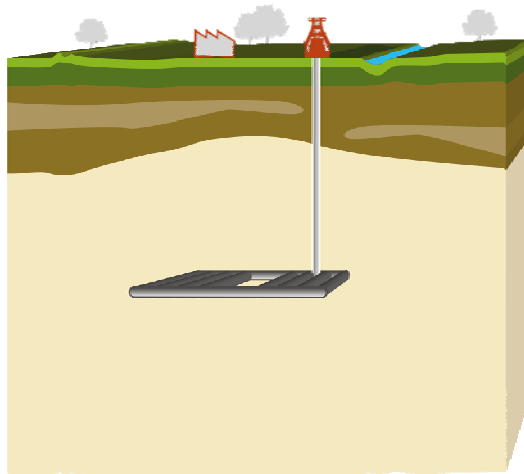


## Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

### Anhang Entsorgungsstrategien

#### Darstellung und Bewertung von Alternativen zur Endlagerung



**30.09.2008**

**Bearbeiter:**

Minhans, A.

Neles, J.

Schmidt, G.

**Braunschweig / Darmstadt  
September 2008**

**Anhang zu GRS-247  
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen an Entsorgungsstrategien.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Entsorgungsstrategien.....</b>	<b>7</b>
3.1	Partitionierung und Transmutation .....	7
3.2	Entsorgungsstrategien im Meer .....	11
3.3	Entsorgungsstrategien mit Überwachung .....	13
3.4	Sonstige Entsorgungsstrategien .....	15
<b>4</b>	<b>Internationale / multinationale Entsorgungsstrategien.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Bewertung .....</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>27</b>



## 1 Einleitung

Bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken, beim Betrieb von Forschungsreaktoren und bei vielen weiteren Tätigkeiten entstehen radioaktive Abfälle. Da die beim radioaktiven Zerfall entstehende Strahlung lebende Organismen schädigt, sind bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle besondere Sicherheitsvorkehrungen erforderlich. Insbesondere die Abfälle mit sehr hoher Radioaktivität wie die wärmeentwickelnden Abfälle müssen dauerhaft von der Biosphäre isoliert werden.

Heute favorisieren nahezu alle Länder eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Die radioaktiven Abfälle sollen dazu in geeigneten Gesteinsschichten wie Tonstein, Steinsalz oder Granit in 250 m bis 1000 m Tiefe eingebracht werden. Dort sollen sie für eine Dauer von 1 Million Jahren von der Biosphäre isoliert sein. Ein Barrierenkonzept aus natürlichen und technischen Barrieren soll die Rückhaltung der Schadstoffe garantieren. Die verschiedenen Aspekte der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen werden in den übrigen Anhängen näher dargestellt. Sie ist nicht Gegenstand des vorliegenden Anhangs.

Parallel zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedene andere Lösungsansätze in der Hoffnung diskutiert, dass sie zu einer „besseren“ Entsorgung des radioaktiven Abfalls führen könnten. Eine „bessere“ Entsorgung müsste im Vergleich zur Endlagerung beispielsweise größere Sicherheit bieten, eine höhere Akzeptanz in der Bevölkerung erzeugen, schneller umsetzbar sein und/oder auch mit geringeren Kosten realisierbar sein. Die wichtigsten diskutierten alternativen Entsorgungsstrategien für hochradioaktive bzw. wärmeentwickelnde Abfälle werden im vorliegenden Anhang vorgestellt.

In Kapitel 2 werden zunächst die Anforderungen beschrieben, die an eine dauerhaft sichere Entsorgung von wärmeentwickelnden Abfällen zu stellen sind. Die wichtigsten Entsorgungsstrategien werden dann in Kapitel 3 beschrieben und diskutiert. Dazu zählen u. a. Partitionierung und Transmutation, Entsorgungsstrategien im Meer und im Meeresboden sowie Entsorgungsstrategien, die eine Überwachung erfordern. Im Kapitel 4 wird das Thema internationale bzw. multinationale Endlager dargestellt, welches auch die Frage nach dem Export radioaktiver Abfälle berührt. Dabei handelt es sich zwar nicht um eine Entsorgungsstrategie im technischen Sinne, trotzdem wird diese

Option immer wieder als Entsorgungsalternative diskutiert. Im Kapitel 5 wird abschließend eine zusammenfassende Bewertung vorgenommen.

## 2 Anforderungen an Entsorgungsstrategien

Hauptziel der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist nach internationalen Empfehlungen der Schutz von Mensch und Umwelt für jetzige und zukünftige Generationen, ohne zukünftigen Generationen unzumutbare Lasten aufzubürden /IAE 95/. Diese Schutzprinzipien wurden auch in dem Gemeinsamen Übereinkommen über nukleare Entsorgung (Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management) /IAE 97/ verankert, das 1997 verabschiedet wurde. In dieser internationalen Vereinbarung wurde erstmals international verpflichtend festgehalten, dass weltweit anerkannte technische Vorschriften bei der Entsorgung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen im nationalen Bereich anzuwenden sind. Mit der Unterzeichnung des Übereinkommens /GEM 97/ verpflichtet sich Deutschland u. a. zur Einhaltung folgender Schutzprinzipien:

- Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle muss gewährleisten, dass Mensch und Umwelt sowohl vor radiologischen als auch sonstigen Gefährdungen durch die Abfälle geschützt sind /BMU 06/.
- Die Auswirkungen der Entsorgung auf zukünftige Generationen dürfen das heutige festgelegte Maß nicht überschreiten /BMU 06/.

Nach den Schutzgedanken des Atomgesetzes (AtG) und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) in Deutschland soll jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt vermieden werden und unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik auch unterhalb des festgesetzten Grenzwertes so gering wie möglich gehalten werden /STR 07/. Die Prinzipien der Strahlenschutzverordnung gelten dabei für die Betriebsphase einer Anlage zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle.

Aufgrund der sehr hohen Konzentrationen an radioaktiven Isotopen in den wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, der hohen Aktivität und der Halbwertszeiten der langlebigen Anteile, müssen für die Entsorgung dieser Abfälle besondere Anforderungen, auch für die Nachbetriebsphase gestellt werden:

- Wegen der hohen Konzentration radioaktiver Isotope im Abfall müssen Einschluss und Rückhaltung praktisch vollständig erfolgen. Bereits das Entweichen geringer Mengen der radioaktiven Stoffe in die Biosphäre hätte katastrophale Folgen.

- Aufgrund der Halbwertszeiten der langlebigen Radionuklide müssen Einschluss und Rückhaltung über einen sehr langen Zeitraum (eine Million Jahre) erfolgen.
- Ein Aufenthalt von Menschen in der unmittelbaren Nähe der radioaktiven Abfälle muss so unwahrscheinlich wie möglich sein, auch um ein unbeabsichtigtes Eindringen in die Entsorgungseinrichtung zu vermeiden.
- Einschluss und Rückhaltung müssen in einem absehbaren und begrenzten Zeitraum (eine Generation) realisierbar sein, um späteren Generationen keine Lasten mehr aufzubürden.

Die dargestellten Anforderungen wurden zwar im Hinblick auf die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen entwickelt. Aber andere Entsorgungsstrategien müssen sich ebenfalls an ihnen messen lassen und mindestens die gleiche Sicherheit bieten. Deshalb werden die in den folgenden Kapiteln betrachteten Entsorgungsstrategien basierend auf diesen Anforderungen diskutiert.



### 3 Entsorgungsstrategien

#### 3.1 Partitionierung und Transmutation

Als eine technische Entsorgungsstrategie für radioaktive Abfälle wird die Partitionierung und Transmutation (P&T) diskutiert. Die Idee besteht darin, die langlebigen radioaktiven Stoffanteile aus den Abfällen abzutrennen und aufzukonzentrieren (Partitionierung) und diese dann in einem besonderen Reaktor mittels Neutronenbestrahlung in kürzerlebige Isotope umzuwandeln (Transmutation). So soll zum einen das endzulagernde Abfallvolumen stark reduziert werden und zum anderen die langfristige Gefährdung durch die Abfälle herabgesetzt werden, indem die Radiotoxizität reduziert wird z.B. /WES 07/.

Der P & T-Prozess als Ganzes bedingt Anlagen für folgende Zwecke:

- Eine Abtrennungsanlage, in der die in den hochradioaktiven Abfällen (z.B. abgebrannte Brennelemente) befindlichen radioaktiven Stoffe separiert werden. Dies funktioniert nur über chemische Trennprozesse der verschiedensten Art. Vom Prinzip her ist das mit den Vorgängen in einer Wiederaufarbeitungsanlage vergleichbar. Allerdings erfordert die Vorbereitung für die Transmutation eine komplexere Prozessführung. In einer Wiederaufarbeitungsanlage wird lediglich in drei Stoffströme getrennt: Uran, Plutonium, übrige Spalt- und Aktivierungsprodukte. In einer Partitionierungsanlage dagegen müssen die übrigen Spalt- und Aktivierungsprodukte weiter aufgetrennt werden, z.B. bestimmte Aktinidenfraktionen, Trennung von langlebigen Spaltprodukten und in bestimmten Fällen auch die Abtrennung von Einzelnucliden. Vom Maßstab her ist ein Durchsatz von vielen hundert Tonnen abgebranntem Brennstoff pro Jahr erforderlich; die Anlage muss also ähnlich groß sein, wie heutige kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlagen.
- Als nächster Schritt ist die Fertigung von Targets für die Transmutation erforderlich, dies entspricht vom Prinzip her den Vorgängen bei der Brennelementfertigung. Die Situation ist allerdings deswegen komplexer, weil die zu verarbeitenden Stoffe ein sehr viel höheres Strahlungsniveau aufweisen als reines Uran oder reines Plutonium. Hinzu kommt, dass wegen des unterschiedlichen che-

mischen Verhaltens der einzelnen Stoffe komplexere chemische Vorgänge zur Herstellung des Targetmaterials und der Targets durchgeführt werden müssen

- Der dritte Schritt ist die eigentliche Transmutation. Diese kann in entsprechend abgewandelten Reaktoren (oder auch in anderen kernphysikalischen Anordnungen, z.B. Beschleunigern) geschehen. Es bestehen zur Durchführung der Transmutation Anforderungen an die kernphysikalische Auslegung dieser Reaktoren, die sich deutlich von den üblichen Leichtwasserreaktoren unterscheiden. Daraus ergibt sich, dass Reaktoren zur Transmutation neu entwickelt und errichtet werden müssen. Die Größe solcher Reaktoren orientiert sich an der von heutigen kommerziellen Reaktoren
- Die bestrahlten Targets müssen wieder einer chemischen Auftrennung unterzogen werden, wobei Ziel ist, die in die gewünschte Richtung umgewandelten Isotope von denen zu trennen, die nicht umgewandelt wurden. Letztere müssen nach der Separierung in neuen Targets wieder der Transmutation zugeführt werden. Die chemische Auftrennung geschieht wieder in den schon im ersten Spiegelpunkt beschriebenen Anlagen, allerdings kommt die Abtrennung der durch die Transmutation erzielten Produkte noch als Anforderung an die chemische Abtrennung hinzu.

Aus technischer Sicht funktioniert P & T nur, wenn alle beschriebenen Anlagen zur Verfügung stehen. Wegen der begrenzten Ausbeute in einem Transmutationszyklus ist auf jeden Fall für ein konkretes Material das mehrfache Durchlaufen des Zyklus erforderlich. Unter Zeitaspekten bedeutet dies, dass ein Material den Zyklus viele Jahre, wenn nicht Jahrzehnte durchlaufen muss, bevor das gewünschte Ergebnis hinsichtlich der Ausbeute der Umwandlung erreicht ist. Bezüglich der notwendigen Anlagen ist anzumerken, dass die entsprechenden Anlagen heute allenfalls in einem ersten Stadium des Labormaßstabs existieren. Für eine quantitative Durchführung der Transmutation müssten aber große Anlagen im großindustriellen Maßstab zur Verfügung stehen.

Der bis zur Realisierung dieser Techniken im großindustriellen Maßstab zu treibende Forschungs- und Entwicklungsaufwand ist extrem hoch. In der EU und insbesondere in Frankreich werden erhebliche finanzielle Mittel in diese Forschung gesteckt. Von 1998 bis 2002 wurde im Rahmen des 5. Rahmenforschungsprogramms insgesamt 69 Millionen Euro für Forschungen im Bereich P&T ausgegeben, wovon 28 Millionen Euro von der EU gefördert wurden. Im 6. Rahmenforschungsprogramm (2002 – 2006) wurde

diese Fördersumme erhöht. Insgesamt gab es einen Forschungsetat von 81 Millionen Euro für Forschungen im P&T Bereich, davon hat 43,5 Millionen Euro die EU gestellt.

Die zahlreichen Forschungsvorhaben in diesem Bereich befassen sich mit den Abtrennungsverfahren (z. B. EUROPART /EUR 08a/), der Entwicklung von Targets aus den abgetrennten Stoffen und den Transmutationstechniken und –prozessen (z.B. EUROTRANS /EUR 08b/) sowie den Einfluss dieser Verfahren auf die Endlagerung (z.B. Red-Impact /RED 08/). In den verschiedenen Forschungsfeldern sind zwar in den letzten Jahren Fortschritte erzielt worden (siehe z.B./NEA 06a/), allerdings ist die Machbarkeit der einzelnen Techniken bisher höchstens im Labormaßstab nachgewiesen worden. Trotz intensiver Forschung konnte die Anwendung dieser Techniken in einer Demonstrationsanlage bisher nicht gezeigt werden. Im 7. Rahmenforschungsprogramm sollen deswegen die Partitionierungs- und Transmutationstechniken weiterentwickelt werden und die Machbarkeit in einer solchen Demonstrationsanlage nachgewiesen werden /FP7 07/. Eine großtechnische Anwendbarkeit dieser Entsorgungsstrategie ist also nach wie vor offen.

Bei den derzeit diskutierten Lösungen im Bereich von P&T sind folgende Kritikpunkte zu sehen:

- Selbst ein ideales Funktionieren dieser Techniken würde die Menge an Abfall und an langlebigen Bestandteilen nur reduzieren, aber nicht vollständig beseitigen. Denn durch die angedachten kernphysikalischen Prozesse ist keine vollständige Umwandlung der verschiedenen langlebigen Isotope erreichbar. Günstigstenfalls wird mit einer Reduktion auf ein Zehntel der sonst endzulagernden langlebigen Schadstoffanteile gerechnet.
- Da die verbleibenden Anteile an langlebigen Isotopen weiterhin gefährlich bleiben, bleibt eine Endlagerung für diesen Anteil erforderlich. Wenn man sich für P&T entscheiden würde, wären also die Einrichtungen zur Durchführung der P&T und ein Endlager nötig. Dabei ist nicht zu erwarten, dass Aufwand und Kosten für das Endlager durch P&T wesentlich verringert werden, da ein kleineres Volumen bei einem Endlager nicht zu einer merklichen Kostenersparnis beim Auffahren und beim Betrieb des Endlagers führt.
- Die bisher bekannten Transmutationsprozesse wandeln nur einen kleineren Teil des eingesetzten Materials um. Deshalb müssen immer mehrere Zyklen durchgeführt werden: bereits umgewandelte Stoffanteile sind abzutrennen, noch nicht umgewandelte Anteile sind für den erneuten Einsatz aufzubereiten und dann wieder

zu bestrahlen. Ein einzelner solcher Zyklus benötigt bereits viele Jahre. Dies bedingt insgesamt einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten, über den die P&T-Technologie kontinuierlich eingesetzt werden müsste.

- Die notwendigen Anlagen existieren bisher nicht, z.T. noch nicht einmal als Prototypanlagen. Der Nachweis der großtechnischen Realisierbarkeit ist mit den heutigen Kenntnissen nicht führbar. Die Umsetzung in einem absehbaren Zeitraum (z. B. eine Generation) ist selbst bei erheblichem Forschungs- und Entwicklungsaufwand, der erst noch geleistet werden müsste, höchst fraglich.
- Die Einrichtungen eines P&T Zyklus würden großtechnische Nuklearanlagen in der Dimension heutiger Wiederaufarbeitungsanlagen, Brennstoffertigungsanlagen und Reaktoren erfordern, die Jahrzehnte verfügbar sind. Wegen des hohen radioaktiven Inventars dieser Anlagen gibt es auch entsprechende Risiken für größere und kleinere Unfälle. Die Errichtung der P&T Anlagen erfordert Finanzmittel im Bereich vieler Milliarden Euro. Auch die Gewährleistung der Sicherheit der Anlagen über den erforderlichen Zeitraum erfordert im Vergleich zur bloßen Lagerung über den gleichen Zeitraum sehr viel größeren Aufwand und ist dazu mit vergleichsweise höheren Risiken verbunden.
- Bei Prozessen, die eine Zerlegung der Brennelemente in ihre einzelnen chemischen Bestandteile möglich machen, wie dies bei P&T zur Reduzierung der Radiotoxizität vorgesehen ist, sind immer Proliferationsrisiken zu beachten. Insbesondere die Abtrennung von Plutonium oder anderen Aktiniden mit Atomwaffenpotential bereitet Probleme in Bezug auf möglichen Missbrauch durch Terroristen. Eine direkte Endlagerung der Brennelemente ist demnach viel proliferationsresistenter als deren Wiederaufarbeitung in Partitionierung und Transmutation z.B. /LYM 08/. Die Entsorgungsstrategie P&T weist hier also Nachteile gegenüber einer direkten Endlagerung auf.
- Die nötigen technischen Schritte (Wiederaufarbeitung, Target-Fertigung, Target-Bestrahlung) sind wiederum mit hohem zusätzlichem Abfallaufkommen, mit erheblichen Emissionen radioaktiver Stoffe und mit hohen Strahlenbelastungen beim Personal verbunden, so dass sich auch aus ökologischer Sicht keine nennenswerten Vorteile ergeben.
- Die Entwicklung wesentlicher Stufen des Verfahrens zur Anwendungsreife wird Jahrzehnte intensiver Forschung bedürfen. Der nötige Forschungsaufwand bindet Mittel, die anderweitig eingesetzt wesentlich kurzfristiger zu Erfolgen führen würden.

Die Aussichten, dass zukünftige neuartige Verfahren das Abfallproblem lösen oder auch nur nennenswert verringern könnten, ist nach sechs Jahrzehnten Forschung auf diesem Gebiet und bei den derzeit diskutierten Lösungsansätzen vage. Die geringen Erfolgsaussichten sprechen daher kaum dafür, mit Hinweis auf mögliche neue wissenschaftliche und technische Erkenntnisse die Entsorgung der radioaktiven Abfälle für Jahrzehnte auf die lange Bank zu schieben. Die P&T-Strategie würde auch der Forderung zuwiderlaufen, dass die Realisierung einer Lösung für die radioaktiven Abfälle von der Generation anzustreben ist, die den wirtschaftlichen Nutzen aus den Reaktoren hatte, aus denen die Abfälle stammen.

### **3.2 Entsorgungsstrategien im Meer**

Die hauptsächlich diskutierte und angewendete Entsorgungsstrategie im Meer ist bzw. war die Versenkung der verpackten oder unverpackten radioaktiven Abfälle. Dahinter steckte die Idee, die Schadstoffe möglichst rasch in den großen Wassermengen der Weltmeere zu verdünnen und die Stoffe so weiträumig zu verteilen. Aufgrund der durch die Verdünnung verringerten Konzentration sollen die Schädigungsmöglichkeiten reduziert sein. Werden bei dieser Mischung Grenzwerte der Aktivitätskonzentration unterschritten, kann zumindest juristisch gesehen, nicht mehr von einer Gefährdung gesprochen werden. Angewendet wurde die Meeresversenkung insbesondere für schwachradioaktive Abfälle.

Die erste Meeresversenkung wurde von den USA im Jahr 1946 durchgeführt. Bis in die 80er Jahre wurden radioaktive Abfälle von mehreren kernenergienutzenden Ländern (Mitglieder der OECD) im Meer versenkt. Dazu wurden in Fässer oder Container verpackte Abfälle im Wesentlichen im nordöstlichen und nordwestlichen Atlantik und im nordöstlichen und westlichen Pazifik von Schiffen abgeworfen /CST 99/. 90 % des so entsorgten Abfallvolumens lagern in 2 – 4 km Tiefe in drei Gebieten, die sich weit entfernt von Küsten und aktiven Plattenrändern befinden. Es erfolgt keinerlei Überwachung oder eine Kontrolle des Zustands der Abfallgebilde.

Im Jahr 1972 wurde die so genannte Londoner Dumping Konvention („Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter“) verabschiedet, die die Versenkung hochradioaktiver Abfälle verbot. Im Rahmen von IAEA Regelungen /IAE 81/ war die Versenkung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle weiterhin erlaubt. Die letzte bekannte Meeresversenkung fand 1982 statt. Im Jahr 1983 wurde ein Moratorium der Unterzeichnerstaaten der Londoner Konvention in Kraft ge-

setzt. Im Jahr 1993 wurde die Konvention so erweitert, dass die Versenkung aller Arten radioaktiver Abfälle im Meer verboten wurde /LC 93/.

Die Londoner Konvention verbietet auch Varianten der Einlagerung radioaktiver Abfälle im Meeresboden. So gab es in den 70er Jahren Forschungsprogramme, die die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Bohrlöchern im Meeresboden untersuchten. In den 80er Jahren wurden Untersuchungen mit so genannten „Free-Fall Penetrators“, das sind torpedoförmige und einige Tonnen schwere Behälter, die sich in den Meeresboden bohren sollten, durchgeführt /PAG 88/. Diese Konzepte erwiesen sich als sehr teuer und technisch nicht ausgereift.

Als weitere Variante der Einlagerung radioaktiver Abfälle im Meeresboden wurde die Einbringung in Subduktionszonen diskutiert. Bei der Subduktion schiebt sich eine Lithosphärenplatte unter eine andere und wird dabei im Erdmantel resorbiert. Der Marianengraben, ein Tiefseegraben im Pazifik, ist eine solche Subduktionszone. Die radioaktiven Abfälle sollten z. B. in den Marianengraben verkippt werden und mit der subduzierenden Platte im Erdmantel resorbiert werden. Tatsächlich ist die Vorhersagbarkeit der geologischen Abläufe im Detail gering und damit die Vorhersagbarkeit des Weges, den die radioaktiven Abfälle nehmen, ebenfalls gering. Da es sich auch hierbei um eine Versenkung im Meeresboden handelt, ist auch dieses Verfahren durch die Londoner Konvention /LC 93/ untersagt.

Ingesamt spricht gegen Verfahren, die auf einer Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen im Meer basieren, dass

- eine gänzlich unschädliche Konzentration radioaktiver Stoffe, ähnlich wie auch bei nicht-radioaktiven kanzerogenen Stoffen, nicht angegeben werden kann,
- bei Verdünnung in Umweltmedien auch die kollektive Dosis durch eine kontinentweite oder weltweite Verbreitung betrachtet werden muss und dies ebenfalls zu stochastischen Schäden führt,
- die Verdünnung durch verschiedene Anreicherungseffekte (z.B. Anreicherung in Sedimenten, Anreicherung durch biologische Prozesse und in der Nahrungskette) aufgehoben werden kann, wobei in der Natur durchaus Anreicherungsfaktoren vom 1.000-fachen und mehr beobachtet werden können,
- die Rücknahme einer später als unerwünscht bewerteten Verdünnung überaus aufwändig sein kann und oft wenig erfolgreich verläuft (praktische Irreversibilität).

Gegen alle Arten von Entsorgungsstrategien im Meer spricht, dass

- das Wissen über die Verhältnisse im und auf dem Meeresboden gering sind. So sind Auswirkungen der radioaktiven Strahlung und der Wärmeentwicklung auf Meeressedimente und Tiefseeorganismen, Diffusionsraten, Verbreitungswege und –geschwindigkeiten von Radionukliden sowie das Korrosionsverhalten der Abfallbehälter unter Tiefseemilieubedingungen weitgehend unbekannt.
- die Last der radioaktiven Entsorgung auf die internationale Gemeinschaft abgewälzt wird. Die Hochsee ist internationales Gemeinschaftseigentum. Vielen Ländern, darunter viele, die keine Nutznießer der Kernenergie sind, dient die See als wirtschaftliche Lebensgrundlage.
- Störfälle nicht beherrschbar sind. Beispielsweise bei Transportunfällen oder Behälterabstürzen verloren gegangene Ladungen lassen sich nicht mehr bergen und verteilen sich unkontrolliert in den Ozeanen.
- für eine dauerhaft sichere Entsorgung ein hoher technischer Entwicklungsaufwand besteht. Eine Aussage zur technischen Machbarkeit und den damit verbundenen Kosten ist derzeit nicht möglich.

### **3.3 Entsorgungsstrategien mit Überwachung**

Unter Entsorgungsstrategien mit Überwachung ist zu verstehen, dass der Schutz vor den Gefahren der radioaktiven Abfälle durch fortdauernde Aufsicht durch Menschen und daraus resultierenden Erhaltungsmaßnahmen gewährleistet wird. Auf passive Barrieren wie z. B. den Verschluss eines Endlagers in einem undurchlässigen Wirtsgestein wird dabei verzichtet. Solche Entsorgungsstrategien werden teilweise auch aktive Entsorgungsstrategien oder „Hüte-Konzepte“ genannt. Entsorgungsstrategien mit Überwachung wurden in verschiedenen Ländern in unterschiedlicher Ausgestaltung untersucht /GÖK 01/. So gab und gibt es Überlegungen zu Lagerung auf der Erdoberfläche oder in zugänglichen unterirdischen Lagern sowohl oberflächennah als auch tief. Die radioaktiven Abfälle bleiben dabei für die Überwachung zugänglich. Die Überwachungsphase sollte meist einige hundert Jahre umfassen. Danach soll sich eine andere Entsorgungsstrategie wie die passive geologische Endlagerung anschließen. Bei einigen Hütekonzepten setzt sich die Überwachung durch Menschen aber auch über viele Jahrtausende fort und soll durch eine Art Priesterschaft gewährleistet werden.

Als großer Vorteil einer Entsorgungsstrategie mit Überwachung über einen gewissen Zeitraum wird in der bestehen bleibenden Verfügbarkeit des Abfalls gesehen. Bei entsprechenden wissenschaftlichen oder technischen Fortschritten könnten die Abfälle zu einem späteren Zeitpunkt weiter genutzt werden oder durch neu entwickelte Verfahren unschädlich gemacht werden oder als dritte Variante fortschrittlicheren Endlagerungsmethoden zugeführt werden. Ein weiterer Vorteil ist zumindest bei den Oberflächen-Endlagern in der einfacheren Errichtung und den damit verbundenen geringeren Investitionskosten zu sehen. Zudem führen die Optionen, die Abfälle zukünftigen fortschrittlicheren Methoden zuführen zu können und die Möglichkeit Maßnahmen bei Störfällen ergreifen zu können, oftmals zu höherer Akzeptanz in der Bevölkerung.

Insbesondere für hochradioaktive bzw. wärmeentwickelnde Abfälle wird meist eine Entsorgungsstrategie mit Überwachung nur über einen befristeten Zeitraum verfolgt. Bei einer unbefristeten Überwachung wäre die Überwachung über einen Zeitraum von 1 Million Jahre zu gewährleisten. Die Kritikpunkte begründen sich vor allen Dingen aus den auch mit einigen hundert Jahren sehr langen Überwachungszeiträumen:

- Die gesellschaftlichen und politischen Entwicklungen und Umwälzungen sind über einige hundert Jahre nicht absehbar. Viele Beispiele aus der Geschichte zeigen, dass hoch entwickelte gesellschaftliche Systeme mit sehr lange gut funktionierenden Organisationsstrukturen aus den verschiedensten Gründen letztendlich doch zusammenbrachen oder zumindest Perioden aufwiesen, in denen keine stabilen gesellschaftlichen Verhältnisse vorlagen.
- Zugängliche Endlagereinrichtungen sind Angriffen (z. B. Krieg, Terror) leichter ausgesetzt als ein Endlager in einer tiefen geologischen Formation. Auch durch den Menschen verursachte Unfälle können zur Zerstörung der Sicherheitssysteme und zur Freisetzung von radioaktivem Abfall führen.
- Der Schutz vor missbräuchlichem Zugriff auf die radioaktiven Abfälle (Proliferation) ist aufgrund der Zugänglichkeit über einen langen Zeitraum schwieriger zu gewährleisten.
- Die Überwachung durch menschliche Institutionen ist über viele Generationen hinweg erforderlich. Die Lagereinrichtungen (z. B. Gebäude, Bergwerkseinrichtungen, Infrastruktur, Messtechnik etc.) sind instand zu halten, Neubauten bzw. Ersatzbauten werden erforderlich. Ebenso sind die Behälter zu warten und zu reparieren. Gegebenenfalls sind die Abfälle umzupacken. Dies erfordert auch



für zukünftige Generationen einen hohen organisatorischen und finanziellen Aufwand, der ethisch nicht vertretbar ist.

- Werden Lagereinrichtungen und Behälter nicht gewartet, kommt es zu Gebäudeverfall und Behälterkorrosion. Radioaktive Abfälle können sich rasch über den Grundwasserpfad in der Biosphäre ausbreiten und führen zu einer unmittelbaren Gefährdung des Menschen.
- Mit zunehmendem Überwachungszeitraum sind die Folgen von zukünftigen klimatischen Veränderungen wie beispielsweise der Anstieg des Meeresspiegels oder eine großflächige Vergletscherung zu berücksichtigen. Solche Erscheinungen haben in der Vergangenheit innerhalb von wenigen tausend bis zehntausend Jahren das Gesicht der Erdoberfläche massiv verändert.

Die Kritikpunkte zeigen, dass ein plausibler Nachweis der Funktionsfähigkeit der aktiven Schutzsysteme für die erforderliche Zeitdauer nicht geführt werden kann. Die erreichbare Zuverlässigkeit der Aussagen reicht an naturwissenschaftlich fundierte Prognosen für das passive Schutzsystem eines geologischen Endlagers nicht heran.

### **3.4 Sonstige Entsorgungsstrategien**

In diesem Kapitel werden weitere Entsorgungsstrategien diskutiert, die aber bereits in frühen Phasen der Erforschung als realisierbare Option ausgeschlossen wurden. Dazu zählen der Transport von radioaktiven Abfällen in das Weltall und die Endlagerung im ewigen Eis.

#### **Transport in das Weltall**

Der Transport radioaktiver Stoffe in das Weltall wird auch heute noch insbesondere von Laien immer wieder diskutiert, da mit dieser Strategie die radioaktiven Abfälle endgültig aus der Biosphäre entfernt werden könnten. Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre wurden laut Studien der NASA Überlegungen angestellt, wie mittels der space shuttle Technologie radioaktive Abfälle im Weltall entsorgt werden könnten /CHA 89/. Im Ergebnis erwies sich der technische und finanzielle Aufwand sowie die Unfallgefahren beim Flug in den Weltraum als inakzeptabel hoch. Entsprechend spielt diese Entsorgungsstrategie in der Fachwelt keine Rolle mehr.

Folgende Kritikpunkte sind im Einzelnen zu nennen:

- Das Risiko einer Explosion in der Startphase des Raumfahrzeugs ist relativ hoch (z. B. Challenger im Januar 1986). In der Folge könnten durch die verteilten radioaktiven Stoffe aus der Nutzlast des Raumfahrzeuges ganze Regionen radioaktiv kontaminiert und für lange Zeit unbewohnbar werden. Ein solches Szenario könnte auch durch den Wiedereintritt eines falsch gelenkten Abfallbehälters in die Erdatmosphäre ausgelöst werden. Dieses Risiko ist ethisch nicht vertretbar.
- Die Kosten für den Weltraumtransport sind sehr hoch. Zudem ist eine hohe Anzahl an Flügen erforderlich (geschätzt 10 Flüge pro Tonne radioaktive Abfälle). Unter diesen Randbedingungen könnte nur ein Bruchteil der hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle in den Weltraum transportiert werden. Dies bedeutet keine vollständige Entsorgung, d. h. weitere Entsorgungsoptionen sind erforderlich.

Als weiteres Argument gegen eine Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltall kann der so genannte Weltraumvertrag der Vereinten Nationen /UNT 02/ interpretiert werden. Darin einigten sich die Unterzeichner darauf, bei ihren Forschungstätigkeiten eine schädliche Kontamination des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper zu vermeiden (Article IX).

### **Endlagerung im Eis**

Die Endlagerung im Eis wurde ausschließlich für wärmeentwickelnde Abfälle diskutiert. In Frage kamen das einige 1000 m dicke Eis auf dem Festland der Antarktis oder Grönlands. Als Vorteil dieser Entsorgungsstrategie wurde die Abgeschiedenheit dieser Regionen angesehen. Außerdem wurde angenommen, dass diese Regionen auch zukünftig keiner intensiven Nutzung durch den Menschen unterliegen.

Die Endlagerung im Eis sah vor, den Abfallbehälter in ein 50 bis 100 m tiefes Bohrloch einzustellen. Durch die sich aus dem Abfall entwickelnde Wärme sollte der Behälter das Eis schmelzen und so bis auf den Untergrund sinken /CST 99/. Technische Varianten wie das zeitweilige Aufbocken der Abfallgebinde bzw. das Verankern mit der Erdoberfläche sollten das Einschmelzen um einige hundert bis tausend Jahre verzögern. So sollte die Rückholbarkeit der Abfälle für eine gewisse Zeit möglich sein.

Diese Entsorgungsstrategie wird weltweit von keinem Land verfolgt. Bereits im Jahr 1959 wurde der Antarktisvertrag mit zahlreichen Folgeverträgen geschlossen /ANT 59/, der eine Entsorgung radioaktiver Abfälle untersagt. Dänemark hat für das unter seiner

Verantwortung stehende Grönland ebenfalls ein entsprechendes Verbot ausgesprochen.

Folgende Kritikpunkte sprechen ebenfalls gegen eine Entsorgungsstrategie im „ewigen Eis“:

- Die klimatischen Veränderungen über den Zeitraum von 1 Million Jahre sind nicht vorhersehbar. Bei einem großflächigen Abschmelzen des Eises könnte es zur Freilegung der Abfälle und in der Folge zu einer Freisetzung des radioaktiven Abfalls in die Biosphäre kommen.
- Die natürlichen Bedingungen sind zu wenig bekannt, so könnten z. B. die Bewegungen des Eises, einen Transport der Abfallbehälter zum offenen Ozean zur Folge haben.
- Die erforderliche Technik ist nicht entwickelt. Dazu gehören Abfallbehälter, die im Eis beständig sind und den Örtlichkeiten und der Witterung angepasste Transport- und Einlagerungseinrichtungen. Auch müssen Störfälle in diesen entlegenen Regionen beherrschbar sein.
- Wegen der weiten Transportstrecken und den unwirtschaftlichen Bedingungen ist zudem mit hohen Kosten zu rechnen.

#### **4 Internationale / multinationale Entsorgungsstrategien**

In der gesellschaftlichen Diskussion in Deutschland spielt der Wunsch, radioaktive Abfälle möglichst weit von dem eigenen Lebensraum / der Heimatregion fern zu halten, eine wichtige Rolle. Dabei ist nicht relevant, dass auch in anderen Weltgegenden keine geeigneteren Techniken oder keine geeigneteren geologischen Formationen zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen zur Verfügung stehen. Für „weit weg“ stehen Vorschläge wie die radioaktiven Abfälle in heute unbewohnte Weltgegenden oder ohnehin kontaminierte Landstriche (z.B. ehemalige Atomtestgelände) zu exportieren. Diese Sichtweise berücksichtigt auch nicht, dass sich die heutigen Bedingungen über den erforderlichen Zeitraum von 1 Million Jahre verändern.

In Fachkreisen spielen der Export und gegebenenfalls der Import radioaktiver Abfälle bei Vorschlägen, internationale bzw. multinationale Endlager zu schaffen, eine Rolle. Die Idee eines multinationalen Endlagers wurde im Hinblick auf Länder mit geringen Beständen an radioaktiven Abfällen entwickelt. Als Entsorgungsstrategie ist bei solchen Vorschlägen nur die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen relevant. So sprach am 3. November 2003 Dr. Mohammed ElBaradei, Generaldirektor der International Atomic Energy Agency (IAEA), vor der UN Generalversammlung /BAR 03/:

*„We should ... consider multinational approaches to the management and disposal of spent fuel and radioactive waste. Over 50 countries currently have spent fuel stored in temporary locations, awaiting reprocessing or disposal. Not all countries have the appropriate geological conditions for such disposal – and, for many countries with small nuclear programs, the financial and human resources required for the construction and operation of a geological disposal facility are daunting.“*

*(Übertragung: Wir sollten multinationale Ansätze für die Behandlung und Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen in Erwägung ziehen. Über 50 Länder haben gegenwärtig abgebrannte Brennelemente zeitlich befristet in Einrichtungen bis zur Wiederaufarbeitung oder Endlagerung gelagert. Nicht alle Länder haben geeignete geologische Bedingungen für die Endlagerung – und für viele Länder mit kleinen Nuklear-Programmen sind die finanziellen und menschlichen Ressourcen, die die Konstruktion und der Betrieb eines geologischen Endlagers erfordern, gewaltig.)*

Die IAEA hat bereits in den 1970er und 1980er Jahren und auch später immer wieder Vorschläge zu internationalen Endlagern entwickelt, die aber keine weitere Berücksichtigung fanden. Ihre Ergebnisse wurden verschiedentlich veröffentlicht. Eines der neueren Dokumente ist das TECDOC 1413 /IAE 04/. Als wichtigster Vorteil eines multinationalen Endlagers wird ausgeführt, dass auch die Länder, die aus den verschiedensten Gründen nicht in der Lage sind ein eigenes Endlager in einem absehbaren Zeitraum einzurichten, ihre radioaktiven Abfälle sicher entsorgen. Für ein multinationales Endlager muss natürlich der heute übliche hohe Sicherheitsstandard eingehalten werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil wird in der Kostenersparnis gesehen. Da die Kosten für ein Endlager bis zu einem gewissen Grad unabhängig von seiner Größe sind (z. B. Kosten für Standorterkundung, Planung und Infrastruktur), ergeben sich bei der Errichtung eines multinationalen Endlagers erhebliche Einsparmöglichkeiten gegenüber der Errichtung mehrerer kleiner Endlager. Für das Standortland (das Land, das das Endlager beherbergt) können sich zusätzliche finanzielle Vorteile beispielsweise durch Ausgleichszahlungen der Nutzerländer (die Länder, die das Endlager mitnutzen) ergeben.

Auch in der Europäischen Union werden multinationale Endlager insbesondere als gangbarer Weg für Länder mit geringer Kernenergienutzung angesehen. So ist im Entwurf der Euratom Richtlinie /EUR 02/ die Empfehlung enthalten, dass Mitgliedstaaten sich die Möglichkeit des Im- und Exports radioaktiver Abfälle offen halten sollen. Zudem beteiligte sich die Europäische Kommission an dem Forschungsprojekt „Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories“ (SAPIERR), das grundlegende Fragen zur Machbarkeit bearbeitet. Nach den Ergebnissen gibt es in der EU zumindest keine grundlegenden rechtlichen Hemmnisse /BOU 06/. Europäische Kommission und IAEA betonen aber dabei, dass kein Land dazu gezwungen werden kann, die radioaktiven Abfälle eines anderen Landes anzunehmen /IAE 97/. In /CHA 08/ wird dargestellt, wie in einem gestuften transparenten Verfahren unter Einbeziehung der Öffentlichkeit die Standortauswahl für ein multinationales Endlager in Europa durchgeführt werden könnte.

Aktivitäten, die ein multinationales Endlager favorisieren, sind aber in den Ländern der Europäischen Union nicht erkennbar. Einige Länder verfolgen zweigleisig sowohl internationale als auch nationale Programme, andere wie England lassen ihre Entscheidung noch offen. Die Kernenergie nutzenden Länder Finnland, Frankreich, Deutschland und Schweden haben sich auf rein nationale Projekte festgelegt. Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle soll innerhalb der Landesgrenzen erfolgen. Gleichzeitig wurde

auch durch Gesetz bzw. über einen politischen Beschluss festgelegt, dass der Import ausländischer Abfälle zum Zwecke der Endlagerung verboten ist.

Neben den beschriebenen Vorteilen werden die wichtigsten Kritikpunkte nachfolgend genannt:

- Jedes Land ist sowohl ethisch als auch rechtlich verantwortlich für die von ihm erzeugten radioaktiven Abfälle. Ein Land wird dieser Verantwortung nicht mehr voll gerecht, wenn es seine radioaktiven Abfälle in einem anderen Land entsorgt.
- Die Entsorgungssicherheit ist eingeschränkt. Ein Endlager muss für die gesamte Laufzeit der Kernenergieprogramme der einzelnen Länder zur Verfügung stehen. Dies umfasst mindestens einige Jahrzehnte zuzüglich der Zeitspanne zur Standortfindung, Planung, Genehmigung und Errichtung des Endlagers. Durch politische Veränderungen kann das Standortland während der Errichtungsphase z. B. die Genehmigung verweigern oder zu einem späteren Zeitpunkt die Annahme radioaktiver Abfälle einschränken oder einstellen. In der Folge muss möglicherweise ein neues Endlagerprogramm begonnen werden.
- Die Nutzung eines internationalen Endlagers hat ein hohes Maß an Transporten von hochradioaktiven Abfällen zur Folge, deren Risiken das Standortland, das Nutzerland und gegebenenfalls weitere Transitländer betreffen. Es müssen lange Strecken zurückgelegt werden und wahrscheinlich mehrere Verkehrsmittel (Schiff, Schiene, LKW) benutzt werden. Die finanziellen Aufwendungen dafür sind auch wegen der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen sehr hoch.
- Die lokale Akzeptanz für die Errichtung eines nationalen Endlagers zu erhalten, ist eine große Herausforderung. So sind schon einige Endlagerverfahren am Widerstand der Bevölkerung gescheitert (z. B. das Wellenberg-Verfahren in der Schweiz und das Sellafield-Verfahren in England). Ein internationales Endlager würde eine deutlich größere Belastung für die lokale Bevölkerung bedeuten (längere Betriebszeiten, mehr Transporte, höhere Risiken für Störfälle), entsprechend ist eine Zustimmung wahrscheinlich viel schwerer zu erreichen. In Ländern mit nationalem Endlagerprogramm ist derzeit eine wichtige Bedingung für die Akzeptanz der Bevölkerung, dass nur die eigenen Abfälle angenommen werden (z. B. Finnland). Importe von radioaktiven Abfällen für die Endlagerung aus anderen Ländern werden von der Öffentlichkeit abgelehnt.

## 5 Zusammenfassung und Bewertung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedenartige Entsorgungsstrategien vorgestellt, die heute unterschiedliche Relevanz haben. Dem gegenüber steht die geologische Endlagerung, die heute überwiegend von den meisten Ländern bevorzugt wird. Zusammengefasst resultieren aus den diskutierten Vor- und Nachteilen der verschiedenen Strategien folgende Bewertungen:

1. Das Verfahren der Partitionierung und Transmutation, das die radioaktiven Stoffe durch Umwandlung in kürzerer Zeit zum Abklingen bringen soll, ist technisch und wirtschaftlich aufwändig, die Erfolgsaussichten sind unklar, die Realisierung erfordert einen sehr großen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, die Behandlung dauert sehr lange und auch im günstigsten Fall ersetzen sie nicht die Endlagerung.
2. Entsorgungsstrategien im Meer werden heute international geächtet. Sie gefährden die Lebensqualität vieler Völker, die vom Meer in vielerlei Hinsicht abhängig sind.
3. Entsorgungsstrategien mit Überwachung und Nachsorge von einigen hundert Jahren und mehr sind mit einem hohen Risiko verbunden und verschieben einen Teil der Verantwortung in die ferne Zukunft und damit auf nachfolgende Generationen. Für die langfristige Isolation kommen ausschließlich passiv wirkende Methoden in Betracht, die aktiver Eingriffe nicht bedürfen.
4. Entsorgungsstrategien wie die Entsorgung in den Weltraum oder die Endlagerung im ewigen Eis haben zu viele Unwägbarkeiten im Hinblick auf die Sicherheit, die technische Umsetzbarkeit und die Kosten. Sie bieten keine Alternativen zu der ausgereiften Technik der Entsorgung in tiefen geologischen Formationen.
5. Internationale bzw. multinationale Endlager sollen Kostenvorteile und einen international durchgängig hohen Sicherheitsstandard gewährleisten. Dem gegenüber stehen eine eingeschränkte Entsorgungssicherheit für die Nutzerländer, hohe Transportkosten, absehbare Akzeptanzprobleme und die Frage der ethischen Vertretbarkeit, einem Land die Lasten der Endlagerung aufzubürden. Welches die günstigere Option ist, ist sicherlich von Land zu Land unterschiedlich zu beurteilen. Für Deutschland als einem Land mit einem größeren Kernenergieprogramm sind derzeit keine offensichtlichen Vorteile für ein internationales Endlager erkennbar.

Insgesamt ergibt sich, dass für den langfristigen Verbleib der vorhandenen hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle derzeit keine andere verantwortbare und realisierbare Strategie existiert als die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen.



## 6 Literatur

Hinweis: Dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur.

- /ANT 59/ The Antarctic Treaty, 01. December 1959 Washington, entered into force 23. June 1961; Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty, 1991
- /ATG 08/ Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 215)"
- /BAR 03/ ElBaradei, M.: Statement to UN General Assembly 3/11/03
- /BMU 06/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Gemeinsames Abkommen für die Sicherheit der Behandlung von abgebrannten Brennelementen und die Sicherheit der Behandlung von radioaktiven Abfällen – Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die zweite Überprüfungstagung im Mai 2006,- Berlin 2005
- /BOU 06/ Boutellier, C., McCombie, C.: „Zu den politischen und rechtlichen Bedingungen der Errichtung eines internationalen Lagers für hochradioaktive Abfälle“, Europäischen Umwelt- und Planungsrecht, März 2006
- /CHA 89/ Chapman, N. McKinley, I.: „The Geological Disposal of Nuclear Waste“, John Wiley & Sons, Great Britain, 1989
- /CHA 08/ Chapman, N., McCombie, C.: „Staged siting strategy“, Nuclear Engineering International, Mai 2008
- /CST 99/ Committee on Science and Technology: Science und Technology Third Report, House of Lords, März 1999
- /EUR 02/ European Commission: „Draft Proposal for a Council (Euratom) Directive on the management of spent nuclear fuel and radioactive waste“, Brüssel 2002

- /EUR 08a/ Projektseite des Forschungsvorhabens EUROPART, abrufbar unter <http://www.europart-project.org> (Stand 23.07.2008)
- /EUR 08b/ Projektseite des Forschungsvorhabens EUROTRANS, abrufbar unter <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/Start.html> (Stand 23.07.2008)
- /FP7 07/ Europäische Union: Seventh Research Framework Programme (FP7) Partitioning and Transmutations, abrufbar unter [http://cordis.europa.eu/fp7/euratom-fission/p-and-t\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/euratom-fission/p-and-t_en.html) (Stand 23.7.2008)
- /GEM 97/ Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung)
- /GÖK 01/ Appel, D., Kreusch, J., Neumann, W.: „Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle“, Gruppe Ökologie, Hannover, Mai 2001
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefengeologischen Formationen – Entwurf der GRS - , Köln 2007.
- /IAE 81/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Packaging of radioactive Waste for Sea Disposal, IAEA-TECDOC-240, Wien 1981
- /IAE 95/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, Vienna 1995
- /IAE 97/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, 1997
- /IAE 04/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Developing multinational radioactive waste repositories: Infrastructural framework and scenarios of cooperation, IAEA-TECDOC-1413, Wien, Oktober 2004

- /LC 93/ Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter (London Convention), Dezember 1972  
Banning of dumping of low-level radioactive wastes; phasing out of dumping of industrial wastes; banning of incineration at sea of industrial wastes - amendments 1993
- /LYM 08/ Lyman, E., von Hippel, F. N.: Reprocessing Revisited: The International Dimensions of the Global Nuclear Energy Partnership, abrufbar unter [http://www.armscontrol.org/act/2008\\_04/LymanVonHippel.asp](http://www.armscontrol.org/act/2008_04/LymanVonHippel.asp), 2008
- /NEA 06a/ Nuclear Energy Agency (NEA): Physics and Safety of Transmutation Systems - A Status Report, OECD. - Paris 2006
- /PAG 88/ Europäische Kommission: PAGIS Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste – Disposal in the Sub-seabed, EUR 11779 EN, 1988
- /RED 08/ Projektseite des Forschungsvorhabens Red-Impact.- abrufbar unter: <http://www.red-impact.proj.kth.se/index.php> (Stand 23.07.2008)
- /RSK 02/ Reaktor-Sicherheitskommission / Strahlenschutzkommission (RSK/SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien Stellungnahme der Strahlenschutzkommission und der Reaktor-Sicherheitskommission, abrufbar unter <http://www.ssk.de/werke/volltext/2002/ssk0221.pdf>, Bonn 2002
- /RSK 08/ Reaktor-Sicherheitskommission / Strahlenschutzkommission (RSK/SSK): Stellungnahme zu den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, (Veröffentlichung in 2008 vorgesehen), Bonn, 2008,
- /STR 07/ "Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930)"
- /UNT 02/ United Nations: „United Nations Treaties and Principles on outer space“, New York, 2002

/WES 07/ Westlén, D.: Reducing radiotoxicity in the long run.-In: Progress in Nuclear Energy 49 (2007), S.597-605

## 7 Weiterführende Literatur

Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im Literaturverzeichnis.

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd – Abschlussbericht, Dezember 2002

Boutellier, C., McCombie, C.: Technical Report on Legal Aspects, SAPIERR report – deliverable No. 2, abrufbar unter [www.sapierr.net](http://www.sapierr.net), November 2004

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Ethische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle , Bonn 2003

Buser, M.: „Hüte“-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblick – Expertenbericht HSK, Villingen, 1998

Chapmann, N., McCombie, C., Stefula, V.: Possible Options and Scenarios of Regional Disposal and Future RTD Recommendations, SAPIERR report – deliverable No. 3, abrufbar unter [www.sapierr.net](http://www.sapierr.net), September 2005

Europäisches Parlament: Radioactive Waste Management: Resolution 1157

International Atomic Energy Agency (IAEA): Inventory of radioactive material entering the marine environment, Sea disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC 588, Wien 1991

International Atomic Energy Agency (IAEA): Technical, institutional and economic factors important for developing a multinational radioactive waste repository, IAEA-TECDOC-1021, Wien 1998

International Atomic Energy Agency (IAEA): Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management, Technical Report Series No. 435, Vienna 2004

International Atomic Energy Agency (IAEA): Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle, Expert Group Report submitted to the Director General of the IAEA, Februar 2005

Kirchner, A.: The Destructive Legacy of the Cold War – The Dumping of radioactive waste in the Arctic – European Environmental Law Review No. 9, Februar 2000

Nuclear Energy Agency (NEA): Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation – Eighth Information Exchange Meeting, Las Vegas, Nevada, USA, 9-11-November 2004

Nuclear Energy Agency (NEA): French R&D on Partitioning and Transmutations of Long-Lived Radionuclides – An International Peer Review of the 2005 CEA Report, 2006.

Stefula: Inventory of Radioactive Wastes, SAPIERR report – deliverable No.1, abrufbar unter [www.sapierr.net](http://www.sapierr.net), September 2004

Stefula: SAPIERR Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories, Final Report Deliverable D-7, abrufbar unter [www.sapierr.net](http://www.sapierr.net), Januar 2006

Stoll, W.: The Global Nuclear Energy Partnership – A new US Approach to the fuel cycle.- In: atw 51Jg. (2006) Heft 4, April