

**Vergleichende Bewertung von
Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle**

Abschlussbericht

**Im Auftrag des Forschungszentrums Karlsruhe, Projektträger des
BMBF und BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung**

Förderkennzeichen 02 E 9350

Hannover, Mai 2001

Autoren

Dr. Detlef Appel *
Jürgen Kreuzsch **
Wolfgang Neumann **

***) PanGeo - Geowissenschaftliches Büro**
Ibykusweg 23
30629 Hannover
Tel.: 0511-95 86 710
appel-pangeo@t-online.de

*****) Gruppe Ökologie e.V.**
Kleine Düwelstr. 21
30171 Hannover
Tel.: 0511-85 30 55
intac@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
1. Aufgabenstellung und Aufbau des Berichts	7
2. Darstellung der zu vergleichenden Entsorgungsoptionen	9
2.1 Möglichkeiten der Entsorgung – Entwicklung der Diskussion	9
2.2 Kurzbeschreibung der Entsorgungsoptionen	12
2.2.1 Randbedingungen	12
2.2.2 Baldige Endlagerung (EL)	14
2.2.3 Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle (ELR)	15
2.2.4 Kontrollierte geologische Langzeitlagerung (KGL)	16
2.2.5 Langzeit-Zwischenlagerung	17
2.2.6 Dauerlagerung	18
2.3 Operative Phasen bei den Entsorgungsoptionen	19
2.3.1 Beschreibung der operativen Phasen	20
2.3.2 Bedeutung der operativen Phasen für den Optionsvergleich	23
3. Ziele der Entsorgungsoptionen	25
3.1 Vorgehensweise	25
3.2 Zusammenfassende Darstellung der Ziele	25
3.2.1 Deutschland – Option baldige Endlagerung	25
3.2.2 Schweden – Option Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle	27
3.2.3 USA – Option Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle	29
3.2.4 Schweiz – Option kontrollierte geologische Langzeitlagerung	31
3.2.5 Frankreich – Optionen Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle und Langzeit-Zwischenlagerung	33
3.2.6 Niederlande - Optionen Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle und Langzeit-Zwischenlagerung	34
4. Vergleichende Bewertung der Optionen	40
4.1 Begründung und Darstellung des Bewertungsverfahrens	40
4.2 Bewertungsrahmen und Begriffe	44
4.3 Vergleichende Bewertung	49
4.3.1 Beurteilungsfeld Sicherheit in der Betriebsphase	49
4.3.1.1 Kriterium radiologische Auswirkungen des Normalbetriebs	50
4.3.1.2 Kriterium Wahrscheinlichkeit von Störfällen	52
4.3.1.3 Kriterium Auswirkungen möglicher Eingriffe von außen	53
4.3.2 Beurteilungsfeld Langzeitsicherheit	56
4.3.2.1 Kriterium passives oder aktives Sicherheitssystem	57

4.3.2.2	Kriterium Sicherheitsreserven bei unvorhergesehenem Systemverhalten	58
4.3.2.3	Kriterium Robustheit des Sicherheitssystems	60
4.3.3	Beurteilungsfeld Nachweis der Langzeitsicherheit	61
4.3.3.1	Kriterium Prognostizierbarkeit der sicherheitstragenden Systeme	62
4.3.3.2	Kriterium Prognoseverfahren und Informationsbedarf	64
4.3.4	Beurteilungsfeld Sicherung (Safeguards)	65
4.3.4.1	Kriterium Spaltstoffkontrolle	66
4.3.5	Beurteilungsfeld Kritikalitätssicherheit	67
4.3.5.1	Kriterium keine nachträgliche Entstehung kritischer Spaltstoffmassen	67
4.3.6	Beurteilungsfeld Gerechtigkeit	69
4.3.6.1	Kriterium keine unangemessene Belastung künftiger Generationen	69
4.3.6.2	Kriterium Erhalt der Handlungsspielräume künftiger Generationen	71
4.3.7	Beurteilungsfeld Akzeptanz	72
4.3.8	Beurteilungsfeld Ökonomie	73
4.3.8.1	Kriterium Verursacherprinzip	74
4.4	Zusammenfassende Bewertung	78
5.	Zusammenfassende Darstellung der für die baldige Endlagerung und alternative Entsorgungsoptionen genannten Argumente	81
5.1	Baldige Endlagerung	81
5.2	Andere Optionen als baldige Endlagerung	84
5.3	Zusammenfassende Bewertung	89
6.	Konsequenzen für die deutsche Entsorgungskonzeption	91
7.	Quellen	95

ANHANG A

Darstellung der in ausgewählten Ländern und internationalen Organisationen verfolgten Entsorgungsoptionen

Inhalt

	Seite
A 1. Einleitung	A-3
A 2. Deutschland	A-4
A 2.1 Entsorgungsrahmen	A-4
A 2.2 Entwicklung und Stand der Entsorgungsstrategie	A-6
A 2.3 Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-15
A 2.4 Quellen Deutschland	A-18
A 3. Schweden	A-21
A 3.1 Entsorgungsrahmen	A-21
A 3.2 Entwicklung und Stand der Entsorgungsstrategie	A-24
A 3.3 Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-29
A 3.4 Quellen Schweden	A-32
A 4. USA	A-35
A 4.1 Entsorgung militärischer Abfälle	A-35
A 4.2 Entsorgung ziviler Abfälle	A-36
A 4.2.1 Entsorgungsrahmen	A-36
A 4.2.2 Entwicklung und aktueller Stand der Entsorgungsstrategie	A-40
A 4.2.2.1 Entsorgung schwachaktiver Abfälle	A-40
A 4.2.2.2 Entsorgung hochaktiver Abfälle	A-42
A 4.2.3 Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-45
A 4.3 Quellen USA	A-48
A 5. Schweiz	A-51
A 5.1 Entsorgungsrahmen	A-51
A 5.2 Entwicklung und Stand der Entsorgungsstrategie	A-54
A 5.3 Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-62
A 5.4 Quellen Schweiz	A-65

A 6.	Frankreich	A-68
A 6.1	Entsorgungsrahmen	A-68
A 6.2	Entwicklung und Stand der Entsorgungsstrategie	A-70
A 6.3	Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-73
A 6.3.1	Ziel von Pfad (1) – Abtrennung und Transmutation	A-74
A 6.3.2	Ziele von Pfad (2) – Endlagerung	A-74
A 6.3.3	Ziele von Pfad (3) – Konditionierung und Langzeitzwischenlagerung	A-77
A 7.4	Quellen Frankreich	A-79
A 7.	Niederlande	A-81
A 7.1	Entsorgungsrahmen	A-81
A 7.2	Entwicklung und Stand der Entsorgungsstrategie	A-82
A 7.3	Ziele der aktuellen Entsorgungsstrategie	A-84
A 7.4	Quellen Niederlande	A-87
A 8.	Europäische Union (EU)	A-89
A 8.1	Entwicklung der Position der Europäischen Union zur Endlagerung	A-89
A 8.2	Quellen Europäische Union	A-90
A 9.	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD)	A-91
A 9.1	Entwicklung der OECD-Position zur Endlagerung	A-91
A 9.2	Entsorgungsziele der OECD-NEA	A-93
A 9.3	Quellen OECD	A-95

ANHANG B

Prüfung der Argumente für die Entsorgungsoptionen

Inhalt	Seite
B 1. Vorgehensweise	B-2
B 2. Prüfung der Argumente für die Option baldige Endlagerung	B-7
B 2.1 Sicherheitsorientierte Argumente	B-7
B 2.1.1 Gewährleistung der Langzeitsicherheit	B-7
B 2.1.2 Nachweis der Langzeitsicherheit	B-13
B 2.2 Ethische Argumente	B-15
B 2.3 Argument Akzeptanzgewinn	B-18
B 2.4 Ökonomische Argumente	B-18
B 2.5 Sonstige Argumente	B-19
B 3. Prüfung der Argumente für andere Optionen als baldige Endlagerung	B-20
B 3.1 Sicherheitsorientierte Argumente	B-20
B 3.1.1 Gewährleistung der Langzeitsicherheit	B-20
B 3.1.2 Nachweis der Langzeitsicherheit	B-28
B 3.2 Ethische Argumente	B-31
B 3.3 Argumente Akzeptanzgewinn	B-37
B 3.4 Ökonomische Argumente	B-39
B 4. Zusammenfassung	B-41
B 5. Quellen	B-44

ANHANG C

Abtrennung und Transmutation (Partitioning & Transmutation – P&T)

Inhalt

	Seite
C 1. Einleitung	C-2
C 2. Ziele von P&T	C-2
C 3. Technologien zur Abtrennung der Radionuklide	C-5
C 4. Technologien zur Transmutation der Radionuklide	C-8
C 5. Darstellung einiger spezieller entsorgungsbezogener Aspekte	C-11
C 6. Zusammenfassende Bewertung von P&T	C-16
C 7. Quellen Anhang C	C-18

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite	
Abb. 1	Möglichkeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle	11
Abb. 2	Operative Phasen bei den betrachteten Lageroptionen mit Kennzeichnung des relativen Beitrags von Maßnahmen, (geo)technischen Barrieren und geologischer Barriere zur Sicherheit des Lagersystems	22

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Zusammenstellung der in verschiedenen Ländern und von internationalen Institutionen mit den verfolgten bzw. diskutierten Entsorgungsoptionen angestrebten Ziele	37-39
Tab. 2	Beurteilungsfelder und Bewertungskriterien	49
Tab. 3	Ergebnis der vergleichenden Bewertung der Entsorgungsoptionen	77
Tab. B-1	Zusammenstellung der Argumente für die baldige Endlagerung in tiefen geologischen Formationen und die sonstigen Entsorgungsoptionen	B-4 bis B-6

Abkürzungsverzeichnis

AEC	Atomic Energy Commission (USA)
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AtG	Atomgesetz (Deutschland)
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (Frankreich)
AGNEB	Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung
AVR	Atom-Versuchs-Reaktor
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz (Deutschland)
BfB	Bundesanstalt für Bodenforschung (Vorläufer der BGR)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover)
BMwF	Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique (Frankreich)
CLAB	Centralt Lager för Använt Kärnbränsle (Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente, Schweden)
CNE	Commission Nationale D'Évaluation (Frankreich)
COVRA	Central Organisatie Voor Radioactief Afval (Niederlande)
CSSN	Conseil Supérieur de la Sûreté Nucléaire (Frankreich)
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau u. Betrieb von Endlagern mbH
DL	Dauerlagerung
DOE	Department of Energy (USA)
DSIN	Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires (Frankreich)
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
EL	Baldige Endlagerung
ELR	rückholbare Endlagerung
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
EVED	Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (bis 1997, heute UVEK)
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
HAW	Hochaktiver Abfall
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Schweiz)
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
KASAM	Statens råd för kärnavfallsfrågor (schwedischer nationaler Rat für Fragen des radioaktiven Abfalls)
KGL	Kontrollierte geologische Langzeitlagerung
KBS	Kärnbränslesäkerhet (Schweden)
KNE	Kommission Nukleare Entsorgung (Schweiz)
LAW	Schwachaktiver Abfall
LRWPA	Low-Level Radioactive Waste Policy Act (USA)
LRWPAA	Low-Level Radioactive Waste Policy Amendments Act (USA)
LZL	Langzeit-Zwischenlagerung
MAW	Mittelaktiver Abfall
NAS	National Academy of Science (USA)
NEA	Nuclear Energy Agency (USA)
NEZ	Nukleares Entsorgungszentrum
NRC	Nuclear Regulatory Commission (USA)
NWPA	Nuclear Waste Policy Act von 1982 (USA)

NWPAA	Nuclear Waste Policy Amendmends Act von 1987 (USA)
NWTRB	Nuclear waste Technical Review Board (USA)
OCRWM	Office of Civilian Radioactive Waste Management (USA)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Office of Environmental Management (USA)
OPLA	Commissie Opberging te Land (NL)
PAGIS	Performance Assessment for Geological Isolation Systems
PSI	Paul-Scherrer-Institut
P&T	Abtrennung und Transmutation
RWMC	Radioactive Waste Management Committee (USA)
SFL	Slutförvar för Langlivat Radioaktivt Avfall (Schweden)
SFR	Slutförvar för Drifavfall (Schweden)
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schweden)
SKI	Statens Kärnkraftinspektion (Kernkraft-Aufsichtsbehörde, Schweden)
SKN	Statens Kärnbränslenämnd (Schweden)
SSI	Statens Stralskyddsinstitut (staatl. Strahlenschutzinstitut, Schweden)
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TAG	Technische Arbeitsgruppe Wellenberg, Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle
THTR	Thorium Hochtemperatur-Reaktor (in Hamm-Uentrop)
UTL	Untertage-Labor
UVEK	Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (ab 1998, früher EVED, Schweiz)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)

Elemente und Elementsymbole

Am	Americium
Cm	Curium
Cs	Cäsium
I	Jod
Np	Neptunium
Pu	Plutonium
Ra	Radon
Se	Selen
Sn	Zinn
Tc	Technetium
Th	Thorium
U	Uran

Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Die Diskussion um die Entsorgung der bei der zivilen Nutzung der Kernenergie anfallenden radioaktiven Abfälle (einschließlich bestrahlter Brennelemente) hat sich in den vergangenen Jahren aufgeweitet. Neben die „klassischen“ Endlagerung der Abfälle mit baldigem Verschluss des Endlagers sind zusätzliche Optionen getreten, wie beispielsweise die Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle.

Die in der Diskussion für die jeweils bevorzugte Entsorgungsoption verwendeten Argumente sind sehr unterschiedlich. In der Regel stehen isolierte Einzelaspekte aus argumentativ bevorzugten Beurteilungsfeldern wie Strahlenschutz, Langzeitsicherheit, Nachhaltigkeit, Proliferation oder Kosten im Vordergrund. Je nach bevorzugtem Beurteilungsfeld werden den einzelnen Optionen ganz bestimmte Vorteile zugeschrieben, während die damit verbundenen Nachteile oft nicht wahrgenommen oder aber hingenommen werden.

Eine umfassende Darstellung und Bewertung der verschiedenen Entsorgungsoptionen im Hinblick auf ihre in der Diskussion genannten tatsächlichen oder angeblichen Vor- und Nachteile hat bisher nicht stattgefunden. Sie muss aber Grundlage einer sachlich angemessenen Diskussion über die zu wählende Entsorgungsoption und einen eventuellen Wechsel der Option sein.

Wesentliche Voraussetzung dafür ist die fundierte vergleichende Bewertung der wesentlichen Entsorgungsoptionen. In Rahmen dieser Bewertung sind folgende Teilaufgaben zu lösen:

- Darstellung des entsorgungspolitischen Umfeldes sowie der Vorgehensweise bzw. des Diskussionsstandes in ausgewählten Ländern, um die angestrebten Ziele und die gesamte Argumentationsbreite für die verschiedenen Optionen zu erfassen und die Einzelargumente für und gegen bestimmte Optionen beurteilen zu können.
- Ableitung einer Bewertungsmethode einschließlich Entwicklung von Kriterien für die vergleichende qualitative Bewertung der Entsorgungsoptionen.
- Ableitung möglicher Konsequenzen für das entsorgungsstrategische Vorgehen in Deutschland aus den Ergebnissen der vergleichenden Bewertung und der Prüfung der Einzelargumente.

Vorgehensweise

Ausgangspunkt und wesentliche Grundlage der Untersuchung ist die Darstellung der Entwicklung und des Standes der Diskussion bzw. der Umsetzung von Entsorgungsoptionen in den Ländern Deutschland, Schweden, USA, Schweiz, Frankreich und den Niederlanden (s. Anhang A). Diese Länder sind ausgewählt worden, weil sie insgesamt das Spektrum an diskutierten oder in Realisierung befindlichen Entsorgungsoptionen weitgehend abdecken. Ergänzend wird auf die Diskussion in der OECD/NEA und der EU eingegangen. Auf diese Weise wurden folgende fünf Entsorgungsoptionen für die vergleichende Bewertung erfasst (Kap. 2.):

- baldige Endlagerung (ohne Absicht längerer Kontrolle/Überwachung und Rückholbarkeit der Abfälle), möglichst rascher Verschluss des Endlagers nach Abfalleinlagerung),
- Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle (üblicherweise mit längerer vorgeschalteter Kontroll- bzw. Überwachungsphase),
- Kontrollierte geologische Langzeitlagerung (mit längerer Kontroll- bzw. Überwachungsphase für Teile des Inventars und Möglichkeit der Rückholbarkeit der Abfälle),
- Langzeit-Zwischenlagerung (kontrollierte ober- oder untertägige Zwischenlagerung) für einige Jahrhunderte, danach Entscheidung über weiteres Vorgehen, sofern nicht früher ein anderer Entsorgungsweg gewählt wird,
- Dauerlagerung (kontrollierte und zeitlich unbegrenzte ober- oder untertägige Lagerung), bis die Abfälle ihre Gefährlichkeit verloren haben.

Soweit möglich werden aus den jeweiligen länderspezifischen Diskussionen die übergeordneten Haupt- und operative Teil- bzw. sonstige Nebenziele abgeleitet (Kap. 3.). Zusätzlich werden die Argumente, die in der Diskussion für bzw. gegen die Optionen angeführt werden, einer detaillierten Prüfung unterzogen (Kap. 5 u. Anhang B). Sowohl die Ziele als auch die Argumente bilden den inhaltlichen Unterbau der vergleichenden Bewertung. Da in einigen Ländern die längerfristige Zugänglichkeit der Abfälle mit der zukünftigen technischen Entwicklung, insbesondere Abtrennung und Transmutation (P&T), begründet wird, wird in Anhang C eine kurze Einschätzung dieser Technologie gegeben.

Die vergleichende Bewertung der Entsorgungsoptionen (Kap. 4.) kann nur qualitativ geschehen, weil sich wesentliche Beurteilungsfelder der Quantifizierung entziehen. Sie wird nach der „verbal-argumentativen Methode“ durchgeführt. Diese Methode erfüllt weitgehend die methodischen Grundanforderungen an die vergleichende Bewertung von Handlungsoptionen und hat sich bei ähnlichen Fragestellungen bewährt.

Die vergleichende Bewertung erstreckt sich auf verschiedene Beurteilungsfelder, die ihrerseits aus den allgemeinen Zielen der Entsorgung sowie den für die einzelnen

Optionen angeführten länderspezifischen Zielen und Argumenten abgeleitet werden. Berücksichtigt werden die Beurteilungsfelder

- Sicherheit in der Betriebsphase,
- Langzeitsicherheit,
- Nachweis der Langzeitsicherheit,
- Sicherung (Safeguards),
- Kritikalitätssicherheit,
- Gerechtigkeit (ethische Aspekte),
- Akzeptanz,
- Ökonomie.

Zu jedem Beurteilungsfeld gehören ein bis drei Kriterien, die die eigentlichen Bewertungsmaßstäbe darstellen. Die Kriterien beziehen sich nur auf solche Aspekte, zu denen heute für eine Bewertung ausreichende Kenntnisse und Informationen vorliegen und bei denen nicht von vornherein mit einer Beeinflussung des Ergebnisses durch individuelle oder gruppenspezifische Werthaltungen gerechnet werden muss.

Abschließend werden die Ergebnisse des Vergleichs diskutiert. Unter Berücksichtigung weiterer bewertungsrelevanter, aber nicht in die vergleichende Bewertung eingeflossener Aspekte werden Konsequenzen für das entsorgungsstrategische Vorgehen in Deutschland abgeleitet (Kap. 6.).

Ergebnisse

In allen betrachteten Ländern wird unabhängig von der jeweils verfolgten Entsorgungsoption das Hauptziel „Schutz von Mensch und Umwelt“ angestrebt. Dieses Ziel ist – ungeachtet gleichzeitig oder zusätzlich verfolgter operativer Teil- oder sonstiger Nebenziele – zweifelsfrei sicherheitsorientiert, d.h. die (langfristige) Sicherheit der jeweiligen Entsorgungsoption stellt den letztendlich entscheidenden Gesichtspunkt dar. Die Teil- und Nebenziele sind nicht bei allen Ländern klar benannt.

Vor diesem Hintergrund liefert die **vergleichende Bewertung** der Entsorgungsoptionen mittels der verbal-argumentativen Methode ein eindeutiges Ergebnis:

Sicherheitsbezogene Beurteilungsfelder

- Bei allen sicherheitsbezogenen Beurteilungsfeldern (außer Kritikalität) schneidet die baldige Endlagerung eindeutig am besten ab. Die Gründe liegen in der Position des Endlagers innerhalb der Erdkruste, im ausschließlich passiven Charakter der sicherheitstragenden Elemente nach der Einlagerungsphase sowie in der Verfügbarkeit von Methoden zur Prognose des langfristigen Systemverhaltens. Die unvermeidlichen Aussageunschärfen von Langzeitprognosen bleiben allerdings unbestritten.