEs (2011) wird nur im Einzelfall zur Veranschaulichung bestehender Unterschiede eingegangen.

DLg - Wesentliche Merkmale und Ziele

Ziel der Option DLg ist die überwachte Lagerung der Abfälle in einem Bauwerk an der Erdoberfläche bis ihr Gefährdungspotenzial auf ein akzeptierbares Maß abgesunken ist (Hüteprinzip), zumindest so lange, bis geeignete Behandlungs- bzw. Beseitigungsmethoden (für die Abfälle insgesamt oder für bestimmte Abfallarten) verfügbar sind (z.B. DARGE 2011). Die Dauer der Lagerung bis zur Erreichung des erstgenannten Ziels bemisst sich beispielsweise an den natürlichen Hintergrundwerten (Radioaktivitätskonzentrationen) der entsprechenden Radionuklide. Hat sich die Strahlung eingelagerter Radionuklide durch Zerfall soweit reduziert, dass sie der natürlichen Hintergrundbelastung entspricht, könnten die entsprechenden Abfälle aus dem Dauerlager freigegeben werden. Es wird davon ausgegangen, dass für die einzelnen Radionuklidarten Abklingzeiten zwischen zehn und mehr als zwanzig Halbwertszeiten erforderlich sind, um entsprechende natürliche Hintergrundwerte zu erreichen (Nuclear Information and Resources Service 1994) Daraus resultieren für Brennelemente und andere hochradioaktive Abfälle Lagerzeiten von einigen Millionen Jahren. ²⁾

²⁾ Im Hinblick auf die nachgeordnete Zielsetzung (Überbrückung der Zeit, bis bessere Behandlungstechniken bzw. für ausreichend sicher angesehene endgültige Entsorgungsmöglichkeiten entwickelt

Die Lagerung auf unbestimmte, jedenfalls aber sehr lange Zeit erfordert die ununterbrochene Weitergabe der Informationen über Lage und Inventar des Lagers sowie über seine Bedeutung für die Menschheit von einer Generation zur nächsten. Dabei soll (nach BAURIEDL 1991) der Lagerstandort (bzw. Lagerstandorte) einen Ort der Kontemplation darstellen, an dem ein kollektives Bewusstsein über menschliche Arroganz und Verantwortlichkeit in den Menschen verankert werden soll. In gewissem Gegensatz hierzu steht die Vorstellung der Lagerung in einem auffälligen, massiven Zweckgebäude mit antiken "Vorbildern" für Bauwerke mit langer Stand- und Funktionszeit (DARGE 2011: Pyramide) ³⁾

Die Dauerlagerung radioaktiver Abfälle kann in einem zentralen Bauwerk erfolgen (DARGE 2011) oder in mehreren bzw. vielen Bauwerken, die vorrangig an bereits vorhandenen Nuklearstandorten errichtet werden sollen (KREUZER 1990, NUCLEAR GUARDIANSHIP FORUM ohne Datum). Die Bauwerke sowie die Abfälle werden regelmäßig kontrolliert, und bei Bedarf werden Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten durchgeführt. Die Gewährleistung der Sicherheit soll hauptsächlich auf der gesellschaftlichen Kontrolle der Lager bzw. der Abfälle beruhen. Der Sicherheitsbeitrag von technischen Barrieren wird in der angegebenen Literatur nicht problematisiert.

Die unterirdische Lagerung radioaktiver Abfälle spielte in der Diskussion über die Dauerlagerung zunächst keine Rolle. BUSER (1998) zitiert jedoch einen Brief von KREUZER (1997), in dem sich ein gewisses Überdenken einiger Positionen der Hüte-Idee andeutet. Es werden auch Zweifel an der ausschließlich überträgigen Positionierung der Lager und der dezentralen Lagerung der Abfälle geäußert. Auf die Entwicklungen in jüngerer Zeit geht ausführlich BUSER (2014) ein. Das grundlegende Problem der Option Dauerlagerung wird davon jedoch nicht berührt.

worden sind) ähnelt die Dauerlagerung generell der langzeitigen Zwischenlagerung (s. Datenblatt LzL). Allerdings sind die im Zusammenhang mit Dauerlagerung geäußerten Vorstellungen im Vergleich zur Langzeitlagerung eher diffus und bringen lediglich vage Hoffnungen zum Ausdruck. Die vorgesehenen bzw. ins Auge gefassten Lagerzeiträume unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen.

³⁾ Die Pyramiden von Gizeh, Ägypten, sind bis heute sehr eindrucksvolle Bauwerke, waren aber trotz zumindest anfänglicher Bewachung nicht geeignet, ihren Inhalt für mehr als einige Jahrzehnte oder Jahrhunderte vor Diebstahl zu schützen.

Aus den dargestellten Zielen der Dauerlagerung ergeben sich folgende **charakteristischen Merkmale** der Option:

- **Einhaltung der Schutzziele** durch zeitlich unbegrenzte, kontinuierlich überwachte übertägige Lagerung der Abfälle mit der Möglichkeit, Wartungsarbeiten, Reparaturen und Umlagerungen von Abfällen über diesen Zeitraum an dem bzw. den Lagerbauwerk(en) bzw. auch an den Abfallbehältern durchzuführen.
- **Stabile gesellschaftliche Verhältnisse** werden für Überwachung, Wartung und Reparatur vorausgesetzt; gleiches gilt für die **Informationsweitergabe** bezüglich der Lage und des Inhaltes der Lager. Es wird angenommen, dass zukünftige Generationen Wissenschaft und Technik im Sinne der Risikoreduzierung weiterentwickeln und kompetentes Personal auf Dauer zur Verfügung steht.
- Die **Rückholung** der Abfälle aus dem Lager ist Bestandteil des Lagerkonzepts und würde bei der baulichen Gestaltung des Lagers so berücksichtigt, dass eine Rückholung von Abfällen ohne großen Aufwand möglich wäre. Geboten wäre Rückholung insbesondere dann, wenn fortschrittliche Methoden zur **Behandlung oder zur** schadlosen **Beseitigung** der Abfälle bzw. Anteilen davon zur Verfügung stehen sollten. Für den Fall, dass sich das Lagerkonzept als fehlerhaft erweisen und der Fehler nicht behebbar sein sollte oder dass ein besseres Lagerkonzept entwickelt würde, wäre die vollständige Umlagerung der Abfälle in ein neues Bauwerk möglich.

DLg - Varianten und Ergänzungen

Nach den ausgewerteten Unterlagen können sich **Varianten** der Option Dauerlagerung aus der Anzahl der Lager und deren Standorte ergeben (ein großes Lager nach DARGE 2011, mehrere Lager nach KREUZER 1990; Lager an bestehenden Nuklearstandorten nach NUCLEAR GUARDIANSHIP LIBRARY ohne Datum). **Ergänzungen** der Option können aus dem Einsatz fortgeschrittener Methoden zur Behandlung und Beseitigung der Abfälle resultieren, wodurch die Lagerzeit für Teile der Abfälle oder alle Abfälle beendet würde.

Beispielsweise schlägt DARGE (2011) als Ergänzung der Dauerlagerung die Transmutation langlebiger Radionuklide in kurzlebige bzw. stabile Isotope vor. Die P&T-Anlage soll – genauso wie das Dauerlager – „hermetisch nach außen abgeschlos-

sen“ sein und eine Verbindung zum Lager aufweisen (Hinweis: dies sind Vorgaben, die sich aus technischen Gründen nicht vollständig umsetzen lassen und sich hinsichtlich ihrer gleichzeitigen Umsetzung widersprechen). Die behandelten Abfälle müssten nur für kürzere Zeit gelagert werden und könnten letztlich per Rakete in den Weltraum geschossen werden (s. dazu aber Datenblatt sEO).

Weitere Aussagen zu Varianten und Ergänzungen der Option DLg sind auf Grundlage der ausgewerteten Unterlagen nicht möglich.

DLg - Begründung

Die positive Einschätzung der Option DLg durch ihre Verfechter gründet sich auf einen wesentlichen Aspekt, nämlich die dauerhafte gesellschaftliche Kontrolle der Abfälle in (insbesondere) obertägigen Lagern. Ein Vorteil wird auch in der Möglichkeit gesehen, durch Fortschritte in Wissenschaft und Technik zu wirksameren Behandlungs- bzw. Beseitigungsmethoden als heute verfügbar zu kommen. Im Gegensatz dazu werden andere Optionen, insbesondere die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen, grundsätzlich abgelehnt, weil sie die Isolation der Radionuklide im Endlager auf Dauer nicht gewährleisten und damit auch ihre Freisetzung in die Biosphäre langfristig nicht verhindern könnten.

Damit stellt die Dauerlagerung den Extremfall einer Option dar, bei der die Sicherheit für unbestimmte, nahezu beliebig lange Zeiträume durch gesellschaftliche Kontrolle gewährleistet werden soll. Die Abfälle werden jeweils von einer Generation an die nächste Generation übergeben mit der Erwartungshaltung, dass diese ebenfalls dazu beitragen wird, die Abfälle für „alle Zeit“ zu hüten.

Im Kern beruht diese Option also auf dem uneingeschränkten Vertrauen in die zeitlich praktisch unbegrenzte Kontrolle der Abfälle durch die Gesellschaft bei gleichzeitigem Misstrauen gegenüber naturwissenschaftlichen Erkenntnissen über die Prognose des langzeitigen Verhaltens geologischer Systeme und technischer Barrieren. Auch die historischen Erkenntnisse über rasche und extreme Veränderungen gesellschaftlicher Strukturen werden nicht akzeptiert. Zwar teilt KREUZER (1993) die Zweifel an stabilen gesellschaftlichen Verhältnissen, er will dies jedoch durch die demokratische Einbettung und Kontrolle der „Fach-Eliten“ in die Gesellschaft kompensieren. Zudem treffen seiner Meinung nach die gleichen Zweifel auf die heute tätigen „Gilden der Wissenschaft und der Technik“ zu.

DLg - Gewährleistung der Sicherheit

Die **langzeitige Sicherheit** der Option beruht weitest gehend auf kontinuierlichem Handeln der Menschen (Monitoring, Wartung, erforderlichenfalls Reparatur). Dieses Handeln muss so lange gewährleistet werden, wie von den Abfällen nicht akzeptierbare Einflüsse auf Mensch und Umwelt ausgehen können. Bei Verlust der gesellschaftlichen Kontrolle bzw. der Handlungsfähigkeit verliert das Lager seine Sicherheit.

Betriebssicherheit

Die Anlage ist während der gesamten Lagerzeit, also über sehr lange Zeiträume, in Betrieb. Während dieser Zeit sind Störfälle durch Einwirkungen von innen oder außen auf die Lagerstruktur, die Abfallbehälter usw. möglich. Die durchgängig erforderlichen Kontrolle, Instandhaltung und gegebenenfalls Reparatur des Lagers bzw. das Umpacken von Abfällen sind weitere potenzielle Ursachen für Störfälle. Die Kritikalitätssicherheit muss bei Ein- und Auslagerung der Abfälle durch Einhaltung bestimmter Sicherheitsvorkehrungen aktiv sowie während der gesamten Lagerzeit aber durch Anordnung oder Barrieren möglichst passiv gewährleistet werden (s. dazu auch DLg - Varianten und Ergänzungen).

Strahlenbelastungen im Normalbetrieb

Für das Betriebspersonal bestehen - beginnend mit der Einlagerung - Strahlenbelastungen über den gesamten extrem langen Betriebszeitraum des Lagers. Zur Strahlenbelastung tragen alle Gebinde bei.

Für die anwohnende Bevölkerung sind (wie bei jeder Entsorgungsoption) Strahlenbelastungen durch den Antransport der Abfälle, durch zulässige bzw. nicht vermeidbare Abgaben während der Lagerung, durch Reparaturarbeiten während der Lagerzeit und durch die erforderliche Neukonditionierung nach einer gewissen Lagerzeit (in welchem Zustand sind Glaskokillen bzw. Brennelemente nach jeweils hundert oder mehr Jahren?) gegeben. Je nach Lagerkonzept können potenzielle Strahlenbelastungen durch Direktstrahlung bei Aufenthalt in der Nähe des Lagers dazu kommen. Je nach der gewählten Variante (ein großes Lager, mehrere kleinere Lager, Lager am Standort von Nuklearanlagen) können sich die Transportrisiken verringern oder sonstige Risiken verschieben. Genaueres dazu ist den verfügbaren Unterlagen zur Option Dauerlagerung nicht zu entnehmen.

Sollte die angenommene Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik dazu führen, dass irgendwann Möglichkeiten für die fortschrittliche Behandlung oder die abschließende Beseitigung der Abfälle zur Verfügung stehen, müsste auch deren Auswirkungen auf Beschäftigte und Anwohner ermittelt werden (gilt v. a. für P&T).

DLg - Proliferation, Safeguards

Aspekte von Proliferation und Safeguards sind bei der Option DLg von erheblicher Bedeutung. Sie werden in den ausgewerteten Texten jedoch nicht beachtet. Ein dauerüberwachtes Lager mit bestrahlten Kernbrennstoffen an der Erdoberfläche stellt per se eine Quelle für das Abzweigen radioaktiver Stoffe dar. In diesem Sinne kritische Aktivitäten bzw. Sachverhalte sind beispielsweise Handhabung der Abfälle, Reparatur geschädigter Abfallbehälter, Manipulation der elektronischen Inventarisierung, unerkannte betriebsorganisatorische Mängel.

DLg - Ungewissheiten und Risiken

Die entscheidenden **Ungewissheiten** der Option DLg liegen in der postulierten Voraussetzung, dass das heutige gesellschaftliche System über sehr lange Zeiträume in dem Sinne stabil bleibt oder sogar eine - im Sinne sicheren Lagerbetriebs - positive Entwicklung nimmt, dass die erforderlichen Überwachungsaufgaben am Lager und die Entwicklung besserer Behandlungstechniken für die Abfälle weiter geführt werde. Ein Blick zurück zeigt jedoch, dass diese Ungewissheit faktisch einem Risiko entspricht, und zwar dem **Risiko**, dass sich jedes politische, ökonomische und soziale System einschließlich Wissenschaft und Technik während des langen „Hüte“-Zeitraums mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit verändern wird, und zwar in unbekannter Art und Weise und in unbekannte Richtung. Ein Rückblick allein auf das letzte Jahrhundert zeigt, wie groß die Wahrscheinlichkeit für künftige politische Änderungen, Kriege und ökonomische Krisensituationen ist. BUSER (1998) führt dies in aller Klarheit aus.

In schweren gesellschaftlichen Krisensituationen hat die Überwachung und Lagerung der Abfälle in Bauwerken möglicherweise nicht die notwendige hohe Priorität, so dass knappe Ressourcen an anderer Stelle eingesetzt werden. Es kann auch nicht selbstverständlich davon ausgegangen werden, dass sich die technisch-wissenschaftliche Entwicklung wie in der Vergangenheit auch in der Zukunft linear oder ohne Brüche fortsetzt. Eine Änderung gesellschaftlicher Grundwerte und

Grundlagen – wie in der Vergangenheit weltweit immer wieder geschehen – kann auch die Bedeutung der angestrebten „demokratischen Einbindung und Kontrolle von Fach-Eliten in die Gesellschaft“ (KREUZER 1993) verändern. Was demokratisch ist, bestimmen nicht zuletzt die Machtinhaber einer Gesellschaft. Insofern wird das mit der Notwendigkeit dauerhafter Überwachung verbundene Risiko der Dauerlagerung durch diesen Ansatz nicht nachhaltig verringert.

Zudem ist auch nicht auszuschließen, dass Lagerbauwerke als Erpressungsmittel benutzt werden. Die Bauwerke an der Erdoberfläche können bautechnisch nicht hinreichend gegen die Einwirkung schon heute verfügbarer panzer- und bunkerbrechender Waffen und Sprengstoffe ausgelegt werden. Für denkbare zukünftige Weiterentwicklungen dieser Waffen dürfte dies erst recht gelten.

Da das Dauerlager für sehr lange Zeiträume in Betrieb sein muss, erwachsen daraus auch erhebliche technische Risiken. Sie ergeben sich aus Veränderungen des Zustands der Abfälle in den Abfallbehältern, der Funktionsentwicklung der sicherheitstechnischen weiteren Barrieren (z.B. Lagerstruktur) und der kontinuierlichen Durchführung des zur Überwachung notwendigen Monitorings. Nähere Angaben dazu finden sich in der einschlägigen Literatur zur Dauerlagerung kaum. DARGE (2011) geht beispielsweise davon aus, dass nach einem Zusammenbruch der gesellschaftlichen Ordnung die Sicherheit des Lagers nicht sofort beeinträchtigt werde, da es so abgeschirmt sei, dass es lange Zeit dauert, bis sich Mängel einstellen werden. KREUZER (1993) wiederum will Sicherheitseinbußen durch dauerhafte Einbindung und Kontrolle der „Fach-Eliten“ in die Gesellschaft vermeiden. Die mit der Dauerlagerung verbundenen tatsächlichen Versagensrisiken werden einfach ignoriert.

Insgesamt muss mangels einschlägiger technisch-wissenschaftlicher Informationen für die Dauerlagerung davon ausgegangen werden, dass die aus der langen Betriebszeit des Lagers resultierenden **erheblichen Risiken** von den Befürwortern der Dauerlagerung nicht erkannt werden oder nicht erkannt werden wollen. Sie entziehen sich jedenfalls der Diskussion darüber.

DLg - Generelle Vor- und Nachteile

Erwartete Vorteile

- Unabhängig von der geplanten Lageranzahl ist ein Dauerlager relativ schnell verfügbar, wenn ein sicherheitstechnisch genehmigungsfähiges Konzept vorliegt. Dies ergibt sich daraus, dass Lagerbauwerke an der Erdoberfläche weitgehend unabhängig von den geologischen Standortverhältnissen errichtet werden können. Entsprechend wird dadurch die Erweiterung einer Anlage durch neue Bauwerke erleichtert.
- Das Dauerlager als gesellschaftlich überwachtes und kontrolliertes Ingenieurbauwerk trifft bei vielen Menschen auf höhere Akzeptanz als die geologische Tiefenlagerung (aktive Gewährleistung der Sicherheit ist vielen Menschen vertraut).
- Je nach Variante der Dauerlagerung können die Abfälle oder Teile davon so lange gelagert werden, bis eine sichere und akzeptierte Entsorgungsoption oder die Möglichkeit ihrer Verwertung gefunden ist.

Nachteile

- Die Betriebsdauer des Lagers umfasst äußerst lange Zeiträume (im Extremfall Millionen Jahre), sofern keine geeigneten Techniken zur Behandlung bzw. endgültigen schadlosen Beseitigung der Abfälle entwickelt werden. Für solche Betriebszeiträume sind geordnete Kontrollmaßnahmen nicht zu gewährleisten.
- Die erhoffte Möglichkeit, die Abfälle solange aufzubewahren zu können, bis der radioaktiven Zerfall der Radionuklide zu einem Strahlenniveau führt, das dem der natürlichen Hintergrundstrahlung entspricht, ist rein theoretischer Art: Die erforderliche gesellschaftliche Stabilität (politisch, ökonomisch, sicherheitstechnisch) der überwachenden und kontrollierenden Gesellschaft ist über die zu betrachtenden sehr langen Zeiträume nicht gewährleistet (nicht einmal der Bestand der menschlichen Gesellschaft an sich ist für diesen Zeitraum gesichert).
- Lagerbauwerk und Abfallbehälter sind relativ leicht zugänglich und befinden sich in bzw. in direkter Nachbarschaft der Biosphäre. Daraus ergeben sich vielfältige Probleme (Strahlenbelastung im Normalbetrieb und bei Störfällen, Terrorismus, Safeguards/Proliferation usw.).

- Nach heutigem Stand der Technik sind bei Lagerzeiträumen von mehr als einigen Jahrzehnten für die bestrahlten Kernbrennstoffe und verglasten hochradioaktiven Abfälle Reparatur- oder Umpackmaßnahmen und die Umlagerungen in neue Gebäude notwendig. Diese Maßnahmen müssten bei Dauerlagerung vielfach wiederholt werden und wären jedes Mal mit zusätzlichen Strahlenbelastungen und Störfallrisiken verbunden.
- Eine solche Umlagerung – wie auch eine wie auch immer geartete der DLg nachfolgende Behandlung – setzt eine Handhabbarkeit der Abfälle voraus. In dieser Hinsicht bedingen Alterungsprozesse – insbesondere bei abgebrannten Kernbrennstoffen – Risiken.
- Die durch den Normalbetrieb verursachten realen Strahlenbelastungen summieren sich über den langen Zeitraum. Die aus dem Betrieb des Lagers resultierende Kollektivdosis für Personal und Bevölkerung ist daher groß.

DLg - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen

Hinter den Vorstellungen zu Nuclear Guardianship und Hüteprinzip stehen ähnliche gesellschaftliche Anforderungen und Vorstellungen, die sich in folgenden Aussagen beispielhaft manifestieren (NUCLEAR GUARDIANSHIP LIBRARY ohne Datum, ETHIC OF NUCLEAR GUARDIANSHIP ohne Datum):

- Verantwortlichkeit der (nutznießenden) gegenwärtigen Generationen für die vorhandenen radioaktiven Abfälle,
- Anspruch zukünftiger Generationen auf das Wissen über die ihnen hinterlassene nukleare Erbschaft und die Möglichkeit, sich davor zu schützen,
- Anspruch zukünftiger Generationen auf die Möglichkeit, nukleare Lager zu überwachen und gegebenenfalls zu reparieren sowie neu entwickelte Technologien anzuwenden, die Mensch und Umwelt wirksamer schützen als gegenwärtige Konzepte bzw. Techniken (die Endlagerung radioaktiven Materials in tiefen geologischen verhindert diese Möglichkeiten und ist mit dem Risiko der unkontrollierten Kontamination der Biosphäre verbunden),

- Transport radioaktiven Materials wegen der großen damit zusammenhängenden Risiken nur dann, wenn die Bedingungen am gegenwärtigen Standort ein größeres Risiko darstellen als der Abtransport der Abfälle,
- hohe Priorität der Entwicklung von Technologien zur insgesamt am wenigsten gefährlichen Behandlung und Lagerung radioaktiver Abfälle,
- moralische Übereinkunft innerhalb der Gesellschaft zur notwendigen Wachsamkeit für die dauerhafte und fortlaufende Isolation des radioaktiven Materials,
- volle Beteiligung der Öffentlichkeit bei politischen Entscheidungen über den Umgang mit radioaktiven Abfällen (freier Informationsfluss ist unverzichtbar für den Selbstschutz der gegenwärtigen und der zukünftigen Generationen),
- permanente Übertragung der Kenntnisse um die Gefährlichkeit der Abfälle von Generation zu Generation zwecks Selbstschutzes der gerade handelnden Generation vor den Abfällen und Weitergabe des nuklearen Wächtertums durch die Zeit.

Im Kern wird also das Recht zukünftiger Generationen zum Umgang mit den „geerbten“ Abfällen in den Vordergrund gestellt. Sie müssen bzw. "dürfen" langfristig die Abfalllager überwachen und die notwendige Wachsamkeit gegenüber den Abfällen und die dazu erforderliche moralische Übereinkunft der Gesellschaft gewährleisten. Der Aspekt der damit verbundenen Belastung zukünftiger Generationen und der Einschränkung ihrer Handlungsfreiheit spielt offensichtlich keine Rolle.

Letztendlich wird die mit den Abfällen zusammenhängende Last auf eine große Zahl zukünftiger Generationen übertragen. Ob diese die Last überhaupt tragen wollen oder können, wird nicht problematisiert. Mehr noch: Die zukünftigen Generationen sollen das „nukleare Wächtertum“ durch gesellschaftliche Erziehung und sonstige Maßnahmen von Generation zu Generation weiterführen und stärken. BAURIEDL (1993a, 1993b) fordert ein verändertes Verantwortungsbewusstsein für unsere Nachkommen. Die Schuld aus der Gefährdung durch die radioaktiven Abfälle dürfe nicht verdrängt werden, man müsse sich ihrer vielmehr bewusst sein und sie als noch zu lösende Aufgabe von einer Generation an die nächste übertragen. BAURIEDL (1993a) spricht der Dauerlagerung eine gewisse religiöse Dimension zu, da alle großen Religionen neben dem Erkennen und Bekennen der eigenen Schuld im-

mer auch den Weg der Erlösung durch Hereinnahme des Bösen und gerade nicht durch seine Abspaltung (hier z.B. durch Endlagerung) gezeigt haben.

Von der Religion zu einer atomaren „Priesterschaft, einem Orden, einer Sekte oder einer Art künftiger „quasi-Stasi“ (KREUZER 1993) ist der Weg nicht mehr weit. Eindeutig dagegen sprechen sich KREUZER (1993) und andere Vertreter des Hüte-Konzepts bzw. des Nuclear-Guardianship-Projektes (z.B. GARFIELD 1994) aus.

Im Übrigen wird von der zukünftigen Möglichkeit deutlich verbesserter Methoden zur Behandlung radioaktiver Abfälle ausgegangen. Der gegenwärtige Stand der Technik reicht nach Ansicht der Unterstützer der Dauerlagerung gerade aus, um die Abfälle in den Lagern dauerhaft zu isolieren (MACY 1992).

Letztlich wird eine abstrakte ethische Position vertreten, die losgelöst von Fragen der Realität ist. Konkrete Schutzziele oder Maßnahmen zur Isolierung der Abfälle über die erforderlichen Zeiträume werden nicht benannt, und heute schon bekannte technische Probleme der Dauerlagerung werden nicht einmal angesprochen, geschweige denn gegen andere Möglichkeiten abgewogen. Es wird ein ethisches Gedankengebäude aufgebaut, das die reale Welt negiert. Hinzu tritt ein durch Indizien nicht gestützter quasi naiver Glaube an die permanente Fortentwicklung von Wissenschaft und Technik. Wenn diese Vorstellungen realistisch wären, müsste sich die Nukleartechnik so weiterentwickeln, dass sie die von ihr hervorgerufenen Probleme innerhalb weniger Jahre selbst löst. Dies ist aber offensichtlich nicht der Fall.

DLg - Operative Phasen

Die operativen Phasen der Option DLg (s. Abb. DLg-1) umfassen nur die Vorbetriebsphase und die Betriebsphase. Eine Nachbetriebsphase gibt es nicht, weil der Betrieb „optionsgemäß“ mit der Auslagerung der Abfälle endet oder dann, wenn sie ungefährlich geworden sind. Generell ist festzustellen, dass die Befürworter der Dauerlagerung kaum genaue wissenschaftlich-technische Vorstellungen über Details der Lagerung und die operativen Phasen der Option formuliert haben. Insofern ist eine Auseinandersetzung damit nur bedingt möglich.

Vorbetriebsphase

Neben den offenen Fragen, die hinsichtlich der Sinnhaftigkeit und Umsetzbarkeit der Option Dauerlagerung auf grundsätzlicher Ebene bestehen (s. DLg - Offene Fragen), sind spätestens in der Vorbetriebsphase eine Reihe die technische Planung und Umsetzung betreffende Fragen durch Entscheidungen bzw. Festlegungen zu beantworten. Hierzu gehören:

- Welche Vor- und Nachteile besitzt die Variante, an vorhandenen Nuklearstandorten jeweils Dauerlager einzurichten gegenüber derjenigen, nur an einem oder sehr wenigen Standorten Dauerlager anzulegen?
- Welche Anforderungen werden an den Standort (bzw. die Standorte) gestellt?
- Welche technischen Anforderungen muss das Dauerlager erfüllen, insbesondere vor dem Hintergrund der extrem langen Lagerzeit?
- Wie soll die Sicherheit des Lagers im Einzelnen gewährleistet werden? Welche technischen Barrieren werden benötigt und wie sind sie auszulegen? Wie ist mit dem im Laufe der sehr langen Isolationszeit zu erwartenden Integritätsverlust von Barrieren umzugehen?
- Welche Sicherheitsfunktionen müssen die Barrieren erfüllen? Welche Schwachstellen und Risiken bestehen?
- Wie soll die lückenlose (auch redundante) Überwachung der Abfälle gestaltet und für die unbegrenzte Lagerzeit gewährleistet werden?
- Wie sollen innere und äußere Störfälle verhindert und daraus resultierende Risiken ausgeschlossen oder minimiert werden?

Diese und andere Fragen müssen vor dem Übergang in die Betriebsphase durch entsprechende Planung mindestens durch Entwicklung belastbarer Konzepte beantwortet und in entsprechende Festlegungen umgesetzt werden. Hierzu gehört auch die abschließende Entscheidung über die Genehmigung des Vorhabens.

Betriebsphase

In der Teilphase Bau des Dauerlagers (bzw. der Lager) müssen die festgesetzten Anforderungen an das Lagerbauwerk umgesetzt werden. In der darauf folgenden Teilphase der Abfalleinlagerung werden die Abfälle eingelagert und überwacht (die Überwachung erstreckt sich auch auf die Strukturelemente des Lagerbauwerks und die Abfallbehälter). Falls erforderlich, werden Instandsetzungsmaßnahmen am Lager durchgeführt, Abfälle neu verpackt usw.. Die Stilllegung des Dauerlagers (bzw. die Auslagerung der Abfälle) bevor die Strahlung der Abfälle das Niveau der Umgebung erreicht, ist nur für den Fall vorgesehen, dass zukünftig verbesserte technische Möglichkeiten für den Umgang mit den Abfällen zur Verfügung stehen und umgesetzt werden. Für diesen Fall erfolgt die Auslagerung der betroffenen Abfallarten. Vom Zerfall der Radionuklide auf das Niveau der Hintergrundstrahlung ist nicht auszugehen, da einige der zu lagernden radiologisch wirksamen Radionuklide natürlicherweise nicht vorkommen oder aber sehr lange Halbwertszeiten (Millionen Jahre) aufweisen.

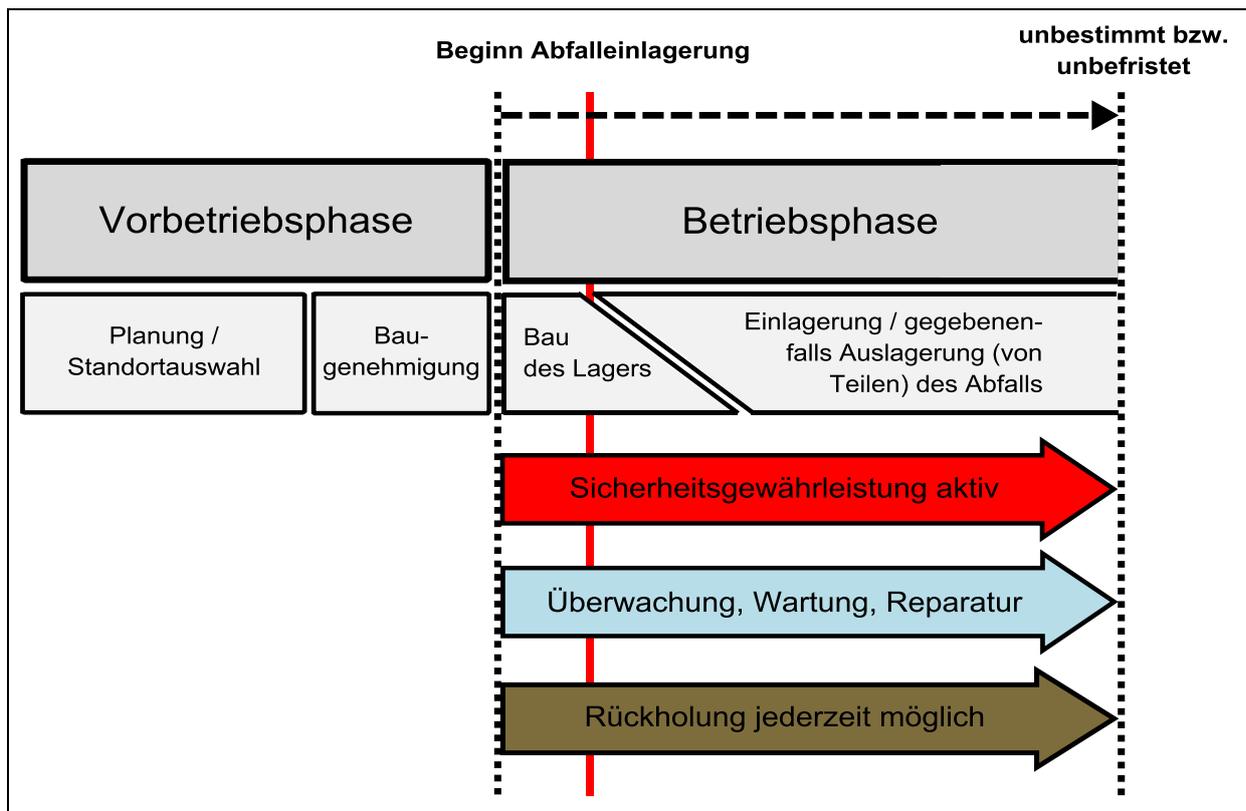


Abb. DLg-1 Operative Phasen der Entsorgungsoption DLg - "Dauerlagerung" mit zugehörigen Aktivitäten und Informationen zur Art der Sicherheitsgewährleistung, zu Monitoring und Beweissicherung sowie zur Rückholung von Abfällen

Nachbetriebsphase

Auf Grund der Zweckbestimmung der Dauerlagerung der Abfälle existiert keine Nachbetriebsphase für diese Option.

DLg - Offene Fragen

Bei der Option Dauerlagerung lassen sich spezifische offene Fragen zu ihrer etwaigen Umsetzung wegen der bisher unzureichenden technisch-wissenschaftlicher Beschreibung der Option bzw. mangels detaillierter konzeptioneller Vorstellungen kaum formulieren. Allerdings lässt sich folgende (durchaus erweiterbare) Liste allgemeiner bzw. grundsätzlicher Fragen aufstellen, zu denen bisher keine bzw. keine aussagekräftigen Antworten vorliegen:

- Welche grundlegenden technisch-wissenschaftlichen Anforderungen muss ein Dauerlager hinsichtlich Sicherheit, Monitoring, Personal usw. erfüllen? Mit welchem technischen Konzept sind diese Anforderungen umzusetzen?
- Wie wird die notwendige Anlagenüberwachung über den extrem langen Lagerungszeitraum sichergestellt? Auf welche Art und Weise erfolgt die Überwachung während schwerer gesellschaftlicher Krisen?
- Wie wird der offensichtliche Konflikt zwischen der überwachten Dauerlagerung der von der Gesellschaft abgelehnten radioaktiven Abfällen einerseits und der – variantenspezifischen – Hoffnung auf eine endgültige wissenschaftlich-technische Lösung des Problems der Abfälle (z.B. durch P&T) andererseits gelöst?
- Was geschieht, wenn sich die technischen bzw. sicherheitlichen Probleme der Dauerlagerung als größer erweisen als gedacht und möglicherweise zu unkontrollierter Freisetzung von Radioaktivität führen?
- Wie soll die kontinuierliche generationenübergreifende Informationsübermittlung bezüglich Lage und Inventar der Dauerlager über die optionstypisch extrem langen Zeiträume sichergestellt werden?
- Von welchen nuklidspezifischen Lagerzeiträumen geht man aus und wie sollen die für eine Reihe von Nukliden extrem langen Lagerzeiträume beherrscht werden?

Generell ist festzuhalten, dass das Hüte-Konzept bzw. das Nuclear-Guardianship-Konzept weniger technisch-wissenschaftlich begründet ist, als vielmehr ethisch-moralisch. Es geht den Vertretern dieser Konzepte hauptsächlich um Fragen der Verantwortung und verantwortungsloser Destruktivität, um die eingeforderte „Beziehungsethik“, die eine Verbindung zwischen Verantwortung und Freiheit herstellen soll, und um die Freiheit bzw. Unfreiheit zukünftiger Generationen.

Das ungleiche Verhältnis zwischen wissenschaftlich-technischem Konzept auf der einen Seite und ethischem Hintergrund auf der anderen Seite ist Ursache für die gravierende argumentative Schiefelage des Konzepts: Die offenkundigen technischen und nichttechnischen Risiken der Dauerlagerung werden weder ernsthaft wahrgenommen noch gegen die erhofften Vorteile abgewogen.

DLg - Datenblattbezogene Quellen

- BAURIEDL, T. (1993a): Kommentar zum „Hüte-Konzept für radioaktive Abfälle“ - Anmerkungen aus dem Institut für Politische Psychoanalyse München, Themenheft: Radioaktiver Müll und atomare Gefahren, Heft 10/11, S. 17 – 19, September 1993, München
- BAURIEDL, T. (1993b): Die Gefahr muss zugänglich bleiben. Thesen zur ethischen Problematik des Umgangs mit radioaktiven Abfällen aus psychoanalytischer Sicht - Anmerkungen aus dem Institut für Politische Psychoanalyse München, Themenheft: Radioaktiver Müll und atomare Gefahren, Heft 10/11, S. 66 - 74, September 1993, München
- BAURIEDL, T. (1991): On Guilt, Grief, Responsibility and Mythology – A Psychoanalyst`s View of the Nuclear Guardianship Project - Übersetzt aus: NUX, Issue 69-70, March 1991
- BUSER, M. (1998): „Hüte“-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblick - Expertenbericht für die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villingen, Januar 1998
- BUSER, M. (2014): „Hüten“ versus „Endlagern“: Eine Standortbestimmung 2014 - Expertenbericht, im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearinspektorats, http://static.ensi.ch/1411369298/hueten_vs_endlagern_2014-ensi_marcos_buser.pdf
- DARGE, W. (2011): Permanentes Atommüll-Lager. Pyramiden-Modell. - Papier v. 30.01.2011, Prof. Dr. Walter Darge, Celle
- ETHIC OF NUCLEAR GUARDIANSHIP (ohne Datum): <http://www.univ-great-turning.org/nuclear-guardianship/r02ethic.htm>
- GARFIELD, S. (1994): „Atomic Priesthood“ is not Nuclear Guardianship. A Critique of Thomas Sebeok's Vision of the Future.- Nuclear Guardianship Forum, On The Responsible Care of Radioactive Materials - [Issue No. 3](#), Spring 1994, p. 15, <http://www.ratical.org/radiation/NGP/AtomPriesthd.html>
- MACY, J. (1992): Technology and Mindfulness – A Call to attention to the radioactive results of nuclear technology - Nuclear Guardianship Forum, On The Re-

sponsible Care of Radioactive Materials, Issue No. 1, Spring 1992, p. 3,
<http://www.ratical.org/radiation/NGP/TechMindful.txt>

NUCLEAR GUARDIANSHIP LIBRARY (ohne Datum): <http://www.univ-great-turning.org/nuclear-guardianship/>

KREUZER, K. (1997): Brief an W. Wildi - Energie und Umwelt, 4/97, S. 22, Schweizer Energie Stiftung [zitiert nach BUSER 1998]

KREUZER, K. (1993): Ein Hüte-Konzept für radioaktive Abfälle - Anmerkungen aus dem Institut für Politische Psychoanalyse München, Themenheft: Radioaktiver Müll und atomare Gefahren, Heft 10/11, S. 6 - 16, September 1993, München

KREUZER, K. (1990): Nukleare Ethik – das Hütekonzept - Wasser Boden Luft, 12/90, S. 14

Nuclear Information and Resources Service (1994): Storage-for-Decay. Proposal by Nuclear Information and Resources Service - NUCLEAR GUARDIANSHIP FORUM, On The Responsible Care of Radioactive Materials, Issue No. 3, Spring 1994, p. 12, <http://www.ratical.org/radiation/NGP/Storage4Decay.html>

I. Optionen

Datenblatt sEO

Darstellung sonstiger Entsorgungsoptionen (sEO)

sEO - Vorbemerkung

In nahezu allen Ländern mit Plänen oder Programmen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist die Diskussion über das mögliche Vorgehen weitgehend auf die in den Datenblättern ELo, ELm und LzL ausführlich dargestellten Optionen konzentriert. In der gesellschaftlichen Diskussion spielt zudem regelmäßig die Dauerlagerung (Datenblatt DLg) eine wichtige Rolle. Seit Beginn der technischen, politischen und gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit der Entsorgung der Abfälle in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts sind aber immer wieder auch Alternativen bzw. Varianten oder Ergänzungen dieser Optionen vorgeschlagen und diskutiert und zum Teil auch im Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit untersucht worden.

Zum einen handelt es sich dabei um alternative Verfahren zur Behandlung der Abfälle vor ihrer endgültigen Entsorgung, von denen im Vergleich zum bisher allgemein bevorzugten bzw. geplanten Vorgehen bei der Entsorgung in Endlagerbergwerken in tiefen geologischen Formationen langfristige sicherheitstechnische Vorteile erwartet bzw. erhofft wurden und werden. Hierzu gehören neben den in Datenblatt P&T beschriebenen komplexen Entsorgungsschritten beispielsweise die Einbindung von Radionukliden in Mineralphasen künstlicher Gesteine (z. B. RINGWOOD et al. 1979: Synroc), die dann verschiedenen Entsorgungswegen zugeführt werden können. Vorgeschlagen und diskutiert wurden und werden auch die Entwicklung und der Einsatz neuer Techniken für die Herstellung unterirdischer Hohlräume (Kavernen, Bohrungen) mit günstigen mechanischen und einschlusswirksamen Eigenschaften (z. B. BIELECKI & MÖLLER 2011/ 2012: Schmelzbohrtechnik). Nicht zuletzt wird von einigen dieser Modifizierungen ein über lange Zeiträume verbesserter Schadstoffeinschluss in einem Endlager in der kontinentalen Kruste erwartet.

Zum anderen handelt es sich um komplexe Strategien bzw. wesentliche Elemente davon, die zur endgültigen Entsorgung der Abfälle führen oder zumindest entschei-

dend dazu beitragen sollten bzw. sollen. Die erhofften, erwarteten oder postulierten sicherheitlichen Vorteile gegenüber anderen Entsorgungsoptionen, insbesondere der Endlagerung in Bergwerken in tiefen geologischen Formationen, wurden und werden von den jeweiligen Verfechtern darin gesehen, dass die Endlagerung bestimmter Abfälle in größerer Tiefe der (vor allem kontinentalen) Erdkruste als bei der Endlagerung in Bergwerken erfolgt, insbesondere in Tiefbohrungen, dass durch Anwendung neuer Techniken (z.B. Schmelzbohrtechnik) ein zuverlässigerer Einschluss der Abfälle erreicht werden kann bzw. dass die Abfälle an gänzlich andere Orte der Erde oder sogar in den Weltraum verbracht werden.

Eine seit Jahren weitgehend unveränderte Palette dieser Optionen wurde und wird von in der Entsorgung aktiven nationalen Institutionen, insbesondere der USA, in größeren zeitlichen Abständen vor allem bei anstehenden Veränderungen in der Entsorgungsstrategie daraufhin geprüft, ob sie aus jeweils aktueller Sicht grundsätzlich als Alternativen zur "üblichen" Endlagerung in Frage kommen und welche Vor- und Nachteile sie aufweisen. Entsprechende (i.W. auf Literatúrauswertung beruhende) Übersichtsdarstellungen bieten z. B. ERDA (1976), ALTOMARE et al. (1979), NAS (2001), NIREX (2002), DUTTON et al. (2004), CORWM (2006), WHIPPLE (2010), JAEA (2011), RECHARD et al. (2011). In der deutschen Fachliteratur finden sich knappe Darstellungen zu einigen der Optionen z.B. in AKEND (2002) und in MINHANS et al. (2008). Ähnlich wie die Dauerlagerung (s. Datenblatt DLg) werden solche Optionen auch von (im Hinblick auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle) engagierten Laien immer wieder ins Gespräch gebracht (z. B. BAIRD 2005, Permanent RadWaste Solutions [ohne Datum]: Entsorgung in Subduktionszonen).

Ausgewählte Vertreter der Gruppe alternativer Entsorgungsoptionen, von denen einige aus heutiger Sicht eher "exotisch" anmuten, werden nachfolgend im Hinblick auf ihre Merkmale kurz dargestellt. Abgesehen von Tiefbohrungen handelt es sich dabei um solche Optionen, die an gänzlich anderen Orten als die Endlagerung in der kontinentalen Kruste umgesetzt werden sollen:

- Endlagerung mittels bzw. in Tiefbohrungen in der kontinentalen Erdkruste,
- Endlagerung unter dem Meeresboden in tektonisch ruhigen Gebieten der Tiefsee von Atlantik und Pazifik,

- Endlagerung unter dem Meeresboden in Subduktionszonen, insbesondere des Pazifik,
- Endlagerung in Inlandeismassen der Antarktis bzw. Grönlands,
- Entsorgung im Weltraum.

Unabhängig von der immer wieder aufflackernden Auseinandersetzung mit diesen und anderen Alternativen zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen der kontinentalen Kruste wird mit Ausnahme der Endlagerung in Tiefbohrungen und -weniger intensiv - in Tiefseesedimenten derzeit keine dieser Optionen ernsthaft diskutiert oder gar verfolgt. Mangels aktueller Informationen weicht ihre Behandlung in den nachfolgenden Abschnitten daher inhaltlich und formal von der "Standardgliederung" in den Datenblättern für die Optionen ELo, ELm, LzL, kpV und DLg insofern ab, als sie auf die generellen Vorstellungen zu ihrer Umsetzung (Entwicklung und Technik) sowie die erwarteten Vorteile und Nachteile der Strategien beschränkt bleibt.

sEO - Endlagerung mittels bzw. in Tiefbohrungen in der kontinentalen Erdkruste

Entwicklung

Eine in 1970er Jahren vor allem in den USA (unter den Bezeichnungen "self-disposal" oder "rock melting") und in Russland diskutierte spezielle Variante der Endlagerungen in Tiefbohrungen sah die Einbringung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefe Bohrlöcher vor, wodurch es zum Aufschmelzen des umgebenden Gesteins und dem weiteren Absinken der Abfallbehälter in sehr große Tiefen kommen sollte. Die Verfestigung der Gesteinsschmelze bei Abkühlung sollte zum Einschluss der Abfälle beitragen. Je nach genauer Zielsetzung waren raster- oder fächerartige Bohrungskonfigurationen vorgesehen (z.B. ÅHÄLL 2006) oder in größerer Tiefe errichtete Absenkungskavernen vorgesehen. "Rock melting" wurde rasch aufgegeben, weil es nicht möglich erschien, den Schmelzprozess zu kontrollieren (CHAPMAN 2013) und alle mit der Option verbundenen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. "Rock melting" wird jedoch bis in jüngere Zeit unter theoretischem Blickwinkel diskutiert (z.B. OJOVAN et al. 2011).

In der Vergangenheit bereits praktiziert wurde die **Verpressung flüssiger bzw. verflüssigter Abfälle** mittels Injektionsbohrungen in den tiefen Untergrund. In

den USA betraf das in den 1970er Jahren (auch mit aushärtendem Injektionsmittel versetzte) schwach- und mittelaktive Abfälle. In Russland sind bis 2002 auch größere Volumina hochaktiver Abfälle verpresst worden (NIREX 2002). Die Abfälle wurden in poröse Gesteinsserien (z.B. Sandstein) gepresst, die von gering permeablen Gesteinsfolgen unter- und überlagert werden. Die Aktivitäten auf diesem Gebiet sind aufgegeben worden, weil standortspezifische Zweifel an der Zuverlässigkeit des Einschlusses der Schadstoffe blieben, gesellschaftliche Widerstände gegen die Verpressung befürchtet wurden bzw. der im Vergleich zur Entsorgung fester Abfälle geringere Sicherheitsstandard gesehen wurde.

Die **Endlagerung** "normal" temperierter hochaktiver Abfälle **in tiefen Bohrlöchern** ist in den vergangenen Jahrzehnten in unregelmäßigen Abständen immer wieder auf Umsetzbarkeit und Sicherheit geprüft worden - vor allem im Zusammenhang mit Änderungen in der nationalen Entsorgungsstrategie (z. B. ARNOLD et al. 2011, ARNOLD et al. 2012 [USA] / NIREX 2002, 2004, CORWM 2006 [Großbritannien] / JAEA 2011 [Japan]). Die Option wird derzeit zwar in keinem Land praktiziert oder konkret geplant, Bohrungen bis in einige tausend Meter Tiefe werden aber in mehreren Ländern im Sinne einer Backup-Lösung als grundsätzlich mögliche Alternative oder Ergänzung zur Endlagerung in Bergwerken betrachtet, zumindest für bestimmte Abfalltypen. In den USA hat sich die technische und politische Diskussion über die Endlagerung in Tiefbohrungen - offenbar mit verursacht durch die Aufgabe des Standortes Yucca Mountain - in jüngster Zeit erheblich verstärkt (z. B. GIBB 2010, CHAPMAN 2013). Auch in Schweden wird die Option in den letzten Jahren verstärkt diskutiert (z. B. ÅHÄLL 2006) und - etwa hinsichtlich technischer Machbarkeit und geowissenschaftlicher Rahmenbedingungen (beispielsweise HARRISON 2000 u. SKB 1989, 1998, 2000, 2013) - genauer betrachtet.

Bis zur Umsetzungsreife der Option Endlagerung in tiefen Bohrlöchern sind allerdings weitere Fortschritte in der Bohr- und Einlagerungstechnik und ihrer Beherrschung sowie Pilotprojekte erforderlich und werden eingefordert (z. B. DRISCOLL et al. 2012). In anderen Anwendungsbereichen der Tiefbohrtechnik (z. B. Geothermie, Verpressung von CO₂) gewonnene Erkenntnisse können bei der Weiterentwicklung hilfreich sein.

Technik

Angestrebt werden derzeit Bohrtiefen von einigen tausend Metern (DRISCOLL et al. 2012) bei einem derzeit möglichen Bohrdurchmesser von ca. 0,5 m. Die Bohrlöcher werden verrohrt, um die Stabilität des Bohrlochs für die Einlagerung, Versiegelung und - falls Rückholbarkeit der Abfälle gefordert ist - eine etwaige Auslagerung zu gewährleisten. Bei einem rund 5.000 m tiefen Bohrloch sollen die Abfälle in die unteren etwa 2.000 Meter eingebracht werden. Zwischen Verrohrung und umgebendem Gestein, zwischen eingelagerten Gebinden und Verrohrung sowie zwischen den Abfallgebinden wird geeignetes Versatz- bzw. Dichtungsmaterial eingebracht (z. B. Spezialzement). Über dem obersten Abfallgebinde wird ein rund 1.000 Meter mächtiger Verschluss aus verschiedenen Dichtungsmaterialien (von oben nach unten beispielsweise: Asphalt, Bentonit, sich ausdehnender Spezialbeton) eingebaut.

Erwartete Vorteile

- Auf Grund der mit der Tiefe abnehmenden Häufigkeit, Öffnungsweite und Vernetzung von Trennflächen sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit in der Einlagerungstiefe,
- geringer Wassergehalt des Wirtsgesteins und stagnierende Grundwasserverhältnisse, mindestens sehr geringes Ausmaß und sehr geringe Geschwindigkeit des Radionuklidtransportes (Diffusion statt Konvektion),
- reduzierende hydrochemische Bedingungen,
- keine Einbeziehung des Grundwassers in den (niederschlagsgesteuerten) meteorischen Wasserkreislauf,
- großer Abstand zwischen Abfall und Biosphäre, auch daher sehr lange Transportzeiten aus der Lagertiefe in die Biosphäre,
- wahrscheinlich geringere Anforderungen hinsichtlich des Wirtsgesteinstyps, daher größere Flexibilität bei der Standortwahl (allerdings steht die Endlagerung im kristallinen Grundgebirge im Vordergrund der Diskussion).

Nachteile

- Sehr wenig Erfahrung mit Bohrungen mit großen Durchmessern in der geforderten Tiefe,
- zuverlässige umfassende Erkundung der einschlussrelevanten hydraulischen, hydrochemischen, geomechanischen, thermischen Verhältnisse in der Tiefe des Einlagerungsbereiches äußerst schwierig,
- lokale Grundwasserkontamination bei Versagen von Behältern und Dichtungen möglich, aber schwierig behebbar,
- nur relativ kleine Gebinde mit zylindrischer Form einlagerbar, daher im Vergleich zur Endlagerung in Bergwerken möglicherweise relativ großer Flächenbedarf,
- wegen der großen Tiefe möglicherweise störfallanfällige Einlagerungsprozedur,
- Einschränkungen hinsichtlich Rückholung von Abfällen, die z. B. in den USA gefordert wird,
- schwieriger Nachweis der dauerhaften Funktion von Verfüll- und Abdichtungsmaterial,
- aufgrund der großen Zahl kleiner Abfallgebände hoher Ressourcenverbrauch für Behälter,
- wegen hohen Drucks und hoher Umgebungstemperatur sowie wegen Wärmeentwicklung des Abfalls und wegen wahrscheinlich aggressiver hydrochemischer Bedingungen fragliche Standzeit von Abfallmatrix und Behälter.

sEO - Endlagerung unter dem Meeresboden in Sedimenten der Tiefsee

Entwicklung

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Sedimenten bzw. Sedimentgesteinen der Tiefsee ist erstmals Ende der 1960er Jahre / in den frühen 1970er Jahren ausführlich beschrieben worden. Zwischen 1974 und 1988 wurde dazu insbesondere in den USA relativ intensiv geforscht. Diese Arbeiten waren Teil eines umfangreichen internationalen Forschungsprogramms zu Alternativen der Endlagerung in der kontinentalen Kruste, das von der OECD-NEA koordiniert worden ist. An diesen Arbeiten

waren (u.a. im Rahmen des Projektes PAGIS - Performance Assessment of Geological Isolation Systems) auch die Europäische Kommission und einige europäische Mitgliedsländer der OECD-NEA beteiligt (MOBBS et al. 1988, RECHARD et al. 2011).

Insbesondere in den USA ist diese Art der Endlagerung unter dem Meeresboden seitdem immer wieder diskutiert worden (z. B. HOLLISTER et al. 1981, KLETT 1997). Die Diskussion hat sich in den letzten Jahren sogar verstärkt, obwohl die Endlagerung unter dem Meeresboden im ergänzenden Protokoll zur London Dumping Convention (1972) von 1996 grundsätzlich dem Verklappen und Verkippen radioaktiver Abfälle im Meer gleich gestellt und damit verboten worden ist. Ein Grund ist offenbar der Wunsch, Auseinandersetzungen über potenzielle Standorte auf dem Territorium der USA zu vermeiden. In Großbritannien ist die Endlagerung unter dem Meeresboden zuletzt im Zusammenhang mit der Neuausrichtung des Entsorgungskonzeptes bewertet worden (CORWM 2005, NIREX 2005b).

In jüngerer Zeit wurde auch von einem japanischen Autor (YOSHIKAWA 2012) die Wiederbelebung dieser Art der Endlagerung radioaktiver Abfälle ins Gespräch gebracht und auf mögliche Synergismen mit der Entwicklung von Techniken zum marinen Bergbau auf Seltene Erden verwiesen. Hintergründe dieser Überlegungen sind die geowissenschaftlichen Probleme Japans (Erdbeben, Vulkanismus) mit der Identifizierung und Ausweisung geeigneter Standorte für die Endlagerung hochaktiver Abfälle und das sich als Folge der Fukushima-Katastrophe verändernde Spektrum der hochradioaktiven Abfälle bei dringlicher werdender Entsorgung.

Technik

Für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in Sedimenten in tektonisch ruhigen Bereichen der Tiefsee sind zwei unterschiedliche Einlagerungstechniken vorgeschlagen worden:

- Einbringung der Abfälle in zylindrischen Behältern in Bohrungen von bis zu einigen hundert Metern Tiefe in mächtige (partiell verfestigte oder verfestigte) Sedimentserien auf der ozeanischen Kruste (oder in basaltische Gesteine der ozeanischen Kruste selbst),
- "Versenkung" von torpedoartigen Behältern ("penetrators") durch freien Fall in mächtigen, nicht bzw. wenig verfestigten tonigen Tiefseeschlämmen.

Die Mächtigkeiten der ins Auge gefassten sedimentären Wirtsgesteinstypen können mehrere hundert Meter betragen. Sowohl im Pazifik als auch im Atlantik sind ausgedehnte, tektonisch ruhige Gebiete identifiziert worden, die - grundsätzlich oder ausweislich vorläufiger Sicherheitsbetrachtungen (z. B. MOBBS et al. 1988, KLETT 1997) - für die Anlage solcher Endlager in Frage kommen könnten.

Die für Bohrlöcher bestimmten Behälter werden zu einem Spezialschiff in der Endlagerzone transportiert, das die Erstellung der bis zu einigen hundert Meter tiefen Bohrlöcher und die Einlagerung der Behälter im Sediment durch eine Verrohrung zwischen Schiff und Einlagerungstiefe übernimmt. Die Bohrlöcher werden nach Einlagerung abgedichtet. Die torpedoartigen Behälter werden mit einem Spezialschiff in die Endlagerzone transportiert und dort durch freien Fall im lockeren Schlammsediment versenkt. Angestrebt wird eine Mindestdiefe im Sediment von 20 m, ab der eine konvektive Anbindung des Porenwassers im Sediment bzw. darin enthaltener Stoffe an die freie Wassersäule darüber allenfalls in geringem Ausmaß erwartet wird.

Erwartete Vorteile

- Rasches Umschließen der Behälter durch das schlammige Sediment,
- sehr langsame Migration von etwa aus Behältern freigesetzten Radionukliden im Sediment (Diffusion ist dominierender Transportprozess),
- Sorption von Radionukliden im Sediment,
- im Wasserkörper über der Sedimentserie konzentrationsmindernde und den Transport verzögernde Konvektion mit Dispersion,
- starke Verdünnung etwa freigesetzter Radionuklide im Wasserkörper über den Tiefseesedimenten,
- Sorption (und Desorption) von Radionukliden an Schwebpartikeln in der Wassersäule, die letztlich zu Boden sinken.

Nachteile

- Nachweis der dauerhaften Ungestörtheit der Einlagerungszone gegenüber natürlichen und menschlich induzierten Einflüssen kaum zu führen,

- sicherheitsgerichtete Detailuntersuchung und verlässliche sicherheitliche Beurteilung des Einlagerungsbereiches kaum möglich,
- Kontrolle über Einlagerungsprozedur und Einlagerungsort (vor allem bei "Penetrators") schwierig bzw. nicht zuverlässig möglich, Einlagerung störanfällig,
- Rückholung daher und wegen der großen Wassertiefe schwierig bzw. störanfällig,
- **verboten** gemäß London Dumping Convention (1972) **und erschwert** durch weitere internationale Vereinbarungen; erforderliche internationale Vereinbarungen über Entwicklung, Betrieb und Überwachung eines Lagers wohl kaum zu erreichen.⁴⁾

sEO - Endlagerung unter dem Meeresboden in Subduktionszonen (Tiefseeegräben)

Entwicklung

Wie die Endlagerung in Sedimenten der Tiefsee (s. sEO-2) ist die Endlagerung in Subduktionszonen in den frühen 1970er Jahren zwar in der Diskussion gewesen, in die erwähnten anschließenden Forschungsarbeiten bis in die 1980er Jahre hinein im Gegensatz dazu aber nicht oder nicht intensiv einbezogen worden. Ausschlaggebend dafür waren und sind Zweifel an der zuverlässigen Umsetzbarkeit der Option (CORWM 2004, NIREX 2005a, s. auch Nachteile).

Eine gewisse Wiederbelebung hat die Option durch die Arbeit von engagierten Laien erfahren, die im Rahmen der Diskussion über den inzwischen aufgegebenen US-amerikanischen Lagerstandort Yucca Mountain ein Konzept dafür vorgelegt haben (BAIRD 2005, Permanent RadWaste Solutions [ohne Datum]).

Technik

Bei den Diskussionen über die Endlagerung in Subduktionszonen in den frühen 1970er Jahren stand das Ziel im Vordergrund, die Abfälle durch den plattentektonischen Subduktionsprozess ozeanischer Kruste unter kontinentale Kruste in den oberen Erdmantel transportieren zu lassen. Es wurde erwartet, dass die Abfälle dort

⁴⁾ In Großbritannien wurde von CORWM (2005) zur Umgehung des internationalen Bans der Endlagerung radioaktiver Abfälle in ozeanischen Sedimenten eine untermeerische Anlage mit Zugangstunnel von Land aus diskutiert (zitiert nach NIREX 2005b).

aufgeschmolzen und verdünnt würden. Wichtige Gründe für die Nichtberücksichtigung in Forschungsprogrammen waren mangelndes Verständnis und mangelnde Detailkenntnisse bezüglich der Transportprozesse vom Ort der Einlagerung in Sedimente des Tiefseegraben vor einer Subduktionszone durch die Überschiebungszone zwischen subduzierter ozeanischer Krusten und überschiebender kontinentaler Kruste bis in den Erdmantel. Hinzu kamen Zweifel, ob die Abfallbehälter in der tektonisch und vulkanisch aktiven Zone der Einlagerung lange genug intakt bleiben würden, um die unkontrollierte Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden noch vor Erreichen der eigentlichen Subduktionsfläche zu verhindern.

Nach den Vorstellungen von Permanent RadWaste Solutions (ohne Datum) sollen durch angetriebene spezielle Transportbehälter hoher mechanischer Stabilität die darin eingeschlossenen Abfälle aus dem Tiefseegraben, in dessen Sedimente sie eingebracht werden sollen, in die unterlagernden Gesteine der Subduktionszone transportiert werden. In der Zeit dieses Transports soll die Radioaktivität der Abfälle auf Grund des radioaktiven Zerfalls bereits auf ein ungefährliches Niveau absinken. Durch den Subduktionsprozess sollen die Abfälle dann in den Mantel transportiert werden, wo die Behälter aufgeschmolzen, die Abfallinhaltsstoffe dadurch freigesetzt und in ihrer Umgebung verteilt werden. Wegen ihres hohen spezifischen Gewichts sollen die verbliebenen langlebigen Radionuklide bis auf den inneren Erdkern absinken und dort auf Dauer von der Biosphäre ferngehalten werden. Belege für die Realitätsnähe dieser Angaben und die daraus abgeleiteten nachfolgenden Vorteile liegen nicht vor (s. Nachteile).

Erwartete Vorteile (insbesondere nach Permanent RadWaste Solutions o.D.)

- Dauerhafte Entfernung der langlebigen Radionuklide von der Erdoberfläche und damit aus der Biosphäre,
- zu keiner Zeit irgendeine Kontamination,
- Abfallbehälter nach Erreichen der Subduktionszone weder aufspürbar noch rückholbar, daher Minimierung des Risikos einer Kontamination der Biosphäre durch terroristische Angriffe,
- nach Einlagerung der Behälter in Tiefseesedimente keine Überwachung notwendig, keine weiteren Kosten.

Nachteile

- Mangelndes Verständnis der subduktionsinduzierten bzw. subduktionsspezifischen Prozesse zwischen dem Ort der Einlagerung (Sedimente des Tiefseegrabens vor einer Subduktionszone) und dem Erdmantel, Transport und endgültiger Verbleib der Abfälle daher beim derzeitigen Wissensstand nicht zuverlässig beurteilbar,
- erforderliche Detailinformationen bezüglich der für die Beschreibung, Bewertung und Umsetzung der Option wichtigen Sachverhalte nicht umfassend erhebbar,
- Zweifel an der Tauglichkeit der Abfallbehälter, um in der tektonisch und vulkanisch aktiven Zone der Einlagerung intakt zu bleiben und die unkontrollierbare Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden noch vor Erreichen der eigentlichen Subduktionsfläche bzw. dem Ort der Aufschmelzung zu verhindern,
- derzeit insgesamt unüberwindliche wissenschaftlich-technische Hindernisse gegen die kontrollierte sichere Umsetzung der Option,
- **verboten** gemäß London Dumping Convention (1972), erforderliche internationale Vereinbarungen über Entwicklung, Betrieb und Überwachung eines Lagers wohl kaum zu erreichen (ob die Tiefseesedimente lediglich als "Transitmedium" angesehen werden dürfen und daher laut Permanent RadWaste Solutions, o. D., keine Verletzung der London Dumping Convention besteht, sei dahingestellt).

sEO - Endlagerung in Inlandeismassen

Entwicklung

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in antarktischem Inlandeis ist seit den späten 1950er und frühen 1960er Jahren des vorigen Jahrhunderts bis in die 1970er Jahre hinein immer wieder vorgeschlagen worden (nicht zuletzt durch die deutschen Polarforscher B. PHILBERTH [z. B. 1956 u. 1961] und K. PHILBERTH [z. B. 1976, 1977] auf Grund ethischer Überlegungen). In den 1970er Jahren wurde die Option mit Blick auf die antarktischen und (nun ergänzend z. T. auch) die grönländischen Eismassen näher betrachtet (KUBO & ROSE 1973, ERDA 1976). In den USA sind Studien zu dieser Option bis zu einer generischen Prüfung der mit der Umsetzung in der Antarktis verbundenen Umweltauswirkungen vorangetrieben worden (DOE 1980).

Von Beginn der Diskussion an standen den postulierten Vorteilen dieser Entsorgungsoption (s. u.) schwerwiegende Zweifel an der sicheren Umsetzbarkeit unter den harten Klimabedingungen der Antarktis und Grönlands sowie an der dauerhaften Isolation der Abfälle von der Biosphäre entgegen. Nicht zuletzt aus diesen Gründen wurde die Option niemals stringent verfolgt. Heute ist die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Inlandeis durch den Antarktisvertrag (1959) für die Antarktis und durch ein Verbot Dänemarks für Grönland ausgeschlossen.

Technik

Nach den Vorstellungen zur Endlagerung in Inlandeis sollten die Abfallbehälter in Bohrlöcher von 50 bis 100 m Tiefe in das Eis eingebracht werden. Die Wärmeentwicklung der Abfälle sollte zum Schmelzen des Eises führen, wodurch die Behälter in einigen Jahren bis Jahrzehnten bis auf die Oberfläche der Gesteine unter dem Eis absinken würden. Es konnte und kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die Behälter dort mit letztlich in das Meer strömendem Schmelzwasser in Kontakt geraten und so etwa freigesetzte Radionuklide in die Biosphäre gelangen könnten. Außerdem wäre nicht auszuschließen, dass die Temperaturerhöhung an der Eisbasis zu Erhöhung der Eisbewegung und daraus resultierenden nachteiligen Umweltfolgen führt. Daher wurde vorgeschlagen, dafür zu sorgen, dass die Abfälle in den wahrscheinlich durchgängig und dauerhaft gefrorenen oberen ca. tausend Metern des Eisschildes verbleiben.

Dazu sollten die Behälter mit Kabeln verankert werden, so dass sie nicht auf Grund der Wärme-entwicklung der Abfälle tiefer wandern, sondern möglichst lange in der genannten günstigen Tiefe verbleiben. Bei dieser Lagervariante wäre das Tiefersinken der verankerten Abfälle im Eis vor allem von internen Schmelzvorgängen, der Eisdynamik und der Eisneubildung abhängig. Optimistische Schätzungen gingen für das Absinken auf den Gesteinsuntergrund von einer Zeitspanne von 20.000 bis 30.000 Jahren aus. Andererseits wurde davon ausgegangen, dass das antarktische Inlandeis möglicherweise nur 10.000 Jahre überdauern würde.

Eine dritte vorgeschlagene Variante sah die Lagerung verankerter Behälter an der Eisoberfläche vor, und zwar in kammerartigen Einrichtungen auf Hubpfählen. Es wurde erwartet, dass die Wärmeabfuhr von den Abfällen auf dem Luftweg das Einsinken der Behälter für einige Jahrhunderte verhindert. Auch bei dieser Variante wäre das Tiefersinken der Abfälle im Eiskörper durch interne Schmelzvorgänge, Eisdynamik und Eisneubildung unausweichlich. Durch Ausfahren der Pfähle könnte aber das Versinken im Eis für gewisse Zeit verhindert werden.

Für die Einlagerung der verankerten Behälter ins Eis und die Oberflächenlagerung wurde Rück-holbarkeit der Abfälle für etwa 400 Jahre angenommen (ERDA 1976).

Erwartete Vorteile

- Geographische Isolation der hochradioaktiven Abfälle von der "bewohnten" Biosphäre,
- Verhinderung, mindestens Erschwerung beabsichtigten Eindringens in das Lager und des Zugangs zu Abfällen mit bombentauglichen Inhaltsstoffen,
- Isolation und Einschluss der Abfälle in Eis (Abwesenheit von Schmelzwasser vorausgesetzt),
- niedrige Umgebungstemperatur und hohes Wärmeableitungsvermögen,
- nach der Einlagerung Schutz vor Schäden durch Sturm, Sabotage und andere Risiken,
- "Selbst-Einlagerung" durch Absinken der Wärme produzierenden Abfälle im Eis.

Nachteile

- Ungünstige Transportbedingungen zum Einlagerungsort (Eismeer, Inlandeismasse), hohe Transportkosten,
- zeitlich auf wenige Monate im Jahr beschränkter Zugang zu Lagern auf bzw. in Inlandeismassen wegen der sehr ungünstigen Umweltbedingungen,
- Probleme für den sicheren Einlagerungsbetrieb auf Grund der ungünstigen Umweltbedingungen und der Unvorhersehbarkeit der Bedingungen auf dem und im Inlandeis,
- schwierige Bedingungen für die Kontrolle des Einlagerungsbetriebs, verbunden mit hohen Kosten,
- mangelnde Detailkenntnisse zu Eisdynamik und Auswirkungen von Klimaänderungen,
- hinsichtlich Langzeitsicherheit des Lagers kritisches Verhältnis zwischen notwendigem Isolations- und Prognosezeitraum und den Ungewissheiten über sicherheitsabträgliche künftige Entwicklung der Inlandeismassen in wesentlich kürzeren Zeiträumen (dies gilt nicht nur unter den Bedingungen der globalen Temperaturerhöhung der Erdatmosphäre und der Meere),
- Gefahr der Behälterzerstörung und Radionuklidfreisetzung an der Basis des sich bewegenden Eises,
- Raumlage der Behälter im Eis auf Dauer kaum kontrollierbar, Rückholung eingelagerter Abfälle daher äußerst schwierig, wenn nicht unmöglich,
- Entsorgung radioaktiven Abfalls in der Antarktis (gemäß Antarktisvertrag 1959) und in Grönland (durch Dänemark) verboten.

sEO - Entsorgung im Weltraum

Entwicklung

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle außerhalb der Erde ist (vor allem in den USA) in den 1970er und 1980er Jahren des vorigen Jahrhunderts in Konzeptstudien untersucht worden (ERDA 1976). Vorausgesetzt der Transport der Abfälle ins All läuft so zuverlässig ab wie erhofft, wurde (und wird) darin eine potenziell sicherere Lösung als in der Entsorgung auf der Erde gesehen. Von Anfang an standen der Verfolgung der Option aber ihre offenkundig erheblichen raumfahrtspezifischen Risiken entgegen, die durch die Space-Shuttle-Katastrophen von 1986 und 2003 in dramatischer Weise bestätigt worden sind. Hinzu kommen die hohen Kosten, die mit dem Transport großer Massen radioaktiver Abfälle ins All verbunden wären, und zwar selbst dann, wenn dieser Entsorgungsweg allein auf zuvor abgetrennte, besonders langlebige oder sonst wie kritische Radionuklide beschränkt würde.

Aus diesen und weiteren Gründen gibt es seit geraumer Zeit keine breite fachliche Diskussion oder gar ernsthafte Entwicklung bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltraum. Bis heute bestätigt sich damit offenbar die zusammenfassende Einschätzung der amerikanischen Akademie der Wissenschaften im Jahr 2001, wonach die Option wegen der damit verbundenen wissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Herausforderungen gegenwärtig nicht umsetzbar sei (NAS 2001). Die Akademie erwartete damals zudem nicht, dass die Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltall jemals eine praktikable und sichere Technologie sein würde. Unabhängig von dieser Einschätzung stehen der Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltraum die Vereinbarungen des Weltraumvertrags von 1967 entgegen.

Als Konsequenz aus solchen bis heute bestehenden Bedenken wurde und wird die Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltraum allenfalls langfristig als Ergänzung zur Entsorgung auf der Erde durch eine Kombination von Maßnahmen wie P & T und Endlagerung angesehen, bei der nur langlebige Radionuklide in den Weltraum geschickt würden. Dies gilt auch dann, wenn gegen das unakzeptierbare Ausmaß der Folgen eines katastrophalen Systemversagens, bevor die Abfälle ihr Bestimmungsbereich erreicht haben, Abfallformen entwickelt und eingesetzt würden, die die Verteilung von Radionukliden verhindern oder deutlich reduzieren. Damit sich an dieser Einschätzung Grundlegendes ändert, sind signifikante Fortschritte bei der Abtren-

nung langlebiger Radionuklide aus den Abfällen und bei Transporttechnik und -kosten erforderlich (WHIPPLE 2010).

Technik

Bei der Diskussion der Option Entsorgung im Weltall standen zunächst die ortsbezogenen Konzeptvarianten Erdumlaufbahnen, Sonnenumlaufbahnen, Verlassen des Sonnensystems und Einschlag in die Sonne nebst Untervarianten im Vordergrund. In den 1980er Jahren sind vorübergehend auch Konzepte mit Landung auf Venus, Jupiter und Asteroiden betrachtet worden, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. In all diesen Fällen sollte der Abfalltransport in den Weltraum je nach vorgesehenem Entsorgungsort mit Raketen bzw. Raketen und zusätzlichen Transportvehikeln durchgeführt werden.

Die erstgenannten Varianten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Ortes der Entsorgung im Weltraum und damit auch der zu seiner Erreichung erforderlichen Geschwindigkeit der Transportraketen und des dafür erforderlichen technischen und finanziellen Aufwands. Im Hinblick auf Umsetzbarkeit, Zuverlässigkeit und Kontrollierbarkeit wurde für diese Varianten folgende Reihenfolge bestimmt: Sonnenumlaufbahn (günstig) - Erd-Umlaufbahn (mit sanfter Landung auf Mond-Oberfläche) - Verlassen des Sonnensystems - hohe Erd-Umlaufbahn - Sonneneinschlag (weniger günstig). Bei diesen und vergleichbaren Optionen ist zu berücksichtigen, dass Abfälle auf Erdumlaufbahnen von der Erde wieder eingefangen werden können. Auf der Mondoberfläche sanft abgelegte Abfälle könnten später zurückgeholt oder zu einem endgültigen Ziel geschafft werden. Umlaufbahnen im inneren Sonnensystem können sich innerhalb von Zeiträumen verändern, die kürzer sind als die Zeitspanne, für die die Abfälle eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Wenn Zweifel an der Stabilität der gewählten Umlaufbahn und damit an der Zuverlässigkeit, Endgültigkeit und Sicherheit dieser Entsorgung bestehen, sollten die Abfälle nicht in einer solchen Umlaufbahn bleiben. Ist die gewählte Umlaufbahn dagegen nachweislich auf Dauer stabil, ist das resultierende Langzeit-Risiko signifikant geringer als bei jeder Entsorgungsoption auf der Erde. Beim Transport der Abfälle zur Sonne würden die Abfälle nach dem Einschlag zuverlässig "verbrannt" und für immer zerstört, der Transport dorthin wäre jedoch äußerst energieaufwendig und verbietet sich daher schon aus Kostengründen.

Erwartete Vorteile

- Vorausgesetzt der Transport der Abfälle ins All läuft so zuverlässig ab wie erhofft, sicherere Entsorgungslösung als Entsorgung auf der Erde (vollständige dauerhafte Entfernung der Abfälle von der Erde und damit kein Risiko für die Beeinträchtigung von Mensch und Umwelt),
- eventuell Möglichkeit der Mehrfachnutzung von Transporteinheiten (Beispiel: Space-Shuttle),
- bei Deponierung der Abfälle auf Mond, Planeten der Sonne oder Asteroiden Rückholung von Abfällen theoretisch möglich.

Nachteile

Der offenkundigste Nachteil der Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltraum besteht im Risiko eines Raketenversagens in der Erdatmosphäre während des Startphase, das zur unkontrollierten Freisetzung der Radionuklide führen würde. Gleiches gilt, wenn aus technischen Gründen die geplante Fluchtgeschwindigkeit aus dem Schwerefeld der Erde nicht erreicht wird und die Abfälle über kurz oder lang zur Erde zurückstürzen würden. Hinzu kommen:

- Kaum Eingriffsmöglichkeit, mindestens schwierige Bergung von Abfällen bei havarierten bzw. gänzlich fehlgeschlagenen Transporten,
- Langzeitrisiko für die Rückkehr von Teilen der Abfälle zur Erde, falls die zum Verlassen der Erdumlaufbahn erforderliche Geschwindigkeit nicht bzw. nur eine instabile Sonnenumlaufbahn erreicht wird,
- Kosten,
- Rückholung von ordnungsgemäß auf Planeten oder Asteroiden im Sonnensystem entsorgtem Abfall sehr aufwendig bis unmöglich,
- Monitoring des Transports und des entsorgten Abfalls eingeschränkt.

sEO - Datenblattbezogene Quellen

- ÅHÄLL, K. I. (2006): Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes. An evaluation based on recent research of bedrock conditions at great depths - MKG Report 2, Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning, Stockholm,
http://www.mkg.se/sites/default/files/old/pdf/MKG_Report_2_Very_Deep_Boreholes0612.pdf
- ALDOMARE, P., BERNARDI, R., GABRIEL, D., NAINAN, D., PARKER, W. & PFUNDSTEIN, R. (1979): Alternative Disposal Concepts for High-Level and Transuranic Radioactive Waste Disposal - Mitre Technical Report MTR-7718, im Auftrag der US EPA,
[http://nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyNET.exe/9100OJXV.PDF?ZyActionP=PDF&Client=EPA&Index=1976%20Thru%201980&File=D%3A\ZYFILES\INDEX%20DATA\76THRU80\TXT\00000022\9100OJXV.txt&Query=Alternative%20Disposal%20Concepts%20High-Level%20Transuranic%20Radioactive%20Waste%20Disposal&SearchMethod=2&FuzzyDegree=0&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&QField=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&Docs=.](http://nepis.epa.gov/EPA/html/DLwait.htm?url=/Exe/ZyNET.exe/9100OJXV.PDF?ZyActionP=PDF&Client=EPA&Index=1976%20Thru%201980&File=D%3A\ZYFILES\INDEX%20DATA\76THRU80\TXT\00000022\9100OJXV.txt&Query=Alternative%20Disposal%20Concepts%20High-Level%20Transuranic%20Radioactive%20Waste%20Disposal&SearchMethod=2&FuzzyDegree=0&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&QField=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&Docs=)
- Antarktisvertrag (1959): 1961 in Kraft getreten, zahlreiche Zusatzvereinbarungen (u.a. Protokoll über den Umweltschutz für die Antarktis von 1991).
- ARNOLD, W. B., BRADY, P. V., BAUER, S. J., HERRICK, C., PYE, S. & FINGER, J. (2011): Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste - Sandia National Laboratories, Report SAND2011-6749, <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/116749.pdf>
- ARNOLD, W. B., VAUGHN, P., MACKINNON, R., TILLMAN, J., NIELSON, D., BRADY, P., HALSEY, W. & ALTMANS, S. (2012): Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal - Sandia National Laboratories, Report SAND2012-8527P,-
<http://energy.gov/sites/prod/files/2013/06/f1/FY12%20Research,%20Development,%20and%20Demonstration%20Roadmap%20for%20Deep%20Borehole%20Disposal.pdf>

- BAIRD, J. (2005): Disposal of high-level material in subduction zones - a rebuttal - http://www.nwmo.ca/uploads_managed/MediaFiles/1287_baird-submissiononthetopic_cho.pdf
- BIELECKI, R. & MÖLLER, D. (2011/2012): Neue Wege in der Tiefe für die unterirdische Abfallentsorgung und Energiegewinnung - Eine Vorabstudie zu einem F+E-Projekt zur Herstellung von Teufen >1.000 m im Festgestein. - Wissenschaftsstiftung Deutsch-Tschechisches Institut (WSDTI) in Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich Technische Informationssysteme der MIN Fakultät der Universität Hamburg, im Eigenverlag der GbR Veröffentlichungen Unterirdisches Bauen, Hamburg
- CHAPMAN, N. (2013): Deep Borehole Disposal of Spent Fuel and Other Radioactive Wastes.- NAPSNet Special Report, July 25, 2013, <http://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/deep-borehole-disposal-of-spent-fuel-and-other-radioactive-wastes/>
- CORWM - Committee on Radioactive Waste Management (2004): Disposal in Subduction Zones - CoRWM Document No. 627, erarbeitet durch The National Nuclear Corporation Ltd. (NNC), Bearbeiter M. Buckley, S. Cripps, S. Usher, zitiert aus NIREX (2005a)
- CORWM - Committee on Radioactive Waste Management (2005): Sub Seabed Disposal of Radioactive Waste - Legal Considerations - Bearbeiter: R. Macrory, R. Purdy, Contract Reference Number TS071/REV 2, zitiert aus NIREX (2005b)
- CORWM - Committee on Radioactive Waste Management (2006): Managing our Radioactive Waste Safely. CoRWM's recommendations to Government - CoRWM Doc 700, July 2006
- DOE - Department of Energy (1980): Final Environmental Impact Statement - Management of Commercially Generated Radioactive Waste, Volume 1, DOE/EIS-0046F-V.1.- <http://energy.gov/sites/prod/files/EIS-0046-FEIS-1980.pdf>
- DRISCOLL, M. J., LESTER, R. K., JENSEN, K. G., ARNOLD, B. W., SWIFT, P. N. & BRADY, P. V. (2012): Technology and Policy Aspects of Deep Borehole Nuclear Waste Disposal - Nuclear Technology, Volume 180, Number 1, 111-121,- http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a_14523

- DUTTON, M., HILLIS, K., STANSBY, J., KENNETT, L., SEPPÄLÄ, T., MACIAS, R. M., RÖHLIG, K.-J., HAVERKATE, B., O'SULLIVAN, P. J., MRŠKOVA, A., PRITRSKY, J., DIAZ-TERAN, J. A., VALDIVIESO RAMOS, J. M., MOREN, L., HUGI, M., ZUIDEMA, P., KING, S. & BREEN, B. (2004): The Comparison of Alternative Waste Management Strategies for Long-Lived Radioactive Wastes (COMPAS Project) - EUR 21021 EN, CEC, Luxembourg 2004, ISBN 92 894 4986 1, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp5-euratom/docs/compas_projrep_en.pdf
- ERDA - Energy Research and Development Administration (1976): Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel Cycle - ERDA-76-43, Volume 4: Alternatives For Waste Isolation And Disposal, <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/7192103>
- GIBB, F. G. F. (2010): Deep borehole disposal (DBD) methods - Nuclear Engineering International, March 2010, <http://www.neimagazine.com/features/featuredeep-borehole-disposal-dbd-methods/>
- HARRISON, T. (2000): Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability - SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB, <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-00-35.pdf>
- HOLLISTER, C. D., ANDERSON, D. R. & HEALTH, G. R. (1981): Subseabed Disposal of Nuclear Wastes - Science, Vol. 213, no. 4514, p. 1321-1326
- IAEA – Japan Atomic Energy Agency (2010): Information Basis for Developing Comprehensive Waste Management System - US-Japan Joint Nuclear Energy Action Plan Waste Management Working Group Phase I Report - (Joint Research).- JAEA-Research 2010-015 - <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2010/05/67013.pdf>
- KLETT, R. D. (1997): Performance assessment overview for subseabed disposal of high level radioactive waste - Sandia National Laboratories, Report SAND93-2723, <http://www.osti.gov/scitech/biblio/491424>
- KUBO, A. & ROSE, D. (1973): Disposal of Nuclear Wastes - Science, Vol. 182, No. 4118, p. 1205-1211

London Dumping Convention (1972): Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972 - In Kraft getreten 1975, ergänzendes Protokoll 1996 (Protocol to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter)

MINHANS, A., NELES, J. & SCHMIDT, G. (2008): Anhang Entsorgungsstrategien. Darstellung und Bewertung von Alternativen zur Endlagerung. - Anhang zu Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, GRS – 247

MIT - Massachusetts Institute of Technology (2003): The Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Study - <http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-full.pdf>

MOBBS, S. F., CHARLES, D., DELOW, C. E. & MC COLLN, P. (1988): PAGIS - Performance assessment of geological isolation systems for radioactive waste disposal into the sub-seabed - Hrsg. Europäische Kommission, EUR 11779 EN

NAS - National Academy of Sciences-National Research Council (2001): Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges - National Academy Press, Washington, DC, http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10119

NIREX - United Kingdom Nirex Limited (2002): Description of Long-term Management Options for Radioactive Waste Investigated Internationally - Nirex Report N/050, May 2002

NIREX - United Kingdom Nirex Limited (2004): A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste - Nirex Report no. N/108, [http://www.mkg.se/uploads/Nirex_Report_N_108 -
_A_Review_of_the_Deep_Borehole_Disposal_Concept_for_Radioactive_Waste_June_2004.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Nirex_Report_N_108_-_A_Review_of_the_Deep_Borehole_Disposal_Concept_for_Radioactive_Waste_June_2004.pdf)

NIREX - United Kingdom Nirex Limited (2005a): Review of CoRWM Document No. 627, Disposal in subduction zones - Document Number 472942, <http://www.nda.gov.uk/publication/nirex-review-of-corwm-document-no-627-disposal-in-subduction-zone-2005/?download>

- NIREX - United Kingdom Nirex Limited (2005b): Review of CoRWM Document No. 927, Sub seabed disposal of radioactive waste - legal considerations - Document Number: 471717, <http://www.nda.gov.uk/publication/nirex-review-of-corwm-document-no-927-sub-seabed-disposal-of-radioactive-waste-legal-considerations-april-2005/?download>
- OJOVAN, M. I., POLUEKTOV, A.A. & KASCHEEV, V. A. (2011): Self-Disposal Option For Heat-Generating Waste - Proceedings of the ASME 2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 2011, September 25-29, 2011, Reims, France, <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1646135>
- Permanent RadWaste Solutions (ohne Datum): High Level Radioactive Waste Disposal - PowerPoint-Presentation, Permanent RadWaste Solutions (D. Engelhardt, G. Parker, R. Boyd), <http://home.earthlink.net/~dengelhardt/Radwaste.ppt>
- PHILBERTH, B. (1956): Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen - Atomkern-Energie, 1 (11-12), S. 396-400, München
- PHILBERTH, B. (1961): Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde - Schweizerische Z. f. Hydrologie, Vol. 23, No. 1, S. 263-84, abrufbar gegen Entgelt über <http://www.springerlink.com/content/fulltext.pdf?id=doi:10.1007/BF02505629>
- PHILBERTH, K. (1976): Mitteilungen. Atomkernenergie-Risiken und Atommüll-Deponierung im Eis - Polarforschung 46 (2), S. 106-120, <http://hdl.handle.net/10013/epic.29441.d001>
- PHILBERTH, K. (1977): On the disposal of radioactive waste in ice sheets - Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 81, 607-617, http://www.igsoc.org:8080/journal/19/81/igs_journal_vol19_issue081_pg607-617.pdf
- RECHARD, R. P., GOLDSTEIN, B., BRUSH, L. H., BLINK, J. A., SUTTON, M. & PERRY, F. V. (2011): Basis for Identification of Disposal Options for Research and De-

velopment for Spent Nuclear Fuel and High Level Waste - Im Auftrag des U.S. Department of Energy, Used Fuel Disposition Campaign,
http://energy.gov/sites/prod/files/2013/06/f1/FY11%20-%20Basis%20for%20Identification%20of%20Disposal%20Options%20for%20R%26D%20for%20Spent%20Nuclear%20Fuel%20and%20High-Level%20Waste_2.pdf

RINGWOOD, A. E., KESSON, S. E., WARE, N. G, HIBBERSON, W. & MAJOR, A. (1979): Geological immobilisation of nuclear reactor wastes in SYNROC - Nature, 278, S. 219-223

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB (1989): Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: Feasibility Study and Assessment of Economic Potential. Part I: Geological Considerations. Part II: Overall Facility Plan and Cost Analysis - SKB Technical Report 89-39,
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR89-39webb.pdf>

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB (1998): The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth - SKB Technical Report 98-05,
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-98-05.pdf>

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB (2000): Waste disposal alternative: Very Deep Boreholes. Contents and scope of the research, development and demonstration (RD&D) programmes required for a comparison with the KBS-3 method - SKB Report R-00-28 (in Schwedisch),
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-00-28.pdf>

SKB - Svensk Kärnbränslehantering AB (2013): Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock - SKB P-13-12, Bearbeiter: N. Marsic, B. Grundfeldt,
<http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-13-12.pdf>

Weltraumvertrag (1967): Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper - In Kraft getreten 1967 (in Deutschland 1971) auf Basis der Erklärung der Vereinten Nationen von 1963 zu den Rechtsgrundsätzen hinsichtlich der Tätigkeiten im Weltraum.

WHIPPLE, C. (2010): Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste - ENVIRON International Corporation, im Auftrag der Blue-Ribbon-Kommission zu Amerikas Zukunft, 16 S.,
http://brc.gov/sites/default/files/documents/disposal_of_spent_nuclear_fuel_and_high_level_radioactive_waste_rev4.pdf

YOSHIKAWA, H. (2012): A reconsideration on deep sea bed disposal of high level radiological wastes – a post-Fukushima reflection on sustainable nuclear energy in Japan - Nuclear Safety and Simulation, Vol. 3, Number 4, December 2012,
<http://www.ijnsweb.com/?type=subscriber&action=download&file=final&ext=pdf&id=143>

II. Vorgehensweisen

Datenblatt kpV

Darstellung der "konservativ-pragmatischen Vorgehensweise" (kpV)

Dieses Datenblatt bewegt sich mit seinen Argumenten auf einer anderen Ebene als die bisher eingeführten Konzepte und Optionen. Es handelt sich um Überlegungen mit – bezogen auf die Zukunft - spekulativem Charakter. Allerdings gewinnen diese Überlegungen durch die Erfahrungen, die die Autoren in letzten drei Jahrzehnten mit der deutschen Entsorgungspolitik gemacht haben, eine nicht zu verleugnende Plausibilität und sollten daher in einer Diskussion der Entsorgungsoption berücksichtigt werden.

kpV - Vorbemerkung

Im Jahr 2010 sind in Deutschland Anforderungen zur Entsorgung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle veröffentlicht worden (BMU 2010), die Konkretisierungen des bis dahin verfolgten Entsorgungsweges beinhalten, der allein hinsichtlich des übergeordneten Ziels "passiv sichere Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Intention der Rückholung der Abfälle", und zwar in Deutschland, genau festgelegt war. Die aus diesen Konkretisierungen resultierenden möglichen Konsequenzen für das künftige Vorgehen in Deutschland sind im Datenblatt ELo (Entsorgungsoption "Endlagerung ohne Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholbarkeit") dargestellt.

Abgesehen von der Verfolgung des genannten Ziels war das Vorgehen der verantwortlichen Institutionen bis dahin durch im Einzelnen nicht immer nachvollziehbare bzw. interessengeleitet oder opportunistisch erscheinende Schwenks gekennzeichnet. Daraus haben sich erhebliche Verfahrensverzögerungen und Vertrauensverluste der Öffentlichkeit gegenüber den verantwortlichen Institutionen ergeben. Auf Grund der mehr als drei Jahrzehnte zurückreichenden Erfahrungen mit dieser Art der Entsorgungsentwicklung kann trotz der Festlegungen in BMU (2010) nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einem Rückfall in frühere Verhaltensmuster

kommt. Daran ändert die mit StandAG (2013) dokumentierte politische Absicht, bald zu einer tragfähigen Lösung des Entsorgungsproblems zu kommen, ohne erfolgreiche Umsetzungsschritte nichts.

Das vor diesem Hintergrund als möglich erscheinende künftige Vorgehen als Fortsetzung des Vorgehens in der Vergangenheit wird nachfolgend als „konservativ-pragmatische Vorgehensweise“ (kpV) skizziert. Die Ableitung der kpV beruht nicht auf der detaillierten Analyse der Entwicklung in der Vergangenheit und ihrer Ursachen (das wäre ein eigenes Forschungsvorhaben), sondern allein auf der langzeitigen Beobachtung und Interpretation konkreter, allerdings unsystematischer Veränderungen im Entsorgungshandeln in Deutschland und der damit verbundenen Konsequenzen für die jeweils nächste Zukunft. Diese Veränderungen können als opportunistische „Muddling Through“ Strategie klassifiziert werden. Die Veränderungen werden auf im Einzelnen nicht bzw. nicht genau bekannte interessengesteuerte Einflüsse bzw. Kräfteverhältnisse (v.a. politisch, wirtschaftlich) zurückgeführt.

Im Gegensatz zur Entsorgungsoption ELo (Beispiel Deutschland) wird für die konservativ-pragmatische Vorgehensweise unterstellt, dass das beschriebene Muster des Entsorgungshandelns in Deutschland auch in der Zukunft grundsätzlich weiterbestehen kann.

Von den im Rahmen des ENTRIA-Transversalprojektes „Interdisziplinäre Risikoforschung – Modul 1: Entsorgungsoptionen und -systeme“ vorrangig zu berücksichtigenden Entsorgungsoptionen und den weiteren in diesem Arbeitsbericht behandelten Optionen unterscheidet sich die kpV in gravierender Weise: Da diese Optionen in ihrer Zielsetzung und Struktur sowie in ihrem Umsetzungsweg mehr oder weniger detailliert geplant sind und entsprechend umgesetzt werden, können sie klar beschrieben und hinsichtlich wichtiger Aspekte beurteilt werden. Für die konservativ-pragmatische Vorgehensweise kann dagegen unterstellt werden, dass sich das bisherige, durch unsystematische und a priori nicht immer absehbare Veränderungen gekennzeichnete Entsorgungshandeln in Deutschland zukünftig in grundsätzlich ähnlicher Weise fortsetzen wird. Abgesehen vom erklärten übergeordneten Ziel ist die kpV damit einer detaillierten Beschreibung und Beurteilung der weiteren Verfahrensschritte nicht zugänglich.

Mit Blick auf Ziele, wichtige Einzelemente des Entsorgungsweges und seinen bisherigen Verlauf ist die konservativ-pragmatische Vorgehensweise durch zwei zunächst **gegensätzlich erscheinende charakteristische Merkmale** gekennzeichnet:

Das **erste Merkmal** liegt in dem über Jahrzehnte beibehaltenen **übergeordneten Entsorgungsziel** "passiv sichere Endlagerung ohne Absicht der Rückholung von Abfällen" (einschließlich bestimmter Teilziele auf dem Weg dorthin). Darin kommt ein erhebliches, in seiner Struktur **konservatives Beharren** der handelnden Institutionen im Hinblick auf bestimmte Entsorgungsziele zum Ausdruck. Andererseits hat dieses Beharren aber auch zur interessenbedingten Beibehaltung von einmal eingeführten Entsorgungselementen geführt, obwohl dies aus gesellschaftlicher, teilweise auch sicherheitlicher Sicht nicht mehr nachvollziehbar war (z.B. ausschließliche bzw. vorrangige Betrachtung von Salz in Salzstöcken als Wirtsgestein). In der Summe führte dieses Beharrungsvermögen zu einer gesellschaftspolitischen „Versteinerung“ der Entsorgungssituation in Deutschland, als deren Folge sämtliche Zeitpläne für die ursprüngliche Entsorgungsplanung obsolet geworden sind und das Vertrauen der Bevölkerung in die Sicherheit des Entsorgungswegs und die verantwortlichen Institutionen weitgehend verloren gegangen ist.

Beispiele für Beharren auf bestimmten Zielen und Entsorgungsbausteinen:

- Trotz (nicht nur nach heutigen Standards) mangelhafter Standortwahl, intensiver Proteste und auch fachlicher Bedenken wurde jahrzehntelang am einmal festgelegten Endlagerstandort Gorleben festgehalten.
- Das Endlager Morsleben wurde von der Bundesrepublik Deutschland trotz bekannter Sicherheitsmängel bis 1998 betrieben; erst nach einem Gerichtsurteil wurde die Einlagerung gestoppt, und daran anschließend wurde mit der Stilllegung begonnen.
- Die Verfügbarkeit alter Grubengebäude bei den Endlagern Asse (ab 1964/65) und Konrad (ab 1975/1982) sowie eines bereits in der ehemaligen DDR in Betrieb befindlichen Endlagers bei Morsleben (ab 1991) stellte ein wesentliches Entscheidungsmerkmal dar, obwohl die mit der Nutzung ehemaliger Gewinnungsbergwerke zusammenhängenden Probleme grundsätzlich bekannt und teilweise offensichtlich waren.

- An Salzgestein als einzig ernsthaft betrachteten Wirtsgestein wurde über Jahrzehnte festgehalten, obwohl Tonstein eine weitere, auch in Deutschland verfügbare Option darstellt. Die von Deutschland betriebenen F&T-Arbeiten zu Ton und Kristallin haben am grundsätzlichen Festhalten an Salzgestein nichts geändert
- Die Notwendigkeit einer systematischen Endlagerstandortsuche wurde trotz jahrelanger, methodisch und gesellschaftlich gut begründeter Forderungen bis in jüngste Zeit nicht gesehen.

Das **zweite Merkmal** besteht in gravierenden Veränderungen im Ablauf des Entsorgungsweges. Es ist Ausdruck einer **pragmatischen Anpassung** des Vorgehens der zuständigen Institutionen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle an Veränderungen der Rahmenbedingungen bzw. Kräfteverhältnisse durch interessengeleitete gesellschaftliche, politische, ökonomische und technisch-wissenschaftliche Einflüsse. Hierzu gehört auch, dass bis dato für unverzichtbar erklärte Elemente bzw. Teilschritte der Entsorgung fallen gelassen oder aber in stark veränderter Form fortgesetzt worden sind. Bei Bedarf wurden auch neue Elemente aufgegriffen.

Beispiele für solche Veränderungen durch Anpassung:

- Der Verzicht auf das Integrierte Entsorgungszentrum Gorleben (1979),
- Aufgabe des Ein-Endlager-Konzeptes durch die Benennung von Schacht Konrad für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (1982),
- Aufgabe der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf (1989),
- Übernahme und Weiterbetrieb des DDR-Endlagers Morsleben trotz Sicherheitsbedenken (1990),
- rechtliche Gleichwertigkeit von direkter Endlagerung bestrahlter Brennelemente und Wiederaufarbeitung (1994),
- Verbot der Wiederaufarbeitung ab 2005 (2002),
- dezentrale Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen an den Kraftwerksstandorten (2002),
- die Ankündigung einer neuen Standortauswahl für Wärme entwickelnde Abfälle mit Überprüfung bisheriger Ansätze ab 2014,

- das Anstreben einer dezentralen Zwischenlagerung für die noch zu erwartenden Wiederaufarbeitungsabfälle, ohne dass dieser Weg politisch und juristisch abgesichert wurde (2014).

Auf den ersten Blick mögen die beispielhaft genannten und weitere, hier nicht genannte Veränderungen im deutschen Entsorgungsweg als Ausdruck einer methodisch sinnvollen und verfahrenstechnisch vorteilhaften Flexibilität interpretiert werden, wie sie bewusst in anderen nationalen Entsorgungsprogrammen vorgesehen ist, um regelgerecht, geordnet und transparent auf unvorhergesehene Hindernisse im Verfahrensablauf reagieren zu können. Flexibilität in diesem Sinne ist jedoch nicht der Hintergrund der Anpassungen im deutschen Entsorgungsweg, vielmehr sind sie (zumindest überwiegend) eher als opportunistische bzw. interessen geleitete Reaktionen auf verfahrensexterne Veränderungen der gesellschaftlichen, politischen, ökonomischen oder technisch-wissenschaftlichen Randbedingungen zu interpretieren.

Da die Darstellung der konservativ-pragmatischen Vorgehensweise in den nächsten Kapiteln im Wesentlichen auf der Unterstellung beruht, dass **"Beharren" und "Anpassung"** auch in Zukunft das Entsorgungshandeln der verantwortlichen Institutionen bestimmen werden, hat sie weitgehend spekulativen Charakter. Eine in sich geschlossene technisch-wissenschaftliche und strategische Vorstellung über das künftige Vorgehen kann daher nicht entwickelt werden. Deshalb werden im Folgenden nur solche Aspekte behandelt, zu denen in Zusammenhang mit der kpV halbwegs plausible Aussagen möglich sind.

kpV - Wesentliche Merkmale und Ziele

Unabhängig von dem die Vorgehensweise kpV kennzeichnenden Oszillieren zwischen Beharren und Veränderung bestand und besteht das **übergeordnete Ziel** der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland bis 2010 darin, sie in tiefen geologischen Formationen dauerhaft und passiv sicher zu beseitigen, und zwar ohne Intention der Rückholung (s. auch Option ELo). Mit BMU (2010) ist dieses Vorgehen lediglich durch Forderung nach Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle (bzw. Anteilen davon) während der Betriebsphase des Lagers und durch Anforderungen an die Abfallbehälter zur Erleichterung deren Bergung innerhalb eines Zeitraums von 500 Jahren ergänzt worden. Als Interimslösung ist beim derzeitigen Entwicklungs-

stand eine langzeitige Zwischenlagerung der Abfälle in Bauwerken (s. dazu Option LzL) nicht auszuschließen.

Davon ausgehend, dass das bisherige übergeordnete Ziel der kpV weiterhin angestrebt wird, gleichzeitig aber die in der Vergangenheit gezeigte Offenheit gegenüber sich aufdrängenden Veränderungen oder gruppenspezifischen Interessen erhalten bleibt, wird die kpV je nach aktuell wirksamen Anforderungen durch verschiedene „Bausteine“ ergänzt werden, die allerdings im weiteren Zeitverlauf auch wieder aufgegeben werden können. Selbst das übergeordnete Ziel der kpV könnte verändert werden. Auf lange Sicht ist nicht einmal auszuschließen, dass der derzeit grundsätzlich ausgeschlossene Export von Abfällen in andere Staaten verfolgt wird.

In diesem Sinne ist im Rahmen der kpV beispielsweise folgende Handlungskette vorstellbar:

- 1) Zwischenlagerung der Abfälle an den Kraftwerksstandorten,
- 2) Verlängerung der Zwischenlagerung wegen fehlenden Endlagers,
- 3) Um- und Neuverpackung der Abfälle,
- 4) Übergang in eine langzeitige Zwischenlagerung der stark wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (Option LzL; s. auch Datenblatt Abfälle) wegen weiterhin fehlenden Endlagers (bzw. Endlager) oder weitergehende physikalische bzw. chemische Behandlung der Abfälle,
- 5) Endlagerung mit oder ohne Monitoring und mit oder ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit oder Verbringen der Abfälle in eine Anlage im Ausland.

Bis zum Erreichen des übergeordneten Ziels über diese Entsorgungsschritte könnten hundert und mehr Jahre vergehen. In die dargestellte Handlungskette können je nach Interessenslage und Kräfteverhältnissen - konform mit der konservativ-pragmatischen Vorgehensweise - Schleifen im Vorgehen oder weitere Entsorgungsbausteine eingefügt bzw. wieder aufgegeben werden.

Die wesentlichen Merkmale der konservativ-pragmatischen Vorgehensweise lassen sich wie folgt zusammenfassend beschreiben:

- **Einhaltung der Schutzziele und Sicherheitsanforderungen** gemäß Stand von Wissenschaft und Technik für alle Elemente, aus denen der zukünftige Entsorgungsweg aufgebaut sein soll bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt ist.
- **Anpassung des Handelns** an Veränderungen der gesellschaftspolitischen, ökonomischen und wissenschaftlich-technischen Rahmenbedingungen bzw. Kräfteverhältnisse. Dies kann zur Veränderung einzelner Entsorgungsbausteine und letztlich des Vorgehens insgesamt führen. Die Fähigkeit der verantwortlichen Institutionen - speziell im politischen Raum - zur Anpassung kann als Pragmatismus interpretiert werden; im Extremfall kann sie jedoch zur Beliebigkeit des Handelns ohne jegliche zielorientierte strategische Ausrichtung der Entsorgungspolitik und zu weitgehender Intransparenz des Vorgehens führen.
- Das **Beharren** in einzelnen Bereichen der Entsorgung. Es ist allerdings zweifelhaft, ob dieses Beharren auf Dauer zum Erfolg im Sinne des übergeordneten Ziels (auch der kpV) führen kann, denn zumindest teilweise (z.B. Standortauswahl, geplantes Endlager Gorleben, Bevorzugung von Salz) ist es in jüngerer Zeit (post-Fukushima) aufgebrochen worden (z.B. Standortauswahl Endlager).
- Besonders durch (uneinsichtiges) Beharren war das bisherige Vorgehen hinsichtlich der Verfahrensbeteiligung Betroffener und der allgemeinen Öffentlichkeit gekennzeichnet. Es ist seit Langem bekannt, dass die frühzeitige, dauerhafte und wirksame **Einbeziehung zivilgesellschaftlicher Kräfte** in die Entscheidungsprozesse eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg einer jeden Entsorgungsoption ist. Nur dann kann die Anpassung des Vorgehens an veränderte Randbedingungen im Sinne verfahrenskonformer Flexibilität positiv zum Tragen kommen und dem dominierenden Einfluss von (auch sachfremden) Interessengruppen begegnet werden.

kpV - Begründung

Die konservativ-pragmatische Vorgehensweise ist daraus abgeleitet worden, wie während der vergangenen Jahrzehnte im Bereich der Entsorgung in Deutschland gehandelt worden ist und welche Verfahrenskonsequenzen damit verbunden waren.

Mit Ausnahme des übergeordneten Entsorgungsziels sowie der in kpV - Vorbemerkung genannten Beharrensbeispiele und einiger Verfahrensmerkmale (s. kpV – Wesentliche Merkmale) lässt sich ein die Entwicklung begründendes Konzept nicht ableiten. Allenfalls ließen sich im Einzelfall für die genannten Verfahrensänderungen Gründe finden. Davon abgesehen gründet sich das Vorgehen im Rahmen der kpV aber auf das zu einem bestimmten Zeitpunkt als "opportun", "geboten", „alternativlos“ oder „machbar“ Erscheinende. Ohne Entwicklung einer klaren und folgerichtig abzuarbeitenden Strategie der Entsorgung wird sich daran nichts ändern.

kpV - Ungewissheiten und Risiken

Da die einzelnen Elemente, aus der die konservativ-pragmatische Vorgehensweise konkret bestehen könnte, vorab nicht vollständig bekannt sind und auch nicht festgelegt werden können, lassen sich zugehörige Ungewissheiten und Risiken nicht im Einzelnen skizzieren. Da aber einige Schlüsselemente, die zum Erreichen des übergeordneten Zieles der kpV zusätzlich zu den bisherigen Vorstellungen benötigt werden oder sinnvoll sein könnten (z. B. Zwischenlagerung, Transport usw., aber gegebenenfalls auch Langzeitlagerung, P&T), können die Ungewissheiten und Risiken der entsprechenden Optionen (s. dazu Datenblätter ELo, Elm, LzL, DLg, P&T) herangezogen werden.

Ein generelles Risiko der kpV ergibt sich aus der "beliebigen" Anpassung des Vorgehens an durch den Einfluss von Interessengruppen veränderte Rahmenbedingungen. Es ist nicht auszuschließen, dass gruppenspezifische Interessen die Umsetzung wichtiger Bausteine verhindern und stattdessen andere Bausteine oder gar ein Abweichen vom übergeordneten Ziel durchsetzen. Damit könnte auch die Aufweichung sicherheitstechnischer Anforderungen verbunden sein. Die Möglichkeit für solche Änderungen oder tatsächliche Änderungen können außerdem zu wachsendem Misstrauen in der Bevölkerung führen und die Zustimmung zur kpV verringern.

Risiken können aus dem Beharren der verantwortlichen Institutionen auf einzelnen Schritten oder Elementen des eingeschlagenen Entsorgungsweges erwachsen, wenn neue Erkenntnisse keine Berücksichtigung finden. Beispielsweise wurde seit den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechenden systematische Auswahl des Endlagerstandortes gefordert (GRUPPE ÖKOLOGIE/PANGEO 1994, GRUPPE ÖKOLOGIE 1998, AKEND 2002), von den politischen Entscheidungsträgern aber mit Hinweis auf die Untersuchungen

am geplanten Endlagerstandort Gorleben und ein im Einzelnen nicht bekanntes Auswahlverfahren mit dem Ergebnis der Festlegung auf Gorleben kategorisch abgelehnt. Erst 2013 wurde die Forderung mit dem Auswahlgesetz (StandAG 2013) erfüllt. Ein vergleichbares Beharren auf bestimmten Positionen oder umstrittenen Entsorgungsbausteinen könnte also auch in Zukunft zu gesellschaftlichen Konflikten mit den aus der Vergangenheit bekannten Ergebnissen „Versteinerung der Verhältnisse“ und „unnötige Zeitverluste“ führen.

Unabhängig von den genannten Risiken liegt ein weiteres großes Risiko der konservativ-pragmatischen Vorgehensweise im gesellschaftlichen Bereich: Die mögliche Kombination von situationsbedingten, pragmatisch erscheinenden Änderungen einerseits und dem Beharren auf bestimmten Positionen andererseits kann die Transparenz des Vorgehens beeinträchtigen und erhebliches Misstrauen in der Bevölkerung insgesamt, aber auch bei mit der Entsorgung betrauten Personen oder Institutionen entstehen lassen. Dem kann nur durch ein in den Grundzügen vorab abgestimmtes faires Vorgehen mit wirksamer kontinuierlicher und in Entscheidungsprozesse eingebundener Öffentlichkeitsbeteiligung entgegnet werden, das vorrangig auf die Sicherheit des Endlagers (bzw. der zugrunde liegenden Entsorgungsoption) hin ausgerichtet sein muss. Die Diskussion der damit verbundenen sicherheitstechnischen Fragen erfordert einen geordneten gesellschaftlichen und politischen Rahmen. Eine umfassende und institutionell abgesicherte Bürgerbeteiligung würde die genannten Risiken nicht ausschließen, aber deutlich verringern.

kpV - Generelle Vor- und Nachteile

Vorteile

- Möglichkeit der Anpassung des Handelns an neue, sinnvoll erscheinende Entwicklungen bei einzelnen Entsorgungsbausteinen innerhalb des durch das übergeordnete Ziel "passiv sichere Endlagerung der Abfälle" vorgegebenen Rahmens. Auch das Ziel kann u.U. zur Disposition stehen. Solche Anpassungen führen allerdings nur dann zu positiven Ergebnissen, wenn die Gründe dafür nachvollziehbar und überzeugend sind und die Bevölkerung durch wirksame Beteiligung in die Entscheidungen eingebunden ist.
- Auf Änderungen der sicherheitstechnischen Bewertung einzelner Elemente der kpV kann schnell reagiert werden. Bei neu auftauchenden Problemen kann das

Vorgehen verlangsamt oder gar unterbrochen werden, um die fraglichen Sachverhalte zu klären.

Die genannten Vorteile stellen keine Besonderheit der konservativ-pragmatischen Vorgehensweise dar, sondern sind implizite oder - verbunden mit dem Begriff Flexibilität - explizite Bestandteile der meisten nationalen Entsorgungsstrategien.

Nachteile

- Die Anpassung des Handelns an veränderte Bedingungen kann bei unzureichender Begründung und Nachvollziehbarkeit als opportunistisch erscheinen und schnell zu einem schwerwiegenden Vertrauensverlust führen. Das gilt insbesondere dann, wenn unklare oder widersprüchliche sicherheitstechnische Argumente zu dem Verdacht führen, Entscheidungen seien nicht sachgerecht abgewogen und gefällt worden, sondern zu Gunsten von Gruppeninteressen.
- Das übergeordnete Ziel der kpV (passiv sichere Endlagerung in Deutschland) kann im Zeitverlauf auf Grund bestimmter Umstände, die angeblich keine Handlungsalternative zulassen (z.B. ökonomisch, fehlende gesellschaftliche Durchsetzbarkeit), aufgegeben oder gravierend verändert werden (z.B. Export von Abfällen, Umschwenken auf die Entsorgungsoption LzL). Die Entscheidung über eine solche Neuorientierung darf nicht alleine den damit befassten Institutionen überlassen werden. Die Festlegung und Umsetzung bedarf vielmehr einer gesellschaftlichen Diskussion unter Beteiligung der Öffentlichkeit (s. auch kpV - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen). Tiefgreifende Änderungen im Entsorgungsweg oder sogar hinsichtlich des Ziels bedürfen der nachvollziehbaren und überzeugenden Begründung und sind ohne gesellschaftliche Beteiligung nur schwer durchzusetzen. Es besteht zudem die Gefahr, dass sämtliche Terminvorstellungen obsolet werden.
- Bei den zuvor aufgeführten nachteiligen Entwicklungen kommt hinzu, dass sie durch die kpV-immanent eingeschränkte Transparenz für nicht unmittelbar am Verfahren Beteiligte kaum nachvollziehbar sind und daher (möglicherweise begründete) Ursache für Misstrauen in die handelnden Personen und Institutionen sind.

- Ohne langfristigen politischen Minimalkonsens (u.a. zwischen Bund und Ländern) hinsichtlich des übergeordneten Zieles und wichtiger Einzelmaßnahmen auf dem Weg dorthin werden die mit der Möglichkeit zur Anpassung verbundenen Vorteile hinfällig.

kpV - Proliferation, Safeguards

Proliferations- und Safeguards-Aspekte spielen bei der kpV je nach ihrer konkreten Ausbildung eine wichtige Rolle: Zum Beispiel stellt die längere Zwischenlagerung bestrahlten Kernbrennstoffs an der Erdoberfläche per se eine denkbare Möglichkeit für das Abzweigen radioaktiver Stoffe dar. In diesem Sinne kritische Aktivitäten bzw. Sachverhalte sind z.B. Handhabung der Abfälle, Reparatur geschädigter Abfallbehälter, Manipulation der elektronischen Überwachung, Anfälligkeit von Beschäftigten und unerkannte organisatorische Mängel. Entsprechend umfassend sind die zu treffenden Safeguards-Maßnahmen.

kpV - Gesellschaftliche Anforderungen und Erwartungshaltungen

Die konservativ-pragmatische Vorgehensweise kann in ihrer konkreten Ausbildung viele verschiedene Varianten umfassen, deren Umsetzung aber zu einem bestimmten Zeitpunkt auf ein erklärtes übergeordnetes Ziel ausgerichtet ist. Das genaue Vorgehen innerhalb dieser Varianten ist offen und muss sich nur innerhalb des Rahmens bewegen, der durch das Ziel vorgegeben wird. Die Variantenvielfalt für die Umsetzung der kpV und die kpV-immanent eingeschränkte Transparenz erfordern zwingend die systematische Einbeziehung und die verfahrenswirksame Beteiligung der Öffentlichkeit, damit die Festlegung auf bestimmte Bausteine des Vorgehens überprüft wird und verfahrensstabilisierende breite Zustimmung erhält. Dies gilt umso mehr, wenn es um die Änderung des übergeordneten Zieles der Entsorgung gehen sollte.

Generell erfordert die kpV wegen ihrer Variabilität besondere Sorgfalt mit Blick auf die kontinuierliche Beteiligungs- und Mitentscheidungsmöglichkeiten der Bevölkerung. Wird diese Anforderung nicht eingelöst, können ausweislich der Erfahrungen aus der Vergangenheit Konflikte zwischen verschiedenen Interessengruppen zu Verzögerungen im Verfahrensablauf bis hin zur Verhinderung sinnvoller Maßnahmen führen. Die für die Umsetzung der Entsorgungsstrategie zuständigen Entschei-

Träger bzw. Institutionen müssen also Kritik an einzelnen Vorhaben ernst nehmen und bereit sein, sich damit auseinander zu setzen.

kpV - Datenblattbezogene Quellen

AKEND – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd.-Dezember 2002

GRUPPE ÖKOLOGIE e.V. (1998): Analyse der Entsorgungssituation in der Bundesrepublik Deutschland und Ableitung von Handlungsoptionen unter der Prämisse des Ausstiegs aus der Atomenergie - Studie im Auftrag der Heinrich Böll Stiftung, 248 S., August 1998, Hannover.

GRUPPE ÖKOLOGIE e.V. / PANGEO (1994): Studie zur Entwicklung von Grundlagen für ein Verfahren zur Auswahl von Endlagerstandorten und Beurteilung ihrer Langzeitsicherheit - Im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums, Abschlussbericht November 1994, Hannover

StandAG – Standortauswahlgesetz (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 23. Juli 2013 -

http://www.juris.de/jportal/docs/news_anlage/gportal/bilder/bqbl1/bqbl113s2553.pdf

III. Technologien

Datenblatt P&T

Abtrennung und Umwandlung (Partitioning & Transmutation - P&T)

P&T - Vorbemerkung

Das Datenblatt P&T enthält grundlegende Aussagen über Möglichkeiten, Vorteile und Risiken der Abtrennung (Partitioning) von langlebigen Radionukliden aus radioaktiven Abfällen und ihre Umwandlung (Transmutation, daher P&T) in stabile oder kurzlebige Isotope. Zur Technologie insgesamt wird schwerpunktmäßig auf Aspekte eingegangen, die für die Bundesrepublik Deutschland relevant sind.

In Zusammenhang mit den in den Datenblättern ELo, ELm und LZL dargestellten und anderen Entsorgungsoptionen nimmt P&T die Rolle einer Ergänzung ein. P&T kann als Behandlungsschritt für radioaktive Abfälle den Optionen sowohl vor- als auch nachgeschaltet sein. Die Nachschaltung gilt wegen des erheblichen Aufwands der Abfallrückholung wahrscheinlich nicht für die Option ELo (Endlagerung ohne Monitoring und ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit).

P&T - Wesentliche Merkmale und Ziele

In den Staaten mit Atomenergienutzung wird weltweit über den Umgang mit den dabei anfallenden radioaktiven Abfällen diskutiert. Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist das bisher bevorzugt angestrebte Ziel. Auch weil Aussagen zur Langzeitsicherheit von Endlagern mit Unsicherheiten behaftet sind, wird an der Entwicklung der Technologie P&T gearbeitet. Das ursprüngliche Ziel, mit dieser Technologie die Endlagerung überflüssig zu machen, hat sich inzwischen aus naturwissenschaftlichen Gründen als nicht erreichbar erwiesen. Es besteht heute die Erwartungshaltung, dass mit Hilfe von P&T der Anteil langlebiger Radionuklide im radioaktiven Abfall soweit verringert werden kann, dass die Anforderungen an das Einschussvermögen eines geologischen Endlagers reduziert werden und der Nachweis für die Langzeitsicherheit eines Endlagers entlastet bzw. zuverlässiger geführt werden kann.

Sofern sich P&T im oben genannten eingeschränkten Umfang für bestrahlte Brennelemente als technologisch umsetzbar erweist, würde das in der Bundesrepublik Deutschland mit P&T verfolgte Ziel die Verringerung des Gefahrenpotenzials der bis zur Beendigung der Atomenergienutzung 2022 angefallenen bestrahlten Brennelemente sein. Alle weiteren mit P&T in der internationalen Diskussion verbundenen Ziele sind für die Bundesrepublik Deutschland wegen der Beendigung der Kernenergiegewinnung irrelevant. In Staaten mit unbefristetem Atomenergienutzungsprogramm soll durch die Abtrennung des Urans aus den bestrahlten Brennelementen und dessen Einsatz in neuen Brennelementen eine Verringerung des Bedarfs an "frischem" Uranerz für die Elektrizitätsgewinnung erreicht werden. Ferner besteht die Hoffnung, durch den Betrieb von Reaktoren für die Transmutation einen Nettogewinn an Energie zu erreichen und diese für die Bereitstellung von Elektrizität nutzen zu können. Sollten diese Ziele mit der weiteren Entwicklung tatsächlich erreicht werden, käme das hier nicht zum Tragen, weil die technische Umsetzung erst lange nach dem gesetzlich festgelegten Ausstieg aus der Atomenergienutzung erfolgen würde. Das Atomgesetz lässt in Deutschland weder den Neubau von Reaktoren noch von Abtrennungsanlagen zu.

P&T - Entwicklungsstand

Gegenwärtig existiert noch kein geschlossenes Konzept für P&T. Zu den Verfahrensschritten Abtrennung und Kernumwandlung wird intensiv geforscht. Für die Kernumwandlung der verschiedenen Radionuklide wird ein breites Spektrum an Reaktoren benötigt. Dazu gehören sowohl herkömmliche, aber weiterzuentwickelnde Kernspaltreaktoren mit schnellen Neutronen als auch neu zu entwickelnde beschleunigergesteuerte Reaktoren (ADS, Accelerator-Driven-System), mit denen die erforderlichen schnellen Neutronen erzeugt werden sollen (ACATECH 2013). Im belgischen Forschungszentrum Mol wird gegenwärtig der ADS-Forschungsreaktor „MYRRHA“ geplant, der etwa 2025 in Betrieb gehen soll (SCK•CEN 2014). Auch zu den Brennelementen, in denen die Radionuklide mittels der schnellen Neutronen umgewandelt werden sollen, zu den Targets für beschleunigergesteuerte Reaktoren, in denen die erforderlichen schnellen Neutronen erzeugt werden sollen, und zu den Behandlungsmethoden für die entstehenden radioaktiven Abfälle sind intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Zur Erreichung des oben genannten Ziels müssten aus dem radioaktiven Abfall möglichst viele der langlebigen Radionuklide (Aktinide und Spaltprodukte) abgetrennt und in einem Reaktor durch Kernreaktionen möglichst weitgehend in stabile oder kurzlebige Nuklide umgewandelt werden. Die bisherige Entwicklung hat allerdings gezeigt, dass das ursprüngliche Ziel, den Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager deutlich zu entlasten, nicht im gedachten Umfang erreicht werden kann. Ein Teil der langlebigen Radionuklide macht aufgrund seiner chemischen Eigenschaften bzw. aufgrund kernphysikalischer Prozesse Probleme bei der Abtrennung (z.B. Cs-135 und Cm-244) bzw. bei der Umwandlung (z.B. Cs-135, C-14, Cl-36, U-238). Für solche Radionuklide ist P&T praktisch nicht zu realisieren. Extrem schwierig wäre P&T für die Spaltprodukte I-129 und Tc-99. Unabhängig davon entstünden bei der Umwandlung auch neue längerlebige Radionuklide. Nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik wird sich P&T deshalb im Wesentlichen auf Aktinide beschränken (NEUMANN & KREUSCH 2013).

Auch die weniger langlebigen, aber radiologisch relevanten Radionuklide Sr-90 und Cs-137 können nicht effektiv umgewandelt werden. Diese Radionuklide gehören zu den Hauptbestandteilen der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle, deren Behandlung durch P&T ohnehin keinen Sinn macht. Auch ökonomisch wäre das bei den sehr großen schwach- und mittelradioaktiven Abfallmassen nicht umsetzbar.

P&T - Erwartete Vorteile

Wäre die Anwendung von P&T auf ausgewählte Aktinide mit hoher Effektivität möglich, hätte dies folgende Vorteile:

- Durch die starke Verringerung der in Frage kommenden Aktinide würden das Radionuklidinventar des Endlagers und die sicherheitlichen Anforderungen an das Endlagersystem verringert sowie der Langzeitsicherheitsnachweis in Bezug auf diese Aktinide erleichtert.
- Der Gesamtwärmeeintrag aus den Brennelementen in das Endlager würde verringert. Dies würde die die Abfälle umgebenden geologischen und (geo-)technischen Barrieren thermisch weniger belasten bzw. den Platzbedarf verringern.

- Durch die weitgehende Umwandlung der atombombentauglichen Radionuklide (hauptsächlich Pu-239, Pu-241, Np-237, Am-241) würde die Proliferationsgefahr in Bezug auf das Endlager stark verringert.

P&T - Relativierung der erwarteten Vorteile

Die von der Einführung von P&T erwarteten Vorteile bezüglich der Endlagerung werden durch folgende Einschränkungen stark relativiert (NEUMANN & KREUSCH 2013):

- Die radiologischen Auswirkungen von Freisetzungen aus dem Endlager in die Biosphäre werden hauptsächlich durch langlebige und mobile Spaltprodukte bestimmt. Da diese durch P&T nicht umgewandelt werden können, ist der Gewinn für die Langzeitsicherheit bei der Endlagerung gering.
- Der positive Effekt wird weiter dadurch verringert, dass das Radioaktivitätsinventar der verglasten hoch- und mittelradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle, die wegen ihrer Zusammensetzung für P&T nicht infrage kommen und endgelagert werden müssen, die sicherheitlichen Anforderungen an das Endlagersystem mitbestimmt und beim Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt werden muss. Die in ihnen enthaltenen Mengen von Uran-, Plutonium-, Neptunium und Americiumisotopen heben den durch die Anwendung von P&T auf die Brennelemente erreichten Vorteil zum Teil wieder auf.
- Neben den verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen, den auch langlebige Radionuklide enthaltenden Targets und den Lösungen aus den Abtrennungsprozessen fallen in allen für P&T benötigten Anlagen schwach- und mittelradioaktive Betriebsabfälle an. Alle diese Abfälle müssen in ein geologisches Endlager verbracht werden und beeinflussen damit den Langzeitsicherheitsnachweis.
- Die Integrität der geologischen Barrieren und die potenzielle Freisetzung von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen wird weniger durch den Gesamtwärmeeintrag als vielmehr durch den volumenspezifischen Wärmeeintrag bestimmt. Dieser ändert sich jedoch nicht wesentlich durch P&T, da ja ein Ziel gerade die Verringerung des Endlagervolumens ist (s. P&T – Erwartete Vorteile). Wegen der Optimierung des Umgangs mit den Abfällen sind die Radionuklide nach P&T oh-

nehin entsprechend konzentriert, so dass von einer spezifischen Wärmeentwicklung auf dem Niveau der Abfälle ohne P&T auszugehen ist.

P&T - Risiken

Die Anwendung von P&T wäre mit hohen zusätzlichen Risiken verbunden:

- Bei den verschiedenen Abtrennungsprozessen und der Brennelementfertigung existiert im Normalbetrieb ein hohes Freisetzungspotenzial für zum Teil stark radiotoxische Stoffe.
- Durch den Umgang mit den abgetrennten Aktiniden, die Alpha-, Gamma- und/oder Neutronenstrahler sind, können erhebliche Strahlenbelastungen für das Betriebspersonal auftreten.
- Vor allem für die Abtrennungsprozesse und die Kernumwandlung in Reaktoren sind nach gegenwärtigem Stand der Entwicklung Störfälle mit katastrophalen Auswirkungen nicht auszuschließen (s. z.B. ZERRIFFI & MAKHIJANI 2005 u. INBF 2011).
- Mit den Targets aus den beschleunigergesteuerten Reaktoren und vor allem den nach den Abtrennungsprozessen verbleibenden Lösungen entstehen zwei Stoffströme mit erheblichem Gefahrenpotenzial.
- Während der Durchführung von P&T liegen Kernbrennstoffe für relativ lange Zeiträume in leicht zugänglicher und vor allem auch in reiner Form vor. Damit ist eine drastische Erhöhung der Proliferationsgefahr verbunden.

P&T - Perspektiven und Resümee

Neben der Abwägung der mit einer Anwendung von P&T verbundenen Vorteile und Risiken sind bei einer Entscheidung über ihre Anwendung in Deutschland auch die nach Strahlenschutzverordnung notwendige Rechtfertigung der Anwendung und die Einhaltung des Minimierungsgebotes in Bezug auf den Gesamtumgang mit den bestrahlten Brennelementen zu prüfen. Im Rahmen der Abwägung ist auch die Frage zu beantworten, welchen Sinn angesichts des in Deutschland beschlossenen Ausstiegs aus der Atomenergienutzung und der daraus resultierenden Beendigung der Produktion wärmeentwickelnder bzw. hochradioaktiver Abfälle die Entwicklung und der Bau großtechnischer Anlagen für P&T haben.

Die Entwicklung von P&T befindet sich zum Teil noch im Bereich der Grundlagenforschung. Bis zur großtechnischen Einsatzreife - sofern das gesteckte Ziel überhaupt erreicht wird - müssen mehrere Milliarden Euro investiert werden. Angesichts der gegenwärtigen Planung, den ersten Forschungsreaktor in der Europäischen Union (MYRRHA) als wesentliche Grundlage für die weitere Entwicklung der Transmutation frühestens im Jahr 2025 in Betrieb zu nehmen, kann es bis zur Einsatzreife noch 50 Jahre dauern. Dies zeigt nicht zuletzt die Erfahrung mit vergleichbaren kerntechnischen Entwicklungen, wie die Kernfusion. Die Aufgabe ist überhaupt nur in internationaler Kooperation zu bewältigen und die erforderlichen Anlagen werden eher in Staaten mit einem zeitlich unbegrenzten Atomenergieprogramm betrieben werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich aus den skizzierten Gründen Vorteile von P&T für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland derzeit nicht erkennen lassen.

P&T- Datenblattbezogene Quellen

- INBK - Institut für nuklearen Brennstoffkreislauf RWTH Aachen (2011): Konzept einer gasgekühlten beschleunigergetriebenen Transmutationsanlage – AGATE - Aachen Nuclear Safety Reports, Vol. 1, März 2011
- NEA – Nuclear Energy Agency (2011): Potentials Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation - NEA-No. 6894, OECD 2011. <http://www.oecd-nea.org/science/reports/2011/6894-benefits-impacts-advanced-fuel.pdf>
- NEUMANN, W. & KREUSCH, J. (2013): Ersteinschätzung des Ökotoxizitätspotenzials von P&T - intac GmbH, erstellt im Rahmen der acatech Studie „Partitioning und Transmutation“ vom Dezember 2013, Hannover, März 2013
- RED IMPACT (2008): Red Impact - Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal. Synthesis Report - Schriften des Forschungszentrums Jülich, Vol. 15, Jülich 2008 ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6-euratom/docs/red-impact-final-published-report_en.pdf
- SCK•CEN (2014): MYRRHA: Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications - <http://myrrha.sckcen.be/en>
- ZERREFFI, H. & MAKHIJANI, A. (2005): The Nuclear Alchemy Gamble. An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy - Institute for Energy and Environmental Research (IEER), Washington D.C., May 12 2005, <http://ieer.org/resource/reports/nuclear-alchemy-gamble/>

IV. Inventar

Datenblatt Abfälle

Kategorisierung der Abfälle in Deutschland

Vorbemerkung

Das Datenblatt Abfälle (Stand März 2014) enthält eine Übersicht über in Deutschland vorliegende radioaktive Abfallarten, insbesondere ihre Eigenschaften, Haupttrisiken, ihre Konditionierung und Behandlungsoptionen. In der Übersicht sind zur Vollständigkeit alle Abfallarten aufgeführt, unabhängig von ihrem Verbleib. Die Abfallmengenangaben sind aufgrund der vorliegenden Informationslage sehr heterogen. Auch weil für einen Teil der Abfallarten die Verpackung für die Endlagerung noch nicht feststeht, werden in den Quellen teilweise die Gesamtvolumina für endlagerfertige Gebinde und teilweise für Rohabfälle oder vorkonditionierte Abfälle angegeben. Für spezielle Abfallarten gibt es bisher keine oder keine zuverlässigen Mengenangaben.

Für einige dieser Abfallarten ist zurzeit noch nicht abschließend geklärt, welchem Entsorgungsweg oder Endlager sie zugeordnet werden. In der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) wurden die graphithaltigen Abfälle, Abfallgebinde mit Brennelement-Strukturteilen, Urantails aus der Brennelementherstellung sowie sonstige vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Mischabfälle berücksichtigt und fiktiv einem gesonderten Bereich des geplanten Endlagers Gorleben zugewiesen (GRS 2013). Eine definitive Entscheidung darüber oder über andere Abfallzuordnungen ist noch nicht gefallen. Im Zusammenhang mit der Erarbeitung des Nationalen Entsorgungsprogramms im Bundesumweltministerium sollten solche und ähnliche Fragen geklärt werden.

1. Abfälle für das Endlager mit wärmeentwickelnden Abfällen

In der folgenden Übersicht zu den radioaktiven Abfällen wird zu den Abfallarten jeweils stichpunktartig auf die radiologischen Eigenschaften, die Hauptrisiken, die Konditionierung und das damit zusammenhängende Endlagerungsreferenzkonzept in Deutschland, die Behandlungsoptionen hierzu sowie die in Deutschland insgesamt zu erwartende Abfallmenge eingegangen. Bei den Angaben in der Rubrik „Konditionierung in D“ handelt es sich um das gegenwärtig in Deutschland verfolgte Referenzkonzept für die Einlagerung in ein Endlager, dessen Entwicklung am weitesten fortgeschritten ist. Unter „Behandlungsoptionen“ sind alternative Einlagerungskonzepte genannt.

1.1 Bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren

Eigenschaften:	hochradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide in großem Umfang.
Hauptrisiken:	Kritikalität, Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität (u.a. α -Strahler), Proliferation.
Konditionierung in D:	in Brennstäbe zerlegen, diese in Büchsen und diese in für die Endlagerung entwickelte Pollux-Behälter (Endlagerung in Strecken). (FILBERT & ENGELMANN 1998)
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- in Brennstäbe zerlegen, diese in Büchsen und diese in Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (FILBERT & ENGELMANN 1998)- unzerlegte Brennelemente in POLLUX-Behältern (Endlagerung in Strecken). (SAE 1984); wird zurzeit nicht verfolgt- im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen und diesen verfüllen (Endlagerung einzelner Behälter in horizontalen Bohrlöchern). (GRAF et al. 2009) und (GRS 2013)- Abtrennung & Umwandlung (noch kein Konzept für Endlagerung nicht abtrennbarer oder umwandelbarer, zum Teil auch langlebiger Radionuklide)
Abfallmenge in D:	22.366 m ³ Endlagervolumen (zerlegt in POLLUX-Behältern) (GRS 2012) oder 6.644 m ³ Endlagervolumen (zerlegt in Kokillen)

(GRS 2012) oder
55.915 m³ Endlagervolumen (unzerlegt in POLLUX-
Behältern) (hochgerechnet aus GRS 2012) oder
29.616 m³ Endlagervolumen (unzerlegt in Transport- und
Lagerbehältern) (GRS 2012)

1.2 Bestrahlte Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren

Eigenschaften:	hochradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide in großem Umfang
Hauptrisiken:	Kritikalität, Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität (u.a. α -Strahler), Proliferation
Konditionierung in D:	Brennelemente im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen und den Resthohlraum im Behälter verfüllen (Endlagerung in Strecken) (GRS 2011)
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- umpacken in Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern) (GRS 2011)- Abtrennung & Umwandlung bisher nicht in Diskussion
Abfallmenge in D:	160 m ³ Endlagervolumen (in Transport- und Lagerbehältern) (BFS 2014) oder 57 m ³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012)

1.3 Bestrahlte Brennelemente aus Forschungsreaktoren geringer Leistung

Eigenschaften:	mittel- oder schwachradioaktiv und gering wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Kritikalität, Proliferation.
Konditionierung in D:	<ul style="list-style-type: none">- für einen Teil der Brennelemente ist die Veraschung vorgesehen, nach der das abgetrennte Kernmaterial wiederverwendet werden soll- der andere Teil wird im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen und diese verfüllt (Endlagerung in Strecken)

Behandlungsoptionen: - umpacken in Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern).
- Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll möglich

Abfallmenge in D: nicht bekannt

1.4 Bestrahlte Brennelemente aus Hochtemperaturreaktoren

Eigenschaften: mittelradioaktiv und relativ wenig wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide

Hauptrisiken: hoher C-14- und H-3-Anteil, Kritikalität, Radiotoxizität (α -Strahler), Proliferation.

Konditionierung in D: Die Brennelemente befinden sich in Kannen, die in CAS-TOR[®]-Behältern sind; darin sollen sie möglicherweise für die Endlagerung bleiben (Endlagerung in Strecken). (GRS 2011)

Behandlungsoptionen: - umpacken der Kannen in Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (GRS 2011)
- Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll möglich

Abfallmenge in D: 1.970 m³ Endlagervolumen (in Transport- und Lagerbehältern) (BFS 2014) oder
430 m³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012)

1.5 Brennelementstrukturteile aus der Brennelementkonditionierungsanlage

Eigenschaften: mittel- bis hochradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide

Hauptrisiken: Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität

Konditionierung in D: möglicherweise Hochdruckverpressung und Verpackung in MOSAIK[®]-Behältern (Endlagerung in Strecken)

Behandlungsoptionen: - umpacken in Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern)
- Abtrennung & Umwandlung nicht möglich

Abfallmenge in D: ca. 3.400 m³ Endlagervolumen in MOSAIK[®]-Behältern (BFS 2014) oder
822 m³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012)

1.6 Verglaste Spaltprodukt- u. Aktinidenlösungen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V)

Eigenschaften:	hochradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide in großem Umfang
Hauptrisiken:	Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität (u.a. α -Strahler)
Konditionierung in D:	keine weitere Behandlung, sondern direkte Endlagerung der Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (BFS 1990)
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- Einbringung von jeweils drei Kokillen in ein sogenanntes Triple Pack (Endlagerung mehrerer Triple Packs übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (GRS 2013)- Einbringung in Pollux-Behältern (Endlagerung in Strecken). (GRS 2011)- im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen (Endlagerung einzelner Behälter in horizontalen Bohrlöchern). (GRS 2011)- Abtrennung & Umwandlung nicht möglich
Abfallmenge in D:	1.170 m ³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012) oder 9.559 m ³ Endlagervolumen in POLLUX-Behälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.7 und 1.8 (GRS 2012) oder 7687 m ³ Endlagervolumen in Transport- und Lagerbehälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.7 und 1.8 (GRS 2012)

1.7 Verglaste Deko- und Spülwässer aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B)

Eigenschaften:	mittelradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide
Hauptrisiken:	Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität (u.a. α -Strahler)
Konditionierung in D:	keine weitere Behandlung, sondern direkte Endlagerung der Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (GRS 2011)
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- Einbringung von jeweils drei Kokillen in ein sogenanntes Triple Pack (Endlagerung mehrerer Triple Packs übereinander in vertikalen 300 m tiefen Bohrlöchern). (GRS 2013)

- Einbringung in Pollux-Behältern (Endlagerung in Strecken). (GRS 2011)
- im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen (Endlagerung einzelner Behälter in horizontalen Bohrlöchern). (GRS 2011)
- Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll und nicht möglich

Abfallmenge in D: 97 m³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012).
 9.559 m³ Endlagervolumen in POLLUX-Behälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.6 und 1.8 (GRS 2012)
 7687 m³ Endlagervolumen in Transport- und Lagerbehälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.6 und 1.8 (GRS 2012)

1.8 Kompaktierte metallische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C)

Eigenschaften: mittelradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide

Hauptrisiken: Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität

Konditionierung in D: keine weitere Behandlung, sondern direkte Endlagerung der Kokillen (Endlagerung mehrerer Kokillen übereinander in vertikalen Bohrlöchern). (GRS 2011)

Behandlungsoptionen: - Einbringung in Pollux-Behältern (Endlagerung in Strecken). (GRS 2011)
 - im Transport- und Zwischenlagerbehälter belassen (Endlagerung einzelner Behälter in horizontalen Bohrlöchern). (GRS 2011)
 - Abtrennung & Umwandlung nicht möglich

Abfallmenge in D: 1.286 m³ Endlagervolumen (in Kokillen) (GRS 2012)
 9.559 m³ Endlagervolumen in POLLUX-Behälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.6 und 1.7 (GRS 2012)
 7687 m³ Endlagervolumen in Transport- und Lagerbehälter gemeinsam mit den Abfällen in 1.6 und 1.7 (GRS 2012).

1.9 Feste Wiederaufarbeitungsabfälle WAK

Eigenschaften:	Mittelradioaktiv und wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide.
Hauptrisiken:	Direktstrahlung, Radiotoxizität, Kritikalität, Proliferation.
Konditionierung in D:	Nicht bekannt. Befinden sich zurzeit in 200 l Fässern.
Behandlungsoptionen:	Nicht bekannt. Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll.
Abfallmenge in D:	ca. 180 m ³ Nettovolumen (BFS 2014)

2. Sonstige Abfälle, die mit hoher Wahrscheinlichkeit in das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle kommen könnten

Die folgenden Abfälle können aus unterschiedlichen Gründen nicht im Endlager Konrad eingelagert werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit könnten sie in das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle eingelagert werden.

2.1 Uran (abgereichert) aus der Urananreicherung

Eigenschaften:	liegt als Oxid vor, schwachradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide
Hauptrisiken:	Radiotoxizität (u.a. α -Strahler)
Konditionierung in D:	Einbringung des Oxides in Stahlblechcontainer, z.B. Konradcontainer Typ VI (Endlagerung in Kammern in einem von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennten Endlagerbereich). (GRS 2011)
Behandlungsoptionen:	keine; Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll
Abfallmenge in D:	hohe Ungewissheiten, 100.000 m ³ Nettovolumen nach BMU (2011) 111.350 m ³ Endlagervolumen in Konrad-Container Typ VI (hochgerechnet aus GRS 2012)

2.2 Uran aus der Wiederaufarbeitung

Eigenschaften:	liegt als Oxid vor; schwach- bis mittelradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide
Hauptrisiken:	Direktstrahlung, Radiotoxizität (u.a. α-Strahler)
Konditionierung in D:	nicht bekannt, mögliche Option ist gemischte Endlagerung (in getrennten Behältern) mit höher angereicherten Forschungsreaktor-brennelementen oder mit verglasten Abfällen
Behandlungsoptionen:	nicht bekannt; Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll
Abfallmenge in D:	nicht bekannt

2.3 Thorium und thoriumhaltige Abfälle

Eigenschaften:	schwach- bis mittelradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd, langlebige Radionuklide
Hauptrisiken:	Radiotoxizität (u.a. α-Strahler), Proliferation
Konditionierung in D:	nicht bekannt, Endlagerung vorgesehen
Behandlungsoptionen:	nicht bekannt, Abtrennung & Umwandlung nicht sinnvoll
Abfallmenge in D:	keine Information

2.4 Graphit und graphithaltige Abfälle

Eigenschaften:	schwachradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Radiotoxizität und Mobilität, vor allem von C-14 und H-3
Konditionierung in D:	- für einen Teil der Abfälle wird eine thermische Behandlung entwickelt - Einbringen in MOSAIK [®] -Behälter (Endlagerung in Kammern in einem von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennten Endlagerbereich)
Behandlungsoptionen:	keine
Abfallmenge in D:	2.990 m ³ Endlagervolumen (in MOSAIK [®] -Behälter) (GRS 2012)

2.5 Strahlenquellen

Eigenschaften:	hochradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität
Konditionierung in D:	nicht bekannt, mögliche Option ist gemischte Endlagerung (in getrennten Behältern) mit höher angereicherten Forschungsreaktor-brennelementen oder mit verglasten Abfällen
Behandlungsoptionen:	nicht bekannt, Abtrennung & Umwandlung nicht möglich
Abfallmenge in D:	keine Information

2.6 Tritiumhaltige Abfälle

Eigenschaften:	schwachradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Radiotoxizität und hohe Mobilität von H-3
Konditionierung in D:	nicht bekannt
Behandlungsoptionen:	nicht bekannt
Abfallmenge in D:	keine Information

2.7 Weitere Abfälle

Nach der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) könnten weitere vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle in das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle eingelagert werden, da sie die Endlagerungsbedingungen für Konrad nicht erfüllen (GRS 2011). Die Abfallarten werden in der VSG nicht näher spezifiziert.

Eigenschaften:	schwachradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	abfallartabhängig
Konditionierung in D:	gegenwärtig wird von Konditionierung und Verpackung nach Konrad-Endlagerungsbedingungen ausgegangen (in Kammern in einem von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennten Endlagerbereich) (GRS 2011).
Behandlungsoptionen:	keine
Abfallmenge in D:	14.998 m ³ Endlagervolumen (in verschiedenen Behältern) (GRS 2012)

3. Abfälle für das in Errichtung befindliche Endlager Konrad

In Konrad sollen nach gegenwärtigem Endlagerkonzept "vernachlässigbar" wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle endgelagert werden. Die jeweilige Art der Konditionierung ist durch den Planfeststellungsbeschluss (NMU 2002) und die Endlagerungsbedingungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BFS 2010) vorgegeben.

Die zur Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland prognostizierte Menge beträgt 304.000 m³ (BFS 2014).

3.1 Betriebsabfälle aus kerntechnischen Anlagen

Eigenschaften:	schwach- bis mittelradioaktiv und "vernachlässigbar" wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Direktstrahlung, Radiotoxizität
Konditionierung in D:	je nach Abfallart durch Trocknung, Kompaktierung, Verbrennung, Einschmelzen, Verfestigung mit Zement oder Pyrolyse; nach anforderungsgerechter Verpackung direkte Endlagerung (Endlagerung in Strecken)
Behandlungsoptionen:	- Abklinglagerung bis zur Freigabemöglichkeit (nur für kleinen Teil der Abfälle theoretisch möglich) - Abtrennung und Transmutation nicht möglich

3.2 Stilllegungsabfälle aus kerntechnischen Anlagen

Eigenschaften:	schwach- bis mittelradioaktiv und "vernachlässigbar" wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Direktstrahlung, Radiotoxizität
Konditionierung in D:	je nach Abfallart durch Trocknung, Kompaktierung, Verbrennung, Einschmelzen oder Verfestigung mit Zement; nach anforderungsgerechter Verpackung direkte Endlagerung (Endlagerung in Strecken)
Behandlungsoptionen:	- Abklinglagerung bis zur Freigabemöglichkeit (nur für relativ kleinen Teil der Abfälle theoretisch möglich) - Abtrennung und Transmutation nicht möglich

4. Abfälle aus der Rückholung Asse

Gegenwärtig ist es aus Langzeitsicherheitsgründen das Ziel, alle im Bergwerk Asse II eingelagerten Abfälle rückzuholen. Wegen der großen Menge und aus anderen Gründen (z.B. Gehalt chemotoxischer Inhaltsstoffe) können die Abfälle nicht in Konrad eingelagert werden. In welchen Endlager sie kommen sollen, ist noch nicht festgelegt.

Eigenschaften:	gering bis mittelradioaktiv und vernachlässigbar wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Zustand der Abfälle, große Menge (>175.000 m ³), Direktstrahlung (Teil der Abfälle), Radiotoxizität
Konditionierung in D:	bisher nicht festgelegt; in der Diskussion sind Trocknung oder Zementierung und Verpackung in Konrad-Container Typ III oder IV für schwachradioaktive und Verpackung in MOSAIK-Behälter für mittelradioaktive Abfälle (STEAG 2013)
Behandlungsoptionen:	Einbringung in störfallfeste Behälter, Abtrennung & Umwandlung nicht möglich
Abfallmenge in D:	nach Konditionierung 150.000 m ³ bis 275.000 m ³ (GNS 2011)

5. Zwischengelagerte Abfälle im Endlager Morsleben

In dem im Stilllegungsprozess befindlichen Endlager Morsleben sind radioaktive Abfälle zwischengelagert. Der Betreiber (Bundesamt für Strahlenschutz) möchte diese Abfälle im Rahmen der Stilllegung am Ort in die Endlagerung überführen. Da der Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager schwierig ist und die zwischengelagerten Abfälle einen erheblichen Teil des gesamten Radioaktivitätsinventars ausmacht (z.B. 90 % des α -Inventars) prüft die Planfeststellungsbehörde, ob diese Abfälle aus dem Endlager entfernt werden müssen. In welches Endlager sie ggf. dann kommen sollen, wird bisher nicht diskutiert. Die Abfälle sind nicht Konrad-gängig. Die Angaben sind zusammengestellt in (INTAC 2011).

5.1 Radiumfass

Eigenschaften:	mittelradioaktiv und wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Radiotoxizität (α -Strahler)
Konditionierung in D:	das Radium liegt in unterschiedlichem Zustand vor und wurde unterschiedlich konditioniert in Behälter eingebracht, alle Behälter befinden sich in einem 200 l Fass, das wiederum in ein 280 l Fass eingestellt ist; dieses Überfass wurde in eine VBA eingestellt
Behandlungsoptionen:	Verbleib im ERAM
Abfallmenge:	1,3 m ³

5.2 Europium-Abfälle

Eigenschaften:	hochradioaktiv und wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität
Konditionierung in D:	in Aluminiummatrix gesintert und von Stahlstäben umgeben in Spezialcontainer verpackt
Behandlungsoptionen:	Verbleib im ERAM
Abfallmenge:	2 Spezialcontainer (< 0,1 m ³)

5.3 Umschlossene Strahlenquellen

Eigenschaften:	hochradioaktiv und wärmeentwickelnd
Hauptrisiken:	Direktstrahlung (hohe Dosisleistung), Radiotoxizität
Konditionierung in D:	die Quellen sind jeweils von Innenbehältern umgeben und in Spezialcontainern verpackt
Behandlungsoptionen:	Verbleib im ERAM
Abfallmenge:	5 Spezialcontainer ($< 0,2 \text{ m}^3$)

6. Abfälle zur Freigabe in den konventionellen Bereich

Gering radioaktive Stoffe (in einigen EU-Staaten als Very Low Level Waste bezeichnet) können in der Bundesrepublik Deutschland bei Unterschreitung von in der Strahlenschutzverordnung aufgeführten Freigabewerten in den konventionellen Bereich abgegeben werden (STRLSCHV 2012). In den nächsten 20 bis 30 Jahren fallen etwa 4,5 Mio Mg gering radioaktive Abfälle an (NEUMANN 2013).

6.1 Abfälle aus Betrieb und Stilllegung kerntechnischer Anlagen zur eingeschränkten Freigabe

Eigenschaften:	gering radioaktiv
Hauptrisiken:	Akkumulation von Radionukliden in der Umwelt
Konditionierung in D:	einschmelzen (Metalle), Deponierung (feste Stoffe aller Art), Verbrennung (feste und flüssige brennbare Stoffe aller Art)
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- Behandlung als radioaktive Abfälle(wird nicht angestrebt)- Abklinglagerung bis zur uneingeschränkten Freigabemöglichkeit- Abtrennung und Transmutation ist für diese Abfälle nicht sinnvoll

6.2 Abfälle aus Betrieb und Stilllegung kerntechnischer Anlagen zur uneingeschränkten Freigabe

Eigenschaften:	gering radioaktiv (niedrigere Radioaktivität als bei den eingeschränkt freigegebenen Abfällen)
Hauptrisiken:	Akkumulation von Radionukliden in der Umwelt, Verbleib der Stoffe wird nicht bilanziert und nicht kontrolliert
Konditionierung in D:	beliebiger Umgang mit Stoffen aller Art
Behandlungsoptionen:	<ul style="list-style-type: none">- eingeschränkte Freigabe- Abtrennung und Transmutation ist für diese Abfälle nicht sinnvoll

Abfälle - Datenblattbezogene Quellen

- BFS- Bundesamt für Strahlenschutz (1990): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichts über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben vom Mai 1983. BfS ET-2/90, April 1990
- BFS- Bundesamt für Strahlenschutz (2010): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Oktober 2010) - Endlager Konrad -, Hrsg.: P. Brennecke, 11. Januar 2011
- BFS- Bundesamt für Strahlenschutz (2014): Abfallprognosen
<http://www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html>
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Antwort auf die Anfrage der Bundestagsabgeordneten Kottling-Uhl (Bündnis 90 / Die Grünen), Drucksache 17/6954, 8. September 2011
- FILBERT, W. & ENGELMANN, H.J. (1998): Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“. Abschlussbericht der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, 13.03.1998
- GRAF, R., FILBERT, W., BRAMMER, K.-J. & BOLLINGERFEHR, W. (2009): Disposal Technologies for Spent Fuel from German Nuclear Power Plants. Proceedings ICEM'09, Liverpool, 11-15 October 2009
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst - Bericht zum Arbeitspaket 3, GRS-278, September 2011
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2012): Endlagerauslegung und -optimierung - Bericht zum Arbeitspaket 6, GRS-281, Juni 2012
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2013): Synthesebericht für die VSG - Bericht zum Arbeitspaket 13, GRS-290, März 2013
- INTAC – Beratung·Konzepte·Gutachten zu Technik und Umwelt GmbH (2011): Expertise zur Endlagerung zwischengelagerter Abfälle im ERAM - erstellt im Auftrag von BUND, Landesverband Sachsen Anhalt und BI Morsleben, Initiative gegen das Atommüllendlager Morsleben e.V., Hannover, Oktober 2011

NEUMANN, W (2013): Stellungnahme zu Defiziten der Regelung von Freigaben radioaktiver Stoffe in der Bundesrepublik Deutschland - im Auftrag von Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Hannover, Oktober 2013

NMU – Niedersächsisches Umweltministerium (2002): Planfeststellungsbeschluss für das Endlager Konrad - Az.: 41-40326/3/10, Hannover, 22. Mai 2002

SAE-Systemstudie Andere Entsorgungstechniken (1984): Abschlußbericht, Hauptband, KWA 2190/1, Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken - Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Dezember 1984

STEAG Energy Services GmbH (2013): Asse II – Planungsgrundlagen für Zwischenlager - Vortrag in Göttingen, 18.06.2013

STRLSCHV (2012): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung), 24.02.2012