

Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C:

**Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung
(Auftrag BMWi Az. IIA5 – 32507/7 vom 08.06.2015)**

Anmerkungen der AG 3 zu Kategorie C (K-Drs. 98 neu, K-Drs. /AG3-11 neu)

Angesichts des derzeitigen und absehbaren Wissensstandes und unter Angabe klarer Argumente sind Pfade aus dieser Kategorie nicht weiter zu verfolgen. Es ist zwar nicht vollständig auszuschließen, dass Pfade aus dieser Kategorie in Zukunft wieder diskutiert werden, z.B. aufgrund überraschender technischer Entwicklungen, aber hierfür sieht die AG 3 auch bei optimistischer Interpretation des Wissensstandes zurzeit keine Anzeichen.

1 Entsorgung im Weltraum (Pfad 1)

Die Option der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Weltraum wurde besonders in den 1970er und 1980er Jahren untersucht. Dafür sollte auch die Space-Shuttle-Technologie verwendet werden (CHAPMAN & MCKINLEY 1989). Federführend waren dabei Wissenschaftler der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und der Boeing Aerospace Corporation in den USA, die ihre Erkenntnisse in verschiedenen Berichten dokumentierten (BOEING 1981, ERDA 1976, RICE & PRIEST 1981, SCHNEIDER & PLATT 1974).

Die untersuchten Konzepte variierten von der Verbrennung der Abfälle durch die Sonne über den Transport aus dem Sonnensystem heraus bis hin zur Lagerung auf dem Mond oder in einem hohen Erdorbit. Die verschiedenen Optionen wurden bewertet und eine Rangfolge erstellt (BURNS et al. 1978, RICE & PRIEST 1981). Die Umlaufbahnen im inneren Sonnensystem (Erde, Mond) wie auch die Verbrennung in der Sonne wurden dabei schlechter bewertet als z. B. die Verbringung in eine Sonnenumlaufbahn, auf die Mondoberfläche oder ganz aus dem Sonnensystem heraus. Die Verbrennung in der Sonne würde die gefährlichen Substanzen zwar sicher zerstören, wäre aber extrem

kostspielig. Erd- und Mondumlaufbahnen wären für die Langzeitlagerung nicht stabil genug (RECHARD et al. 2011). Darüber hinaus wurde z.B. auch über Landemöglichkeiten auf Jupiter, Venus und Asteroiden nachgedacht (BOEING 1981).

Der Transport in den Weltraum wurde meistens als komplementäre Alternative zur Endlagerung auf der Erde betrachtet, die vornehmlich für kleinere Abfallmengen aus separierten langlebigen Nukliden angewendet werden sollte (AkEnd 2000).

Generell sind beim Transport in den Weltraum einige Grundprobleme zu lösen. Dazu gehört die Einrichtung von Rettungsfunktionen, die bei Fehlfunktionen während der Versendung zur Anwendung kommen können. Außerdem muss z.B. über eine stabile und haltbare Verpackung, die Wahrscheinlichkeit eines erneuten Zusammentreffens mit der Erde, Kosten, Orbitgeschwindigkeit, Antriebskraft und Startfenster nachgedacht werden.

Die kurzfristigen Risiken werden als hoch eingeschätzt, während langfristige Risiken bei korrekter Wahl und Beibehaltung der Umlaufbahn im Vergleich zur terrestrischen Lagerung als geringer angesehen werden (RECHARD et al. 2011). Abfallstoffe könnten in Form von Cermet einem hitzebeständigen Material aus Keramik und gesintertem Metall transportiert werden, um die Ausbreitung von Radionukliden im Fall eines Unfalls zu minimieren.

Die National Academy of Sciences der USA (NAS) stellt abschließend fest, dass die Option der Endlagerung im Weltraum nicht sicher und praktikabel sei und wohl auch nie sein werde (NAS 2001). Auch MCKINLEY et al. (2007) sprechen von einer Hochrisikotechnologie mit Kosten, die eine Größenordnung über denen der geologischen Endlagerung liegen. Die Wahrscheinlichkeit eines Raketenfehlstarts liege im Bereich von 1 bis 10 Prozent. Der gleichen Meinung sind auch MINHANS et al. (2008) sowie (DUTTON et al. 2004). Nach KRAUSKOPF (1988) ist zu dem zu berücksichtigen, dass auch die Separierung gefährlicher Substanzen ein aufwändiges und teures Verfahren ist, bei dem die Gefährdungsrisiken für das eingesetzte Personal nicht außer Acht gelassen werden sollten.

Ein weiterer Hinderungsgrund ist Artikel IX des sogenannten *Weltraumvertrages* (United Nations 2008), in dem sich die Unterzeichner verpflichten, dass bei Forschungsaktivitäten eine schädliche Kontamination des Weltraumes einschließlich des

Mondes und anderer Himmelskörper vermieden werden soll. Dieses am 10.10.1967 in Kraft getretene Übereinkommen ist für die Bundesrepublik Deutschland seit dem 10.02.1971 rechtsverbindlich (HOFMANN 1981).

2 Entsorgung im antarktischen oder grönländischen Inlandeis (Pfad 2)

Kurz nach Erscheinen eines Berichtes der National Academy of Sciences der USA zur geologischen Endlagerung radioaktiver Substanzen (NAS 1957) wurde auch eine Lagerung in Eis und Permafrost in Betracht gezogen und diskutiert. Das Konzept wurde in Studien von SCHNEIDER & PLATT (1974) sowie der ERDA (1976) entwickelt und anschließend bewertet (Department of Energy 1980).

Vorgeschlagen wurden Zonen in der Antarktis und Grönland, die beide von mächtigen Eiskappen bedeckt sind. Grönland ist im Vergleich zur Antarktis zwar für Schiffstransporte besser erreichbar und die vorherrschenden Umweltbedingungen sind weniger extrem, jedoch ergaben sich durch die Zugehörigkeit zu Dänemark und das Vorhandensein von Siedlungsbereichen erhebliche Schwierigkeiten für ein internationales Kooperationsvorhaben (ZELLER et al. 1976).

Aufgrund der hohen Transport- und Konditionierungskosten kamen vornehmlich hochaktive Abfallstoffe (HAW) in Betracht, die von einem 50-100 m tiefen Bohrloch aus durch ihre Wärmeentwicklung selbstständig bis zur Gesteinsoberfläche unterhalb des Eises absinken sollten, oder durch Verankerungen an der Oberfläche in einer bestimmten Position gehalten werden sollten (Committee of Science and Technology 1999, MCKINLEY et al. 2007). In den 1970er Jahren wurde angenommen, dass die Antarktis seit 200 Millionen Jahren auch während wärmerer Interglazialperioden ununterbrochen vereist war (ANGINO et al. 1976, BUDD et al. 1971). Die sichere Vorhersagbarkeit der klimatischen Bedingungen wurde schon zur damaligen Zeit aufgrund von fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnissen angezweifelt (BULL 1975). Neuere Erkenntnisse zeigen, dass die Antarktis bis vor 34 Millionen Jahren überwiegend eisfrei war und dass der atmosphärische CO₂-Gehalt ein wichtiger Faktor für die klimatische Entwicklung ist (DECONTO & POLLARD 2003, GIACCIO et al. 2015).

Nach Artikel 5 des am 23.06.1961 in Kraft getretenen Antarktisvertrags des *Antarctic Treaty Consultative Meeting* (ATCM 1959) und seinen zahlreichen Folgeverträgen ist die Lagerung radioaktiver Abfälle in der Antarktis bislang ausgeschlossen. Der Vertrag

galt zunächst 30 Jahre. Seit 1991 können Änderungen vorgenommen werden, wenn ein Konsultativstaat darum ersucht. Auch in Deutschland wurde Ende der 1950er Jahre über die Entsorgung in den polaren Eiskappen nachgedacht (PHILBERTH 1958, 1959), der Ansatz aber Anfang 1960 endgültig vom damaligen Bundesministerium für Atomfragen verworfen.

Insgesamt wurde die Idee der Lagerung in Eis und Permafrost wegen der anhaltenden globalen Erwärmung mit abschmelzenden Eismassen und der sehr empfindlichen arktischen und antarktischen Ökologie stark in Zweifel gezogen (WHIPPLE 2010). Annahmen von KUBO & ROSE (1973) zur Ausdehnung von Eisflächen, die über mehr als 10.000 Jahre existieren können, sind nach heutigem Erkenntnisstand nicht mehr haltbar. Es existieren zwar Eiskerne mit deutlich älterem Tiefeneis, jedoch ist das Auffinden von Regionen mit sehr altem stabilen Eis schwierig und die Fläche begrenzt (FISCHER et al. 2013).

Trotz z.T. patentierter Konzepte (VALFELLS 2002) überwiegen insgesamt die Kritikpunkte. Klimatische Veränderungen sind von entscheidender Bedeutung aber nicht sicher vorhersagbar (MCKINLEY et al. 2007). Es bestehen nach wie vor Wissenslücken z.B. zur Gletscherdynamik oder zu den (sicherheits-) technischen Voraussetzungen (MINHANS et al. 2008). Die Wirkung einer starken Hitzequelle im Eis oder an seiner Basis ist nur schwer abschätzbar (KRAUSKOPF 1988). Zusammen mit der logistischen und politischen Problematik hat das Verfahren einige ernstzunehmende Defizite, die einer Realisierung entgegenstehen.

3 Entsorgung in den Ozeanen (Pfad 3)

Obwohl nach wie vor eine gewisse Menge an Radionukliden durch atomare Wiederaufarbeitungsanlagen und Reaktoren in die Weltmeere gelangt, ist die Versenkung von festen radioaktiven Abfällen auf oder in den Meeresgrund durch mehrere internationale Abkommen untersagt. Dies beruht auf Zweifeln hinsichtlich des letztendlichen Verbleibs des Abfälle und der Einsicht, dass einige wenige Länder nicht die von allen geteilte marine Umwelt verunreinigen sollten (MCKINLEY 2007).

Im Jahr 1972 wurde die *London Dumping Convention (Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, LC72)* verabschiedet und ist seit 1975 in Kraft. Sie ist eine der ersten globalen Übereinkünfte zum Schutz der mari-

nen Umwelt vor menschlichen Eingriffen. Im Jahr 1996 wurde sie durch das *London Protocol*, das die *London Convention* letztendlich ersetzen soll, ergänzt und modernisiert (IMO 1972). Durch das *London Protocol* ist nicht nur die Entsorgung auf, sondern auch im Meeresboden und im tieferen Meeresuntergrund ausgeschlossen. Die einzige Ausnahme wäre ein von Land aus erreichbarer Bereich des Meeresbodens, was z.B. für den potentiellen Endlagerstandort bei Forsmark in Schweden zum Tragen kommen könnte. Hierbei ist die Rechtslage allerdings nicht eindeutig geklärt (CHAPMAN & McCOMBIE 2003). Weitere Abkommen und Konsensdokumente sind z.B. die *United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)* (United Nations 1982) oder die *Washington Declaration* (United Nations 1995). Die *OSPAR Convention* (OSPAR 1992) mit ihrer Erweiterung von 1998 hat zwar nur regionale Bedeutung für den Nordostatlantik und die Nordsee, gilt aber trotzdem als richtungsweisend für die internationale Politik (CHAPMAN & McCOMBIE 2003). Sie sieht bis zum Jahr 2020 eine weitere deutliche Reduktion der radioaktiven Einträge vor.

Wenn als Folge der Realisierung eines Vorhabens grenzüberschreitende Auswirkungen zu erwarten sind, muss u.U. eine grenzüberschreitende Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach *UNECE (United Nations Economic Commission for Europe)-Convention* durchgeführt werden (vgl. auch K-Mat 37 b). Dieses auch unter dem Namen *Espoo-Convention* bekannte Abkommen wurde z.B. beim Bau der *Nord-Stream-Pipeline* durch die Ostsee berücksichtigt, um den Ostseeanrainerstaaten frühzeitig Gelegenheit zur Teilnahme am UVP-Verfahren zu geben.

3.1 Versenkung im Meer unter Annahme des Verdünnungsprinzips (Pfad 3.1)

Die erste Meeresversenkung wurde von den Vereinigten Staaten von Amerika bereits im Jahr 1946 durchgeführt. Danach wurden noch bis in die 1980er Jahre von einigen kernenergienutzenden OECD Staaten (Organization for Economic Co-operation and Development), zu denen auch Länder ohne eigenen direkten Zugang zu den Ozeanen wie die Schweiz gehörten, vornehmlich schwach radioaktive Abfälle im Meer entsorgt (MCKINLEY et al. 2007). In Containern oder Fässern verpackte Abfälle wurden zumeist in Gebieten im Nordatlantik und nordöstlichen bzw. westlichen Pazifik versenkt (Committee of Science and Technology 1999). Die nicht überwachten Abwurfzonen befinden sich weit entfernt von Küsten und aktiven Plattenrändern in Wassertiefen zwischen 2000 und 4000 m. Das Gefährdungsrisiko des Verfahrens wurde in einem Be-

richt der Nuclear Energy Agency (NEA) für einige Abfallarten als relativ gering eingestuft (NEA 1985). Die Entsorgungsstrategie stützt sich im Wesentlichen auf die Annahme, dass die Schadstoffe mit ihrer Aktivität durch dieses Verfahren möglichst schnell in einer sehr großen Wassermenge verdünnt und weiträumig verteilt werden, um durch die verringerte Konzentration die geforderten Grenzwerte einhalten zu können. Im Rahmen von Regelungen durch die IAEA (IAEA 1981) war die Versenkung von schwach- und mittelradioaktivem Abfall noch bis zum Jahr 1982 möglich und wurde auch durchgeführt. Ein Moratorium der Unterzeichnerstaaten der *London Convention* beendete diese Praxis, was 1993 zur Verabschiedung einer Anpassung führte, die 1994 in Kraft trat und auch die Versenkung schwachradioaktiver Abfälle untersagte (IMO 1972).

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

3.2 Verbringung in geeigneten Behältern in Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens in Tiefseezonen (Pfad 3.2)

Als mögliche Methoden für die Lagerung unterhalb des Meeresbodens wurden zwei Verfahren näher betrachtet. Bei dem einen werden speziell angefertigte stromlinienförmige und mehrere Tonnen schwere Abfallbehälter von Bord eines Schiffes fallen gelassen (KLETT 1997, MOBBS et al. 1988, 1989), die sich bis zu 30 Meter tief in unverfestigte weiche Sedimente am Meeresboden bohren. Dies wurde in den 1980er Jahren erfolgreich in der atlantischen Tiefsee getestet (MCKINLEY 2007).

Bei dem anderen, nicht in der Praxis getesteten, Verfahren sollten die Abfälle in Bohrlöchern von einigen hundert Metern Tiefe in verfestigten oder unverfestigten Sedimenten gelagert werden, die abschließend mit Beton zu versiegeln wären.

Unter Federführung der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD wurde von 1974 bis 1988 das *Sub-seabed Disposal Program (SDP)* vorangetrieben. Als Ergebnis liegen

eine Reihe von Abschlussberichten zur Machbarkeit der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tiefseesedimenten vor (NEA 1988, RECHARD et al. 2011).

Die Methode erschien aus technischer Sicht wegen der relativ geringen Störfallwahrscheinlichkeit durch die günstigen Eigenschaften von Tiefseesedimenten mit hohem Rückhaltevermögen zunächst praktikabel und vorteilhaft (AkEnd 2002), wurde aber nicht zuletzt durch die vorangegangenen Versenkungskampagnen auf dem Meeresboden sehr kritisch betrachtet. Bemängelt werden laut KRAUSKOPF (1988) vor allem lange Transportwege sowie eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf See und das damit verbundene größere Risiko für das eingesetzte Personal während des Transportes und der Einlagerung. Auch das Risiko von Korrosionsleckagen an Metallcontainern wird im marinen Milieu im Vergleich zur terrestrischen Einlagerung als höher angesehen.

Wichtige Kritikpunkte sind laut MINHANS et al. (2008), dass es große Wissenslücken bezüglich der Tiefseebedingungen gibt, die Last der Entsorgung auf die internationale Gemeinschaft abgeschoben wird, Störfälle nicht beherrschbar sind und hoher technischer Entwicklungsaufwand betrieben werden muss, um die Machbarkeit zu gewährleisten. Auch nach Einschätzung des AkEnd (2002) stehen für die Erschließung eines solchen Endlagerstandortes und die nachfolgende Einlagerung keine erprobten Techniken zur Verfügung. Dies führte Ende der 1980er Jahre auch zur Einstellung der Forschungsprogramme und Auflösung der Forschergruppen.

3.3 Einbringung in Subduktionszonen und damit letztlich in das Erdinnere außerhalb der Ökosphäre (Pfad 3.3)

Zu Beginn der Überlegungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle in den Ozeanen wurde auch die Positionierung in Subduktionszonen („Abtauchzonen“ in der Erdkruste) als Entsorgungsalternative vorgeschlagen (BOSTROM & SHERIF 1970). Das primäre Argument für dieses Vorgehen war, dass die Abfälle durch den Prozess des Abtauchens einer tektonischen Platte in den Erdmantel von der Biosphäre isoliert würden (RECHARD et al. 2011). Dabei geht die Subduktion mit einer Rate von einigen Zentimetern pro Jahr und die damit verbundene Bildung eines Akkretionskeiles aus abgescheren Sedimenten relativ langsam vonstatten. Nach RAO (2001) reiche dies aus, um die Diffusionsgeschwindigkeit von Radionukliden in turbiditischen Sedimenten zu übertreffen. Im Zusammenhang mit seismischer Aktivität an diesen aktiven Plattengrenzen wurde auch die Möglichkeit einer erdbebenbedingten periodischen Sedimentverflüssi-

gung kontrovers diskutiert, die das Einsinken der Abfallbehälter in wassergesättigte turbiditische Sedimente begünstigen könnte (FRANCIS 1971, SILVER 1972).

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

4 Dauerlagerung an der Erdoberfläche oder erdoberflächennahe Lagerung (Pfad 4)

Die oberflächennahe Lagerung hochradioaktiver Abfälle ist derzeit gängige Praxis. In den meisten Fällen dient diese Technik allerdings zur Zwischenlagerung als Vorstufe zur späteren Endlagerung. In einigen Ländern wird auch über eine oberflächennahe Langzeitlagerung nachgedacht, die angewendet werden soll, bis eine geeignete Endlagermethode zur Verfügung steht (AkEnd 2000). Aktuell werden z.B. in Deutschland, Schweden, Frankreich, Japan und den USA abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung an der Erdoberfläche oder oberflächennah gelagert. Die langfristige Zwischenlagerung wird, neben der Transmutation, vom AkEnd (2002) als eine der international am meisten diskutierten Alternativen zur Endlagerung eingestuft.

In den USA wurden, nachdem die *Atomic Energy Commission* ein Projekt in einem Salzbergwerk im Bundesstaat Kansas aufgeben musste (WALKER 2006), im Jahr 1972 Pläne zur Erstellung einer Einrichtung zur rückholbaren Oberflächenlagerung vorgestellt (RECHARD et al. 2011). Die Verweildauer der Abfälle in der Einrichtung sollte mindestens 100 Jahre betragen und zur Prüfung weiterer Optionen genutzt werden (WALKER 2009). Als Einlagerungskonzepte wurden dickwandige luft- oder wassergekühlte Kammern bzw. luftgekühlte abgeschirmte Behälter vorgeschlagen (SZULINSKI et al. 1973). Letzteres wurde zu dem heute verwendeten System der dezentralen Trockenlagerung von Abfallbehältern an Reaktorstandorten weiterentwickelt.

Bereits 1971 wurde über das Konzept der Einlagerung in einer Art Wüstenpyramide nachgedacht (STARR & HAMMOND 1972), was aber in späteren Studien nicht weiter ver-

folgt wurde. Nicht vertieft wurden ebenso Überlegungen zur Schaffung einer künstlichen Geologie an einem Endlagerstandort durch Abtragung ganzer Geländeabschnitte z.B. mittels Grubentechnik aus dem Tagebaubereich oder Bau einer künstlichen Insel (RECHARD et al. 2011). Stattdessen wurde vornehmlich die oberflächennahe Lagerung von schwach- und mittelradioaktiven Substanzen in künstlich angelegten Gräben vorangetrieben (HAN et al. 1997, IAEA 2001).

4.1 Dauerlagerung der Abfälle auf unabsehbare Zeit in Form eines oberirdischen und damit ständig zu kontrollierenden und kontrollierbaren Lagers (Pfad 4.1)

Bei der oberflächennahen permanent kontrollierten Dauerlagerung der Abfälle und der Endlagerung bestehen insofern Parallelen als auch bei Endlagerkonzepten vielfach zeitlich begrenzte Kontroll- und Monitoringmaßnahmen eingeplant sind (MCKINLEY et al. 2007). Bei der Dauerlagerung sollten die Abfälle zusätzlich jederzeit inspizier- und problemlos rückholbar sein. Dabei sind die erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitskonzepts nur durch eine langfristige gesellschaftliche Kontrolle zu gewährleisten.

Als Vorteil des Verfahrens wird an vorderster Stelle die bessere Zugänglichkeit der Abfälle genannt. Im Falle eines technischen Fortschrittes bei den Einlagerungsmethoden oder der Abfallbehandlung könnten die schädlichen Substanzen zumindest teilweise wieder nutzbar oder besser unschädlich gemacht werden, was u.U. auch eine Volumenreduktion zur Folge hätte. Zudem gebe es Optionen, die Abfälle zukünftigen fortschrittlicheren Methoden zuführen zu können und die Möglichkeit, Maßnahmen bei Störfällen ergreifen zu können. Dadurch könnte insgesamt die gesellschaftliche Akzeptanz verbessert werden (MINHANS et al. 2008).

Der entscheidende Faktor hierbei ist jedoch die Langlebigkeit und Stabilität des Überwachungskonzepts und insbesondere die der beauftragten Institutionen. Ein kontrovers diskutierter Vorschlag zu dieser Problematik stammt von BUSER (1998), der ein sogenanntes *Hüte-Konzept* vorschlägt, bei dem die Verantwortung zur Überwachung eines oberirdischen Lagers über Generationen weitergegeben werden soll. Ein ähnlicher, an schwedische Verhältnisse angepasster, Ansatz wurde von CRONHJORT et al. (2003) vorgestellt. Dabei sollen die Abfälle in trockenen Gesteinsschichten knapp unter der Erdoberfläche eingelagert werden, um der Gefahr von, durch variierende Eisauflast in-

duzierter, tektonischer Aktivität zu begegnen. Auch dieser Ansatz wurde kritisch betrachtet und diskutiert, letztendlich aber nicht weiterverfolgt (MCKINLEY & MUNIER 2003, MÖRNER 2003).

Die Verlässlichkeit der beauftragten Institutionen stellt laut MCKINLEY et al. (2007) den größten Unsicherheitsfaktor dar. Aus diesem Grund geht die IAEA davon aus, dass das Verfahren nur für kurzlebige Isotope sinnvoll anwendbar ist (IAEA 1992, 2002, 2003). In die gleiche Richtung tendiert auch die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), die die gesellschaftliche der geologischen Stabilität gegenüberstellt (NAGRA 1997). Aus Sicht von APPEL et al. (2001) ist die baldige Endlagerung gegenüber Optionen mit Überwachung zu bevorzugen, da weder bezüglich der (Langzeit-)Sicherheit noch der ethischen Begründbarkeit Vorteile der Alternativen erkennbar sind. Die *Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle* (EKRA 2000) kommt zu dem Schluss, dass die Langzeitsicherheit nicht durch eine überwachte Dauerlagerung, sondern nur durch geologische Konzepte gewährleistet werden kann. Weitere Kritikpunkte neben der unsicheren Prognose hinsichtlich gesellschaftlicher und politischer Entwicklungen sind die Gefahr von Unfällen (z.B. durch mangelnde Wartung) und Angriffen durch Krieg oder Terrorismus, die Proliferationsgefahr, der große organisatorische und finanzielle Aufwand für zukünftige Generationen und klimatische Unwägbarkeiten.

Somit kommen auch MINHANS et al. (2008) übereinstimmend mit dem AkEnd (2002) zu der Schlussfolgerung, dass ein plausibler Nachweis der Funktion der aktiven Schutzsysteme über den Nachweiszeitraum nicht möglich ist und die Zuverlässigkeit der Prognosen nicht an die zur Funktion der passiven Schutzsysteme eines geologischen Endlagers heranreicht. Sollten sich die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Möglichkeiten kommender Generation verschlechtern, könnte das positiv bewertete Offenhalten von Handlungsspielräumen zu einer Bedrohung für die Sicherheit und Einschränkung der Handlungsfreiheit führen (AkEnd 2002).

5 Literaturverzeichnis:

- AkEnd (2000): 1. Workshop Wege zur Endlagerung, Kassel, 15. bis 16. September 2000; Tagungsbericht. –; Kassel, Germany (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte).
- (2002): Auswahlverfahren fuer Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte; Federal Republic of Germany.
- ANGINO, E. E., DRESCHHOFF, G. & ZELLER, E. J. (1976): Antarctica – A Potential International Burial Area for High-Level Radioactive Wastes. – Bull. Eng. Geol., **14**: 173-178.
- APPEL, D., KREUSCH, J. & NEUMANN, W. (2001): Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle. – Gruppe Ökologie e.V.; Hannover.
- ATCM (1959): The Antarctic Treaty. –; Washington DC (Antarctic Treaty Consultative Meeting).
- BOEING (1981): Analysis of Space Systems Study for the Space Disposal of Nuclear Waste. – Boeing Aerospace Co.; Seattle, WA.
- BOSTROM, R. C. & SHERIF, M. A. (1970): Disposal of Waste Material in Tectonic Sinks. – Nature, **228**(5267): 154-156. – [10.1038/228154a0]
- BUDD, W. F., JENSSEN, D. & RADOCK, U. (1971): Derived Physical Characteristics of the Antarctic Ice Sheet. – University of Melbourne; Melbourne.
- BULL, C. (1975): Radioactive Waste Disposal. – Science, **189**: 595.
- BURNS, R. E., CUASEY, W. E., GALLOWAY, W. E. & NELSON, R. W. (1978): Nuclear Waste Disposal in Space. – NASA; Huntsville, AL.
- BUSER, M. (1998): Hüte-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle - Argumente; Diskurse und Ausblick - Expertenbericht. – Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen - Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK); Villingen, Switzerland.
- CHAPMAN, N., A. & MCKINLEY, I., G. (1989): The Geological Disposal of Nuclear Waste. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore (John Wiley & Sons).
- CHAPMAN, N. A. & MCCOMBIE, C. (2003): Appendix 1 International conventions and agreements concerning deep geological disposal of long-lived radioactive wastes. – Waste Management Series - Principles and Standards for the Disposal of Long-lived Radioactive Wastes: 247-263; (Elsevier). ISBN 1478-7482. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0713-2743\(03\)80019-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0713-2743(03)80019-3).
- Committee of Science and Technology (1999): Science and Technology - Third Report. – House of Lords; London.
- CRONHJORT, B., MÖRNER, M. A. & SJÖBERG, R. (2003): Dry rock deposit argued in favour of wet deep disposal – Process through cooperation. – 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM). –: 1298-1303; Las Vegas, NV (American Nuclear Society (ANS)). ISBN/ISSN 0-89448-669-1.
- DECONTO, R. M. & POLLARD, D. (2003): Rapid Cenozoic Glaciation of Antarctica Induced by Declining Atmospheric CO₂. – Nature, **421**: 245-249.
- Department of Energy (1980): Final Environmental Impact Statement, Management of Commercially Generated Radioactive Waste. – US Department of Energy; Washington, DC.

- DUTTON, M., HILLIS, K., STANSBY, J., KENNETT, L., SEPPÄLÄ, T., MACIAS, R. M., RÖHLING, K.-J., HAVERKATE, B., O'SULLIVAN, P. J., MRŠKOVA, A., PRÍTRSKÝ, J., DÍAS-TERÁN, J. A., VALDIVIESO RAMOS, J. M., MORÉN, L., HUGI, M., ZUIDEMA, P., KING, S. & BREEN, B. (2004): Nuclear Science and Technology – The comparison of alternative waste management strategies for long-lived radioactive wastes (COMPASS Project). – EU; Luxembourg.
- EKRA (2000): Disposal Concepts for Radioactive Waste - Final Report. – Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle; Bern, Switzerland.
- ERDA (1976): Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel Cycle. – Energy Research and Development Administration; Richland, WA.
- FISCHER, H., SEVERINGHAUS, J., BROOK, E., WOLFF, E., ALBERT, M., ALEMANY, O., ARTHERN, R., BENTLEY, C., BLANKENSHIP, D., CHAPPELLAZ, J., CREYTS, T., DAHL-JENSEN, D., DINN, M., FREZZOTTI, M., FUJITA, S., GALLEE, H., HINDMARSH, R., HUDSPETH, D., JUGIE, G., KAWAMURA, K., LIPENKOV, V., MILLER, H., MULVANEY, R., PARRENIN, F., PATTYN, F., RITZ, C., SCHWANDER, J., STEINHAGE, D., VAN OMMEN, T. & WILHELMS, F. (2013): Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS "Oldest-Ice" ice core. – *Clim. Past*, **9**(6): 2489-2505, (Copernicus Publications). ISSN 1814-9332. doi:10.5194/cp-9-2489-2013. – [CP]
- FRANCIS, T. J. G. (1971): Effect of Earthquakes on Deep-sea Sediments. – *Nature*, **233**(5315): 98-102.
- GIACCIO, B., REGATTIERI, E., ZANCHETTA, G., NOMADE, S., RENNE, P. R., SPRAIN, C. J., DRYSDALE, R. N., TZEDAKIS, P. C., MESSINA, P., SCARDIA, G., SPOSATO, A. & BASSINOT, F. (2015): Duration and Dynamics of the Best Orbital Analogue to the Present Interglacial. – *Geology*, **43**(7): 603-606. doi:10.1130/G36677.1.
- HAN, K. W., HEINONEN, J. & BONNE, A. (1997): Radioactive Waste Disposal: Global Experience and Challenges. – *IAEA Bulletin*, **39**(1): 33-41.
- HOFMANN, H. (1981): Rechtsfragen der atomaren Entsorgung. *Scheideweg - Vierteljahresschrift für skeptisches Senken*, Beiheft 6. – 409 S.; Stuttgart (Klett-Cotta). ISBN 3129031111.
- IAEA (1981): Packaging of radioactive Waste for Sea Disposal. – International Atomic Energy Agency; Vienna, Austria.
- (1992): Storage of Radioactive Waste. – International Atomic Energy Agency; Vienna, Austria.
- (2001): Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste – International Atomic Energy Agency; Vienna, Austria.
- (2002): Long term storage of spent nuclear fuel: Survey and recommendations - Final report of a coordinated research project. – International Atomic Energy Agency; Vienna, Austria.
- (2003): The long term storage of radioactive waste: Safety and sustainability. A position paper of international experts. – International Atomic Energy Agency; Vienna, Austria.
- IMO (1972): Convention, Amendments (1993) and Protocol (1996) on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter. –; London (International Maritime Organization).
- KLETT, R. D. (1997): Performance assessment overview for subseabed disposal of high-level radioactive waste. – Sandia National Laboratories; Albuquerque.
- KRAUSKOPF, K. B. (1988): Radioactive Waste Disposal and Geology. London (Chapman and Hall).
- KUBO, A. S. & ROSE, D. J. (1973): Disposal of Nuclear Wastes. – *Science*, **182**(4118): 1205-1211.

- MCKINLEY, I. G. (2007): Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. – In: ALEXANDER, W. R. & MCKINLEY, L. E. (Hrsg.): Radioactivity in the Environment: 300; Amsterdam (Elsevier). ISBN 978-0-08-045010-0.
- MCKINLEY, I. G. & MUNIER, R. (2003): Discussion of “In absurdum: long-term predictions and nuclear waste handling”: By N.A. Mörner (Vol. 61, pp. 75–82). – Engineering Geology, **68**(3–4): 401-403. ISSN 0013-7952. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00238-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00238-7).
- MCKINLEY, I. G., RUSSELL ALEXANDER, W. & BLASER, P. C. (2007): Development of geological disposal concepts. – In: ALEXANDER, W. R. & MCKINLEY, L. E. (Hrsg.): Radioactivity in the Environment: 41-76; (Elsevier). ISBN 1569-4860. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1569-4860\(06\)09003-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1569-4860(06)09003-6).
- MINHANS, A., NELES, J. & SCHMIDT, G. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Entsorgungsstrategien, Darstellung und Bewertung von Alternativen zur Endlagerung. – Öko-Institut e.V., Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS); Braunschweig, Darmstadt.
- MOBBS, S. F., CHARLES, D., DELOW, C. E. & MCCOLL, N. P. (1988): PAGIS, Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste Disposal in the Sub-Seabed. – EUR - Scientific and Technical Research Reports, European Commission; Bruxelles.
- (1989): Assessment of Subseabed Disposal of Vitrified High Level Waste for the PAGIS Project. – NRPB; Harwell, UK.
- MÖRNER, N.-A. (2003): Reply to discussion of “In absurdum: long-term prediction of nuclear waste handling”. – Engineering Geology, **68**(3–4): 405-407. ISSN 0013-7952. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00239-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00239-9).
- NAGRA (1997): Which is more stable: a rock formation or a social structure? – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle; Wettingen, Switzerland.
- NAS (1957): The Disposal of Radioactive Waste on Land. – 146 S., National Academy of Sciences - National Research Council; Washington, DC.
- (2001): Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges. – 212 S., National Academy of Sciences - National Research Council; Washington, DC.
- NEA (1985): Review of the continued sustainability of the dumping site for radioactive wastes in the North-East Atlantic. – OECD/NEA; Paris, France.
- (1988): Feasibility of disposal of high-level radioactive waste into the seabed – 1: Overview of research and conclusions. – OECD/NEA; Paris, France.
- OSPAR (1992): The Convention for the Protection of the marine Environment of the North-East Atlantic (OSPAR Convention). –; Paris (OSPAR Commission).
- PHILBERTH, B. (1958): Disposal of Atomic Fission Products in Polar Ice Caps. – AHS Symposium, 16.-24.09.1958, Chamonix 350; (Association Internationale d'Hydrologie Scientifique).
- (1959): Beseitigung radioaktiver Abfallssubstanzen in den Eiskappen der Erde. – Zeitschrift für die Kernenergie in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft, **4/3**: 116-119.
- RAO, K. R. (2001): Radioactive waste: The problem and its management. – Current Science, **81**(12): 1534-1546.
- 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 Development for Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste, Fuel Cycle Research & Development. – U.S. Department of Energy – Used Fuel Disposition Campaign.

- RICE, E. E. & PRIEST, C. C. (1981): An Overview of Nuclear Waste Disposal in Space (DOE/TIC-4621). – **1**; Oak Ridge, TN (Oak Ridge National Laboratory).
- SCHNEIDER, K. J. & PLATT, A. M. (1974): High-level Radioactive Waste Management Alternatives. – Battelle Pacific Northwest Laboratories; Richland, WA.
- SILVER, E. A. (1972): Subduction Zones: Not Relevant to Present-day Problems of Waste Disposal. – *Nature*, **239**(5371): 330-331. – [10.1038/239330a0]
- STARR, C. & HAMMOND, R. P. (1972): Nuclear Waste Storage. – *Science*, **177**(4051): 744-745. doi:10.1126/science.177.4051.744.
- SZULINSKI, M. J., WARREN, J. H. & ELGERT, O. J. (1973): Engineered Storage of Radioactive Waste. – OECD/IAEA Symposium on the Management of Radioactive Wastes from Fuel Reprocessing. –; Paris, France (Organisation for Economic Co-Operation and Development,).
- United Nations (1982): United Nations Convention on the Law of the Sea. –; New York (United Nations).
- (1995): UNEP-GPA Washington Declaration on the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities. –; New York (United Nations).
- (2008): United Nations Treaties and Principles on Outer Space and related General Assembly resolutions. – In: (UNOOSA), O. F. O. S. A.; Vienna, Austria (United Nations). ISBN/ISSN ST/SPACE/11/Rev.2.
- VALFELLS, A. (2002): Disposal of radioactive waste in permanent icefields; U.S. patent US 6,342,650 B1. – Icelandic Radiation Protection Institute; Reykjavik.
- WALKER, J. S. (2006): An “Atomic Garbage Dump” for Kansas. – *Kansas History*, **29**(4).
- (2009): The Road to Yucca Mountain: The Development of Radioactive Waste Policy in the United States. – 240 S.; Berkley, CA (University of California Press).
- WHIPPLE, C. (2010): Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-level Radioactive Waste. – Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future;
http://cybercemetery.unt.edu/archive/brc/20120620234233/http://brc.gov/sites/default/files/documents/disposal_of_spent_nuclear_fuel_and_high_level_radioactive_waste_rev4.pdf.
- ZELLER, E. J., ANGINO, E. E. & SAUNDERS, D. F. (1976): Antarctica: A Potential Disposal Site for the World's High-Level Radioactive Waste. – *Modern Geology*, **6**: 1-16.