

Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle

Schlussbericht

Walter Wildi (Vorsitz)

Detlef Appel

Marcos Buser

François Dermange

Anne Eckhardt

Peter Hufschmied

Hans-Rudolf Keusen

Michael Aebersold (Sekretariat)

Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

31. Januar 2000

© Der Bericht kann unter Quellenangabe zitiert und auszugsweise reproduziert werden

Information: wildi@sc2a.unige.ch, michael.aebersold@bfe.admin.ch

Verteiler:
Bern, 02.02.2000 ...

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einleitung	7
1.1 Nukleare Entsorgung in der Schweiz: Hintergrund des vorliegenden Berichts	7
1.2 Mandat der EKRA	9
1.3 Arbeitsweise und Zusammensetzung der EKRA	9
2. Entwicklung und heutiger Stand der Entsorgungsprogramme	11
2.1 Zur Geschichte der Entsorgungsprogramme	11
2.2 Entsorgung radioaktiver Abfälle im Ausland	14
2.3 Das Entsorgungsprogramm der Schweiz	21
3. Gesellschaftliche Erwartungen an die Lagerung radioaktiver Abfälle und die sich daraus ergebenden Konsequenzen	24
3.1 Gesellschaftliche Entscheidungen und Expertenurteil	24
3.2 Beurteilungskriterien	27
3.3 Grundsätze der Lagerkonzeption	29
3.4 Das Verursacherprinzip	32
4. Grundelemente "Entsorgungskonzept Schweiz"	34
4.1 Das Abfallinventar	34
4.2 Lagerkonzepte	36
4.3 Das Sicherheitssystem	41
4.4 Lagerphasen	48
5. Das Konzept des kontrollierten geologischen Langzeitlagers	52
5.1 Technische Auslegung	52
5.2 Mögliche Umsetzung	54
5.3 Massnahmenplanung	57
6. Beurteilung der Lagerkonzepte	58
6.1 Grundlagen der Beurteilung	59
6.2 Beurteilung der Sicherheit	62
6.3 Vergleichende Gesamtbeurteilung	68
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	71
7.1 Schlussfolgerungen	71
7.2 Zum Mandat	74
7.3 Empfehlungen	76
Bibliographie	78
Anhang 1: Begriffserklärungen	83
Anhang 2: Abkürzungen	87
Anhang 3: Nukleare Entsorgung in der Schweiz - wichtige Daten	89
Anhang 4: Gesetze, Verordnungen und Richtlinien im Bereich der Entsorgung	91

Zusammenfassung

Mandat

1998 hat sich die von Bundesrat Moritz Leuenberger eingesetzte Arbeitsgruppe "Energie-Dialog Entsorgung" mit wichtigen Grundsatzfragen der nuklearen Entsorgung befasst. Der Ende 1998 vom Vorsitzenden erstellte Schlussbericht enthielt Vorschläge, wie die gegensätzlichen Positionen der Betreiber von Kernkraftwerken und der Umweltorganisationen überbrückt werden können. Unter anderem wurde eine Vertiefung des Konzepts der "kontrollierten und rückholbaren Langzeitlagerung" vorgeschlagen.

Anfangs 1999 blieben die Gespräche zur Befristung des Betriebs der bestehenden Kernkraftwerke und der Lösung des Entsorgungsproblems zwischen dem Bundesrat sowie den Standortkantonen, den Umweltorganisationen und den Betreibern der Kernkraftwerke ohne zufriedenstellendes Ergebnis. Darauf setzte der Vorsteher des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation im Juni 1999 die "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (EKRA) ein.

In der Folge erarbeitete die EKRA die Grundlagen für einen Vergleich verschiedener Entsorgungskonzepte. Sie entwickelte dazu das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung und verglich dieses mit der Endlagerung, der Zwischenlagerung und der Dauerlagerung. Dabei standen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Aktive und passive Sicherheit
- Überwachung und Kontrolle
- Rückholbarkeit

Der vorliegende Bericht stellt die Resultate der EKRA vor.

Lagerkonzepte und Entsorgungsprogramme

Ionisierende Strahlung verursacht Schäden an Lebewesen, namentlich durch die Auslösung von genetischen Veränderungen und Krebskrankheiten. Um dies zu verhindern, muss die Umgebung wirksam von radioaktiven Abfällen abgeschirmt werden.

Praktisch alle Konzepte zur Entsorgung radioaktiver Abfälle aus der zivilen Nutzung der Kernspaltung wurden schon zu einer sehr frühen Zeit, mehrheitlich in den fünfziger Jahren, skizziert. International wird die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen der kontinentalen Erdkruste, die geologische Endlagerung, bevorzugt. Die Argumente, die für die Endlagerung sprechen, sind allerdings nicht unumstritten. Vor allem werden Bedenken vorgebracht, die Langzeitsicherheit eines Endlagers könne mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln und Methoden nicht ausreichend gewährleistet werden. Daher werden seit einigen Jahren in verschiedenen Staaten Strategien und Entsorgungskonzepte studiert oder bereits verfolgt, welche nach dem Prinzip der Reversibilität eine Überwachung und Kontrolle sowie eine erleichterte Rückholbarkeit vorsehen.

Die Schweiz verfolgt heute zwei Endlagerprogramme, nämlich für:

1. *kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)*

Nach einem Evaluationsverfahren schlug die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (nagra) 1993 den Wellenberg als Standort für ein geologisches Endlager in mergeligen Wirtsgesteinen vor. Aufgrund eines Volksentscheides des Standortkantons ist das Endlagerprojekt jedoch seit 1995 blockiert.

2. *hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle (HAA/LMA)*

Die nagra verfolgt den Machbarkeitsnachweis der geologischen Endlagerung in zwei potentiellen Wirtsgesteinen, einerseits im kristallinen Untergrund und andererseits im etwa 100 m mächtigen Opalinuston der Nordschweiz.

Vorgehen der EKRA

Im Rahmen ihres Mandats untersuchte die EKRA neben technisch-wissenschaftlichen Fragen der sicheren Entsorgung – dies unter Berücksichtigung des Gebots einer nachhaltigen Entwicklung – auch gesellschaftliche Aspekte. Die wichtigsten Werte und Ziele in der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind:

- Sicherheit von Mensch und Umwelt (höchste Priorität)
- Handlungsspielraum für alle betroffenen Generationen und Gerechtigkeit zwischen Bevölkerungsschichten, -gruppen und Generationen
- Einhaltung des Verursacherprinzips
- Akzeptanz

Gestützt auf diese Beurteilungskriterien hat die EKRA die Bedingungen für eine sichere Lagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz formuliert. Anschliessend beschreibt sie im vorliegenden Bericht die herkömmlichen Lagerkonzepte. Darauf aufbauend wird das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung entwickelt.

Die wesentlichen technischen und operationellen Elemente dieses Konzepts sind Testlager, Hauptlager und Pilotlager. Das Testlager dient zur endgültigen Abklärung der Eignung des gewählten Lagerstandorts. Es wird vor der Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager betrieben. Das Hauptlager nimmt den Grossteil der Abfälle auf; ein kleiner, aber repräsentativer Anteil der Abfälle wird bis zum Ende einer Beobachtungsphase in das Pilotlager verbracht und dort stellvertretend für die Abfälle im Hauptlager bis zur abschliessenden Verfüllung der Anlage überwacht und kontrolliert. Ein kontrolliertes geologisches Langzeitlager kann innerhalb kurzer Zeit verschlossen und in ein geologisches Endlager überführt werden. Bezüglich der Langzeitsicherheit werden an Standort und Wirtsgestein dieselben Anforderungen wie an ein geologisches Endlager gestellt.

Abschliessend werden die diskutierten Lagerkonzepte verglichen und beurteilt.

Schlussfolgerungen

Die Beurteilung der verschiedenen Lagerkonzepte führt die EKRA zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. *Zwischenlager* erfüllen das Ziel der Langzeitsicherheit nicht.
2. *An der Erdoberfläche gelegene Abfalllager und tiefe Dauerlager* werden dem Ziel der Langzeitsicherheit ebenfalls nicht gerecht.
3. *Geologische Endlagerung* ist die einzige Methode zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen an die Langzeitsicherheit (bis zu mehr als 100'000 Jahren) entspricht.
4. Die gesellschaftlichen Forderungen an die Abfalllagerung orientieren sich am Prinzip der Reversibilität. Die EKRA hat daher das Konzept der *kontrollierten geologischen Langzeitlagerung* entwickelt, das Endlagerung und Reversibilität verbindet.
5. Bezüglich Sicherheit und Vorgehen beim Wechsel von der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung zur späteren geologischen Endlagerung bestehen noch offene Fragen, die Abklärungen erfordern.

6. Entsorgungsprogramme in der Schweiz:

HAA/LMA-Programm: Das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston ist sowohl für eine geologische Endlagerung als auch für eine kontrollierte geologische Langzeitlagerung grundsätzlich geeignet.

SMA-Programm: Dies gilt auch für das vorgesehene Wirtsgestein am Wellenberg; die Standortcharakterisierung ist allerdings durch einen Sondierstollen zu vervollständigen.

Empfehlungen

Ausgehend vom Mandat empfiehlt die EKRA folgendes Aktionsprogramm:

- a. Die öffentliche Auseinandersetzung zur Frage der nuklearen Entsorgung ist zu fördern.

Zum Kernenergiegesetz

- b. Im Kernenergiegesetz ist für alle Abfallarten die geologische Endlagerung vorzusehen. Die Projektanten sind zu verpflichten, im Rahmen der laufenden konkreten Projekte die Überwachung, Kontrolle und erleichterte Rückholung im Sinne des Konzepts der geologischen Langzeitlagerung zu dokumentieren.
- c. Die finanzielle Unabhängigkeit des Entsorgungsprogramms von den Betreibern der Kernkraftwerke ist schon heute zu sichern. Ausserdem sind die notwendigen institutionellen Anpassungen vorzunehmen.

Zum SMA-Projekt Wellenberg

- d. Der Standort Wellenberg erfüllt aufgrund der heutigen Kenntnisse die Anforderungen sowohl für die geologische Endlagerung als auch für die kontrollierte geologische Langzeitlagerung. Das Projekt ist weiterzuvorführen, wobei das angepasste Lagerkonzept der Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg als Ausgangspunkt dienen kann. Zusätzlich sind die Möglichkeiten der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung bezüglich Lage und Auslegung eines Pilotlagers zu prüfen. Vorgängig sind am Wellenberg die notwendigen Schritte zur Realisierung eines Sondierstollens in die Wege zu leiten.

Zum HAA/LMA-Programm

- e. Das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston ist grundsätzlich sowohl für ein geologisches Endlager als auch für ein kontrolliertes geologisches Langzeitlager geeignet. Nach Vorliegen des Entsorgungs-

nachweises sind die Standortcharakterisierung voranzutreiben und die Lagerplanung und Standorterkundung an die Hand zu nehmen. Ausländische Lageroptionen stellen keinen Ersatz für die Lösung der Entsorgungsfrage in der Schweiz dar.

Zum Zeitplan der Realisierung

- f. Für beide Projekte ist ein Zeitplan bis zur Realisierung der Lager vorzulegen und dessen Einhaltung regelmässig zu überprüfen.

1. Einleitung

Kapitel 1 beschreibt den Rahmen, in welchem die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle den vorliegenden Bericht ausarbeitete.

1.1 Nukleare Entsorgung in der Schweiz: Hintergrund des vorliegenden Berichts

Herkunft der Abfälle

1969 wurde in der Schweiz der erste kommerzielle Kernreaktor "Beznau 1" in Betrieb genommen. Heute werden fünf Reaktoren betrieben (Figur 1). Ein grosser Teil der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle stammt aus diesen Anlagen. Weitere Abfälle werden in Medizin, Industrie und Forschung produziert.

KKW	Inbetriebnahme	Leistung in MW (Stand 1.12.1998)
Beznau I	1969	365
Beznau II	1971	357
Mühleberg	1971	355
Gösgen	1978	970
Leibstadt	1984	1145

Figur 1: Kernkraftwerke (KKW) in der Schweiz

Erste Forschungsarbeiten

Die ersten Forschungsarbeiten auf der Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle wurden gegen Ende der sechziger Jahre durchgeführt.

"Projekt Gewähr 1985"

1972 wurde die Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (nagra) gegründet. 1978 stellte sie das Untersuchungsprogramm zum "Projekt Gewähr 1985" vor, mit dem der Entsorgungsnachweis für radioaktive Abfälle erbracht werden sollte. 1985 präsentierte die nagra dem Bundesrat die Resultate aus diesem Projekt.

Am 3. Juni 1988 beurteilte der Bundesrat die Ergebnisse von Gewähr wie folgt (siehe auch nagra 1997):

- Für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) ist der Entsorgungsnachweis erbracht.
- Für hochaktive Abfälle (HAA) und langlebige α -haltige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ist der Sicherheitsnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht; hingegen besteht noch kein Standortnachweis für ein Endlager.
- Aus bautechnischer Sicht bestehen keine Bedenken gegen die Erstellung eines Endlagers.

Neben ihren bisherigen und weiterlaufenden Untersuchungen im kristallinen Untergrund der Nordschweiz wurde die nagra vom Bundesrat verpflichtet, auch ein Untersuchungsprogramm in Sedimentgesteinen durchzuführen.

Programm HAA	Das 1991 in Sedimentgesteinen begonnene Untersuchungsprogramm im Opalinuston der Nordschweiz (nagra 1994a), insbesondere die Sondierbohrung in Verbindung mit der 3D-Seismik bei Benken (Kanton ZH; 1999), führte im Hinblick auf einen Standort für ein Endlager HAA zu ermutigenden Resultaten.
Programm SMA	Nach einem ablehnenden Volksentscheid 1995 im Kanton Nidwalden sistierte der Bundesrat 1997 das Rahmenbewilligungsgesuch für ein Endlager SMA am Wellenberg. Das Endlagerprojekt ist seither blockiert. Deshalb setzten der Bund und der Kanton Nidwalden eine "technische Arbeitsgruppe" und eine "Arbeitsgruppe Volkswirtschaft" ein. Die beiden Arbeitsgruppen umrissen in ihren Berichten den Rahmen einer Weiterführung des Projektes sowie die mit dem Projekt verbundenen volkswirtschaftlichen Aspekte (TAG 1998, AGV 1998).
Energie-Dialog Entsorgung	1998 sollten im "Energie-Dialog Entsorgung" wichtige Grundsatzfragen im Hinblick auf ein neues Kernenergiegesetz (KEG) beantwortet werden. Der Ende Jahr vom Vorsitzenden verfasste Schlussbericht enthielt Vorschläge, wie die gegensätzlichen Positionen der Betreiber von Kernkraftwerken und der Umweltorganisationen überbrückt werden können (Ruh 1998).
Einsetzung der EKRA	Nachdem Gespräche der Bundesräte Moritz Leuenberger und Pascal Couchepin mit den Standortkantonen, den Umweltorganisationen und den Betreibern der Kernkraftwerke Anfang 1999 ohne zufriedenstellendes Ergebnis geblieben waren, wurde die EKRA eingesetzt.

1.2 Mandat der EKRA

Der Vorsteher des Eidgenössischen Departementes für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesrat Moritz Leuenberger, erteilte der Expertengruppe folgendes Mandat:

Die "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (EKRA) erarbeitet die Grundlagen für einen Vergleich der Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Sie untersucht und vergleicht insbesondere die geologische Endlagerung, die kontrollierte und rückholbare Langzeitlagerung und die Zwischenlagerung unter den Aspekten:

- Aktive und passive Sicherheit
- Überwachung und Kontrolle
- Rückholbarkeit

In einem technische und gesellschaftliche Fragen darstellenden Bericht fasst die EKRA die gewonnenen Resultate sowie ihre Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu Händen des UVEK zusammen.

Basierend auf diesem Auftrag hat die EKRA das kombinierte Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (KGL) entwickelt. Anhand von Beurteilungskriterien wird die kontrollierte geologische Langzeitlagerung mit der geologischen Endlagerung, der Dauerlagerung und der Zwischenlagerung verglichen und bewertet. Zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle legt die EKRA einen Aktionsplan vor.

1.3 Arbeitsweise und Zusammensetzung der EKRA

Leitlinien

Die EKRA ging bei ihrer Arbeit davon aus, dass es Aufgabe der Gesellschaft sei, die Vorgaben zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle zu definieren. In Anlehnung an den Aktionsplan des Bundes (Aktionsplan 1997) orientierte sich die Arbeitsgruppe namentlich am Gedanken der Nachhaltigkeit. Demnach besitzt die radiologische Sicherheit der heutigen sowie kommender Generationen vor allen weiteren Anforderungen Vorrang.

Hearings

Die EKRA tagte in den Monaten Juni bis Dezember 1999 an insgesamt sieben Tagen. An Hearings wurden die Behörden (Bundesamt für Energie, BFE; Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK), Umweltorganisationen (Schweizerische Energiestiftung, SES; Greenpeace; Komitee für die Mit-

sprache der Nidwaldner Bevölkerung bei Atomanlagen, MNA) sowie Vertreter der nagra und der Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg (GNW) angehört.

Verfassen
des Berichts

Basierend auf den Hearings, Diskussionen und Literaturstudien wurde der Berichtstext kapitelweise von einzelnen Mitgliedern verfasst und anschliessend inhaltlich und redaktionell bereinigt. Die Teilnehmer der Hearings erhielten Gelegenheit, zu einem Vorentwurf Stellung zu nehmen und Korrekturen bzw. Ergänzungen vorzuschlagen; verantwortlich für den Inhalt des Berichts ist jedoch allein die EKRA.

Zusammensetzung
der EKRA

Vorsitz:

Prof. Walter Wildi, Universität Genf, Fachbereich Geologie

Mitglieder:

Dr. Detlef Appel, PanGeo Hannover, Fachbereich Geologie, radioaktive Abfälle

Dipl. nat. Marcos Buser, Buser & Finger Zürich, Fachbereich Altlasten, Entsorgungskonzepte

Prof. François Dermange, Universität Genf, Fachbereich Ethik

Dr. Anne Eckhardt, Basler & Hofmann Zürich, Fachbereich Risiko und Sicherheit

Dr. Peter Hufschmied, Emch + Berger Bern, Fachbereich Hydrogeologie, Modellierungen

Dr. Hans-Rudolf Keusen, Geotest Zollikofen, Fachbereich Tunnelbau, Stabilitätsfragen

Sekretariat:

Dr. Michael Aebersold, Bundesamt für Energie

2. Entwicklung und heutiger Stand der Entsorgungsprogramme

Kapitel 2 zeigt die Entwicklungen auf, welche zu den heute verfolgten Entsorgungsprogrammen führten, und beschreibt Ansätze zu neuen Strategien. Dargestellt werden sowohl der Stand der Entsorgung in der Schweiz als auch die internationale Situation.

2.1 Zur Geschichte der Entsorgungsprogramme

Schutz vor
ionisierender Strahlung

Ionisierende Strahlung verursacht Schäden an Lebewesen, namentlich durch die Auslösung von genetischen Veränderungen und Krebskrankheiten. Um dies zu verhindern, müssen radioaktive Abfälle abgeschirmt gehandhabt und aufbewahrt werden.

Entsorgung
radioaktiver Abfälle

Das Problem der Entsorgung radioaktiver Abfälle besteht, seit entsprechende Substanzen in Medizin, Industrie und Forschung eingesetzt werden. Vom Beginn der militärischen Anwendung der Kernspaltung in den vierziger Jahren an und verstärkt mit der friedlichen Nutzung der Kernenergie ab 1950 hat die Entsorgungsfrage weltweit an Bedeutung gewonnen.

Geologische
Endlagerung

Die damit verbundenen naturwissenschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Probleme wurden in der Anfangsphase der friedlichen Kernenergienutzung unterschätzt. Mit wachsendem Problembewusstsein setzte in vielen Staaten eine kontroverse Diskussion über verschiedene, heute teilweise exotisch anmutende Entsorgungsoptionen ein (Figur 2). Im Vordergrund standen dabei die hochaktiven Abfälle (HAA¹). Die Auseinandersetzung um die Entsorgung der schwachaktiven und mittelaktiven Abfälle (SAA, MAA) war weniger intensiv.

Nahezu alle Konzepte zur Entsorgung radioaktiver Abfälle wurden schon zu einer sehr frühen Zeit der Nutzung der Kernspaltung, mehrheitlich in den fünfziger Jahren, skizziert. Wissenschaftliche und technische, wirtschaftliche und ökologische, aber auch politische Beweggründe schränkten im Laufe der Jahrzehnte die Zahl der Optionen ein.

¹ Zu den HAA werden hier vereinfachend auch abgebrannte Brennelemente gerechnet, obwohl sie in den meisten Staaten rechtlich nicht als Abfall behandelt werden. Den Bezeichnungen "hoch-, mittel- und schwachaktiv" liegt keine strenge Definition zugrunde, da sich die entsprechenden Abfallkategorien in Abhängigkeit von nationalen Entsorgungsregelungen unterscheiden können.

Für HAA und MAA, in einigen Staaten auch für SAA, hat sich dann bei den für die Entsorgung zuständigen Institutionen ab etwa Mitte der sechziger Jahre weltweit die Idee der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen der kontinentalen Erdkruste (geologische Endlagerung, GEL), namentlich in Bergwerken, durchgesetzt.

Ausserhalb dieser Institutionen bestanden gegenüber der GEL allerdings von Anfang an auch Zweifel. Sie ergeben sich vor allem aus

- der Diskrepanz zwischen dem langen Zeitraum, über den die Abfälle eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen, und der begrenzten Aussagekraft von Langzeitprognosen bezüglich Funktionstüchtigkeit von Barrieren, die für die dauerhafte Sicherheit von Endlagern erforderlich sind
- der fehlenden Möglichkeit von Eingriffen in das Endlagersystem bei Versagen
- der Irreversibilität der Endlagerung

Entsorgungskonzepte	Art, Material	Bemerkung	Autor, Jahr	Zeitschrift
HAA: Fixierung in Ton	insbesondere Montmorillonite		Ginell et al., 1954	Nucleonics 12/12
HAA: Verglasung und Keramik		Verglasung seit 1951 vorgeschlagen	Rodger, 1954	Nucl. Engineering 50/5
HAA und SMA: Deponierung in oberflächennahen Schichten	dump oder land-burial	im Rahmen des Konzepts des nuklearen Brennstoffkreislaufs	Goodman, 1949	Nucleonics 4/2
SMA (und HAA): Verdünnung	Ventilation von Gasen und Ableitung von Flüssigkeiten		Beers, 1949 Scott, 1950	Nucleonics 4/4 Nucleonics 6/1
HAA und SMA: Verpressung	in Borlöchern oder Brunnen		Struxness et al. 1955	IAEA, Genf, P/554
Flüssige SMA: Versickerung	mit Versickerungsbecken		Morton, 1952	NSA 6, 1212
Geologische Endlagerung	Sedimente (Tone, Salz), danach kristalline Gesteine, Tuffe etc.	progressive Entwicklung der Konzepte	Theis, 1955 Warde et al., 1955	IAEA, Genf, P/564, J. of Metals, Oct. 55
SMA: Meeresversenkung	dumping	nach 1972 durch Londoner Convention geregelt, seit 1985 Moratorium. Soll im Rahmen der Londoner Konvention verboten werden.	Claus, 1955	IAEA, Genf, P/848
HAA: Subseabed-Disposal	Endlagerung in unkonsolidierten, ungestörten Meeressedimenten	ab 1977 als "sub seabed"-Projekt weiterverfolgt	Evans, 1952	NSA 8, 1954: 4929
HAA: Endlagerung in Subduktionszonen	submarine Endlager in abtauchender ozeanischer Platte	Gefahr des Vulkanismus	Bostrom et al., 1970	Nature 228
HAA: Endlagerung in Bruchzonen	Tiefseeegräben		Bogorov et al., 1958	IAEA, Genf, P/2058
HAA: Endlagerung im Eis	antarktische Endlager	meltdown heisser Abfälle (Eisschmelzen)	Philbert, 1959	Atomkern-Energie, 4/3
HAA: Selbstverschmelzung im tiefen Untergrund	deep underground melting	flüssige HAA in einer atomar erzeugten Kaverne	Cohn et al., 1972	Nuclear Technol., April 1972
"Entsorgung" im Weltall			Hollocher, 1975	MIT Press
Transmutation			Cecille et al., 1977 Hage W., 1978	IAEA, Wien, 36/366 EUR-5897

Figur 2: Vorgeschlagene Entsorgungskonzepte seit 1949 (ergänzt nach Buser 1998)

Alternative Lagerkonzepte

Bereits Anfang der siebziger Jahre hatten daher Vorschläge zu alternativen Lagerkonzepten Eingang in die Diskussion gefunden (IAEA 1971, Buser & Wildi 1981). Überlegungen zur Notwendigkeit der Überwachung und der möglichen Rückholung von Abfällen aus einem Lager führten zu Lagerkonzepten, die Elemente der gesellschaftlichen Kontrolle stark betonten (Hammond 1979, Roseboom 1983). Gegen Ende der achtziger Jahre wurden solche Entwürfe von Bewegungen mit mystischem Gedankengut wieder aufgenommen. Sie mündeten in ein Konzept zum dauernden Hüten radioaktiver Abfälle ("Nuclear Guardianship" oder "Hütekonzert", Kreuzer 1992, Buser 1997, 1998). Umweltorganisationen vertraten in der Folge neue Lagerkonzepte unter besonde-

rer Berücksichtigung ethisch motivierter Grundsätze (Bär 1997, SES/Greenpeace 1998).

2.2 Entsorgung radioaktiver Abfälle im Ausland

Geologische
Endlagerung von HAA

Während heute für zivile HAA und MAA mit langlebigen Radionukliden in den meisten Staaten die Entsorgung in einem geologischen Endlager vorgesehen ist, werden SAA und MAA in Abhängigkeit von ihrem Gefährdungspotential (Strahlung, Wärmeentwicklung, Anteil langlebiger Radionuklide) und den jeweils gültigen nationalen Sicherheitsstandards unterschiedlich behandelt.

Dumpingverbot

Nicht mehr zur Diskussion steht die Versenkung dieser Abfälle im Meer. Aufgrund des Londoner Abkommens 1972 zum Schutz der Meere und Ergänzungen besteht ein Moratorium. Ein Zusatzprotokoll wird die Versenkung von festen und flüssigen radioaktiven Abfällen im Meer in Zukunft grundsätzlich verbieten. Für Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Radionukliden (in einigen Ländern: Halbwertszeit < 30 Jahre) ist heute die kostengünstige Endlagerung in technisch mehr oder weniger aufwendigen oberflächennahen Einrichtungen am meisten verbreitet.

Geologische Endlagerung
von SAA und MAA

In Kuba, Finnland, Norwegen, Schweden, der Schweiz und Tschechien (HAN et al. 1997) werden für SAA und MAA mit hohen Anteilen kurzlebiger Radionuklide Endlager in einfach zugänglichen Stollen oder Kammern einige zehn bis wenige hundert Meter unter der Erdoberfläche betrieben bzw. geplant. Die in Deutschland, Grossbritannien und Rumänien vorgesehene GEL dieser Abfälle in tiefen, nur über Schächte zugänglichen Bergwerken stellt dagegen die Ausnahme dar.

Für die GEL werden vor allem Sicherheitsargumente genannt: der Abstand zwischen Abfall und Biosphäre, die geringe Strömungsgeschwindigkeit des Transportmediums Grundwasser, das Rückhaltevermögen der Geosphäre gegenüber aus dem Endlager möglicherweise freigesetzten Radionukliden und die inhärent-passive Sicherheit des aus mehreren unabhängigen technischen und natürlichen Barrieren bestehenden Endlagersystems. Die ethische Rechtfertigung für die Endlagerung liegt darin, dass die mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle verbundenen Lasten nicht nachfolgenden Generationen hinterlassen werden dürfen, die von der Kernenergienutzung keine Vorteile hatten (NEA 1995).

Alternative Lagerkonzepte

Gegenüber diesen Argumenten bestehen allerdings auch Zweifel, die sich im Verlauf der vergangenen zehn bis fünfzehn Jahre vielerorts verstärkt und in gesellschaftlichem und politischem Widerstand gegen konkrete Endlagerprojekte artikuliert haben.

Verschiedentlich sind daher Varianten der herkömmlichen Art der Endlagerung entwickelt oder gänzlich neue Entsorgungsstrategien angedacht worden. Sie betreffen vor allem HAA und MAA mit langlebigen Radionukliden. Zu den heute international diskutierten Optionen gehören insbesondere die

- Endlagerung mit vorgeschalteter Demonstrations- bzw. Testphase im Endlager bzw. in einem Untertagelabor im Bereich des geplanten Endlagers
- Endlagerung mit langer, vorab zeitlich befristeter oder unbefristeter Rückholbarkeit (und Überwachung) der Abfälle
- vorab zeitlich befristete oder unbefristete Langzeitlagerung der Abfälle (mit Überwachung) in einem übertägigen oder untertägigen Lager
- Kombination mehrerer Optionen

Ob und gegebenenfalls welche dieser Optionen in einzelnen Staaten untersucht oder gar verfolgt werden, hängt von den Motiven für den Strategiewechsel und auch von den spezifischen Rahmenbedingungen ab, insbesondere von Grösse und Ausgestaltung² des Programms zur Nutzung der Kernenergie.

² mit oder ohne Brütertechnologie, Wiederaufarbeitung

	Frankreich	USA	Niederlande	Schweden
Übergeordnete Ziele	Sicherheitsgewinn, Verbesserung der Nachweisqualität, Nachhaltigkeit, Akzeptanzgewinn	Sicherheitsgewinn, Verbesserung der Nachweisqualität, auch Akzeptanzgewinn	Sicherheitsgewinn, Verbesserung der Nachweisqualität, Nachhaltigkeit, Akzeptanzgewinn	Demonstrationsphase: Sicherheitsgewinn; GEL-R ³ noch unklar (Akzeptanzgewinn?)
Technische Ziele	Langzeitlagerung, GEL-R: Zeitgewinn bis zur Abtrennung langlebiger Radionuklide/Transmutation, Reversibilität, Kontrolle der Abfälle; Untertagelabor: Erfahrung gewinnen, Abbau von System- und Nachweisunsicherheiten, Untersuchung der Rückholbarkeit	Überprüfung des Systemverhaltens Endlager, Absicherung der Modelle mit Sicherheitsanalysen, Reagieren auf unvorhergesehene Ereignisse	Zeitgewinn bis zur Abtrennung langlebiger Radionuklide/Transmutation, Reversibilität, Kontrolle der Abfälle, Erhaltung der Option Wiederaufarbeitung	Demonstrationsphase: Demonstration der sicheren Funktion des Endlagersystems, Erfahrung sammeln; GEL-R: noch unklar
Zeitraum für die Umsetzung	Langzeitlagerung: noch unbestimmt; GEL-R: noch unbestimmt (ca. 300 Jahre)	50 Jahre direkter Zugang zu den Abfällen, ab Einlagerungsbeginn 100 Jahre (ausdehnbar auf 300 Jahre) Rückholbarkeit der Abfälle	Langzeitlagerung: Noch unbestimmt (bis mehrere hundert Jahre); GEL-R: bis 200 Jahre (endgültige Verfüllung nach bis zu 600 Jahren)	Demonstrationsphase: mindestens 5 Jahre; GEL-R: noch nicht entschieden
Art der Umsetzung	Bis 2006 Prüfung verschiedener Optionen: Oberirdische/unterirdische Langzeitlagerung, GEL, verschiedene Phasen von GEL-R; Untertagelabor: Untersuchungen (Verständnis Endlagersystem, Nachweismethodik)	Rückholbare Lagerung der Behälter in Strecken, Überwachung, Untersuchungen (Auswirkungen Wärmeeintrag auf Wirtsgestein, Behälterkorrosion)	Bis 2000 Prüfung verschiedener Konzepte mit den Phasen: Oberirdische Langzeitlagerung (100 bis 300 Jahre), GEL-R (bis 200 Jahre) und endgültige GEL-Verfüllung	Demonstrationsphase: Teilmenge des vorgesehenen Inventars wird in Teilbereich des Endlagers rückholbar gelagert; GEL-R: noch nicht festgelegt
Betroffene Abfälle	Langzeitlagerung und GEL-R: Vor allem abgebrannte Brennelemente, HAA und langlebige MAA mit Verwertungspotential; GEL: Abfälle ohne Verwertungspotential	Abgebrannte Brennelemente, sonstige zivile HAA	Alle Abfälle (möglicherweise nur HAA und langlebige MAA mit Verwertungspotential)	Abgebrannte Brennelemente
Standorte (Wirtsgestein)	Untertagelabor / GEL-R: Standort "L'Est" (Tonstein) bzw. noch nicht benannt (Granit)	Yucca Mountain (Tuff)	Noch nicht benannt (Steinsalz, möglicherweise Ton[stein])	Noch nicht benannt, Auswahlverfahren läuft (Kristallin)
Stand der Umsetzung	Konzeptentwicklung, vergleichende Sicherheitsstudien	Detailplanung, Standorteignungsaussage ca. 2001	Konzeptentwicklung, vergleichende Sicherheitsstudien	Demonstrationsphase: Detailplanung; GEL-R: Konzeptentwicklung
Programm zur Nutzung der Kernenergie (1998/1999)	62 Kernkraftwerke (zwei schnelle Brüter), Beendigung der Kernenergienutzung nicht geplant	104 Kernkraftwerke, Beendigung der Kernenergienutzung nicht geplant	Ein Kernkraftwerk, Beendigung der Kernenergienutzung im Jahr 2004 geplant	12 Kernkraftwerke, Beendigung der Kernenergienutzung im Jahr 2010 geplant

Figur 3: Entsorgungsstrategien in Frankreich, den USA, den Niederlanden und in Schweden

³ GEL-R: Endlagerung mit langer, vorab zeitlich befristeter oder unbefristeter Rückholbarkeit (und Überwachung) der Abfälle

Beispiele Frankreich, USA,
Niederlande und Schweden

In Figur 3 sind beispielhaft die in Frankreich, den USA, den Niederlanden und Schweden ins Auge gefassten bzw. bereits verfolgten Lagerkonzepte für zivile Abfälle dargestellt. Die Angaben sind ANDRA (1997), CNE (1998, 1999), CRWMS (1998), DODD et al. (1998), EIA (1999), IWM (1999), NEA (1997a, 1997b, 1998), NL (1993), OCRWM (1998), Richardson (1999), Selling et al. (1998), SKB (1999) und SKI (1999) entnommen. Sie beziehen sich vor allem auf Aspekte, die für die Diskussion um herkömmliche Endlagerung oder Entsorgungsalternativen bedeutsam sind. Zu beachten ist, dass bestimmte Optionen für unterschiedliche Abfallarten zur Auswahl stehen.

Mit der Auswahl von Frankreich, den USA, den Niederlanden und Schweden wird eine grosse Bandbreite bereits weitgehend verbindlicher Alternativen zur herkömmlichen Endlagerung abgedeckt. Zudem unterscheiden sich die Programme dieser Staaten zur Nutzung der Kernenergie deutlich. Im Hinblick auf die Ausgereiftheit der vier nationalen Strategien sind folgende Besonderheiten zu beachten:

Das französische und das niederländische Entsorgungsprogramm befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Die angegebenen Optionen werden gegenwärtig untersucht, um die Festlegung auf ein endgültiges Konzept vorzubereiten.

Die Strategie der USA wurde 1982 gesetzlich festgelegt (Nuclear Waste Policy Act) und seither lediglich modifiziert.

Zur Rückholbarkeitsphase im schwedischen Endlagerungsprogramm liegen noch keine verbindlichen Regelungen vor. Rückholungstechniken werden jedoch intensiv untersucht (SKB 1999).

Gründe für Alternativen
zur Endlagerung

Die Motive bzw. auslösenden Momente, die zuvor verfolgten Konzepte aufzugeben, waren in den betrachteten Staaten unterschiedlich. In Frankreich und den USA erfolgte ein Umdenken, nachdem sich – durch methodische Unzulänglichkeiten bei der Auswahl von Endlagerstandorten noch verstärkt – regional und lokal heftiger Widerstand gegen einzelne Endlagerprojekte entwickelt hatte. Mit einem neuen Ansatz sollte die Akzeptanz verbessert werden. Ähnliches trifft auch für Schweden und die Niederlande zu, obwohl dort noch keine erheblichen Akzeptanzprobleme aufgetreten sind. In Frankreich und in den Niederlanden gilt seit 1991 bzw. 1993 die Reversibilität jeglicher Abfalllagerung politisch (in Frankreich auch rechtlich) als vorrangige Entsorgungsvorgabe.

Die in Figur 3 angeführten übergeordneten und technischen Ziele der vier Entsorgungsstrategien spielen auch ausserhalb der untersuchten Staaten eine wichtige Rolle in der Diskussion.

Verbesserung der Sicherheit
und der Nachweisqualität

Zur Erhöhung der Sicherheit bestehender bzw. geplanter Endlager und zur Verbesserung der Aussagekraft von Eignungsnachweisen soll in den betrachteten und weiteren Staaten, wie z.B. Grossbritannien, eine (kurze) Testphase und/oder eine definierte (längere) Phase mit einfacher Rückholbarkeit der Abfälle eingeführt werden. In diesen Phasen sollen die technische Machbarkeit der Endlagerung abgebrannter Brennelemente demonstriert, das Verhalten des Endlagersystems beobachtet und die mit der Endlagerung verbundenen Erkenntnis- und Prognoseunsicherheiten verringert werden. Gleichzeitig können mit der Einrichtung eines Untertagelabors wirtsgesteins- und standortbezogene Erkenntnisse gewonnen werden.

Art und Umfang der Überwachungsmassnahmen und Untersuchungen, die durchgeführt werden sollen, um die phasenbezogenen Ziele zu erreichen, werden gegenwärtig diskutiert bzw. geplant. Die Zweckmässigkeit einer Phase mit erleichterter Rückholbarkeit, welche der langfristigen Informationsbeschaffung zum Abbau von Prognoseunsicherheiten dient, ist dabei – zumal unter Berücksichtigung der Langzeitsicherheit – umstritten.

In Frankreich und in den Niederlanden finden breit angelegte Untersuchungen statt. Anders als bei der aktuellen Diskussion in der Schweiz stellen die Ergänzung bzw. der Ersatz natürlicher und technischer Barrieren durch Kontroll- und Reparaturmassnahmen hierfür aber nicht das Hauptargument dar.

Verminderung des Gefahrenpotentials der Abfälle

Vielmehr steht im Vordergrund, den Zeitraum zu überbrücken, bis fortschrittliche Technologien zur Reduzierung des Gefahrenpotentials zur Verfügung stehen bzw. bis bestimmte Abfallarten durch Abtrennung langlebiger Radionuklide und deren Transmutation zu kurzlebigen verwertet werden können. In beiden Ländern (sowie in den USA, DOE 1999) wird gegenwärtig das Entwicklungspotential solcher Technologien untersucht und beurteilt. Dabei sind allerdings weniger entsorgungspolitische als vielmehr energie- und forschungspolitische Interessen ausschlaggebend. Über die Umsetzung im nationalen Rahmen wird nur in Frankreich nachgedacht. Selbst dort bestehen jedoch Zweifel, ob ein derartiges Vorgehen unter dem Blickwinkel von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gerechtfertigt wäre.

In Schweden (und anderen Staaten) werden Strategien, mit denen allein der Zeitraum bis zur Verfügbarkeit neuer Technologien überbrückt werden soll,

verworfen. Begründet wird dies vor allem mit der geringen Grösse des Atomprogramms, den Unwägbarkeiten der künftigen Entwicklung sowie den Kosten und Umweltauswirkungen entsprechender Anlagen. Das gilt umso mehr, als auch bei Abtrennung und Transmutation eine Endlagerung notwendig ist (NEA 1999).

Akzeptanzgewinn

In allen untersuchten Staaten spielt der Akzeptanzgewinn bei der Strategieentwicklung eine wichtige Rolle. Allerdings bleibt abzuwarten, ob sich die gewählten Vorgehensweisen auch tatsächlich akzeptanzfördernd auswirken werden. Zumindest in der niederländischen Öffentlichkeit bestehen offenbar Befürchtungen, dass alternative Entsorgungskonzepte lediglich zu deren Beruhigung untersucht würden (Damveld & Van den Berg 1999a).

In den USA hat der Widerstand gegen die Konzentration auf Yucca Mountain, Nevada, als einzigen Endlagerstandort für zivile HAA nicht zu bedeutenden Änderungen des Endlagerkonzeptes geführt, obwohl Alternativen, insbesondere die Langzeitlagerung, diskutiert worden sind (Gervers 1993). Vielmehr wurden die Information der Öffentlichkeit und deren Beteiligung an Entscheidungsprozessen erweitert, um die Akzeptanz zu verbessern. Der Widerstand, zum Beispiel des Staates Nevada gegen das Projekt, wurde dadurch nicht vermindert.

Schlussfolgerungen

Abschliessend ist festzuhalten, dass die Ziele Nachhaltigkeit und Akzeptanz weder eindeutig den Weg zu einem bestimmten Lagerkonzept weisen, noch unmittelbar mit der Sicherheit in Beziehung stehen. Die ethisch motivierte Aufforderung "Erhalt des Handlungsspielraums künftiger Generationen" kann, je nach der aus dieser Forderung abgeleiteten Vorgehensweise, zu widersprüchlichen Schlussfolgerungen führen.

Zusammenfassende
Bewertung

Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Radionukliden werden in den meisten Staaten in Einrichtungen an oder nahe der Erdoberfläche entsorgt, und zwar in der Regel ohne Absicht zur Rückholung. Für HAA/LMA werden seit einigen Jahren wieder Alternativen zur früher bevorzugten geologischen Endlagerung diskutiert.

International verstärkt sich die Diskussion. Diese Entwicklung beruht nicht primär darauf, dass alternative Entsorgungskonzepte aus Sicht der für die Entsorgung verantwortlichen Institutionen Sicherheitsvorteile bieten. Vielmehr wird vom verbreiteten Widerstand gegen die Entsorgung radioaktiver Abfälle durch Endlagerung im Allgemeinen, sowie gegen konkrete Endlagerprojekte im Besonderen, in einer Reihe von Staaten die Notwendigkeit abgelesen, auf die geäußerten Befürchtungen zu reagieren. In Frankreich und den Niederlanden zwingt zudem das rechtlich bzw. politisch verbindliche Reversibilitätsprinzip zur Aufgabe der herkömmlichen Endlagerung.

Die in allen betrachteten Staaten verfolgte bzw. untersuchte Ergänzung der herkömmlichen Endlagerung um eine vorgeschaltete Demonstrations- oder Testphase bzw. eine genau definierte längere Phase mit erleichterter Rückholbarkeit wird auch in einigen weiteren Ländern diskutiert, vor allem für HAA bzw. abgebrannte Brennelemente.

In Frankreich und in den Niederlanden steht die gesamte bisherige Entsorgungskonzeption für mittel- und hochaktive Abfälle (Frankreich) bzw. wahrscheinlich alle Abfallarten (Niederlande) auf dem Prüfstand. Mit den Alternativen "Endlagerung mit langfristiger Rückholbarkeit der Abfälle" und "Langzeitlagerung der Abfälle" soll vor allem der Zeitraum überbrückt werden, bis Technologien zur Verminderung des langfristigen Gefahrenpotentials zur Verfügung stehen bzw. eine definitive Lösung realisierbar ist. Gegenwärtig ist allerdings offen, ob derartige Technologien überhaupt entwickelt werden (können). Eine konkrete zeitliche Perspektive und Sicherheitsvorteile sind für solche Lösungen nicht zu erkennen.

2.3 Das Entsorgungsprogramm der Schweiz

2.3.1 Rechtlicher Rahmen

Umgang mit
radioaktiven Abfällen

Der Umgang mit radioaktiven Abfällen wird in der Schweiz im Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991 und in der Strahlenschutzverordnung vom 22. Juni 1994 geregelt. Das Strahlenschutzgesetz hält insbesondere fest: "Die in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle müssen grundsätzlich im Inland beseitigt werden. Der Bundesrat umschreibt die Voraussetzungen, unter denen ausnahmsweise eine Ausfuhrbewilligung erteilt werden kann." (Art. 25, Abs. 3)

Abfallausfuhr

Atomgesetzgebung

Die gesetzliche Grundlage für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, die bei der Nutzung der Kernenergie entstehen, bildet das Atomgesetz vom 23. Dezember 1959. Es unterstellt insbesondere die Errichtung eines Abfalllagers der Bewilligungspflicht und der Aufsicht des Bundes. Das Atomgesetz wird ergänzt durch den Bundesbeschluss vom 6. Oktober 1978 zum Atomgesetz. Dieser hält fest: "Wer radioaktive Abfälle erzeugt, hat auf eigene Kosten für deren sichere Beseitigung zu sorgen; vorbehalten bleibt das Recht des Bundes, die radioaktiven Abfälle auf Kosten der Erzeuger selbst zu beseitigen." (Art. 10, Abs. 1)

Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) ist Aufsichtsbehörde. Sie definiert in ihrer Richtlinie HSK-R-21 die Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie HSK-R-14 regelt die Konditionierung und Zwischenlagerung der Abfälle

2.3.2 Die Endlagerprogramme SMA und HAA/LMA

Die Schweiz verfolgt heute zwei Endlagerprogramme:

SMA-Programm
Wellenberg

1. *Kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)*

Nach einem langen Evaluationsverfahren schlug die nagra 1993 den Wellenberg als Standort für ein Endlager SMA vor. 1994 wurden die Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg (GNW) gegründet und das Rahmenbewilligungsgesuch eingereicht. Am 25. Juni 1995 lehnten jedoch die Nidwaldner Stimmbürgerinnen und Stimmbürger die beiden Wellenberg-Vorlagen – die Stellungnahme der Nidwaldner Regierung zum Rahmenbewilligungsgesuch und die Erteilung der Konzession zur Nutzung des Untergrundes – knapp ab. Am 4. Juni 1997 hat das UVEK das Rahmenbewilligungsverfahren sistiert.

Aufgrund der von 1995 bis 1998 geführten Diskussion schlägt die GNW heute ein angepasstes Lagerkonzept Wellenberg (nagra 1998) mit einer vorerst überwachten Lagerung in offenen und unverfüllten Kavernen vor. Die GNW hat sich zudem bereit erklärt, etappiert vorzugehen und vorerst nur eine Teilkonzession für einen Sondierstollen zu beantragen.

Seit dem ablehnenden Volksentscheid im Kanton Nidwalden ist dieses Entsorgungsprogramm blockiert. Zur Weiterführung des Projektes wartet die GNW heute sowohl auf einen politischen Entscheid als auch auf eine kantonale Bewilligung, um mittels Sondierstollen die Eignung des Gesteins im Untergrund zu erkunden.

2. *Hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle (HAA/LMA)*

HAA/LMA-Programm

Für HAA/LMA verfolgt die nagra den Nachweis der Machbarkeit der geologischen Endlagerung in zwei potentiellen Wirtsgesteinen:

Kristallin
Nordschweiz

Im Rahmen des Projekts Kristallin wurde die Endlagerung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz untersucht. Mit dem "Projekt Gewähr 1985" konnte die generelle Eignung des Gesteins nachgewiesen werden. Aus geologischer Sicht ist der kristalline Untergrund der Nordschweiz jedoch schwer explorierbar. In der Folge wurde ein weiteres Bohrgesuch nach wenig aussagekräftigen Resultaten aus seismischen Untersuchungen zur Ortung eines geeigneten Gesteinskörpers sistiert. Die Option Kristallin ist heute als Reserveoption zu betrachten.

Sedimente
(Opalinuston)
Nordschweiz

1988 verlangte der Bundesrat eine Ausweitung des Untersuchungsprogramms auf Sedimentgesteine. In einem ersten Schritt erwog die nagra Gesteine der Unteren Süsswassermolasse und den Opalinuston (nagra 1988). Die Wahl fiel schliesslich auf die zweite dieser Gesteinsformationen, die homogener und von geringerer Durchlässigkeit als die Molasse ist (nagra 1994a). Ab 1994 wurden Sedimentgesteine im nördlichen Kanton Zürich untersucht. Seit 1997 führt die nagra Arbeiten im Zürcher Weinland durch. Die seismischen Messungen sowie die 1998/1999 durchgeführte Sondierbohrung Benken bestätigten die positiven Erwartungen (nagra 1999). Der Entsorgungsnachweis soll deshalb in der etwa 100 m mächtigen Gesteinsformation des Opalinustons erbracht werden.

Untertagelabors

Im Rahmen des Entsorgungsprogramms führt die nagra wissenschaftliche und technische Untersuchungen in zwei Untertagelabors durch:

Am Mt. Terri (Kanton Jura) werden die Eigenschaften des Opalinustons als Wirtsgestein für ein Endlager erforscht. Mehrere ausländische Organisationen, unter anderem aus Deutschland, Japan, Frankreich, Spanien, sind an diesem Programm beteiligt.

Versuche mit breiter internationaler Beteiligung werden auch im Grimsel-Labor der nagra in kristallinen Gesteinen durchgeführt.

3. Gesellschaftliche Erwartungen an die Lagerung radioaktiver Abfälle und die sich daraus ergebenden Konsequenzen

Kapitel 3 analysiert und bewertet die gesellschaftlichen Erwartungen an die Lagerung radioaktiver Abfälle. Die Weiterentwicklung des schweizerischen Lagerkonzepts hat diesen Erwartungen Rechnung zu tragen. Der Umfang dieses Kapitels erklärt sich namentlich durch die Tatsache, dass gesellschaftlichen Anliegen bis heute zu wenig Beachtung geschenkt wurde.

3.1 Gesellschaftliche Entscheidungen und Expertenurteil

Gesellschaftliche Mitbestimmung

Lange ging man davon aus, dass die Entsorgung radioaktiver Abfälle ausschliesslich Angelegenheit von Experten sei. Doch seit einigen Jahren werden zunehmend Stimmen laut, die für eine Mitbestimmung der Gesellschaft eintreten. Die Diskussion wird dadurch bereichert, gewinnt aber zugleich an Komplexität. Es stellt sich die Frage, wie zwischen verschiedenen Wissensformen, Rationalitätsebenen und Wahrheitsansprüchen vermittelt werden und gleichzeitig eine pluralistische und demokratische Diskussion über die Entsorgung der radioaktiven Abfälle erfolgen kann.

Ethik als Entscheidungshilfe

In diesem Sinn wird Ethik nicht nur als eine Wissensform unter anderen verstanden, die sich selbst wiederum in verschiedene philosophische und anthropologische Strömungen aufteilt. Ethik beinhaltet vielmehr auch das Bestreben, eine Lösung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle zu entwickeln. Diese Lösung soll einerseits die Vielfalt der Zielvorstellungen und Weltanschauungen in unserer Gesellschaft berücksichtigen und andererseits eine über Jahrtausende tragende und überzeugende Antwort auf die Herausforderung liefern, wie mit den von uns erzeugten radioaktiven Abfällen richtig umzugehen ist.

Pluralismus als Wert

- a. *Demokratische Entscheide in einer pluralistischen Gesellschaft*
Einen zentralen Wert bei der Lösung der Entsorgungsfrage stellt die pluralistische und demokratische Gesellschaft dar. Das bedeutet:

Ein von der öffentlichen Diskussion losgelöster Zugang zur Ethik existiert nicht. Wer im Namen der Wissenschaft, der Wirtschaft oder eines bestimmten philosophischen oder transzendenten Konzepts behauptet, einen privilegierten Zugang zur Wahrheit zu haben, dem werden zu Recht eine ganze Reihe *a priori* ebenso gerechtfertigter anderer Meinungen entgegengehalten.

In der Gesellschaft sind vielfältige Weltanschauungen und Einstellungen zum Menschen und dessen Bestimmung vorhanden, die häufig miteinander unvereinbar sind. Dennoch besteht weder ein Zwang zum Subjektivismus (Ethik ist Privatangelegenheit jedes Individuums), noch zum Relativismus (alle Meinungen sind gleichberechtigt).

Gemeinsame Werte

Die Entsorgungsfrage erfordert vielmehr demokratische Entscheidungen. Demokratie beruht auf gemeinsamen in der Verfassung verankerten Werten wie Rechtsgleichheit und gleichem Schutz aller Bürgerinnen und Bürger durch den Staat. Zudem basiert sie wesentlich auf Verfahren und Regeln. Gemeinsame Werte, Verfahren und Regeln stellen die Grundlage dar, um gesellschaftliche Konflikte zu lösen.

Grundsatzfragen

b. Eine Vielfalt von Anschauungen

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle wird international intensiv diskutiert. Es scheint, dass die damit verbundenen Fragen die Meinungsvielfalt in demokratischen Gesellschaften besonders stark zum Ausdruck bringen, wobei alle Seiten versuchen, für ihre Ziele ethische Argumente einzusetzen.

Technik und Gesellschaft

Beispielhaft seien zwei einander entgegengesetzte Haltungen betrachtet: Für die eine Seite ist die Entsorgungsfrage ein ausschliesslich technisches Problem, das mit wissenschaftlicher Objektivität gelöst werden sollte. Der kritische Blick der Gesellschaft ist hier nicht gefragt. Für die andere Seite ist die Entsorgung radioaktiver Abfälle unauflöslich mit der Frage verbunden, ob die Kernenergie weiterhin genutzt werden soll. Die Entsorgungsfrage zu lösen bedeutet zugleich, die Nutzung der Kernenergie anzunehmen und zu legitimieren.

Handlungsspielraum
– aber wie?

Allgemeine Einigkeit herrscht über den Grundsatz, dass bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle der Handlungsspielraum künftiger Generationen gewahrt werden soll. Uneinigkeit besteht hingegen darüber, wie dieser Grundsatz auszulegen ist. Wird der Handlungsspielraum späterer

Generationen am besten sichergestellt, indem man ein Lager zügig verschliesst und damit unseren Nachfahren keinerlei Lasten für Überwachung und Unterhalt aufbürdet? Oder bedeutet Handlungsspielraum vielmehr, die weitere Entwicklung des Lagers kontinuierlich überwachen und bei Bedarf jederzeit über die radioaktiven Abfälle verfügen zu können?

Auf einer anderen Ebene stehen die Vertreter einer Ethik, die sich auf ein Gut bezieht (vom Glück des Menschen bis zum sozialen Wohlstand) jenen gegenüber, die sich auf eine Gerechtigkeitstheorie berufen (Anmerkung 1⁴).

Ethische Theorien

Bewusst oder unbewusst besteht zwischen solchen ethischen Anschauungen und den Argumenten, welche die aktuellen Diskussionen prägen, ein Zusammenhang. Von wesentlicher Bedeutung sind hier die teleologische (zielgerichtete) Ethik, die verschiedenen Utilitarismustypen, die Verantwortungsethik (Jonas 1979), der Kommunitarismus und die Neoaristotelik (Walzer 1983, Taylor 1992) etc. sowie auch die deontologische Ethik.

Nutzen optimieren,
Rechte achten

Häufig werden der utilitaristische und der deontologische oder kontraktualistische Ansatz einander gegenübergestellt (Anmerkung 2). Der utilitaristische Ansatz zielt in der Regel darauf ab, für möglichst viele Menschen einen möglichst hohen wirtschaftlichen Nutzen zu erreichen, wobei Risiken annehmbar sind, wenn sich daraus ein erheblicher wirtschaftlicher Vorteil ergibt. Beim deontologischen Ansatz steht die Achtung der individuellen moralischen Rechte, die in einer Demokratie anerkannt sind, im Vordergrund.

Aufgaben der Gesellschaft

c. *Stellenwert von Gutachten und Expertisen*

Wie bereits erwähnt, bestehen in einer demokratischen Gesellschaft vielfältige Visionen und Konzepte. Diese Vielfalt ist einerseits *eine Tatsache*, andererseits aber auch ein gemeinsames *Gut*. Die Aufgabe von Experten kann nicht darin bestehen, einem der konkurrierenden Konzepte den Vorrang zu geben. Es ist vielmehr Aufgabe der Demokratie, mittels ihrer Institutionen zu ermitteln, was das gesellschaftlich Wünschenswerte ist.

Aufgaben der Experten

⁴ Anmerkungen zu Kapitel 3 finden sich im Anschluss an die Bibliographie

Experten sollten jedoch die grundlegenden Werte ermitteln, welche die Voraussetzung für das demokratische Kräftespiel in einer Gesellschaft bilden. Ziele oder Werte müssen also in eine Hierarchie gebracht werden, die das demokratische Kräftespiel unter Wahrung der Pluralität und des gegenseitigen Respekts gewährleistet. Einen solchen Ansatz stellen die folgenden Abschnitte dar.

3.2 Beurteilungskriterien

Priorität der Sicherheit	<p><i>a. Sicherheit für Mensch und Umwelt</i></p> <p>Hauptziel und Hauptwert jedes Entsorgungskonzeptes für radioaktive Abfälle muss die Sicherheit von Mensch und Umwelt sein. Über diesen Grundsatz besteht allgemein Einigkeit. Sicherheit ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass ein Mensch handeln, entscheiden und von seiner Freiheit Gebrauch machen kann.</p>
Gleiche Rechte für alle	<p><i>b. Gerechtigkeit (Fairness)</i></p> <p>Ist eine ausreichende Sicherheit gewährleistet, stellt die Gerechtigkeit einen zentralen Wert dar. Gerechtigkeit ist der Dreh- und Angelpunkt jeder Demokratie. Alle Bürgerinnen und Bürger besitzen die gleichen Rechte und einen Anspruch darauf, gleich behandelt zu werden. Beispielsweise darf niemand aufgrund seiner Meinung oder Zugehörigkeit zu einer bestimmten gesellschaftlichen Gruppierung benachteiligt werden. Dieser Grundsatz ist auch zeitübergreifend zu verstehen: Kein Mensch darf diskriminiert werden, weil er einer anderen Generation angehört (Parfit 1983). Solange von radioaktiven Abfällen eine Gefahr für Menschen ausgeht, können kommende Generationen daher das gleiche Sicherheitsniveau wie die heute lebenden Generationen beanspruchen.</p>
Ablehnung der Diskontierung	<p>Damit muss der Versuch mancher Utilitaristen abgelehnt werden, eine Diskontierung künftiger Risiken in die Kosten/Nutzen-Analyse einzuführen. Moralisch gesehen besteht zwischen aktuellen und künftigen Risiken kein Unterschied. Theorien, wonach bei einer Diskontierung beispielsweise Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit in zwanzig Jahren nur noch zu einem Zehntel der heutigen Wirkung in Kosten/ Nutzen-Überlegungen einzubeziehen sind, sind abzulehnen.</p>
Differenzierung nach Zeiträumen	<p>Die Entsorgung radioaktiver Abfälle betrifft künftige Generationen über Zeiträume, die bei den HAA mehr als 100'000 Jahre betragen. Typische gesellschaftliche Zeitmasstäbe reichen jedoch kaum je weiter als 1'000</p>

Jahre. Die Zeiträume, mit denen man es bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle zu tun hat, sind daher so gross, dass sie die Möglichkeiten unserer Gesellschaft bezüglich Weitergabe des technischen Wissens und Stabilität der politischen und gesellschaftlichen Institutionen übersteigen.

Bei der Beurteilung von Entsorgungskonzepten für radioaktive Abfälle müssen zwei Zeiträume unterschieden werden: Der Zeitraum, der in der Reichweite unserer heutigen Gesellschaft liegt (Anmerkung 3), und der Zeitraum, während dem die Sicherheit für Mensch und Umwelt ohne menschliches Zutun gewährleistet sein muss (Anmerkung 4).

Im Folgenden konzentrieren wir uns auf den Zeitraum, der in der Reichweite der heutigen Gesellschaft liegt. Dabei sollte jedoch nicht das Bewusstsein dafür verloren gehen, dass der wesentlich längere Zeitraum, der sich daran anschliesst, für die Sicherheit gesamthaft von grösserer Bedeutung ist.

c. *Individuelle und gesellschaftliche Akzeptanz*

Zustimmung und
Kompensation

Die Kriterien der Sicherheit und der Gerechtigkeit verlangen, das Risiko gerecht über alle Menschen zu verteilen. Eine solche gerechte Risikoverteilung ist aber in der Regel unmöglich. Jemandem ein Risiko aufzubürden, setzt daher immer die direkte oder indirekte Zustimmung des Einzelnen sowie gegebenenfalls eine Kompensation voraus.

Ein Entsorgungskonzept für radioaktive Abfälle wäre somit nur dann vertretbar, wenn es jeder Generation die Möglichkeit offen liesse, es im Sinne ihres Selbstbestimmungsrechts in einer demokratischen Entscheidung mitzugestalten oder abzulehnen.

Gesellschaftliche
Akzeptanz

Eine schwächere Forderung zielt auf gesellschaftliche Akzeptanz: Zum Zeitpunkt der Errichtung und des Betriebs sollte ein Lager für radioaktive Abfälle von einer Mehrheit der Schweizer Bevölkerung, insbesondere in der Region des Lagerstandorts, akzeptiert sein. Das Lager ist so zu gestalten, dass gute Voraussetzungen für dessen Akzeptanz auch durch künftige Generationen bestehen.

Im Vergleich zu Sicherheit und Gerechtigkeit ist das Kriterium der Akzeptanz von untergeordneter Bedeutung, denn durch die Forderung nach Akzeptanz werden die heutigen sowie evtl. einige wenige unmittelbar nachfolgende Generationen gegenüber den späteren Generatio-

nen eindeutig bevorzugt. Indem wir für uns beanspruchen, heute eine Entscheidung zu treffen, die mit irreversiblen Konsequenzen bzw. erheblichen Lasten für kommende Generationen verbunden ist, verstossen wir gegen das Gebot der Gleichbehandlung.

Abwägung
unterschiedlicher Werte

Ein Beispiel stellt die geologische Endlagerung mit Offenhaltung des Lagers über einen Zeitraum von 100 Jahren dar. Für diese Variante ist eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz zu erwarten als für ein Lager, das sofort nach Ende der Betriebszeit verschlossen wird. Zudem wird der Handlungsspielraum späterer Generationen im Hinblick auf Rückholung der Abfälle erhöht. Andererseits sind bei einem Lager, das zunächst über 100 Jahre offen gehalten wurde, langfristig gewisse Sicherheitseinbussen möglich. Eine vermehrte Gefährdung von Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern lässt sich kaum vermeiden. Künftigen Generationen werden zudem Lasten für Überwachung, Kontrolle, Unterhalt, Sicherung und Verschluss des Lagers auferlegt.

3.3 Grundsätze der Lagerkonzeption

a. *Sicherheit hat Vorrang*

Integrale Betrachtung
von Nutzen und Kosten

Strebt man utilitaristisch eine Maximierung des quantifizierbaren Nutzens an, so muss eine integrale Nutzen- und Kostenbetrachtung jedes Lagerkonzepts vorgenommen werden. In diesem Fall kann, wenn von der Diskontierung abgesehen wird, selbst ein geringes, aber zeitlich fast unbegrenztes Risiko das Verhältnis von Nutzen und Kosten stark beeinflussen. Utilitaristen ziehen es daher vor, eine möglichst rasche und effiziente Lösung für die Endlagerung zu finden, welche die künftigen Risiken auf ein Minimum beschränkt. Der Handlungsspielraum späterer Generationen wäre in diesem Fall gewährleistet, da diesen Generationen keine Verpflichtungen mehr aufgebürdet werden.

Schon heute sollte für eine grösstmögliche Sicherheit von Mensch und Umwelt während der gesamten "Lebensdauer" der Abfälle gesorgt werden, um nachfolgende Generationen so wenig wie möglich zu belasten.

Notwendigkeit
der Kontrolle

Diese Haltung wird von vielen technischen Experten vertreten. Gegenargumente werden unter anderem von Umweltschutzverbänden und Kontraktualisten vorgebracht. So werden etwa Vorwürfe erhoben, wissenschaftliche Lösungen würden durch kurzfristige wirtschaftliche Überlegungen mitbestimmt, oder die Gesellschaft solle daran gehindert

werden, Verantwortung für die von ihr geschaffenen Risiken zu übernehmen, oder mögliche Probleme der Zukunft würden nicht mit der notwendigen Gewissenhaftigkeit behandelt.

Ein wesentliches Argument betrifft die Sicherheit von Mensch und Umwelt. Prognoseunsicherheiten können demnach, insbesondere über lange Zeiträume hinweg, zu einer unzulässigen Gefährdung führen. Deshalb sind Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen notwendig (Anmerkung 5). Zudem sind Erfahrungen zu sammeln, damit die Modelle über eine längere Dauer überprüft werden können.

b. Technische Kontrolle und demokratische Instanzen lassen sich nicht trennen

Kontrollinstanzen

Technische Kontrollen setzen gesellschaftliche Einrichtungen voraus. Bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle stellt sich damit die Frage, wer befugt ist, solche Kontrollen vorzunehmen. Wie kann dafür gesorgt werden, dass die verantwortlichen Instanzen ihre Aufgaben zuverlässig, dauerhaft, unabhängig und mit demokratischer Legitimation erfüllen? Die Beantwortung dieser Fragen wird weniger von technischen Sachzwängen als vom gesellschaftlich Wünschenswerten bestimmt.

Anforderungen
an Kontrollinstanzen

Solange ein Lager für radioaktive Abfälle Kontrollen erfordert, muss daher eine Institution bestehen, welche die oben beschriebenen Anforderungen erfüllt und gesellschaftlich akzeptiert ist. Untersuchungen haben ergeben, dass ein Risiko, das der Einzelne nicht kontrollieren kann, dennoch akzeptiert wird, wenn es von Institutionen kontrolliert wird, deren Kompetenz weitgehend unbestritten ist und denen die Bevölkerung Vertrauen entgegenbringt (Slovic 1991). Wesentlich scheint zudem zu sein, dass eine solche Institution von den Kernenergieproduzenten und von der jeweiligen Regierung weitgehend unabhängig ist (Damveld & Van de Berg 1999b).

c. Innovation ist eine Option unter anderen

Innovationen
nutzen

Was heute als optimale Lösung gilt, wird wesentlich vom Stand der Technik und des Fachwissens bestimmt. Beide werden sich in Zukunft weiterentwickeln und wahrscheinlich neue Lösungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle eröffnen.

Dauerhafte Verpflichtungen
vermeiden

Daher scheint es vorteilhaft, wenn spätere Generationen über längere Zeiträume die Möglichkeit besitzen, eingelagerte radioaktive Abfälle anders zu behandeln, neu zu lagern oder – im Fall von HAA – auch wieder

zu nutzen. Zudem soll es ihnen freistehen, das Verhalten des Lagers zu überwachen. Der Handlungsspielraum künftiger Generationen wird jedoch eingeengt, wenn ihnen das Lager dauernde Lasten oder Verpflichtungen auferlegt, über die sie nicht selber entscheiden können (Shrader-Frechette 1993; MacLean 1986). Hier ist eine gesellschaftliche Entscheidung gefordert.

d. *Das akzeptable Sicherheitsniveau zu bestimmen, ist Aufgabe der Gesellschaft*

Gesellschaftlicher Entscheidungsspielraum besteht auch bei der Festlegung des geforderten Sicherheitsniveaus.

Welches Risiko ist akzeptabel?

Welches Risiko als akzeptabel gelten kann, wird von verschiedenen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, darunter auch dem Stand von Wissenschaft und Technik, beeinflusst. Letztlich muss das akzeptable Sicherheitsniveau jedoch in einem demokratischen Entscheid festgelegt werden. Aus ethischen Gründen ist zudem ein Entscheidungsspielraum für künftige Generationen gefordert, das akzeptable Risiko nach ihren Vorstellungen festzusetzen.

Im Allgemeinen wird das Risiko als Funktion von Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadenausmass bestimmt. Bei ihren Vorschlägen für ein akzeptables Risikoniveau gehen viele Experten immer noch implizit davon aus, dass das natürliche oder bisher hingenommene auch ein akzeptables Risikoniveau sei. Dagegen betont der kontraktualistische Ansatz, dass auch ein bestehendes Risikoniveau immer in Bezug auf den aktuellen Kenntnisstand und die gesellschaftlichen Wünsche auslegungsbedürftig sei. Ein Beispiel stellen die immer wieder auflebenden Kontroversen über annehmbare Strahlendosen dar.

Naturalistischer Fehlschluss

Aus philosophischer Sicht begeht, wer aus einem natürlichen ein akzeptables Risiko herzuleiten versucht, den so genannten naturalistischen Fehlschluss (*naturalistic fallacy*, Moore 1951). Die Ausgangslage und der anzustrebende Zustand dürfen niemals verwechselt werden. Die Sicherheit bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist zudem eine Frage nicht nur des absoluten Risikos (*risk magnitude*), sondern auch der bestehenden Möglichkeiten, das Risiko zu vermindern.

Die Sicherheit bei der Lagerung der radioaktiven Abfälle ist durch geeignete Massnahmen zu kontrollieren, bevor das Lager definitiv verschlossen und versiegelt wird (Endlager).

Die Kontrolle beinhaltet gesellschaftliche und technische Komponenten. Sie muss durch eine zuverlässige, dauerhafte, unabhängige und demokratisch legitimierte Kontrollinstanz vorgenommen werden. Bei der Lagerkonzeption ist dem Grundsatz der Reversibilität Rechnung zu tragen, d. h. jede Generation sollte grundsätzlich die Möglichkeit besitzen, neue Erkenntnisse bezüglich Lagerung und Anforderungen an die Lagerung radioaktiver Abfälle umzusetzen.

Reversibilität

Diese Grundsätze können unter dem Begriff der Reversibilität zusammengefasst werden. Reversibilität stellt ein wesentliches Element einer nachhaltigen Entwicklung dar, da der Schutz von Mensch und Umwelt, die Gerechtigkeit, der wirtschaftliche Fortschritt und der soziale Zusammenhalt berücksichtigt werden.

3.4 Das Verursacherprinzip

Die Kosten
der Abfallentsorgung

Durch die Lagerung radioaktiver Abfälle sollen künftige Generationen möglichst wenig belastet werden. Dieser Grundsatz ist nicht nur aus utilitaristischen Überlegungen gerechtfertigt, sondern auch aus Gründen der Gerechtigkeit. Zwischen den derzeitigen und den künftigen Generationen besteht nämlich potenziell ein erhebliches Missverhältnis von Nutzen und Kosten. Es wäre ungerecht, wenn jene Generationen, welche die Kernenergie nutzten, externe Kosten und Folgekosten dieser Nutzung auf nachfolgende Generationen abwälzen würden.

Ökonomische Prinzipien
der Entsorgung

Aus ökonomischer Sicht und im Hinblick auf den sparsamen Umgang mit Ressourcen ist zu fordern, den Aufwand für Errichtung, Betrieb, Überwachung und Kontrolle des Lagers bei gegebenem Sicherheitsstandard möglichst gering zu halten. Dabei ist im Hinblick auf Gerechtigkeit und Handlungsspielraum kommender Generationen den Folgekosten besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Verursacherprinzip

Damit ist auch die Berücksichtigung des Verursacherprinzips vorgezeichnet. Das Verursacherprinzip fordert grundsätzlich, dass "dem Verursacher die Kosten für Massnahmen auferlegt werden, um die Umwelt in einen akzeptablen Zustand zu versetzen" (Anmerkung 6). Oft wird vom Verursacher jedoch nur bei einem Unfall bzw. der Verletzung eines rechtlich festgesetzten Grenzwertes gefordert, dass er die Opfer entschädigt oder den Umweltschaden wiedergutmacht. Für das Restrisiko oder die meist chronische, unter den Grenzwerten bleibende Umweltbelastung wird er nicht belangt. Hier könnten jedoch

auch Entschädigungen, wie sie zusehends Eingang in die Umweltpolitik finden, verlangt werden (Barde 1991).

a. *Kompensation*

Wesentlich für die Lagerung radioaktiver Abfälle ist die gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen – sowohl räumlich, als auch über längere Zeitspannen hinweg. Erhöhte Risiken im Bereich des Lagerstandorts müssen aufgrund angemessener Kompensationen oder unter dem Gesichtspunkt der gesamtgesellschaftlichen Solidarität vertretbar sein. Eine Kompensation ist besonders dann erforderlich, wenn die Einwilligung der Betroffenen nicht eingeholt wurde und keine gerechte Verteilung von Nutzen und Kosten erreicht werden kann. Kompensationen müssen mit den Betroffenen ausgehandelt werden, wobei künftige Generationen stellvertretend mitzuberücksichtigen sind (siehe auch AGV 1998).

b. *Kosten für Überwachung und Kontrolle*

Die Kosten für Überwachung und Kontrolle eines Lagers sowie für die gesellschaftlichen Kontrollinstanzen müssen auch während der als notwendig erachteten Beobachtungszeit vom Verursacher übernommen werden.

c. *Kosten für die Rückholung*

Die erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle ist Teil der geforderten Reversibilität und setzt neben technischen auch finanzielle Mittel voraus. Erfolgt die Rückholung aus Sicherheitsgründen, so handelt es sich um einen Haftpflichtfall, der einer gesetzlichen Regelung bedarf. Wird die Rückholung aus anderen Gründen vorgenommen, sind dafür keine Rückstellungen der Generationen, die von der Nutzung der Kernenergie profitierten, erforderlich.

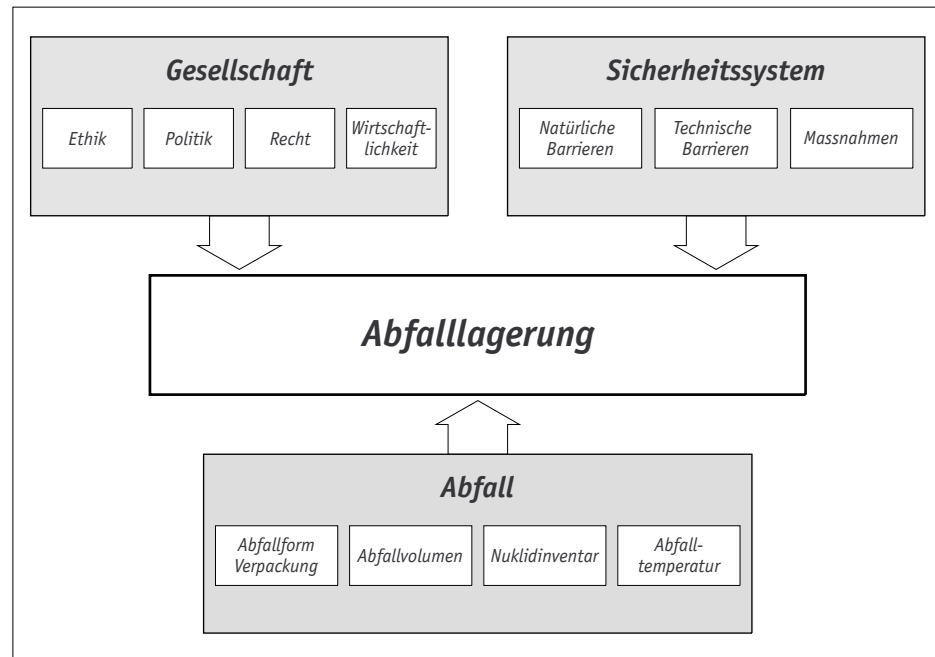
d. *Neue Behandlungsmethoden*

Ebenso müssen für mögliche neue Methoden zur Behandlung radioaktiver Abfälle keine finanziellen Mittel bereitgestellt werden, sofern die Sicherheit kommender Generationen nicht durch Versäumnisse der nutzniehenden Generationen unzulässig beeinträchtigt wurde.

4. Grundelemente "Entsorgungskonzept Schweiz"

Kapitel 4 zeigt die Vorgaben und Rahmenbedingungen der Entsorgung unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen Erwartungen auf.

Figur 4 veranschaulicht die gesellschaftlichen und technischen Vorgaben und die Rahmenbedingungen der Abfalllagerung.



Figur 4: Vorgaben und Rahmenbedingungen der Abfalllagerung

4.1 Das Abfallinventar

Abfallsorten

Im Hinblick auf die Zuordnung zu einzelnen Lagertypen werden die Abfallsorten charakterisiert und sogenannten Abfallkategorien zugeordnet. Aufgrund ihrer Herkunft werden heute in der Schweiz folgende fünf Abfallsorten unterschieden (nagra 1994b):

- Betriebsabfälle
- Reaktorabfälle
- Stilllegungsabfälle
- Wiederaufarbeitungsabfälle
- Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF-Abfälle)

Bei Verzicht auf die vollständige Wiederaufarbeitung müssen die abgebrannten Uran- und MOX-Brennelemente⁵ konditioniert und als HAA entsorgt werden.

Abfallkategorien

Aufgrund der Toxizität, des Anteils langlebiger Radionuklide sowie basierend auf Langzeitsicherheitsanalysen werden diese Abfallsorten gemäss schweizerischem Abfallprogramm in die drei Abfallkategorien SMA, LMA und HAA eingeteilt. Da heute erst Teile der Betriebsabfälle und der MIF-Abfälle vorliegen und noch keine Stilllegungsabfälle vorhanden sind, besitzt die Beschreibung der Abfallsorten modellhaften Charakter. Weiter ist zu beachten, dass der Verzicht auf Wiederaufarbeitung die direkte Lagerung von Brennelementen und damit eine Volumenveränderung zur Folge haben wird. Figur 5 gibt einen Überblick über die zu erwartenden Volumina der verschiedenen Abfallsorten.

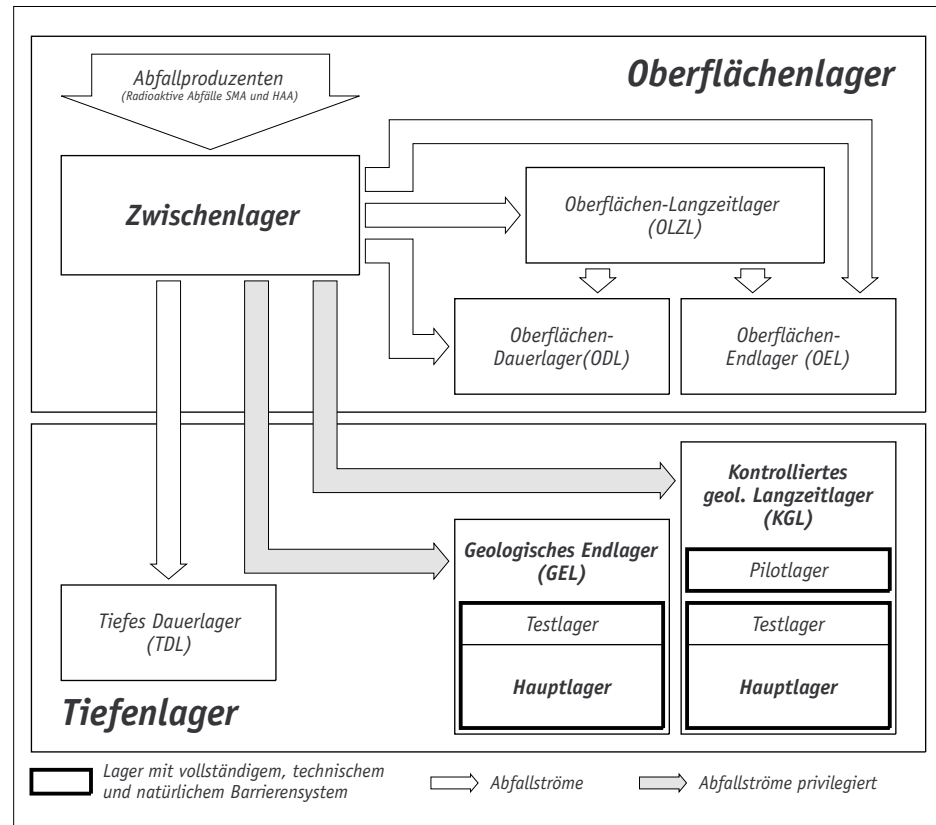
Abfallsorte	SMA	LMA	HAA
Betriebsabfälle KKW	9'200		
Reaktorabfälle	2'400		
Stilllegungsabfälle KKW	43'000		
Stilllegungsabfälle PSI	11'000		
Wiederaufarbeitungsabfälle	5'700	2'000	130
MIF-Abfälle	4'000		
Uran- und MOX-Brennelemente			4'000
Total	75'300	2'000	4'130

Figur 5: Volumina der verschiedenen Abfallsorten in m³ (bei Annahme einer vierzigjährigen Betriebsdauer der fünf Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitung von ca. 1'000 t Uranoxid gemäss bestehenden Verträgen; nagra 1994b und AGNEB 1997)

⁵ MOX-Brennelemente (Mischoxid) enthalten neben Uran auch Plutonium als Brennstoff

4.2 Lagerkonzepte

Bei der Suche nach Lagermöglichkeiten im Inland bestehen in der Schweiz die in Figur 6 dargestellten Möglichkeiten.



Figur 6: Lagertypen an der Erdoberfläche (Oberflächenlager) und im Untergrund (Tiefenlager)

4.2.1 Zwischenlagerung

Definition und Ziel

Gemäss HSK-Richtlinie R-14 dient ein Zwischenlager dem mittelfristigen Aufbewahren von Abfallbehältern in zweckgebundenen, hierzu eingerichteten Räumlichkeiten, wobei die feste Absicht einer späteren Auslagerung besteht.

Umsetzung

In einem Zwischenlager beruht der Schutz von Mensch und Umwelt auf technischen Barrieren und Massnahmen. Zu den die technischen Barrieren gehören Abfallmatrix, Abfallbehälter, Lagergebäude und Lagereinrichtungen. Die Massnahmen umfassen Überwachung und Unterhalt der Abfälle, Gebäude und Anlagen. Die Lebensdauer eines Zwischenlagers ist in der Regel auf einige Jahrzehnte beschränkt.

4.2.2 Dauerhafte Lagerung

Nach der Zwischenlagerung können die Abfälle in ein Oberflächenlager oder in ein Tiefenlager überführt werden. Folgende Lagertypen stehen dabei zur Diskussion:

Definition und Ziel	<p>1. <i>Dauerlager</i></p> <p>Dauerlager (DL) entsprechen dem "Hütekonzept" (Buser 1998). Es handelt sich um speziell hergerichtete Bauten an der Erdoberfläche (Oberflächen-Dauerlager, ODL) oder untertägig als Tiefen-Dauerlager (TDL). Ein DL wird weder verfüllt noch verschlossen.</p> <p>Das Dauerlager soll Mensch und Umwelt dauerhaft (über die erforderlichen Lagerzeiten) vor schädlichen Auswirkungen der Abfälle schützen, dabei aber jederzeit und ohne erheblichen Aufwand eine Überwachung und Rückholung ermöglichen.</p>
Umsetzung	<p>Der Schutz beruht auf technischen Barrieren sowie Massnahmen (Buser 1998, Nux 1991, Greenpeace 1993). In einem DL ist der Abfall für Befugte jederzeit zugänglich. Der Aufwand für die Rückholung ist nicht grösser als für die Einlagerung.</p>
Definition und Ziel	<p>2. <i>Kontrollierte Langzeitlager</i></p> <p>Der Begriff des kontrollierten Langzeitlagers (LZL) wird im Schlussbericht zum Energie-Dialog Entsorgung (Ruh 1998) von den Umweltorganisationen als Teil eines neuen Lagerkonzepts für die Schweiz eingeführt.</p> <p>Anlässlich eines Hearings mit der EKRA erläuterten die Vertreter von SES, Greenpeace Schweiz und MNA ihre Vorstellungen wie folgt:</p> <ul style="list-style-type: none">– Die Terminologie "Endlager" stört. Das Ende bezieht sich nur auf die Abgabe der Verantwortung der nach dem Recht bisher Pflichtigen, nicht aber auf den Übergang des Lagerinhalts in einen dauerhaft sicheren Zustand.– Das Ziel der Langzeitlagerung soll im Rahmen eines kontrollierten Langzeitlagers durch ein entsprechendes Design und ein dynamisches Konzept erreicht werden. Die Umweltorganisationen haben sich nicht festgelegt, ob der Forderung durch ein geologisches Lager

- oder durch ein Oberflächenlager entsprochen werden kann. Sie haben sich aber unmissverständlich vom Hütekonzept distanziert.
- Das kontrollierte Langzeitlager soll Überwachung und erleichterte Rückholung ermöglichen.
 - Ein Oberflächenlager bzw. ein oberflächennahes Lager soll als Möglichkeit offen bleiben. Es müsste aber ähnlich stabil wie ein geologisches Tiefenlager sein. Auch bei einem Oberflächenlager darf der Unterhalt langfristig nicht Pflicht bleiben.
 - Das kontrollierte Langzeitlager als Übergang zu einem Endlager ist möglich. Es darf jedoch nicht einfach als Zwischenschritt zum Endlager betrachtet werden, sondern verlangt nach einer neuen Philosophie, welche die Kontrollierbarkeit eines Lagers auf Jahrhunderte/Jahrtausende ermöglicht und den Aufbau von Strukturen verlangt, die über diese Zeiträume handlungsfähig sein müssen. Bezüglich der Übergangsfrist sind keine konkreten Vorstellungen vorhanden.
 - Grundsätzlich besteht das Problem, dass sich die Reversibilität als zentrales Element der LZL nicht mit der Endlagerung vereinbaren lässt.

Die Umweltorganisationen betrachten es nicht als ihre Aufgabe, die Konzeption der kontrollierten Langzeitlagerung zu präzisieren. Sie erwarten, dass die EKRA die notwendigen Schritte aufzeigt, wie die Konzeptidee der Langzeitlagerung auf einen mit dem Endlagerkonzept vergleichbaren Planungsstand gebracht werden kann.

Weitere Ausführungen zum LZL sind SES (1999) zu entnehmen: Demnach ist die Endlagerung nicht verantwortbar, da nach dem Verschluss des Endlagers keine Eingriffsmöglichkeiten bestehen. Die Umweltorganisationen erneuern ihre Forderungen nach einem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie, der am Anfang eines ernsthaften Entsorgungskonzepts stehen müsse.

Umsetzung

Die Forderungen der Umweltorganisationen nach einer LZL weisen in sich wesentliche Widersprüche auf: Einerseits wird das Hütekonzept ausgeschlossen, andererseits werden Forderungen nach einer bis Jahrtausende dauernden kontrollierten Langzeitlagerung gestellt und die Endlagerung abgelehnt. Damit das von den Umweltorganisationen geforderte LZL nicht mit einem Dauerlager gleichzusetzen ist, müssen deshalb folgende Punkte erfüllt sein:

- Da in einem kontrollierten Langzeitlager – im Gegensatz zum Dauerlager – der dauernde Unterhalt nicht Pflicht sein kann, müssen Lagerräume und -kavernen frühzeitig verfüllt werden. Die Kontrolle bezieht sich vor allem auf das Verhalten und die Integrität dieses Lagers.
- Solange dies von künftigen Generationen gewünscht wird, soll der Lagerprozess reversibel sein; durch geeignete Massnahmen soll die Rückholbarkeit erleichtert werden.
- Ein Langzeitlager, sei es ein Oberflächen-Langzeitlager (OLZL) oder in der Tiefe, ist als Übergangslösung zu verstehen. Zur Garantie der Langzeitsicherheit muss das Lager zu gegebener Zeit ohne grossen Aufwand in ein Endlager übergeführt werden können.

3. *Endlager*

Definition und Ziel

Die für die Schweiz massgebende HSK-Richtlinie R-21 definiert Endlagerung wie folgt: "Wartungsfreie, zeitlich unbefristete Lagerung von radioaktiven Abfällen ohne beabsichtigte Rückholung".

Das Endlager soll Mensch und Umwelt über den gesamten Zeitraum, in dem von den Abfällen schädliche Auswirkungen ausgehen, schützen, ohne dass kommenden Generationen Verpflichtungen auferlegt werden.

Umsetzung

Das Konzept des geologischen Endlagers (GEL) ist am besten erforscht und für SMA in einer Reihe von Ländern bereits umgesetzt worden. Beim GEL wird der Schutz von Mensch und Umwelt nach Vefüllung, Versiegelung und Verschluss allein durch natürliche und technische Barrieren sichergestellt. Nach Einlagerung der Abfälle wird das GEL schnellstmöglich verschlossen. Danach ist noch eine Umweltüberwachung an der Erdoberfläche vorgesehen. Neben dem Hauptlager beinhaltet das Konzept der GEL im allgemeinen auch ein Testlager.

Testlager

Das Konzept des Testlagers wurde zur Abklärung der Eignung eines Endlagers entwickelt. Es wird vor der Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager betrieben und dient namentlich auch der definitiven Sicherheitsanalyse des eigentlichen Abfalllagers. Testlagerung im künftigen Lagerbereich kann mit echten Abfällen oder, in einer ersten Zeit, mit nicht radioaktiven Abfallsimulatoren vorgenommen werden.

Oberflächennahe Endlager

Oberflächennahe Endlager (OEL) im Sinne einer Abfalldéponie stehen für HAA aus Gründen der Langzeitsicherheit in keinem Land zur Diskussion.

Angepasstes Lagerkonzept
Wellenberg

Im Vorfeld und nach der Abstimmung zum Endlager Wellenberg im Kanton Nidwalden wurden Forderungen nach Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle gestellt. Basierend auf dem Konzept im Rahmenbewilligungsgesuch hat die GNW daher ein angepasstes Lagerkonzept ausgearbeitet (nagra 1998).

Das Konzept ermöglicht es, das Lager während einer begrenzten Zeit offen zu halten, ohne die Langzeitsicherheit zu beeinträchtigen. Der Verschluss kann – auf Wunsch oder nach Bedarf – jedoch jederzeit innerhalb weniger Jahre erfolgen. In diesem Fall sollen vorerst die Lagerkavernen und später die Zugangsstollen verfüllt und versiegelt werden. Die Lagerkavernen werden baulich so ausgelegt, dass sie für einen Zeitraum von bis zu 100 Jahren offen gehalten werden können. Das Betriebskonzept ermöglicht während dieser Zeit eine einfache Kontrolle des Lagerguts und eine einfache Rückholung der Abfälle.

Der Entscheid für den endgültigen Verschluss des Lagers kann künftigen Generationen überlassen werden. Am Konzept der geologischen Endlagerung wird festgehalten. Eine erste sicherheitstechnische Bewertung der nagra zeigt, dass die Betriebs- und Langzeitsicherheit auch beim angepassten Lagerkonzept gegeben ist.

4. *Kontrolliertes geologisches Langzeitlager*

Definition und Ziel

Ihrem Mandat entsprechend und ausgehend von den Vorstellungen der Umweltorganisationen hat die EKRA das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (KGL) entwickelt (vgl. Kapitel 5).

Ein KGL erfüllt wie ein Endlager die Forderung nach Langzeitsicherheit und wird gleichzeitig dem Bedürfnis nach Reversibilität gerecht.

Umsetzung

Neben einem Hauptlager, das in seinen Grundzügen einem herkömmlichen geologischen Endlager entspricht, und dem Testlager beinhaltet das Konzept zusätzlich ein Pilotlager.

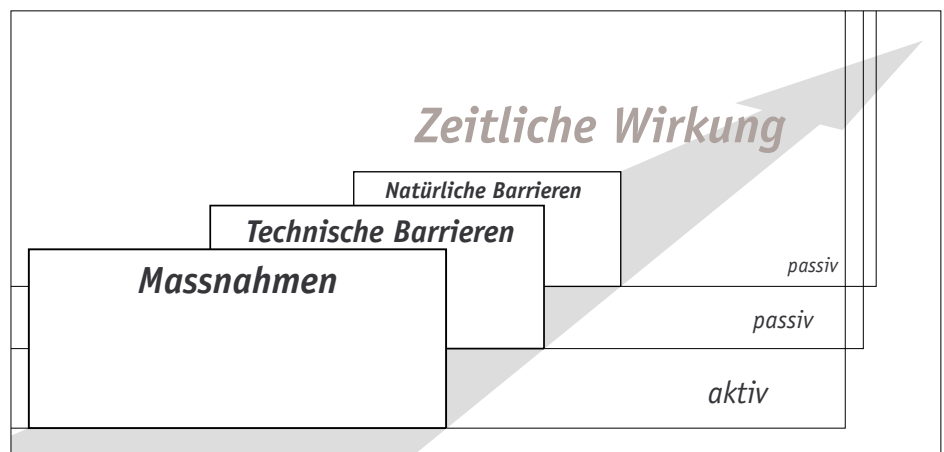
Pilotlager

Dabei handelt es sich um eine Anlage, in welcher Überwachung und Kontrolle im Rahmen der KGL durchgeführt werden können, ohne dass das Hauptlager im Hinblick auf eine spätere Überführung in ein GEL beeinträchtigt wird. Im Gegensatz zum Testlager ist das Pilotlager räumlich vom Hauptlager getrennt und kann über einen längeren Zeit-

raum betrieben werden. Die Aufgaben des Pilotlagers sowie die Anforderungen an die Anlage werden in Kapitel 5 näher ausgeführt.

4.3 Das Sicherheitssystem

Die Sicherheit eines Lagers für radioaktive Abfälle ist durch mehrfache natürliche und technische Barrieren (passives Sicherheitssystem) sowie durch Massnahmen (aktives Sicherheitssystem) gewährleistet:



Figur 7: Das Sicherheitssystem für die Lagerung radioaktiver Abfälle

Die Aufgaben der Barrieren sind:

- möglichst langer Einschluss der Radionuklide (Nutzung der Zeit für den Zerfall)
- Begrenzung der Freisetzung von Radionukliden
- Schutz vor unerwünschtem menschlichem Zugriff (Non-Proliferation, Schutz bei Krisen) und vor externen Einflüssen (z.B. vor Flugzeugabsturz, Flut, Erdbeben)

4.3.1 Natürliche Barrieren

Die natürlichen Barrieren werden gebildet durch Geosphäre, Wirtsgestein und Nahfeld (vgl. Anhang 1).

Geosphäre	Wenn radioaktive Substanzen aus dem Endlager ins Wirtsgestein austreten, sorgt die Geosphäre für eine Verzögerung des Transports in die Biosphäre. Dadurch wird Zeit für den Zerfall der Radionuklide gewonnen. In der Geosphäre findet zudem eine Verdünnung der Radionuklide statt, indem sich das Grundwasser aus der Lagerzone mit anderem Grundwasser vermischt.
Wirtsgestein	Das Wirtsgestein stellt die langfristig wichtigste Migrationsbarriere dar, indem es den Radionuklidtransport durch Sorption und Matrixdiffusion verzögert. Mit seiner geringen Wasserdurchlässigkeit begrenzt es den Wasserzutritt zu den technischen Barrieren.
Nahfeld	Das Nahfeld ist Bestandteil des Wirtsgesteins und steht in direktem Kontakt mit den technischen Barrieren. Durch einfache bauliche Massnahmen im Nahfeld kann der unerwünschte menschliche Zugriff auf die Abfälle behindert werden.
Felsmechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins	<p>a. <i>Felsmechanik (Stabilität des Hohlraums unter Tage)</i></p> <p>Untertage erstellte Hohlräume bedeuten einen Eingriff ins Gebirge; sie sind dessen Spannungen ausgesetzt. Gebirgsspannungen sind bedingt durch den tiefenabhängigen Überlagerungsdruck und die besonders in jungen Gebirgen auftretenden tektonischen Kräfte. Aufgrund der geschaffenen Hohlräume bewirken diese Spannungen eine Deformation des umgebenden Gebirges, was sich in Form einer mehr oder weniger starken Konvergenz manifestiert. Das Ausmass dieser Verformung ist abhängig von der Plastizität des Gebirges. Diese wird ihrerseits beeinflusst durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> – die Plastizität des Gesteins – die Klüftigkeit – die in den Klüften vorhandenen Stoffe wie Luft, Wasser oder Lehm <p>Manche Gesteine wie Ton (Opalinuston) oder Salz reagieren plastisch. Dies bedeutet, dass sich Hohlräume im Gebirge ohne Gegenmassnahmen rasch deformieren und unter Umständen in kurzer Zeit schliessen (Salz). In weniger plastischen Gebirgen aus z. B. granitischen Gestei-</p>

nen sind die Deformationen deutlich geringer. Hier vermag sogar das Gebirge um Hohlräume einen pseudostabilen Zustand aufzubauen.

Kleinere und statisch optimierte Ausbruchquerschnitte für Stollen und Kavernen unterliegen geringeren Gebirgsdeformationen als grosse Kavernen mit ungünstigen Profilen.

Erdbebensicherheit

Erfahrungsgemäss sind Untertagebauten weitgehend erdbebensicher. Bezüglich der geotechnischen und hydrogeologischen Auswirkungen ist auf den Bericht der Technischen Arbeitsgruppe Wellenberg zu verweisen (TAG 1998).

Einbauten

Lagerkavernen in Ton können durch eine rasche, gebirgsschlüssige Verfüllung vor Deformationen bewahrt werden. In eher elastischen Gebirgen sind die Vorgänge langsamer und weniger intensiv: Hier genügen leichter dimensionierte Einbauten. Auf die Lagerstrategien in Tiefenlagern angewendet bedeutet dies:

Zugangsstollen und -schächte in tonigem Gebirge müssen durch Einbauten ringschlüssig mit Sohlgewölbe ausgebaut werden. Der Einbau beinhaltet gleichzeitig eine Abdichtung bzw. Drainage des Bergwassers (siehe unten).

Dem Einbau kommt umso grössere Bedeutung zu, je länger die Hohlräume offen bleiben müssen. Bei Langzeitlagern ist mit einem entsprechenden Wartungsaufwand für das Instandhalten der Verkleidung zu rechnen. Bei Dauerlagern (Tiefenlager) hängt die Stabilität des gesamten Baus von der Felsstabilität und der Lebensdauer der Einbauten ab.

Eine grossangelegte Studie der ETH Zürich (Wegmüller und Chabot, 1997) hat gezeigt, dass mit speziellen Techniken (Wasserhaltung, Betonzusätze) die Lebensdauer von so gesicherten Untertagebauten verlängert ist.

In den eigentlichen Lagerkavernen kann durch rasche Bauabfolge von Ausbruch, Einlagerung und gebirgsschlüssigem Verfüllen der verbleibenden Hohlräume die Gebirgsstabilität gewährleistet werden, ohne dass hier massive Einbauten erfolgen. Dies ist vor allem in tonigem Wirtsgestein, z. B. Opalinuston, wichtig, weil hier Betonverkleidungen aus geochemischen Gründen unerwünscht sind. Bei anderen Gesteinen könnte auch in der Lagerkaverne ein Einbau erfolgen mit der Absicht,

den Hohlraum längere Zeit offen zu halten. Ein solches Vorgehen ist jedoch nicht zwingend, weil eine erleichterte Rückholung durch die Verfüllung kaum wesentlich beeinträchtigt wird.

Im Interesse der Sicherheit, vor allem der Begrenzung der Auflockerungszone, müssen die Lagerkavernen eines Tiefenlagers möglichst rasch verfüllt werden. Die Zugangsstollen sind durch Einbauten für die Zeit des Lagerbetriebs und der Beobachtung zu sichern.

b. Bergwasser

Bergwasser
in Untertagebauten

In Hohlräumen unter Tage, welche sich praktisch immer unterhalb des Bergwasserspiegels befinden, tritt Bergwasser auf. In dem für ein Tiefenlager ausgewählten, wenig durchlässigen Wirtsgestein ist der Wasserzufluss allerdings sehr gering. Die zu den Lagern führenden Zugangsstollen oder Schächte werden jedoch "nasse", durchlässigere Gebirgsabschnitte mit grösserem Wasseranfall und unter Umständen hohen Wasserdrücken queren. Da die Kavernen trocken zu halten sind, ist das anfallende Bergwasser, soweit es nicht mit Abdichtungen zurückgedrängt werden kann, zu drainieren und allenfalls abzupumpen.

Drainage
des Bergwassers

Die Drainage des Bergwassers in Untertagebauten schafft eine hydraulische Senke, d. h. Bergwasser fliesst von allen Seiten zum Hohlraum. In gering durchlässigen Gebirgen, wie sie für die Lagerung von radioaktiven Abfällen exploriert werden, ist die Drainagewirkung auf das umgebende Gebirge jedoch sehr gering. Für die zur Diskussion stehenden Lagerstrategien bedeutet ein längeres Offenhalten von Zugängen und Stollen trotzdem eine Wasserhaltung in Form von Drainagen und Abpumpen. Das fließende Wasser wird langfristig die Anlagen und Einbauten beeinträchtigen und erfordert daher eine entsprechende Wartung.

"Austrocknung"
des Gebirges

Grundsätzlich ist eine Drainage des Wirtsgesteins jedoch unerwünscht, auch wenn sie nur geringfügig ist. Die Drainage führt nämlich zu einer teilweisen Entsättigung des Gesteins in der unmittelbaren Umgebung der unterirdischen Bauten, und durch das Drainagewasser können Schadstoffe in die Umwelt gelangen.

Abpumpen des
Grubenwassers

In Lagern mit horizontalem Zugang, wie am Wellenberg geplant, kann das anfallende Wasser während der Betriebsphase durch den Zugangsstollen nach aussen abgeleitet werden. In Tiefenlagern, welche

durch Schächte erschlossen werden, muss das Bergwasser an die Oberfläche gepumpt werden. Ein Ausfall der Pumpen hätte eine Flutung des Lagers und der Zugänge zur Folge. Sowohl bei horizontalem wie vertikalem Lagerzugang beinhaltet die Drainage die Gefahr, dass Schadstoffe in die Umgebung freigesetzt werden.

Um die Freisetzung von Schadstoffen in die Umgebung zu vermeiden, sollten die Lagerkavernen kurz nach der Einlagerung verfüllt und verschlossen werden. Evtl. ist auch eine Injizierung (Verfüllung) der Drainagen angezeigt.

c. *Bewetterung (Belüftung)*

Offene Zugänge zu Lagern müssen mit Frischluft versorgt werden. Ähnlich wie Drainagewasser kann auch Luft ein Transportmedium für gasförmige Schadstoffe sein.

4.3.2 Technische Barrieren

Die technischen Barrieren in einem Abfalllager umfassen drei Komponenten:

Abfallmatrix

Die Abfallform und die Verpackung sorgen für einen ersten Einschluss. Radioaktive Abfälle werden mit geeigneten Materialien zu einer auslaugfesten Matrix verfestigt. Bei SMA besteht diese Matrix vielfach aus Zement oder Bitumen. HAA aus der Wiederaufarbeitung sind in einer Glasmatrix eingeschlossen. Falls die Abfallmatrix nach einer Korrosion der Abfallbehälter mit Grundwasser in Kontakt kommt, wird die Freisetzung der Radionuklide behindert.

Abfallbehälter

Die Abfallbehälter, vor allem Stahlgebäude zusammen mit allfälligen Containern und Verfüllmaterialien, bilden die zweite Barriere. Über einen bestimmten Zeitraum schliessen sie die Abfälle vollständig ein. Darüber hinaus sorgt ein günstiger Chemismus für eine Begrenzung der Löslichkeit und für die Sorption der Radionuklide.

Verfüllung
der Lagerhöhlräume

Die Lagerhöhlräume werden mit Materialien verfüllt, die den Wasserzutritt zu den Abfallbehältern begrenzen, die Freisetzung von Radionukliden in die Geosphäre verzögern, durch eine günstige Chemie die Löslichkeit der Radionuklide im Grundwasser begrenzen und durch Sorption die Radionuklide an das Verfüllmaterial binden. Werden die Lagerräume nicht verfüllt, fehlt eine wesentliche technische Barriere.

Verschiedene Abfall- bzw. Lagertypen erfordern unterschiedliche technische Barrieren und den Einsatz verschiedener Materialien. Die sicherheitsbezogenen Auslegungen sind jedoch vergleichbar. Die für ein spezifisches Lagerprojekt gewählten Materialien dürfen keine ungünstigen geochemischen Veränderungen bewirken.

4.3.3 Massnahmen

Da die Massnahmen technische, organisatorische und administrative Tätigkeiten umfassen, stellen sie hohe Anforderungen an die Gesellschaft. Massnahmen sind vor, während und nach der Einlagerung von Abfällen sowie nach dem Verschluss durchzuführen. Sie beinhalten insbesondere Überwachung und Kontrolle sowie eine allfällige Rückholung von eingelagerten Abfällen.

a. *Überwachung und Kontrolle*

Die Wirksamkeit von Überwachungs- und Kontrollmassnahmen hängt davon ab, wo und wann diese durchgeführt werden:

- Bei einem Dauerlager sind Überwachung und Kontrolle jederzeit möglich und für die Sicherheit des Lagers auch erforderlich.
- Bei (noch) offenem Endlager ist eine interne Überwachung möglich. Die Lagerkavernen können durch Einrichtungen vom Zugangstollen oder von Nebentollen aus überwacht werden.
- Nach dem Verschluss eines Endlagers ist nur noch eine externe Überwachung möglich, d. h. eine Überwachung von der Oberfläche aus. Es können langfristig keine von der Oberfläche zum Endlager geführte Sensoren betrieben werden, da deren Lebensdauer zu kurz ist.

In Kapitel 5 wird daher ein Konzept der KGL vorgelegt, das die Einrichtung eines Pilotlagers vorsieht. Im Pilotlager lassen sich die wichtigsten Parameter wie Lagertemperatur, Druckverhältnisse, Wasserführung und Emissionen unter analogen Bedingungen wie im Hauptlager ermitteln. Dies ist einerseits *in situ* oder andererseits in unmittelbarer Nähe von Lagerkavernen möglich. Das Pilotlager erlaubt für das Hauptlager:

- Kontrollen der natürlichen und technischen Barrieren
- Reparaturen oder Verbesserungsmassnahmen an den technischen Barrieren zur Erhöhung der Langzeitsicherheit

Mögliche Gründe	<ul style="list-style-type: none"> – Sanierungsmassnahmen bei Radionuklidaustritt in das Nahfeld oder in die Geosphäre – die Rückholung von Abfällen aus Pilot- oder Hauptlager
	<p data-bbox="552 416 770 448"><i>b. Rückholung</i></p> <p data-bbox="628 461 1492 539">Aus verschiedenen Gründen kann es wünschbar oder notwendig sein, eingelagerte Abfälle zurückzuholen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Sicherheit</i>: Störfall oder ungenügendes Verhalten, so dass beispielsweise die Behörden keine Genehmigung für den Verschluss erteilen – <i>Testbetrieb</i>: Rückholung aus einem Testlager, Teilvalidierung von Modellen – <i>Abfallbehandlung</i>: Wiederverwendung von Ressourcen, Abtrennung und Transmutation, neue Verfestigungstechnologie – <i>Neues Lager</i>: Implementieren eines neuen bzw. "verbesserten" Lagerkonzepts, internationale Lösung – <i>Andere Nutzung des Untergrunds</i>: Rohstoff, Tunnelbau etc.
Lagerzustände und Rückholung	<p data-bbox="628 1104 1385 1135">Drei Lagerzustände beeinflussen die Rückholbarkeit unmittelbar:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="628 1196 1492 1317">1. Abfallbehälter in offenen Lagerkavernen gestapelt oder versenkt; Zugänge offen: sehr leichte Rückholbarkeit gewährleistet mit denselben Geräten, die für die Einlagerung benutzt werden. <li data-bbox="628 1335 1492 1592">2. Verfüllte und versiegelte Lagerkavernen, Hohlräume zwischen Abfallbehälter und Nahfeld verfüllt; Zugänge offen: leichte Rückholbarkeit mit konventionellen Fördertechniken gewährleistet. Das Verfüllmaterial besteht bei Langzeitlagern und Endlagern aus Bentonit oder Betonitgemischen (HAA) oder relativ weichem Mörtel (SMA) und kann entsprechend leicht ausgefräst werden. <li data-bbox="628 1610 1492 1957">3. Wie Variante 2, aber verschlossene und versiegelte Zugänge (Endlager): Rückholbarkeit mit erhöhtem technischem und finanziellem Aufwand. Bei der Rückholung aus Tiefenlagern wird der erneute Zugang zum Lager mittels normaler Untertagebautechniken geschaffen. Dabei ist dem Aspekt des Strahlenschutzes besondere Beachtung zu schenken. Im Lager selbst können Bergbautechniken eingesetzt werden, wie sie im Uranabbau praktiziert werden, auch Roboter. <p data-bbox="628 1975 1492 2094">Eine erleichterte Rückholbarkeit (Varianten 1 und 2) stellt langfristig bei sensiblen Materialien wie spaltbarem Plutonium und Uran eine Gefahr dar, z. B. in Krisensituationen oder bei Missbrauch des Abfalls. Aus</p>

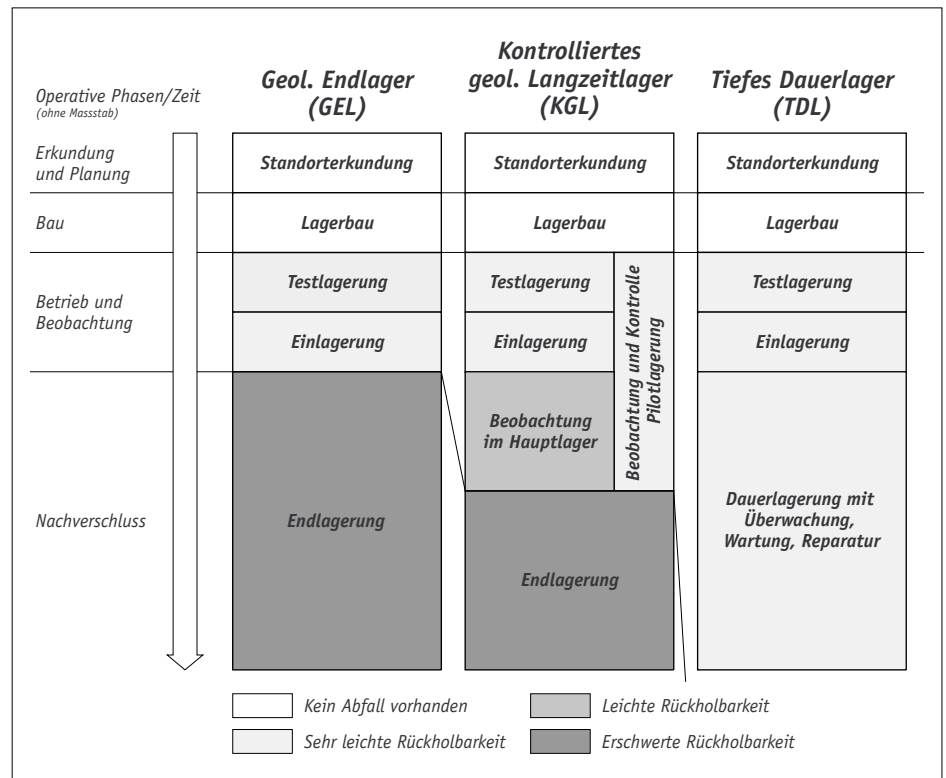
Gründen der Rückholbarkeit allein macht es wenig Sinn, Lagerkavernen offenzuhalten. Die Rückholung wird durch eine eingebrachte Verfüllung technisch nicht entscheidend erschwert.

Zwischen einer Rückholung über noch offene Zugangsstollen oder -schächte und dem Wiederauffahren eines Endlagers bestehen allerdings schwerwiegende technische, wirtschaftliche und psychologische Unterschiede. Auch wenn für Variante 3 grosse Hemmnisse im Weg liegen, ist hier die Rückholung der Abfälle ebenfalls jederzeit technisch machbar.

4.4 Lagerphasen

Im vorliegenden Bericht werden folgende operativen Lagerphasen unterschieden:

- Erkundungs- und Planungsphase
- Bauphase
- Betriebs- und Beobachtungsphase mit
 - Testen und Einlagern (GEL, KGL und DL)
 - Beobachten (KGL und DL)
- Nachverschlussphase (GEL und KGL)



Figur 8: Operative Phasen der Lagerung und phasenbezogener Aufwand für die Rückholung der Abfälle aus den Tiefenlagern

a. **Erkundungs- und Planungsphase; Bauphase**

Bereits vor der Einlagerung der Abfälle in ein Tiefenlager sind diverse Untersuchungen erforderlich:

- Wirtsgesteinsspezifische Untersuchungen in Felslabors (z. B. Mt. Terri, Sondierstollen Wellenberg)
- Verstärkte Grundlagenforschung (nationale und internationale Programme), z. B. durch Untersuchung natürlicher Analoga zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Langzeitprognosen
- Errichtung eines Untertagelabors sowie eines Test- und/oder Pilotlagers am Lagerstandort

b. **Betriebs- und Beobachtungsphase**

Zu Beginn der Betriebsphase werden das Testlager (GEL und KGL) und das Pilotlager (nur KGL) in Betrieb genommen. Nach erfolgreichem Sicherheitsnachweis erfolgt die Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager. Im Falle der herkömmlichen GEL werden die Kavernen und Zugangsstollen möglichst schnell verschlossen. Im Falle der KGL werden die Lagerkavernen auch verschlossen; die Zugänge bleiben hingegen während der Beobachtungsphase offen.

Testen und
Einlagern

Beobachten	<p>Überwachung und Kontrolle werden im Falle der KGL vor allem im Pilotlager und, so weit möglich, auch im Hauptlager durchgeführt. Im Pilotlager sind weitere Massnahmen, wie etwa eine versuchsweise Rückholung von Abfällen, möglich. Am Ende der Beobachtungsphase werden die Abfälle entweder aus dem Hauptlager zurückgeholt, oder das Lager wird verschlossen und versiegelt.</p> <p>Während der Beobachtungsphase muss ein Tiefenlager drainiert und Wasser abgepumpt werden; es findet eine Entwässerung des Wirtsgesteins in Richtung Lager statt. Dadurch baut sich der Druck im Grundwasser ab. Es kommt zu einer Ausgasung von Wasserinhaltsstoffen und möglicherweise zu einer Austrocknung des Gebirges in der Lagerzone.</p>
Verschluss	<p>Falls die Überwachung einige Jahrzehnte oder länger dauert, muss ein KGL für einen raschen Verschluss ausgelegt werden. Diese Massnahme ist erforderlich, da ein aus welchen Gründen auch immer unkontrollierter Abbruch der Überwachung nicht ausgeschlossen werden kann.</p>
Aufsättigung	<p>c. <i>Nachverschlussphase</i></p> <p>Nach Verschluss des Hauptlagers und Überführung in ein geologisches Endlager sind dessen Zugangsstollen verfüllt und versiegelt. Es findet eine vollständige Aufsättigung des Nahfeldes statt. Die Dauer dieser Aufsättigung hängt von den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins (Durchlässigkeit) und bei HAA zudem von der Wärmeproduktion ab.</p> <p>Folgende Massnahmen sind nach dem Verschluss des Hauptlagers noch notwendig bzw. denkbar:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Langzeitbetrieb des vom Hauptlager unabhängigen Pilotlagers: Kontrolle der Lagerparameter (Frühwarnung, Störfallkontrolle) – Fernbeobachtung der Lagerzone (remote sensing) – Langzeitbeobachtung der Umwelt – Aufrechterhaltung des Fachwissens über radioaktive Abfälle und der Kenntnisse über Inventar und Lagerstandort (Vermeidung des unbeabsichtigten Anbohrens) – Schutzmassnahmen (namentlich Sicherung gegen unbefugten Zugriff)

Bis zum Austritt von Radionukliden aus der Verfüllung, d. h. bis zum Übergang von den technischen zu den natürlichen Barrieren, werden bei einem SMA-Lager mehrere hundert, bei einem HAA-Lager mehrere zehntausend Jahre vergehen. Aus heutiger Sicht ist nach dem endgültigen Verschluss eines Lagers, d. h. auch des Pilotlagers und dessen Zugangsstollen, nur noch eine Umweltbeobachtung, z. B. eine Messung der Radioaktivität des Quellwassers, vorzusehen.

5. Das Konzept des kontrollierten geologischen Langzeitlagers

In Kapitel 5 wird das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung entwickelt. Dieses Konzept basiert auf den in den Kapiteln 3 und 4 dargelegten Anforderungen und Rahmenbedingungen.

5.1 Technische Auslegung

Die folgende Beschreibung stellt eine Möglichkeit der technischen Auslegung des kontrollierten geologischen Langzeitlagers (KGL) dar.

Systemelemente

Das Lagerkonzept der KGL umfasst die generellen Systemelemente Test-, Haupt- und Pilotlager (Figur 9). Die konkrete Ausgestaltung muss standort-spezifisch und stufengerecht im Laufe der weiteren Projektierung erfolgen. Die drei Systemelemente haben folgende Ziele zu erfüllen:

Testlager

Das Testlager wird während und/oder unmittelbar nach der Standorterkundung eingerichtet. Es dient als Felslabor dazu, standortspezifische Untersuchungen durchzuführen. Diese Untersuchungen sind notwendig, um den Sicherheitsnachweis, der für die Betriebsbewilligung gefordert ist, zu erhalten. Das Testlager kann – in Ergänzung zum Pilotlager – nach der Betriebsaufnahme des Hauptlagers weiter betrieben werden.

Im Testlager sollen gezielte Untersuchungen zu den im Hauptlager ablaufenden sicherheitsrelevanten Prozessen durchgeführt werden. Dazu können Anlageteile des Hauptlagers nachgebildet und getestet werden. Offene Fragen lassen sich mit spezifischen Versuchen im Felslabor untersuchen. Mit Wärmeelementen ist es möglich, die Wärmeentwicklung der Abfälle zu simulieren, geeignete Radionuklidtracer dienen der Untersuchung von Transportvorgängen (Migrationsversuch) und leere Abfallbehälter dem Studium von chemischen Prozessen unter Endlagerbedingungen.

Hauptlager

Das Hauptlager wird im Wirtsgestein errichtet und nimmt den grössten Teil der Abfälle auf. Um die Langzeitsicherheit zu gewährleisten, müssen Standortwahl und Wirtsgestein des Hauptlagers den Anforderungen an ein Endlager genügen. Die Lagerarchitektur (Kavernensystem und -geometrie), der Einbau und die Verfüllung sind so zu konzipieren und auszuführen, dass die Rückholung technisch einfach bleibt.

Nach der Einlagerung der Abfälle werden die Lagerkavernen sofort verfüllt. Die Zugangsschächte und Stollen sowie Räumlichkeiten für die Überwachung und Kontrolle des Lagers bleiben während der Beobachtungsphase offen; sie sind baulich entsprechend zu verstärken. Während der Betriebs- und Beobachtungsphase müssen die offenen Teile des Lagers drainiert und unterhalten werden.

Zur Gewährleistung der Sicherheit während der länger andauernden Beobachtung sind Einrichtungen für einen raschen Lagerverschluss in Krisenzeiten zu schaffen. Für die Überwachung des Nahfeldes in der Betriebs- und Beobachtungsphase können spezielle Einrichtungen im Zugangsbereich (z. B. Sonden) vorgesehen werden. Diese dürfen jedoch nicht zu einer Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des Hauptlagers führen, z. B. durch Schaffung von direkten hydraulischen Verbindungen (Kurzschlüssen) zur Biosphäre.

Pilotlager

Das Pilotlager erfüllt mehrere Aufgaben:

- Überwachung des Langzeitverhaltens der technischen Barrieren und des Nahfelds
- Bestätigung von Prognosemodellen, mit denen die Langzeitsicherheit nachgewiesen wurde
- Funktion als Nachweislager, welches über den Verschluss des Hauptlagers hinaus eine Langzeitkontrolle ermöglicht

Im Gegensatz zum Hauptlager könnten im Pilotlager nach Ablauf gewisser Fristen auch zerstörende Untersuchungen vorgenommen werden, um genauere Erkenntnisse über Einrichtungen des Endlagersystems zu gewinnen. Da dann die Integrität des Pilotlagers oder von Teilen davon nicht mehr gewährleistet ist, wären betroffene Abfallbehälter zur anderweitigen Entsorgung zurückzuholen.

Die Resultate aus dem Pilotlager liefern gemeinsam mit jenen aus dem Testlager und der Bau- und Betriebsphase des Hauptlagers die wichtigsten Grundlagen zur Bestätigung der Langzeitsicherheit. Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse ist Voraussetzung für die Genehmigung des Hauptlager-Verschlusses.

Die Untersuchungen im Pilotlager liefern zudem Entscheidungsgrundlagen, ob Abfälle aus Sicherheitsgründen aus dem Hauptlager rückgeholt werden müssen.

Aufgrund der Beobachtungen im Pilotlager können folgende Eingriffe im Hauptlager durchgeführt werden:

- Kontrolle der technischen und zum Teil der natürlichen Barrieren
- Reparatur und Verbesserungsmassnahmen an den technischen Barrieren
- Sanierungsmassnahmen bei unerwartetem Austritt von Radionukliden in das Nahfeld oder in die Geosphäre
- Rückholung von Abfällen

Das Pilotlager wird vor dem Hauptlager gebaut und betrieben, es muss von diesem hydraulisch vollständig isoliert sein.

5.2 Mögliche Umsetzung

Als Voraussetzung für die Errichtung des KGL müssen die Standortuntersuchungen mit Erfolg abgeschlossen sein. Bau, Betrieb und ordnungsgemässer Abschluss eines KGL bedingen zudem unabhängige Projekt- und Kontrollstrukturen, welche die Qualität der Planung und Ausführung überwachen und bei Bedarf Korrekturen veranlassen. Offenheit, Transparenz und Fachkompetenz sind die Schlüsselgrössen, die gesellschaftliches Vertrauen aufbauen und damit Akzeptanz herstellen können. Dies wiederum bedarf einer vorbildlichen Informations- und Kommunikationspraxis, die über die gesamte Betriebsdauer des KGL aufrechtzuerhalten ist.

Die Projektstrukturen sind gegenüber gesellschaftlichen Krisenentwicklungen möglichst gut abzusichern. Wirtschaftliche Depression, kriegerische Auseinandersetzungen, Terrorismus und Epidemien sind als besonders bedrohliche Szenarien zu betrachten. Infolge des grossen potentiellen Schadenausmasses setzen diese Bedrohungen eine sorgfältige Prävention und insbesondere Störfallvorsorge voraus.

Erkundungs- und
Planungsphase

Die Erkundungs- und Planungsphase umfasst namentlich die Standorterkundung und -charakterisierung sowie die Planung der verschiedenen Teile des Lagers. Gleichzeitig sind die Modalitäten von Arbeitsüberwachung und Qualitätskontrolle zu regeln. Bei einem positiven Befund der Standortuntersuchung wird mit Planung und Bau begonnen.

Bauphase

In der Bauphase werden zunächst das Test- und das Pilotlager errichtet. Der Bau des Hauptlagers erfolgt stufenweise während der Betriebs- und Beobachtungsphase.

Betriebs- und
Beobachtungsphase

Die Betriebs- und Beobachtungsphase beginnt mit dem Betrieb von Test- und Pilotlager. Das Störfallmanagement muss bereits zu Beginn dieser Phase greifen können.

Testlager. Der Betrieb des Testlagers dient dem Sicherheitsnachweis für das Hauptlager. Aufgrund der Erkenntnisse im Testlager kann das Lagerdesign des Hauptlagers definitiv festgelegt werden.

Pilotlager. Im Pilotlager werden Überwachung und Kontrolle der Anlage und des Nahfeldes konzipiert und umgesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf das Hauptlager übertragen und nötigenfalls vor Ort verifiziert werden.

Hauptlager. Bei positiven Befunden des Testbetriebs kann zur nächsten Etappe geschritten werden. Zugangs- und Betriebsbereiche des Hauptlagers werden vollständig und die Lagerbereiche vorerst teilweise ausgeführt. Weitere Lagerkavernen können fortlaufend und entsprechend den Platzbedürfnissen erstellt und getestet werden.

Der Bau erfordert eine sorgfältige Baubegleitung, welche die Qualität der Bauausführung sicherzustellen hat. Gleichzeitig wird die vollständige Massnahmenplanung eingeleitet.

Nach Freigabe der Lagerkavernen beginnt mit der Einlagerung der Abfälle der eigentliche Betrieb des Hauptlagers.

Sobald die Abfälle eingelagert sind, werden die Lagerkavernen des Hauptlagers sofort verfüllt und versiegelt. Zugangs- und Bedienungstollen sind aber weiterhin offen zu halten, um den Zugang zum Lagerbereich und dessen Nahfeld zu erleichtern. Die offenen Zugänge und Stollen sind zu drainieren. In dieser Phase ist die Rückholung der Abfälle weiterhin ohne grossen technischen und finanziellen Aufwand möglich. Das Störfallmanagement muss weiterhin greifen können.

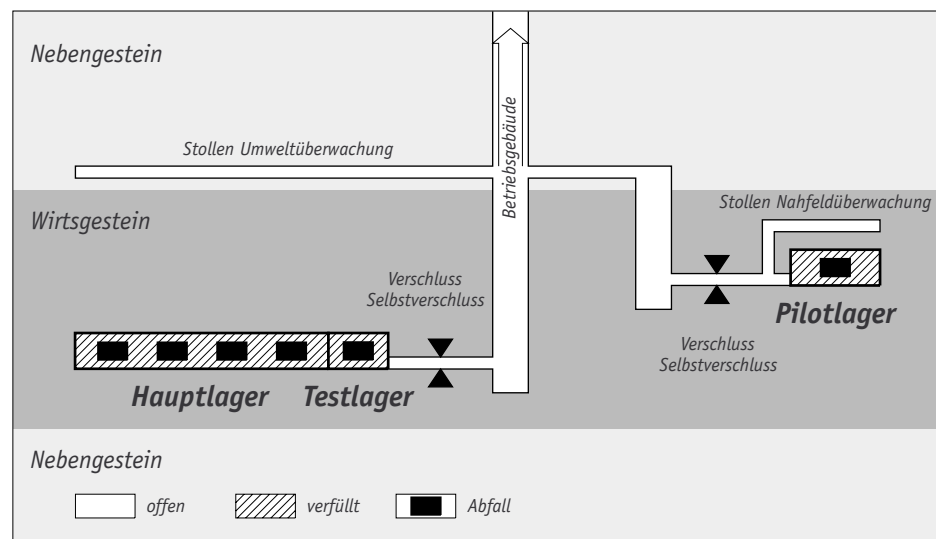
Verschluss und
Nachverschlussphase

Ein definitiver Verschluss der Zugangs- und Bedienungstollen des Hauptlagers wird nach der Betriebs- und Beobachtungsphase erfolgen, die einige Jahrzehnte bis mehr als hundert Jahre dauern kann. In dieser Zeit können die Sicherheitsmodelle validiert werden. Der definitive Verschluss des Hauptlagers bedarf wiederum einer Sicherheitsanalyse.

Es ist denkbar, dass das Pilotlager über eine weitere Zeit offen gehalten wird und dessen Verschluss später als beim Hauptlager erfolgt. Die Entscheidung darüber liegt bei künftigen Generationen.

Aufgaben mit langfristigem Charakter wie Archivführung und Transfer des Fachwissens, evtl. auch Überwachung mit passiven Systemen schliessen an den Verschluss des KGL an und sind von der öffentlichen Hand zu übernehmen.

Der Forschungsstand für die verschiedenen Elemente eines kontrollierten geologischen Langzeitlagers ist weniger weit fortgeschritten als jener für ein geologisches Endlager. Nachholbedarf besteht vor allem bezüglich der Errichtung eines Pilotlagers und der Sicherheitssysteme des KGL während der Betriebs- und Beobachtungsphase.



Figur 9: Schematisches Lagerkonzept KGL: Systemelemente

5.3 Massnahmenplanung

In Kapitel 5.2 wurde ein mögliches Vorgehen bei der technisch-wissenschaftlichen Umsetzung des KGL skizziert. Die folgenden Ausführungen heben die Notwendigkeit einer gesamthaften und kohärenten Massnahmenplanung hervor. Wichtigste Elemente dieser Massnahmenplanung sind:

- Sicherstellung eines hohen Qualitätsniveaus für die generelle Planung und für die spezifischen Teilprogramme (Lagerdesign, Verfüllung, Versiegelung, Verschluss usw.)
- Überwachungs- und Kontrollprogramme für Bau-, Betriebs-, Beobachtungs- und Nachverschlussphase sowie für alle relevanten Anlageteile, technischen Systeme und die Umwelt (insbesondere für das Nahfeld)
- Qualitätssicherungsprogramme für die entsprechenden Lagerphasen und Programmteile (Bauausführung, Überwachung, Kontrolle, Datenmanagement, usw.)
- Störfallmanagement (inkl. Rückholung der Abfälle) ab der Bauphase
- Sicherstellung der finanziellen Ressourcen, der Verfügbarkeit von notwendigen Informationen über das Lager, Markierung des Lagers und Weitergabe des Fachwissens
- Information und Kommunikation als Grundlagen der Vertrauensbildung

6. Beurteilung der Lagerkonzepte

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 4 und 5 dargestellten Lagerkonzepte vergleichend beurteilt. Dabei handelt es sich um die Konzepte

- Oberflächen-Dauerlager (ODL)
- Oberflächen-Langzeitlager (OLZL)
- Oberflächen-Endlager (OEL)
- Tiefen-Dauerlager (TDL)
- Kontrolliertes geologisches Langzeitlager (KGL)
- Geologisches Endlager (GEL)

Diese Lagerkonzepte unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Sicherheitssysteme. Figur 10 enthält eine Zusammenstellung der für die verschiedenen Konzepte charakteristischen Barrieren und Massnahmen (grau markiert). Die Wirksamkeit dieser Barrieren und Massnahmen in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs wird in Kapitel 4 diskutiert.

		Oberflächenlager			Tiefenlager		
		ODL	OLZL	OEL	TDL	KGL	GEL
Massnahmen							
Technische Barrieren	Abfallmatrix und -behälter						
	Lagerverfüllung						
Natürliche Barrieren	Nahfeld, Wirtsgestein, Geosphäre						

Figur 10: Sicherheitssysteme, die bei den betrachteten Lagerkonzepten zum Tragen kommen. Grau: Barriere oder Massnahme ist Teil des Konzepts

6.1 Grundlagen der Beurteilung

a. *Vorgehen*

Für einen Vergleich der Lagerkonzepte ist eine integrale Sicherheitsbetrachtung erforderlich, welche alle Lagerphasen nach dem Bau umfasst:

- Betriebs- und Beobachtungsphase mit
 - Testen und Einlagern
 - Beobachten (Überwachung und Kontrolle)
- Nachverschlussphase

Für die Beurteilung wird hier ein zweistufiges Vorgehen gewählt:

- Als Beurteilungskriterium hat die Sicherheit oberste Priorität. Daher wird zunächst untersucht, welches Sicherheitsniveau in der Betriebs- und Beobachtungs- bzw. in der Nachverschlussphase erreicht werden kann. Die Untersuchung geht davon aus, dass mit allen Lagerkonzepten ein hoher Sicherheitsstandard angestrebt wird. Für eine integrale Sicherheitsbetrachtung muss neben dem erreichten Sicherheitsniveau auch der Zeitraum, über den die verbleibenden Risiken bestehen, betrachtet werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie kann dies nur qualitativ erfolgen.
- Anschliessend werden die weiteren gesellschaftlichen Kriterien Handlungsspielraum, Verursacherprinzip und Akzeptanz in die Beurteilung einbezogen.

b. *Beurteilungskriterien*

In Kapitel 3 werden Werte und Ziele zur Lagerung radioaktiver Abfälle definiert. Diese Werte und Ziele sind hierarchisch geordnet. Höchste Priorität wird dabei der Sicherheit eingeräumt:

- Sicherheit von Mensch und Umwelt
- Handlungsspielraum für jede Generation, Gerechtigkeit zwischen Bevölkerungsschichten, -gruppen und Generationen
- Einhaltung des Verursacherprinzips
- Akzeptanz

c. *Definition der Sicherheitsbereiche*

Allgemein lassen sich – ohne Prioritäten zu setzen – folgende Sicherheitsbereiche unterscheiden:

1. *Arbeitssicherheit*

Ziel: Schutz der Arbeitnehmer/innen

Umfasst: Konventionelle Arbeitssicherheit und Strahlenschutz

2. *Störfallsicherheit*

Ziel: Schutz von Mensch und Umwelt vor akuten, nicht bewusst herbeigeführten Ereignissen

Umfasst: Konventionelle Störfallsicherheit und Strahlenschutz

2.1. *Sicherheit vor internen Ereignissen*

Beispiele: Brand, Explosion, Verpuffung, Einsturz

2.2. *Sicherheit vor externen Ereignissen*

Beispiele: Erdbeben, Meteoriteneinschlag, meteorologische Ereignisse, Überschwemmung, Flugzeugabsturz

3. *Sicherung*

Ziel: Schutz vor bewussten menschlichen Einwirkungen

Umfasst: Sicherheit vor Sabotage und weiteren Einwirkungen Dritter

4. *Sicherheit vor Emissionen*

Ziel: Schutz von Mensch und Umwelt vor chronischen Einwirkungen während des Betriebs einer Anlage

Umfasst: konventionellen Immissionsschutz und Strahlenschutz für nicht beruflich Exponierte, auch bei unbeabsichtigtem, chronischem Austritt radioaktiver Stoffe aus dem Lager

5. *Langzeitsicherheit*

Ziel: Schutz von Mensch und Umwelt vor chronischen Einwirkungen nach Beendigung des Betriebs

Für die Untersuchung dieser fünf Sicherheitsbereiche stehen spezifische Methoden zur Verfügung, auf die im Rahmen des vorliegenden Berichts jedoch nicht näher eingegangen werden kann. Die folgende Beurteilung ist qualitativer Art und nicht mit einer Sicherheitsanalyse im Sinne der Atomgesetzgebung vergleichbar.

d. *Beurteilung natürlicher und gesellschaftlicher Systeme*

Erdwissenschaftliche Programme zeigen, dass die Geologie immer wieder Überraschungen bietet. Geologische Prognosen, aber auch Prognosen zum Langzeitverhalten technischer Systeme sind und bleiben mit Unsicherheiten behaftet.

Wird die kritische Frage nach der Entwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse und der Veränderung von Weltbildern den Naturwissenschaften, namentlich der Geologie gestellt, so müssen sich – mit gleicher Berechtigung – auch die Sozialwissenschaften dieser Frage stellen.

Die Vorhersage der gesellschaftspolitischen Entwicklung ist generell um Größenordnungen unsicherer (siehe Kapitel 3) als Prognosen zu geologischen Ereignissen. Ausnahmen hiervon stellen einzig abrupte Zustandsänderungen wie Erdbeben dar, deren Auftreten statistisch, nicht aber deterministisch vorhersehbar ist. Die gesellschaftliche Zukunft ist – entgegen Überzeugungen in der Tradition des dialektischen Materialismus – längerfristig weder lenkbar noch prognostizierbar. Ein Beispiel liefern die Grenzverschiebungen im Europa der letzten 200 Jahre.

Diese Situation führt dazu, dass Lagerkonzepte, die sich langfristig auf gesellschaftliche Strukturen abstützen, in Sicherheitsanalysen nur wenig Aussicht auf Erfolg besitzen.

Massnahmen können einen Beitrag zur Sicherheit der Lagerung radioaktiver Abfälle leisten. Sie stellen jedoch keine Alternative zu einer umfassenden Untersuchung und Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Lagers dar. Zudem dürfen Einrichtungen zur Überwachung und Kontrolle die passive Sicherheit eines Lagers nicht beeinträchtigen.

6.2 Beurteilung der Sicherheit

6.2.1 Sicherheitsbereiche

a. *Arbeitssicherheit*

Betriebs- und
Beobachtungsphase

Solange die Lagerräumlichkeiten und -kavernen offen stehen, hängt die Arbeitssicherheit während Einlagerung und Betrieb mehr von der Betriebsorganisation als vom Lagerkonzept ab. Es besteht somit kein wesentlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Konzepten. Beispielsweise zeigen die umfassenden Analysen und Gutachten zur Arbeits- und Störfallsicherheit für das Zentrale Zwischenlager Würenlingen, dass die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden können (HSK 1995, HSK 1999, ZWILAG 1994; ZWILAG 1997).

Nach Abschluss der Einlagerung, der Kontrollen und Tests werden die Kavernen bzw. Lagerräume von Langzeitlagern und Endlagern verfüllt. Bei den Endlagern werden zudem die Zugänge verfüllt und verschlossen. Danach sind keine Arbeitsaktivitäten mehr erforderlich.


Die Abschirmung der radioaktiven Abfälle ist im Falle des GEL optimal. An Langzeitlager, einschliesslich KGL, werden somit höhere Anforderungen an den betrieblichen Strahlenschutz gestellt als bei einem GEL. Einerseits fallen mehr Unterhalts- und Instandsetzungsarbeiten an, andererseits sind beim KGL einzelne technische Barrieren vor dem Verschluss noch nicht wirksam.

Figur 11 enthält eine qualitative Abschätzung der Sicherheit der verschiedenen Lagerkonzepte während der Betriebs- und Beobachtungsphase sowie in der Nachverschlussphase.

Betriebs- und Beobachtungsphase Testen und Einlagern (ca. 30 – 50 Jahre)	Oberflächenlager			Tiefenlager		
	ODL	OLZL	OEL	TDL	KGL	GEL
1. Arbeitssicherheit						
2.1. Störfallsicherheit, interne Ereignisse						
2.2. Störfallsicherheit, externe Ereignisse						
3. Sicherung						
4. Schutz vor Emissionen						

Betriebs- und Beobachtungsphase Beobachten (Jahrzehnte bis Jahrhunderte)	ODL	OLZL	OEL	TDL	KGL	GEL
1. Arbeitssicherheit			Keine Aktivität			Keine Aktivität
2.1. Störfallsicherheit, interne Ereignisse	Massnahmen	Massnahmen		Massnahmen	Massnahmen	
2.2. Störfallsicherheit, externe Ereignisse						
3. Sicherung						
4. Schutz vor Emissionen						

Nachverschlussphase bzw. dauerhafter Betrieb (bis mehr als 100'000 Jahre)	ODL	OLZL	OEL	TDL	GEL + KGL
1. Arbeitssicherheit		Keine Aktivität	Keine Aktivität		Keine Aktivität
2.1. Störfallsicherheit, interne Ereignisse					
2.2. Störfallsicherheit, externe Ereignisse					
3. Sicherung					
4. Schutz vor Emissionen					
5. Langzeitsicherheit					



 geringe Sicherheit begrenzte Sicherheit hohe Sicherheit

Figur 11: Qualitative Abschätzung der Sicherheit der verschiedenen Lagerkonzepte

In den nicht verfüllten Lagerräumlichkeiten und Lagerkavernen der Dauerlager sowie bis zur Verfüllung der Kavernen im angepassten Lagerkonzept Wellenberg hängt die Arbeitssicherheit weitgehend von der Betriebsorganisation und von der Wartung der Anlagen ab. Dies betrifft beispielsweise die Standfestigkeit der Lagerzone, die Integrität der Lagergebäude oder den Zustand der elektrischen Anlagen. Die Sicherheit durch technische Barrieren ist reduziert (Figur 11).

Nachverschlussphase bzw. dauerhafter Betrieb

Nach einigen Jahrhunderten herrscht einzig in den Dauerlagern noch Betrieb; es stellt sich die Frage des Zerfalls der Anlagen. Es ist nicht vorhersehbar, auf welche Weise eine künftige Gesellschaft die Massnahmen aufrecht erhalten wird; die Arbeitssicherheit ist daher aus heutiger Sicht langfristig nicht garantiert.

Fazit

Beim Vergleich der Arbeitssicherheit über alle Phasen der Lagerung schneidet die GEL auf Grund des besseren Schutzes vor Emissionen am günstigsten ab, gefolgt von der KGL.

Betriebs- und Beobachtungsphase

b. Störfallsicherheit

Interne Auslöser für Störfälle sind Ereignisse wie Brand, Explosion/Verpuffung, technisches Versagen und Betriebsunfälle. Externe Auslöser sind Ereignisse wie Flugzeugabsturz, Meteoriteneinschlag, meteorologische Vorgänge, Erdbeben und Überschwemmungen.

Ein Dauerlager ist mit einem Zwischenlager vergleichbar, wobei die Lebensdauer des letzteren allerdings auf einige Jahrzehnte beschränkt bleiben soll. Umfangreiche Untersuchungen legen nahe, dass ein Zwischenlager durch entsprechende Auslegung und Organisation über einige Jahrzehnte sicher betrieben werden kann. Gemäss aktueller Gesetzgebung muss während des Betriebs eine Notfallorganisation zur Störfallbewältigung aufrechterhalten werden.

Die Tiefenlager bieten generell einen besseren passiven Schutz als die Oberflächenlager. In den verschlossenen Lagerräumen von GEL und KGL sind die Integrität der Abfallform und der Lagerräumlichkeiten ausserdem eher garantiert als in den offenen Räumen eines TDL. Überwachung, Unterhalt und erleichterte Rückholung sind im Falle der Dauerlager und der Langzeitlager als zusätzliche Massnahmen bei Störfällen zu betrachten, wobei das entsprechende Risiko allerdings durch den verzögerten Verschluss tendenziell erhöht wird. Nach einer Zeit von Jahrzehnten bis mehr als hundert Jahren stellt sich allerdings die Frage der

Stabilität der Lagerzugänge und der Lagerbauten, sowie der Flutung der Untertagebauten bei Ausfall der Drainage.

Betriebs- und Beobachtungsphase	<p>c. <i>Sicherung</i></p> <p>Die Sicherung muss durch kurzfristige Analysen erfasst werden, da die Gefährdungslage mit den gesellschaftlichen Rahmenbedingungen variiert und über längere Zeiträume schwer vorhersehbar ist. Sicherung ist eine Aufgabe, die flexibel immer wieder neu gelöst werden muss. Wesentliche Sicherungsfragen stellen sich insbesondere im Hinblick auf die Proliferationsproblematik. Entsprechend wird diese Thematik international sowohl auf politischer als auch technischer Ebene diskutiert und ist Inhalt verschiedener internationaler Übereinkommen.</p> <p>Untertagebauten erlauben bereits in der Betriebsphase eine einfachere Sicherung durch technische Massnahmen als Oberflächenlager (Figur 11). So könnten z. B. bei kriegerischen Ereignissen die Kavernen und der Lagerzugang relativ rasch verschlossen werden.</p>
Nachverschlussphase bzw. dauerhafter Betrieb	<p>Bei der GEL ist die Sicherung nach dem Verschluss durch den erschwerten Zugang garantiert; einzig eine geplante und mit bedeutenden Mitteln durchgeführte Rückholung erlaubt den Zugriff auf das Lagergut. Da bei Dauerlager kein Verschluss vorgesehen ist, kann sensibles Material jederzeit relativ einfach zurückgeholt werden.</p>
Während der Einlagerung	<p>d. <i>Schutz vor Emissionen</i></p> <p>Ähnlich wie bei der Arbeitssicherheit besteht beim Schutz vor Emissionen während der Einlagerung und dem Betrieb kein wesentlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Anlagen. Die Anlagenteile und Kavernen stehen offen und müssen belüftet werden.</p>
Nach der Einlagerung	<p>Mit dem Abschluss der Einlagerungsarbeiten entwickelt sich die Lage in differenzierter Weise:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Die offenen Dauerlager müssen belüftet werden, wodurch Radioaktivität in die Atmosphäre gelangen kann. Der Austritt von Radionukliden durch Wassertransport ist hingegen unwahrscheinlich, solange die Anlagen angemessen unterhalten und drainiert werden. Es ist davon auszugehen, dass dies während mehreren Jahrzehnte möglich ist.

- In einem OLZL, OEL und im angepassten Lagerkonzept Wellenberg der GNW ist nach Verfüllung des Lagerraumes der Austritt von Radioaktivität geringer als im Falle der Dauerlager.
- Im KGL werden die Lagerkavernen jeweils sofort verfüllt, hingegen bleiben die Zugänge (Schächte, Eingang) sowie das Pilotlager offen. Dadurch entsteht eine hydraulische Senke, welche Schadstoffe durch Wassertransport in Richtung des Grubensumpfes drainieren kann. Das Niveau der Emissionen wird in diesem Konzept wesentlich von der Wasserdurchlässigkeit des Wirtsgesteins, von der Integrität der Abfallgebände und der Dauer der Beobachtungsphase abhängen. Der Schadstoffgehalt im Grubensumpf ist ein Mass für die Integrität des Lagers.
- In einem GEL besteht nach Verfüllung und Versiegelung der Lagerkavern und der Zugänge keine hydraulische Senke mehr. Der Transport von Schadstoffen durch Gase wie auch durch Wasserfluss ist somit stark gehemmt.

Nachverschlussphase
bzw. dauerhafter Betrieb

Nach Verfüllung und Verschluss erfüllen das KGL und das angepasste Lagerkonzept Wellenberg die Voraussetzungen für die Begrenzung der Emissionen wie das GEL optimal. Bei den Oberflächenlagern und dem TDL stellt sich für die betrachteten Zeiträume die Frage nach der Integrität der Lagerbauten.

e. *Langzeitsicherheit*

Nachverschlussphase
bzw. dauerhafter Betrieb

Die Langzeitsicherheit ist für alle Oberflächenlager, etwa aufgrund des Risikos von Naturkatastrophen, Erosionsprozessen oder kriegerischen Ereignissen, nicht gewährleistet. Da über lange Zeiträume die Stabilität der Gesellschaft nicht nachgewiesen werden kann, ist es fraglich, ob Oberflächenlager und auch TDL langfristig sicher betrieben werden können. Bei diesen Lagerformen wäre nach einer entsprechend langen Zeitdauer eine Erneuerung des Einschlusses oder auch eine Neukonditionierung der Abfälle erforderlich.

Falls bei einem Verzicht auf die Wiederaufarbeitung abgebrannte Brennelemente direkt eingelagert werden, könnte bei Oberflächenlagern und unterirdischen Dauerlagern zudem ein unerwünschter Zugriff auf die Abfälle erfolgen, was der Non-Proliferation entgegensteht.

Nach heutigem Wissensstand kann die Langzeitsicherheit einzig durch eine Kombination von natürlichen und technischen Barrieren garantiert werden, wie sie bei einem GEL bzw. bei einem in ein GEL überführten

KGL vorhanden sind. Die Tiefe des GEL unter der Erdoberfläche schützt vor den Auswirkungen von Naturkatastrophen und Erosion. Un-erwünschte menschliche Eingriffe sind erschwert. Die äusserst langsam ablaufenden Prozesse in der Lithosphäre stellen einen wirksamen Schutz gegen die Ausbreitung der Radionuklide dar, bis diese infolge des natürlichen Zerfalles auf ein ungefährliches Niveau abgeklungen sind.

6.2.2 Zeitlicher Verlauf

a. *Langfristige Sicherheit*

Oberflächen- und
Dauerlager

Für den Zeithorizont von einigen Jahrhunderten bis mehr als hunderttausend Jahren besitzt die Langzeitsicherheit höchste Priorität. Entsprechend fallen Oberflächenlager und die TDL ausser Betracht. Hauptgründe hierfür sind:

- Die Integrität der Oberflächenbauten und der offenen Untertagebauten des TDL ist nicht gegeben
- Die gesellschaftliche Entwicklung ist nicht prognostizierbar, und somit sind die für die Sicherheit notwendigen Massnahmen nicht garantiert

GEL und KGL

In Betracht kommen damit als akzeptable Konzepte nur GEL und KGL. Wesentlich für deren Beurteilung sind :

- Zur Endlagerung bestehen eine ausgereifte Philosophie sowie das notwendige Fachwissen für die Sicherheitsanalyse
- Grundsätzlich werden an ein KGL dieselben Sicherheitsanforderungen gestellt wie an ein GEL. Im Vergleich mit dem GEL weist das KGL jedoch eine modifizierte Lagerarchitektur auf, die unter anderem auf erleichterte Rückholbarkeit abzielt. Um zeigen zu können, in welchem Masse die Langzeitsicherheit bei einem KGL aufgrund der vorgeschalteten Beobachtungsphase mit Überwachungs- und Kontrollmassnahmen beeinflusst wird, sind detaillierte Untersuchungen erforderlich

Angepasstes Lagerkonzept
Wellenberg

In vielen Bereichen ist das angepasste Lagerkonzept Wellenberg der GNW mit dem von der EKRA entwickelten Konzept KGL vergleichbar. Es bestehen aber auch Unterschiede. So wurde bereits im Rahmen des Energie-Dialogs Entsorgung darauf hingewiesen, dass ein längeres Of-

fenhalten von Lagerkavernen und Zugangsstollen einen höheren Grundwasserfluss durch ein unverschlossenes Lager bewirken würde als durch ein verschlossenes Lager. Die Verfüllung und Versiegelung der einzelnen Lagerkavernen sollte daher nach Abschluss der Einlagerung rasch erfolgen. Ein weiterer Unterschied betrifft den Bau und Betrieb des Pilotlagers, wie es von der EKRA für die KGL vorgeschlagen wird.

GEL und KGL

b. Mittelfristige Sicherheit

Nachdem die Oberflächenlager und das TDL aufgrund des übergeordneten Kriteriums der Langzeitsicherheit aus der Bewertung ausgeschieden sind, werden nunmehr GEL und KGL anhand ihrer Sicherheit für einige Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte beurteilt. Dabei sind folgende Punkte in Erwägung zu ziehen:

- Aufgrund der verlängerten Beobachtungsphase erfüllt KGL das Kriterium der Reversibilität (Möglichkeit der Überwachung und Kontrolle, Rückholung und Weiterverwendung im Falle der HAA) besser als GEL
- Diesem Vorteil der KGL steht im Vergleich mit dem GEL die Unsicherheit bezüglich der gesellschaftlichen Stabilität während längerer Zeiträume (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) gegenüber. Dies bedeutet einen erhöhten Aufwand im Bereich der Sicherung und der Betriebssicherheit während der Beobachtungsphase und damit Mehrkosten und Mehraufwand im Bereich der Überwachungsbehörden

GEL und KGL

c. Kurzfristige Sicherheit

Während der Betriebsphase, die etwa dreissig bis fünfzig Jahre dauert, unterscheiden sich die Konzepte nicht wesentlich.

6.3 Vergleichende Gesamtbeurteilung

Da Oberflächenlager und Dauerlager wie in 6.2 dargestellt kein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleisten, werden nur das geologische Endlager (GEL) und das kontrollierte geologische Langzeitlager (KGL) einander gegenübergestellt.

a. Sicherheit von Mensch und Umwelt

GEL garantiert nach heutigem Kenntnisstand die langfristige Sicherheit von Mensch und Umwelt.

KGL dagegen bietet während der Betriebs- und Beobachtungsphase die Möglichkeit, mittels Überwachung und Kontrolle nicht vorhergesehene Störungen festzustellen und darauf zu reagieren. Allerdings können bei Offenhaltung der Lagerzugänge Drainagewasser und Gasaustritt Emissionen verursachen. Ausserdem bestehen Unsicherheiten infolge der möglichen gesellschaftlichen Entwicklung. Namentlich stellt sich die Frage, wie lange die Gesellschaft fähig sein wird, ein solches Lager zu überwachen und bei Bedarf zu verschliessen.

Die Optimierung zwischen den Optionen GEL und KGL sollte an konkreten Projekten geprüft werden.

b. Handlungsspielraum für jede Generation und Gerechtigkeit zwischen Bevölkerungsschichten, -gruppen und Generationen

Handlungsspielraum

Für GEL spricht, dass künftigen Generationen keine Verpflichtungen übertragen werden, sich um die radioaktiven Abfälle zu sorgen.

KGL hingegen eröffnet künftigen Generationen bis zu einem gewissen Grad die Möglichkeit, eventuelle frühere Fehlentscheide zu korrigieren und neue Erkenntnisse für die Lagerung anzuwenden.

Gerechtigkeit

Betrachtungen zur Gerechtigkeit, z. B. zur Verteilung von Lasten, beschränken sich zwangsläufig auf die heutige Situation und erlauben es nicht, die beiden Konzepte über längere Zeiträume hinweg miteinander zu vergleichen. Regional betrachtet müssen gegenwärtig beispielsweise die Belastungen zwischen dem Standort des Zwischenlagers (keine Langzeitsicherheit) und den potentiellen Standorten für ein GEL oder ein KGL am Wellenberg und im nördlichen Kanton Zürich abgewogen werden.

c. Einhaltung des Verursacherprinzips

Für beide Lagerkonzepte kann die Einhaltung des Verursacherprinzips in gleicher Weise durch zwei Massnahmen angestrebt werden:

- Durch die heutige finanzielle Absicherung der Lagerung, unabhängig von der fluktuierenden Wirtschaftslage
- Durch die rasche Bereitstellung der Lager

d. *Akzeptanz*

Zur Beantwortung der Akzeptanzfrage ist der öffentliche Diskurs zu fördern. Dabei werden die Vor- und Nachteile von GEL und KGL gegeneinander abzuwägen und zu beurteilen sein.

Die Wahl zwischen GEL und KGL sollte als Optimierungsprozess zwischen zwei sich ergänzenden Konzepten erfolgen. In der Entscheidungsfindung kommt der Sicherheit von Mensch und Umwelt zu jedem Zeitpunkt Vorrang vor allen anderen Kriterien zu.

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen

Die Beurteilung der verschiedenen Lagerkonzepte führt die EKRA zu folgenden Schlussfolgerungen:

- | | |
|---|--|
| Zwischenlager | 1. Die Sicherheitssysteme der Zwischenlager sind auf kurze Lagerzeiten ausgelegt ; sie erfüllen daher das übergeordnete Ziel der Langzeitsicherheit nicht. |
| Lager an der Erdoberfläche und Dauerlager | 2. An der Erdoberfläche gelegene Abfalllager (<i>Oberflächen-Dauerlager, Langzeitlager und Endlager</i>) und offene Lager in der Tiefe (<i>Tiefen-Dauerlager</i>), welche zu überwachen sind, werden dem Ziel der Langzeitsicherheit ebenfalls nicht gerecht . |
| Geologische Endlager (GEL) | 3. Nach heutigem Wissensstand ist die geologische Endlagerung die einzige Methode zur Beseitigung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen an die Langzeitsicherheit (bis zu mehr als 100'000 Jahren) entspricht . Dieses Konzept basiert auf der kombinierten Wirkung von technischen und natürlichen Barrieren zum Einschluss der Radionuklide. Die Reversibilität der Lagerung, d. h. die Möglichkeit der Rückholung der Abfälle aus einem verschlossenen Endlager, ist grundsätzlich gegeben, aber nicht Teil des Konzepts. |
| Beobachtung, Kontrolle und Rückholbarkeit

Konzept kontrollierte geologische Langzeitlagerung (KGL) | 4. Die gesellschaftlichen Forderungen an die Abfalllagerung orientieren sich am Prinzip der Reversibilität . Die EKRA hat daher das Konzept der <i>kontrollierten geologischen Langzeitlagerung</i> entwickelt, welches die Endlagerung mit der Möglichkeit der Reversibilität verbindet. Es sieht zusätzlich zum eigentlichen Abfalllager – oder Hauptlager – die Errichtung eines Testlagers und eines Pilotlagers vor, ferner eine der geologischen Endlagerung vorgeschaltete Phase der Beobachtung und erleichterten Rückholung der Abfälle. Das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung berücksichtigt somit gleichzeitig die Ansprüche auf Langzeitsicherheit und auf Reversibilität. Auf diese Weise soll die geologische Endlagerung schrittweise erreicht werden, falls die Abfälle nicht vorher zurückgeholt werden. |

Abwägung GEL – KGL

5. In welcher Weise **das Konzept der geologischen Endlagerung um Elemente der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung zu ergänzen** ist, wird von Sicherheitsüberlegungen bestimmt.

Sicherheitsvorteile der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung während der Beobachtungsphase sind:

- möglicher Sicherheitszuwachs durch Erkenntnisgewinn und technischen Fortschritt
- Früherkennung unerwarteter und unerwünschter Entwicklungen
- erleichterte Rückholung der Abfälle oder gegebenenfalls Reparatur des Lagers

Sicherheitsnachteile der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung während der Beobachtungsphase sind:

- länger dauernde Exposition, vor allem des Betriebspersonals
- erhöhte Gefährdung durch unerwünschte Einwirkung Dritter
- schwer prognostizierbare negative Konsequenzen aus unvorhergesehenen gesellschaftlichen Entwicklungen wie kriegerischen Ereignissen, Systemwechseln, wirtschaftlichem und technologischem Einbruch, Epidemien

Bezüglich des schrittweisen Vorgehens von der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung zur späteren geologischen Endlagerung bestehen noch offene Fragen, welche Abklärungen im Rahmen konkreter Lagerprojekte und allgemeiner Analysen bedürfen.

Die Einführung des Konzepts der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung wäre im Vergleich zur geologischen Endlagerung mit höheren Bau- und Betriebskosten verbunden.

Sollten fundierte Untersuchungen an konkreten Projekten das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung auf ein Sicherheitsniveau bringen, das mit jenem der geologischen Endlagerung vergleichbar ist, wäre die kontrollierte geologische Langzeitlagerung aufgrund der leichteren Reversibilität vorzuziehen.

Entsorgungsprogramme

6. Entsorgungsprogramme in der Schweiz:

HAA/LMA

HAA/LMA-Programm: **Gemäss dem heutigen Kenntnisstand ist das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston grundsätzlich** für die Anlage sowohl eines geologischen Endlagers als auch eines kontrollierten geologischen Langzeitlagers **geeignet**. Zusätzlich zu den Erkenntnissen für die spätere geologische Endlagerung besteht für die Konkretisierung der Betriebs- und Beobachtungsphase der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung ein Forschungsbedarf.

SMA

SMA-Programm: **In etlichen Punkten ist das angepasste Lagerkonzept Wellenberg mit dem Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung vergleichbar**. Unterschiede ergeben sich vor allem aus der raschen Verfüllung der Lagerkavernen im Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung und der Anlage eines Pilotlagers zur Überwachung und Kontrolle.

Die Standortcharakterisierung ist am Wellenberg durch einen Sondierstollen zu vervollständigen.

7.2 Zum Mandat

1. *Vergleich geologische Endlagerung, kontrollierte und rückholbare Langzeitlagerung, Dauerlagerung und Zwischenlagerung*

Aktive und passive Sicherheit

Nur durch eine Kombination von technischen und natürlichen Barrieren (passive Sicherheitssysteme) kann die Langzeitsicherheit gewährleistet werden. Dafür kommen einzig geologische Tiefenlager mit verschlossenen Lagerkavernen in Frage (geologische Endlager und kontrollierte geologische Langzeitlager im Sinne dieses Berichts). Lager an der Erdoberfläche, namentlich Zwischen- und Dauerlager sowie Tiefen-Dauerlager mit offenen Lagerkavernen, sind als langfristige Lösungen auszuschliessen.

Überwachung und Kontrolle

Überwachung und Kontrolle im Lagerbereich stehen einerseits im Widerspruch zur Forderung nach Langzeitsicherheit. Andererseits sind sie ethisch begründet.

Rückholbarkeit

Rückholbarkeit ist Teil der Forderung nach Reversibilität. Rückholung kann durch planerische Massnahmen erleichtert werden. Solche Massnahmen erhöhen allerdings das Risiko eines nicht gewollten Zugriffs auf das Lagergut.

Geologische Endlagerung

Die EKRA kommt zum Schluss, dass an den Sicherheitsanforderungen im Sinne der geologischen Endlagerung festzuhalten ist. Damit der Forderung nach Überwachung, Kontrolle und erleichterter Rückholung entsprochen werden kann, schlägt die Expertengruppe das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung vor, welches unter anderem den Betrieb eines Testlagers und eines Pilotlagers, sowie organisatorische und institutionelle Massnahmen beinhaltet. Überwachung und Kontrolle können im Rahmen eines Pilotlagers ausserhalb des Hauptlagers durchgeführt werden. Das Pilotlager kann vor, während und nach der Einlagerung der Abfälle ins Hauptlager betrieben werden.

Kontrollierte geologische Langzeitlagerung

2. *SMA-Projekt Wellenberg und HAA/LMA-Projekt Nordschweiz*

Die untersuchten Wirtsgesteine können aufgrund der heutigen Kenntnisse den Anforderungen sowohl an ein geologisches Endlager als auch an ein kontrolliertes geologisches Langzeitlager entsprechen. Beide Projekte sollen daher weiterverfolgt und ausser auf ihre Eignung für Endlagerung auch auf die Möglichkeit der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung untersucht werden.

3. *Gesetzgebung*

- Das Kernenergiegesetz und weitere gesetzliche Grundlagen, z. B. Bergregal, haben im Sinne der obigen Befunde für alle Abfallarten die geologische Endlagerung als Massstab der Langzeitsicherheit vorzusehen. Die Möglichkeit der Überwachung, Kontrolle und erleichterten Rückholung ist durch den Projektanten im Sinne der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung zu dokumentieren.
- Die finanzielle Deckung der Entsorgungsarbeiten ist ab sofort abzusichern; die Finanzierung der Entsorgungsarbeiten ist schon jetzt durch einen Fonds zu decken.

7.3 Empfehlungen

Übergeordnetes Ziel der nuklearen Entsorgung ist der zeitlich unbeschränkte Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren, die von radioaktiven Abfällen ausgehen. Die geologische Endlagerung ist die einzige Methode zur Beseitigung der radioaktiven Abfälle, die dieses Ziel erfüllt. Gesellschaftliche Ansprüche, insbesondere die Forderung nach Überwachung, Kontrolle und Rückholbarkeit, werden mit dem von der EKRA entwickelten Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung berücksichtigt.

Ausgehend vom Mandat empfiehlt die EKRA folgendes Aktionsprogramm:

Öffentliche Auseinandersetzung

- a. Die öffentliche Auseinandersetzung zur Frage der nuklearen Entsorgung ist zu fördern.

Zum Kernenergiegesetz

Kernenergiegesetz

- b. Im Kernenergiegesetz ist für alle Abfallarten die geologische Endlagerung vorzusehen. Die Projektanten sind zu verpflichten, im Rahmen der laufenden konkreten Projekte die Überwachung, Kontrolle und erleichterte Rückholung im Sinne des Konzepts der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung zu dokumentieren.
- c. Die finanzielle Unabhängigkeit des Entsorgungsprogramms von den Betreibern der Kernkraftwerke ist schon heute zu sichern. Ausserdem sind die notwendigen institutionellen Anpassungen vorzunehmen.

Zum SMA-Projekt Wellenberg

SMA-Projekt Wellenberg

- d. Der Standort Wellenberg erfüllt aufgrund der heutigen Kenntnisse die Anforderungen sowohl für die geologische Endlagerung als auch für die kontrollierte geologische Langzeitlagerung. Das Projekt ist weiterzuvorführen, wobei das angepasste Lagerkonzept Wellenberg als Ausgangspunkt dienen kann. Zusätzlich sind die Möglichkeiten der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung bezüglich Lage und Auslegung eines Pilotlagers zu prüfen. Vorgängig sind am Wellenberg die notwendigen Schritte zur Realisierung eines Sondierstollens in die Wege zu leiten.

Zum HAA/LMA-Programm

HAA/LMA-Programm

- e. Das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston ist grundsätzlich sowohl für die Anlage eines geologischen Endlagers als auch für ein kontrolliertes geologisches Langzeitlager geeignet. Nach Vorliegen des Entsorgungsnachweises sind die Standortcharakterisierung voranzutreiben und die Lagerplanung und Standorterkundung an die Hand zu nehmen. Ausländische Lageroptionen stellen keinen Ersatz für die Lösung der Entsorgung in der Schweiz dar.

Zum Zeitplan der Realisierung

Zeitplan

- f. Für beide Projekte ist ein Zeitplan bis zur Realisierung der Lager vorzulegen und dessen Einhaltung regelmässig zu überprüfen.

Bibliographie

- AGNEB (1997): 19. Tätigkeitsbericht der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung, Bundesamt für Energie.
- AGV (1998): Arbeitsgruppe Volkswirtschaft, Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen eines SMA-Lagers Wellenberg – Kosten-Nutzen Analyse. Bundesamt für Energie, Bern.
- Aktionsplan (1997): Aktionsplan Umwelt und Gesundheit, Bundesamt für Gesundheit/Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- ANDRA (1997): Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Laboratoire de recherche souterrain Est - état des connaissances et programme d'experimentation.
- Bär, R. (1997): Der Effizienzpfad aus der atomaren Sackgasse (Zur Lagerung radioaktiver Abfälle aus Atomkraftwerken). Neue Zürcher Zeitung, 27.2.1997.
- Barde, J.-P. (1991): Economie et politique de l'environnement, Paris.
- Buser, M. (1997): Which is more stable: a rock formation or a social structure? Nagra bulletin No. 30, August 1997.
- Buser, M. (1998): "Hüte"-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblicke. HSK Würenlingen.
- Buser, M. & Wildi, W. (1981): Wege aus der Entsorgungsfalle. Schweizerische Energienstiftung (Zürich), Report 12.
- CNE (1998): Commission Nationale d'évaluation relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs instituée par la loi 91-1381 du 30 décembre 1991: Thoughts on Retrievability. Executive Summary, Paris.
- CNE (1999): Commission Nationale d'évaluation relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs instituée par la loi 91-1381 du 30 décembre 1991: Rapport d' Evaluation N° 5, Paris.
- CRWMS (1998): Civilian Radioactive Waste Management System, Total System Description. Revision 1.
- Damveld, H. & van den Berg, R. (1999a): Social and ethical aspects of retrievable disposal. Arbeitspapier.
- Damveld, H. & van den Berg, R. (1999b): Atomabfall und Atomethik. In: W. Neumann: Von Lingen nach Ahaus. EuKo-Info-Redaktion, Gronau.
- Dodd, D.H., Grupa, J.B., Heijdra, J.J. & Prij, J. (1998): A repository design for the retrievable disposal of radioactive waste in rock salt. ECN-Report, Serie RX, 98-022, Petten.
- DOE (1999): US Department of energy. A Roadmap for Developing Accelerator Transmutation of Waste (ATW) Technology. A Report to Congress.- DOE/RW-0519.- Washington, D.C.
- EIA (1999): Energy Information Administration, Annual Energy Review 1998.
- Gervers, J. H. (1993): Bericht der Arbeitsgruppe Standortvorauswahl. Appendix A. Experience of different countries in site selection - case studies. A3 U.S.A. In: Niedersächsisches Umweltministerium (Hrsg.): Endlager-Hearing Braunschweig. Tagungsband II, S. 312-322, Hannover (Internationales Endlager-Hearing 21.-23. September 1993 in Braunschweig).
- Greenpeace (1993): Trittst im Morgenrock daher, seh ich dich im Strahlenmeer, Greenpeace Schweiz.
- Hammond, Ph.R. (1979): Nuclear waste and public acceptance. American Scientist, Vol 67.
- Han, W. K., Heinonen, J. & Bonne, A. (1997): Radioactive Waste disposal: Global experience and challenges. IAEA-Bulletin, 39/1, Wien.

- HSK (1995): Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Gutachten zum Gesuch der ZWILAG um Erteilung der Betriebsbewilligung für Bau und Betrieb des Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle, HSK 27/12, Dezember 1995.
- HSK (1999): Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Gutachten zum Gesuch der ZWILAG um Erteilung der Betriebsbewilligung für die Konditionierungsanlage sowie für die Verbrennungs- und Schmelzanlage des Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle in Würenlingen, HSK 27/45, August 1999.
- IAEA (1971): Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva September 1971, Vol 11.
- IWM (1999): International Waste Management, Website des U.S. Department of Energy [http://edt.pnl.gov:2080/fac/\[france, netherlands, sweden\]/factsheet.html](http://edt.pnl.gov:2080/fac/[france, netherlands, sweden]/factsheet.html).
- Jonas H. (1979): Das Prinzip Verantwortung, Insel Verlag, Frankfurt a. M.
- Kreuzer, K. (1992): Ein Hüte-Konzept für radioaktive Abfälle, neue Wege, März 1992, 86-Jahrgang, Nr. 3.
- MacLean, D. (1986): ed., Values at Risk, Totowa NJ, Rowman and Allanheld.
- Moore, G. E. (1951): Principia Ethica, Cambridge, Cambridge University Press.
- nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988, Möglichkeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. NTB 88-25.
- nagra (1994a): Sedimentstudie, Zwischenbericht 1993. NTB 94-10.
- nagra (1994b): Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects. NTB 93-21.
- nagra (1997): 25 Jahre nagra. nagra Wettingen.
- nagra (1998): Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg. Etappen auf dem Wege zum Verschluss; präzisierende Darstellung der Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit, NTB 98-04.
- nagra (1999): Start der Langzeitmessungen in der Bohrung Benken (ZH). Pressemitteilung vom 16. Juli 1999.
- NEA (1995): Nuclear Energy Agency – OECD, The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal. A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee, Paris.
- NEA (1997a): Nuclear Energy Agency – OECD, Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal.- Proceedings of a NEA International Workshop, Cordoba, Spain, 20-23 January 1997, Paris.
- NEA (1997b): Nuclear Energy Agency – OECD, Update on Waste Management Policies and Programmes. Nuclear Waste Bulletin No. 12, Paris.
- NEA (1998): Nuclear Energy Agency – OECD, Update on Waste Management Policies and Programmes. Nuclear Waste Bulletin, 13, Paris.
- NEA (1999): Nuclear Energy Agency - OECD, Proceedings of the Fifth OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 25-27 November 1998, Mol, Belgium.- Paris.
- NL (1993): The Position of the Dutch Government on Deep Burial.- In: Niedersächsisches Umweltministerium (Hrsg.): Endlager-Hearing Braunschweig. Tagungsband II, S. 374-379, Hannover (Internationales Endlager-Hearing 21.-23. September 1993).
- Nux (1991): The Nuclear Guardianship Project, nux oct. 1990.

- OCRWM (1998): U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management (1998): Civilian Radioactive Waste Management Program Plan. Revision 2.- 53 S., Washington DC.
- Parfit, D. (1983): Energy policy and the further future: the social discount rate, in Energy and the Future, D. MacLean and P. Brown, eds., Totowa NJ, Rowman and Allanheld.
- Richardson, P. J. (1999): Development of Retrieval Plans, Ashby de la Zouch (Grossbritannien), März 1999, im Auftrag des staatlichen Koordinators für die Endlagerung radioaktiver Abfälle beim schwedischen Umweltministerium.
- Roseboom (1983): The case for retrievable high-level nuclear waste-disposal, Fifth International Conference on High-Level Radioactive Waste Management, Las Vegas, Vol. 3.
- Ruh, H. (1998): Energie-Dialog Entsorgung, Schlussbericht des Vorsitzenden zu Handen des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. Bundesamt für Energie, Bern.
- Selling, H. et al. (1998): A Retrievable Concept for an Underground Radioactive Waste Repository in the Netherlands.- In: HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration: Working towards a Cleaner Environment. Proceedings of WM '98, 1.-5.3.1998, Tucson, Arizona.
- SES/Greenpeace (1998): Radioaktive Abfälle: Handlungsperspektiven. In Ruh (1998).
- SES (1999): Atomalptraum ohne Ende? Das Magazin der Schweizerischen Energie-Stiftung SES, Nr. 4.
- Shrader-Frechette, K. (1993): Burying Uncertainty: Risk and the Case against Geological Disposal of Nuclear Waste, Berkeley, University of California Press.
- SKB (1999): Svensk Kärnbränslehantering AB, Activities 1998, Stockholm.
- SKI (1999): Swedish Nuclear Power Inspectorate, The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Evaluation of SKB's RD & D Program 1998. Summary and Conclusions. SKI Report, 99:30, Stockholm.
- Slovic (1991): Slovic, P., Flynn, J. H., Layman, M., Perceived Risk, Trust and the Politics of Nuclear Science, Science, vol. 254, p. 1603-1607, 13 déc. 1991.
- TAG (1998): Technische Arbeitsgruppe Wellenberg, Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Stellungnahme zu technischen Aspekten des Projektes Wellenberg. Bundesamt für Energie, Bern.
- Taylor Ch. (1992): Sources of the self: the making of the modern identity, Cambridge University Press, Cambridge.
- Walzer M. (1983): Spheres of Justice. A Defense of Pluralism and Equality, Blackwell, Oxford.
- Wegmüller M. & Chabot J.D. (1997): Einflüsse des Bergwassers auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Schlussbericht 1997, IBB Forschungsprojekt 085/93, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Juli 1997
- ZWILAG (1994): Sicherheitsbericht zum Gesuch um Erteilung der nuklearen Bau- und Betriebsbewilligung für das Zentrale Zwischenlager Würenlingen, September 1994.
- ZWILAG (1997): Final Safety Analysis Report FSAR zum Gesuch um die Erteilung der Nuklearen Betriebsbewilligung für die ZWILAG-Behandlungsanlagen, Dezember 1997.

Anmerkungen zu Kapitel 3

1. Gegenwärtig besteht eine Vielzahl von Gerechtigkeitstheorien. Genannt seien hier die verschiedenen Modelle der Verteilungsgerechtigkeit (Wie sind Ressourcen und Lasten zwischen den Generationen und verschiedenen Gruppierungen der Gesellschaft aufteilbar?), die Gerechtigkeitstheorien, die auf Diskussion oder Argumentation aufbauen (Wie können die Interessen künftiger Generationen heute vertreten werden?) und jene Theorien, die es ablehnen, den Wohlstand grundlegenden Werten wie der Unversehrtheit der Schöpfung, dem Schutz der Umwelt usw. gegenüberzustellen.
2. Wir beschränken uns auf diese beiden Ansätze, weil sie über die ausgefeilteste Argumentation verfügen und in der gesellschaftlichen Diskussion am stärksten präsent sind (vgl. Damveld & Van de Berg 1999a).
3. Offen ist, über welchen Zeitraum verlässlich mit den demokratischen Institutionen der Schweiz gerechnet werden kann. Über 500 Jahre?
4. Die Art der Entsorgung steht im Bezug zur Lebensdauer der radioaktiven Abfälle. Dieses Prinzip lässt sich leicht durch folgendes Beispiel erfassen: Gemäss dem U.S. Department of Energy und der amerikanischen National Academy of Science ist es ungenügend, eine mindestens 500-jährige Integrität gewisser Stahlbehälter nachzuweisen, wenn die Lebensdauer der darin aufbewahrten Abfälle 10'000 Jahre übersteigt (vgl. Shrader-Frechette 1993).
5. Lösungen zur Überprüfung der Sicherheit stossen selbstverständlich dort an ihre Grenzen, wo sie der Sicherheit selbst im Wege stehen!
6. OECD, Recommendation of the Council on Guiding Principles Concerning International Economic Aspects of Environmental Policies, 26. Mai 1972. Eine Übersicht über OECD-Texte betreffend Verursacherprinzip ist in OECD, Le Principe Pollueur-Payeur, Monographie sur l'environnement, Paris, 1992 zu finden.

Anhang 1: Begriffserklärungen

Anthropologie	Lehre vom Menschen (Menschenbild, Sinn der menschlichen Existenz, Weltanschauung).
Barrieren	<p>Barrieren bilden das passive Sicherheitssystem eines Lagers zum Schutz von Mensch und Umwelt. Es sind technische und natürliche (geologische) Einschluss- und Rückhaltesysteme, welche die radioaktiven Abfälle nach dem Multibarrieren-Konzept von der Biosphäre isolieren.</p> <p>Die <i>technischen Barrieren</i> umfassen die Abfallform (z.B. Glas), die Verpackung der Abfälle (z.B. Stahlskanister) und allenfalls die Verfüllung der Lagerkavernen und -stollen (z.B. Bentonit).</p> <p>Die <i>natürlichen Barrieren</i> sind das Wirtsgestein in der Lagerzone und die weitere Geosphäre (Wirtsgestein und geologisches Umfeld). Die natürlichen Barrieren übernehmen neben ihrer Rückhaltefunktion den langfristigen Schutz der technischen Barrieren.</p>
Dauerlager	Anlage, in der radioaktive Abfälle dauernd gelagert werden. Der Schutz von Mensch und Umwelt beruht auf technischen Barrieren (_ Barrieren) und zeitlich unbeschränkten Massnahmen (_).
Deontologischer Ansatz	Deontologie: von dein (gr.) <i>müssen</i> . Normativer, von Kant inspirierter ethischer Ansatz, der von selbstauferlegten Pflichten handelt. Dieser Ansatz sucht das Gerechte nicht zuerst in Bezug auf seinen Inhalt, sondern über formelle Prozeduren.
Diskontierung	Jährlicher Prozentsatz, mit dem man einen künftigen Wert (Kosten oder Nutzen) gewichtet, um den entsprechenden heutigen Wert zu ermitteln. Die <i>Diskontierung</i> ist also das Gegenteil eines Zinssatzes, eines jährlichen Prozentsatzes, mit dem man den heutigen Wert gewichtet, um den zukünftigen Wert eines Gutes zu ermitteln. In der Wirtschaftswissenschaft bezeichnet man den Zinssatz als positiv und die <i>Diskontierung</i> als negativ. Bei einer <i>Diskontierung</i> von jährlich 10% werden die Auswirkung auf das Wohl der Menschen in 20 Jahren nur noch mit rund einem Zehntel der heutigen Wirkung bewertet.
Endlager	Anlage zur langfristig wartungsfreien, zeitlich unbefristeten Lagerung von radioaktiven Abfällen ohne beabsichtigte Rückholung.
Entsorgungsnachweis (Gewähr: Endlager HAA)	Nachweis aufgrund wissenschaftlicher und technischer Untersuchungen, dass eine sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz machbar ist. Gemäss Beschluss des Bundesrates vom 3. Juni 1988 zum Projekt Gewähr besteht der Entsorgungsnachweis für hochaktive Abfälle aus den drei Teilen Sicherheitsnachweis (_), Standortnachweis (_) und Machbarkeitsnachweis (_).
Geologisches Endlager	Endlager (_) in tiefen geologischen Formationen der kontinentalen Erdkruste. Der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt wird nach dem Verschluss allein durch Barrieren (_) sichergestellt.
Geosphäre	Der Begriff umfasst die Gesamtheit der geologischen Einheiten zwischen Einlagerungshohlräumen und Biosphäre (inkl. Wirtsgestein).
Hütetekzept	Das "Hütetekzept" als Extremfall eines Dauerlagers (_) sieht die dauernde Aufbewahrung der Abfälle unter menschlicher Aufsicht, beispielsweise in Form einer nuklearen Priesterschaft in kathedralen- oder pyramiden-ähnlichen Bauten an der Erdoberfläche, vor.

Kommunitarismus	Politisch-philosophische Denkströmungen, welche die Gemeinschaft (z.B. Familie, Sprachgruppen, Glaubensgruppen, Bevölkerungsgruppen, Kulturkreise) betonen, in der Werte geteilt werden. Ausserhalb dieser Gruppen werden nicht unbedingt dieselben Werte vertreten. Man kann mithin nichts ethisch allgemein Verbindliches aussagen, das über die Gruppe hinausginge, ausser dass die Gruppen und ihre Werte geschützt werden müssen. (Gegensatz: Universalismus)
Kontraktualistischer Ansatz	Ethischer Ansatz, der das Gerechte durch gegenseitige Konventionen bestimmt (Verträge, Abmachungen, demokratische Entscheide). Zu den Kontraktualisten können Philosophen wie Rousseau und Rawls gezählt werden.
Lagerzone	Zone, die unter Einbezug von Sicherheitsreserven (z.B. Abstand zum Nebengestein) für die Anlage der Bauten zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle ausgeschieden wird.
Langzeitsicherheit	Der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch Barrieren () und/oder Massnahmen ().
Machbarkeitsnachweis (Gewähr: Endlager HAA)	Der Machbarkeitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtsgestein ein Endlager unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann.
Massnahmen	Massnahmen bilden das aktive Sicherheitssystem eines Lagers zum Schutz von Mensch und Umwelt. Dabei handelt es sich um technische, organisatorische und administrative Tätigkeiten wie Unterhalt, Reparatur, Kontrolle und Überwachung der Anlage und der eingelagerten Abfälle sowie deren mögliche Rückholung ().
Nahfeld	Das Nahfeld ist derjenige Teil des Wirtsgesteins, der durch Erstellung und Existenz der Lagerhohlräume beeinflusst wird (Auflockerung des Gebirges, Veränderung der chemischen Verhältnisse usw.).
Neoaristotelik	Der Kommunitarismus () ist eine neoaristotelische Denkrichtung. Wie bei Aristoteles wird der Akzent auf das (gemeinsame) Gute, das Ziel gelegt. Die Tugenden (im Unterschied zu Pflichten) sind von besonderer Bedeutung.
Oberflächenlager	Ein Zwischen-, Dauer-, Langzeit- oder Endlager an der Erdoberfläche.
Pluralistische Gesellschaft	Eine Gesellschaft, in der verschiedene Auffassungen des Guten und des Gerechten nebeneinander existieren, ohne dass zwischen ihnen von einem dritten, "neutralen" Standpunkt aus entschieden werden kann, welche Auffassungen besser, gerechter oder schlechter sind.
Relativismus	Der Relativismus folgert aus der Tatsache des Pluralismus, dass jede Auffassung/Sichtweise mit jeder anderen gleichwertig ist, und zieht daraus die Konsequenz, dass keine Auffassung wirklich bedeutsam ist.
Reversibilität	Reversibilität (Umkehrbarkeit von Handlungen) beinhaltet eine Kombination von Systemeigenschaften und Massnahmen (), welche sicherstellen, dass einmal gefällte Entscheidungen und Handlungen rückgängig gemacht werden können.
Rückholbarkeit	Mit Rückholbarkeit wird die Möglichkeit bezeichnet, radioaktive Abfälle aus einer offenen, teilweise oder ganz verschlossenen Anlage mit mehr oder weniger grossem finanziellem und technischem Aufwand zurückzuholen.
Rückholung	Rückholung ist die gewollte Auslagerung von radioaktiven Abfällen aus einer Anlage mit dem Ziel, sie einer anderen Anlage zur weiteren Lagerung, Verarbeitung oder Weiterverwendung zuzuführen.

Seismische Untersuchungen	Bei seismischen Untersuchungen werden an der Erdoberfläche künstlich Schwingungen erzeugt. Diese breiten sich wellenförmig in die Tiefe aus und werden an einzelnen Gesteinsschichten reflektiert. Die reflektierten Wellen werden an der Oberfläche aufgezeichnet und ermöglichen eine räumliche Abbildung der geologischen Strukturen.
Sicherheitssystem	Barrieren () und Massnahmen (), die gegen unvorhergesehene natürliche oder technisch bedingte Ereignisse schützen und so eine unzulässige Gefährdung von Mensch und Umwelt verhindern.
Sicherheitsnachweis (Gewähr: Endlager HAA)	Der Sicherheitsnachweis muss zeigen, dass im definierten Wirtsgestein, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie den technischen Barrieren die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet ist.
Sicherung (Security)	Einrichtungen und Massnahmen gegen unbefugte Einwirkungen Dritter, welche die Sicherheitssysteme () beeinträchtigen.
Standortnachweis (Gewähr: Endlager HAA)	Der Standortnachweis muss aufgrund von dokumentierten Untersuchungsergebnissen zeigen, dass ein genügend grosser Gesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Endlagers im besagten Standortgebiet mit Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.
Subjektivismus	Ethischer Ansatz, nachdem sich die (ethische) Wahrheit nur auf der Ebene des menschlichen Subjektes festlegen lässt (im Gegensatz zum Universalismus).
Teleologische Ethik	Ethik, die das Gute in Bezug auf ein Ziel (Telos) definiert. Dieses Gute kann das Glück, der Utilitarismus, die Gerechtigkeit, das Gemeinwohl sein. Die teleologische Ethik gibt einen Inhalt dieses Guten und stellt Überlegungen an, mit welchen Mitteln das Ziel erreicht werden kann. (Gegensatz: deontologische Ethik, prozedurale Ethik)
Tiefenlager	Ein Zwischen-, Dauer-, Langzeit- oder Endlager im geologischen Untergrund.
Toxizität	Giftigkeit einer Substanz bei Aufnahme in den Körper. Bei der Radiotoxizität beruht die Schädlichkeit auf der nuklidspezifischen Wirkung der radioaktiven Strahlung. Die Radiotoxizität eines Abfallgebindes oder Lagers ist die Summe der Toxizitäten der gesamthaft enthaltenen Nuklide.
Transmutation	Gezielte Überführung von radioaktiven Isotopen mit langen Halbwertszeiten in stabile Isotope oder solche mit kurzen Halbwertszeiten durch den Beschuss mit Neutronen oder geladenen Teilchen. Vorgängig müssen die radioaktiven Isotope in aufwendigen Verfahren getrennt werden.
Transzendentes Konzept	Konzept oder Auffassung, die eine Transzendenz, eine ausser- oder überweltliche Realität behauptet. Eine pluralistische Gesellschaft lässt nicht zu, dass aus einer solchen Auffassung ein privilegierter Zugang zur Wahrheit abgeleitet werden kann.
Transzendenz	Lehre, die ausser- oder überweltliche Realität behauptet. Eine weiterführende Definition: Lehre, nach der hinter den sinnlich erfahrbaren, vergänglichen Dinge ewige Ideen, Wahrheiten, Substanzen oder das eigentliche "Ding an sich" stehen.
Utilitarismus	Der Utilitarismus ist ein teleologischer Ethikansatz, der als Ziel des Guten das grösstmögliche Wohl für die grösstmögliche Zahl der Menschen sucht.

Wirtsgestein	Als Wirtsgestein wird derjenige Bereich der Geosphäre bezeichnet, der für den Schutz der technischen Barrieren, die Begrenzung des Wasserzuflusses zum Lager und für die Rückhaltung der Radionuklide massgebend ist. Das Lager wird innerhalb des Wirtsgesteins angelegt.
Zwischenlager	Anlage zur kurz- bis mittelfristigen Aufbewahrung von Abfallgebinden in zweckgebundenen, hierzu eingerichteten Räumlichkeiten, wobei die feste Absicht einer späteren Auslagerung besteht.

Anhang 2: Abkürzungen

BFE	Bundesamt für Energie
DL	Dauerlager, Dauerlagerung
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle
GEL	Geologisches Endlager, geologische Endlagerung
GNW	Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg
HAA	Hochaktive Abfälle
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
KEG	Kernenergiegesetz (in Bearbeitung)
KGL	Kontrolliertes geologisches Langzeitlager, kontrollierte geologische Langzeitlagerung
KKW	Kernkraftwerk(e)
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
LZL	Langzeitlager, Langzeitlagerung
MAA	Mittelaktive Abfälle
MIF	Medizin, Industrie und Forschung
MNA	Komitee für die Mitsprache der Nidwaldner Bevölkerung bei Atomanlagen
MOX	Mischoxid-Brennelemente
nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
ODL	Oberflächen-Dauerlager
OEL	Oberflächen-Endlager
OLZL	Oberflächen-Langzeitlager
PSI	Paul Scherrer Institut
SAA	Schwachaktive Abfälle
SES	Schweizerische Energiestiftung
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
TDL	Tiefen-Dauerlager
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
ZWILAG	Zentrale Zwischenlager Würenlingen AG

Anhang 3: Nukleare Entsorgung in der Schweiz - wichtige Daten

- 1957 Verfassungsartikel zur Atomenergie
- 1959 Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz
- 1969 Inbetriebnahme des ersten KKW (Beznau I)
- 1972 Gründung der nagra
- 1978 Bundesbeschluss zum Atomgesetz: Verursacherprinzip, Forderung nach "Gewähr"
nagra: Erstes Konzept für die nukleare Entsorgung der Schweiz
- 1980 nagra: Einreichen von zwölf Gesuchen für Sondierbohrungen in der Nordschweiz (Kristallin, Programm HAA)
- 1982 Letzte Tiefseeversenkungen von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen aus der Schweiz
Bundesrat: Bewilligungen für Sondierbohrungen im Kristallin
nagra: bis 1989 Durchführung der Sondierbohrungen
- 1983 nagra: Einreichen von Sondiergesuchen für drei Standorte für ein Endlager SMA (TI, UR, VD)
- 1985 nagra: Einreichen "Projekt Gewähr"
Bundesrat: Bewilligung für Untersuchungen an den drei Standorten SMA (ohne Sondierstollen)
- 1987 nagra: Einreichen Sondiergesuch Wellenberg (NW)
- 1988 Bundesrat: Entscheid zu "Gewähr"
SMA: Entsorgungsnachweis erbracht
HAA/LMA: Sicherheitsnachweis erbracht, Standortnachweis nicht erbracht, bautechnisch keine Bedenken
Bundesrat: Bewilligung eines Teils der Sondierungen am Wellenberg
nagra: bis 1995 Durchführung der Sondierungen Wellenberg
- 1989 Verordnung über vorbereitende Handlungen
- 1990 ZWILAG: Einreichen Rahmenbewilligungsgesuch für Zentrales Zwischenlager
Aktionsprogramm "Energie 2000", Entsorgungskonferenz
- 1992 EVED⁶: Einsetzen einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Vertretern des Bundes und der vier potentiellen Standortkantone für ein Endlager SMA (NW, TI, UR, VD)
Einsetzen der Konfliktlösungsgruppe radioaktive Abfälle, vorzeitige Beendigung wegen Rückzug der Umweltorganisationen nach Mühlebergentscheid (Verlängerung der Betriebsbewilligung)
- 1993 Bundesrat: Rahmenbewilligung für Zentrales Zwischenlager
Schlussfolgerungen der Arbeitsgruppe "Bund + vier Standortkantone SMA":
Ergebnisse liegen vor, um einen Entscheid zur Standortwahl zu treffen
nagra: Wellenberg soll in erster Priorität als Standort SMA weiterverfolgt werden
- 1994 nagra: Einreichen Rahmenbewilligungsgesuch Wellenberg
nagra: Einreichen Sondiergesuche Leuggern/Böttstein und Benken
Parlament stimmt der Rahmenbewilligung für das ZWILAG zu
- 1995 Kanton Nidwalden: Ablehnung der Wellenberg-Vorlagen in Volksabstimmung:
Stellungnahme des Regierungsrats zum Rahmenbewilligungsgesuch: 51,9% Nein zu 48,1% Ja
Konzession zur Nutzung des Untergrunds: 52,5% Nein zu 47,5% Ja
- 1996 Bundesrat: Bewilligung Sondierbohrung Benken (Programm HAA)
Bundesrat: Bau- und Teilbetriebsbewilligung ZWILAG
- 1997 EVED: Sistierung des Rahmenbewilligungsgesuchs Wellenberg
Einsetzen der Arbeitsgruppen Wellenberg (technische und volkswirtschaftliche Aspekte)
- 1998 UVEK: Energie-Dialog Entsorgung, Abschluss ohne Konsens, Bericht Ruh
Veröffentlichung der Ergebnisse der Arbeitsgruppen Wellenberg
- 1999 Bundesräte Leuenberger und Couchepin führen Gespräche mit den Standortkantonen, den Betreibern und den Umweltorganisationen zur Befristung des Betriebs der bestehenden Kernkraftwerke und zur Lösung des Entsorgungsproblems
UVEK: Einsetzen der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle

⁶ Seit 1.1.1998 UVEK

Anhang 4: Gesetze, Verordnungen und Richtlinien im Bereich der Entsorgung

Gesetze

- Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie (Atomgesetz), vom 23. Dezember 1959 (SR 732.0)
- Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978 (SR 732.01)
- Kernenergiehaftpflichtgesetz (KHG) vom 18. März 1983 (SR 732.44)
- Strahlenschutzgesetz (StSG) vom 22. März 1991 (SR 814.50)

Verordnungen

- Verordnung über Begriffsbestimmungen und Bewilligungen auf dem Gebiet der Atomenergie (Atomverordnung) vom 18. Januar 1984 (SR 732.11)
- Verordnung über die ablieferungspflichtigen radioaktiven Abfälle vom 8. Juli 1996 (SR 814.557)
- Verordnung über vorbereitende Handlungen im Hinblick auf die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle vom 27. Nov. 1989 (SR 732.012)
- Verordnung über dem Stilllegungsfonds für Kernanlagen vom 5. Dezember 1983 (SR 732.013)
- Kernenergiehaftpflichtverordnung (KHV) vom 5. Dez. 1983 (SR 732.44)
- Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (SR 814.501)

Internationale Übereinkommen

- Übereinkommen vom 29. Dezember 1972 über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Versenken von Abfällen und anderen Stoffen, ratifiziert 1979 (SR 0.814.287)
- Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (noch nicht in Kraft)

Richtlinien der HSK

- HSK-R-14/d Konditionierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle, Dezember 1988
- HSK-R-21/d: Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, November 1993

Empfehlungen der IAEA (International Atomic Energy Agency), Wien

- The Principles of Radioactive Waste Management. Safety series N° 111-F, 1995
- Establishing a National System for Radioactive Waste Management. Safety series N° 111-S-1, 1995