



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



„Hüten“ versus „Endlagern“: Eine Standortbestimmung 2014

Expertenbericht

Marcos Buser
Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft INA GmbH
Zürich

August 2014

„Hüten“ versus „Endlagern“: Eine Standortbestimmung 2014

Marcos Buser
Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft INA GmbH, Zürich

10. August 2014

Der Bericht wurde im Auftrag des ENSI erstellt. Die im Bericht aufgeführten Beurteilungen und Aussagen sind jene des Autors.

Impressum

Datum: Juni 2014
Projekt: „Hüten“ versus „Endlagern“: Eine Standortbestimmung 2014
Autor: Marcos Buser/ INA GmbH, Funkackerstrasse 19, 8050 Zürich
Begleitung: Dr. Felix Altorfer, ENSI
Finanzierung: Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg
Illustrationen: Daniel Schmider

Inhaltsverzeichnis

Einleitende Zusammenfassung	4
1 „Hüten“ versus „Endlagern“: Wichtigste Ergebnisse der Studie von 1998	6
2 „Hüten“ versus „Endlagern“: eine erste Standortbestimmung seit 1998	9
3 „Hüten“ versus „Endlagern“: Abgrenzung und Risiken	17
4 Zwischenlagern und „Hüten“: Vorteile, Herausforderungen, Risiken	23
4.1 Risiken durch Flugkörper ("Natur"-Risiken).....	23
4.2 Gesellschaftliche und politische Risiken und Möglichkeiten.....	24
4.3 Technische Risiken.....	28
4.4 Ökonomische Risiken.....	30
4.5 Planerische Risiken.....	30
4.6 Gekoppelte Risiken.....	31
4.7 Zusammenfassende Bewertung.....	31
5 Langfristig sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle in einer geologischen Senke: Stand der Entwicklung bei der Planung, Forschung und Umsetzung	33
5.1 Einwirkungen auf das Wirtgestein.....	35
5.2 Forschungsplanung und -entwicklung.....	36
5.3 Integrale Gesamt- und Massnahmenplanung.....	36
5.4 Zusammenfassende Bewertung.....	37
6 Schlussbetrachtungen, Empfehlungen	40
6.1 Schlussbetrachtungen.....	40
6.2 Empfehlungen.....	42
Literatur	43
Figuren und Tabellen	47

Einleitende Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit geht auf Diskurse um das Jahr 1990 zurück. Zu dieser Zeit diskutierten Exponenten der Atomgegner und Umweltverbände das aus den Vereinigten Staaten stammende „guardian-ship“-Konzept, für das sich bald ein recht grosses Bündnis von Atomkraftgegnern aussprach. Die im deutschsprachigen Raum als „Hüte“-Konzept bekannten Ideen beeinflussten wiederum die Diskussionen, welche bei Behörden und Institutionen geführt wurden und die sich mit den Auswirkungen dieser Konzeption auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz befassten. Die Betonung der Rückholbarkeit und Kontrollierbarkeit von Endlagern und die Ende der 1990er Jahre in der Kommission „Entsorgungskonzepte radioaktive Abfälle“ (EKRA) entwickelten Ideen zum Pilot-Lager sind Ausdruck für die Auseinandersetzung mit diesen Gedanken.

Das „Hüte“-Konzept ist aus der gesellschaftlichen Diskussion um Lösungen für radioaktive Abfälle nicht verschwunden, auch wenn es weniger prominent debattiert wird wie in früheren Zeiten. Das Unbehagen weiter Teile der Zivilgesellschaft gegenüber definitiven Lösungen wie jene des Tiefenlagers besteht aber weiter und manifestiert sich in der Forderung nach vermehrter Kontrolle und Überwachung und der Gewährleistung der Bergbarkeit der Abfälle. Es lag auf der Hand, die 1998 veröffentlichte Studie unter diesem Blickwinkel neu aufzunehmen und den Stand der Diskussion 2014 darzustellen. Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) als Nachfolgeinstitution der Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) beauftragte mich, diese Neubewertung vorzunehmen. Diese Arbeit erfolgte in Etappen zwischen 2012 und 2014.

Die Neubearbeitung baute auf den Ergebnissen der Studie von 1998 auf. Eines der zentralsten Ergebnisse dieser Studie war, dass die Dauerlagerung an der Oberfläche in speziellen Zwischenlagern oder Mausoleen Risiken birgt, die nicht mit jenen eines tiefen Endlagers zu vergleichen sind. Diese zentrale Folgerung wurde daher als Ausgangspunkt der neuen Studie vorausgesetzt und nicht mehr im Detail aufgenommen. Die Fragen zur gesellschaftlichen Stabilität und die Rolle von atomaren Priesterschaften können in der Studie von 1998 nachgelesen werden.

Was ebenfalls bereits festgestellt worden war ist die Tatsache, dass es kein ideales Entsorgungssystem gibt. Dies war ebenfalls Ausgangspunkt für den vorliegenden Bericht, bei dem es in erster Linie um eine Standortbestimmung der Zwischenlagerung beziehungsweise der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Gesteinsschichten geht. In den ersten beiden Kapiteln wurden die wichtigsten Ergebnisse der Studie 1998 überprüft und der Stand des Wissens 2014 ermittelt. Kapitel 3 befasst sich mit den Konzepten, insbesondere mit der Entwicklung der „Hüte“-Konzeptionen in der Vergangenheit beziehungsweise der heute absehbaren Zwischenlagerung über längere Zeiträume (Generationen). Kapitel 4 und 5 leuchten die Risiken der länger andauernden Zwischenlagerung beziehungsweise der Tiefenlagerung aus und versuchen, die wichtigen Herausforderungen für die künftigen Generationen herauszuschälen. Aus diesen Betrachtungen werden schliesslich die wichtigen Folgerungen abgeleitet.

Die Studie 2014 bestätigt zunächst die Zeiträume, die für dieses Mehrgenerationenprojekt benötigt werden (mindestens 4 Generationen). Unter Berücksichtigung des vorhersehbaren raschen Gesellschaftswandels stellt selbst dieser vier Generationen umfassende Zeitraum eine gewaltige politische, technische, finanzielle und moralische Herausforderung für die künftigen Generationen und Gesellschaften dar. Die Institutionen unserer Zeit sollten sich bei ihrer Entscheidungsfindungen dieser Tatsache bewusst sein. Wir können die Bearbeitung der nuklearen Entsorgung nicht auf die lange Bank schieben. Die Zeit drängt in diesem Sinne.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Studie ist die Erkenntnis, dass passive und aktive Sicherheitsmassnahmen nicht gegeneinander ausgespielt werden sollten. Es braucht sie beide in verschiedenen Zeitabschnitten beziehungsweise für unterschiedliche Aufgabenstellungen. Die Zwischenlagerung ist auf aktive Planungs-, Sicherheits-, Sicherungs- und Begleitmassnahmen angewiesen. Dagegen sollte die definitive und dauerhafte Einlagerung ausschliesslich auf passiven Sicherheitsmassnahmen beruhen, mit einer Ausnahme: Der Schutz vor dem Eindringen in das tiefe Endlager und die Erinnerungskultur bleiben über einen Zeitraum von einigen tausend Jahren und sogar länger zu gewährleisten – eine weitere grosse Herausforderung für die Gesellschaften der Zukunft.

Im Übergangsstadium zum Tiefenlager werden die langfristigen Zwischenlager eine herausragende Rolle spielen. Sie sind technisch auf höchstem Sicherheitsniveau zu betreiben, gegen finanzielle Erosionen abzusichern und gegen moralische und gesellschaftliche Zerfallserscheinungen zu schützen. Die Sicherstellung dieser Aufgaben ist – mit Blick auf den Gang unserer heutigen Welt und den sich abzeichnenden technischen Entwicklungen – bereits gewaltig, wie die Lektüre des Kapitels 4 zeigt. Aber auch die Herausforderungen für die Wissenschaft in der Entwicklung eines langfristigen Sicherheitssystems für Endlager sind gewaltig. Unsere Gesellschaft und unsere Nachfolger sollen alles daran setzen, dass sich nicht wiederholt, was bei konventionellen Abfällen oder militärischen Anwendungen bereits geschah: die Verseuchung von Geländen oder Gebieten und die Schaffung von „Opferzonen“. Die Planung und Umsetzung der Forschung und Entwicklung auf höchstem Qualitätsniveau bleibt sicherzustellen. Zum Abschluss werden noch einige wichtige Folgerungen aus der Diskussion gezogen und Empfehlungen für den Umgang mit den verschiedenen Abfallkategorien beziehungsweise Endlagertypen abgegeben.

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle stellt eine besondere Herausforderung für die Menschheit dar. Alle an einem solchen Projekt Beteiligten sollten sich daher möglichst bewusst sein, welche Verantwortung das eigene Handeln mit sich bringt. Eine der zentralsten Folgerungen dieser Erkenntnis ist, dass diese Aufgabe mit höchster Kompetenz und grösster Vorsicht und Präzision entwickelt, bearbeitet und umgesetzt werden muss, um Schäden an Menschen und Umwelt in der Zukunft möglichst zu vermeiden. Die Utopien haben ausgedient, auf welcher Seite auch immer. In diesem Sinne ist Emile Ciorans „Geschichte und Utopie“ als Bewusstsein erweiternder Essay immer noch hoch aktuell.

1 „Hüten“ versus „Endlagern“: Wichtigste Ergebnisse der Studie von 1998

Im Jahr 1995 erfuhr die damalige Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) von meinen Bedenken gegenüber dem Konzept des „ewigen Hüten“, so wie dies von Befürwortern des „guardian-ship“-Konzeptes vertreten wurde. Dieses „Hüte“-Konzept war von der amerikanischen Philosophin und Umweltaktivistin Joanna Macy Ende der achtziger Jahre vorgeschlagen worden und fand rasche Verbreitung in der Umweltbewegung und bei Atomkraftgegnern. Der Kern dieser Hüte-Strategie bestand darin, die Abfälle auf unbestimmte Dauer zwischenzulagern, zu überwachen und bei Bedarf die notwendigen Infrastrukturen und Konditionierungen zu erneuern. Die Idee als solche war nicht neu. Die Langzeitzwischenlagerung über Zeiträume von vielen hundert Jahren war bereits frühzeitig in den Kreisen der Nuklearindustrie vorgeschlagen und umgesetzt worden, vor allem in Zusammenhang mit den flüssigen hochaktiven Abfällen, die aus den militärischen Atombombenprogrammen stammten. Bereits 1948 sind in der publizierten Literatur zwei gegensätzliche Strategien beschrieben, eine erste, die auf eine längerfristige Zwischenlagerung abzielte, und eine zweite, welche auf die Beseitigung von radioaktiven Abfällen im Meer setzte.¹ In den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde darauf verwiesen, dass Lagerungsgebiete für radioaktive Abfälle an der Oberfläche zu keinem anderen Zweck mehr genutzt werden könnten.² Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) fasste zum gleichen Zeitpunkt internationale Sperrzonen für die Ablagerung der radioaktiven Abfälle aus Reaktoren ins Auge.³ In den siebziger und achtziger Jahren verlagerte sich die Diskussion um die Langzeitzwischenlagerung zusehends auf Sicherheitsfragen und die Wirtschaftlichkeit.⁴ Der Zielkonflikt zwischen Lagerungsoptionen, Sicherheit und Kosten war bereits erkannt: „Es ist klar, dass eine unbefristete Lagerung unbefriedigend und teuer ist, auf der anderen Seite, sind Vorschläge für die alternative langfristige Zwischenlagerung und Programme für die dauerhafte Entsorgung noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.“⁵ Auch das Risiko von „Providurien“, d.h. von umgewandelten und damit endgültigen Provisorien, war zu dieser Zeit schon identifiziert: „Wenngleich höher entwickelte Langzeit-Zwischenlagerungssysteme schon auf dem Papier stehen, müssen sie doch noch erst gebaut werden. Diese Systeme werden deshalb nicht besonders geschätzt, weil

¹ Forrest Western (1948): *Nucleonics*, Vol. 3, no. 2, August 1948: „Once the radioactive wastes are concentrated to convenient volumes, current thinking appears to be divided between two courses of action. Some groups talk of placing them in storage for indefinite periods of time, until national or international policies of waste disposal can be established. Other groups plan to dispose of them, in suitable containers, in one of the oceans.“ (p. 49)

² Walter D. Claus (1955): *Considérations fondamentales sur l'élimination d'importantes quantités de déchets radioactifs dans le sol et la mer*, Actes de la Conférence Internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève 8 – 20 août 1955, Vol. 9, 1956

³ Konrad Huber (1957): *Die universelle Ordnung der friedlichen Verwendung der Atomenergie*, Europa-Archiv, 20. August 1957, S. 10083

⁴ Y. Sousselier, J. Pradel (1971): *La gestion des déchets radioactifs et leur stockage à long-terme*, IAEA Proceedings Series, Conférence Internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève 6 – 16 septembre 1971, Vol. 11

⁵ Thomas C. Hollocher (1975): *The nuclear fuel cycle*, MIT Press, Cambridge Massachusetts / London England, p. 244: „It is clear that indefinite storage is unsatisfactory and expensive; on the other hand, proposals for alternate long-term storage programs and for permanent disposal methods are still in the research and development phase.“

Gefahr besteht, dass durch Verzögerung oder Fahrlässigkeit aus den Zwischenlagern Endlager werden.“⁶

Die Forschungs- und Entwicklung im Endlagerbereich beschleunigte sich in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Zeitlich etwas verschoben, stellten vor allem Umweltverbände oder ihnen nahestehende Bewegungen, aber auch einzelne Wissenschaftler⁷, das Konzept der definitiven Endlagerung in Frage. Zu Beginn der neunziger Jahre kristallisierte sich schrittweise die eigentliche „Hüte“-Idee und die „Hüte“-Bewegung heraus, welche die sichere und dauernde Endlagerung grundsätzlich in Frage stellte und als Alternative ein Modell der langzeitlichen Wächterschaft des Atommülls forderte. Die Hüte-Bewegung, die sich auf Schriften von Joanna Macy berief, hatte auch spirituelle Wurzeln und knüpfte an Weltanschauungen an, denen mystische Naturbewegungen seit alters her anhängen. Die „Hüte“-Idee verbreitete sich Anfangs der neunziger Jahre rasch in Teilen der Atomgegnerschaft. In der Schweiz wurde die Idee vom Forum für verantwortbare Anwendung der Wissenschaft in Flüh (Baselland) verbreitet. Der Erfolg des Hüte-Konzeptes in weiten Kreisen der Umweltbewegung beruhte darauf, dass er einen Gegenentwurf gegenüber den offiziell verfolgten Strategien der Endlagerung darstellte. Auch Umweltorganisationen wie Greenpeace oder die Schweizerische Energie-Stiftung stellten sich hinter das Konzept (Buser 1998, EKRA 2000). In der Folge interessierte sich die HSK zunehmend an dieser Debatte und beauftragte mich, die beiden Grundkonzeptionen des „Hütens“ beziehungsweise der Endlagerung zu vergleichen (Buser 1998). Dieser Bericht kam zu fünf zentralen Schlussfolgerungen:

- **Prognosen:** Prognosen über die Entwicklung von Systemen sind stark zeitabhängig. Erdwissenschaftliche Prozesse sind – von Ausnahmen wie Erdbeben abgesehen – um Dimensionen langsamer als gesellschaftliche Prozesse. Mächtige Gesteinsschichten um ein Endlager bieten einen bedeutend besseren Schutz vor Gefährdungen, sowohl von solchen, die vom Menschen und von Gesellschaften ausgehen, wie auch von natürlichen Gefährdungen (z.B. Klimawandel, Kometen). Zwar ist auch ein Endlager in Tiefen von hunderten von Metern grundsätzlich Gefährdungen ausgesetzt, doch ist die Eintretens-Wahrscheinlichkeit von Ereignissen mit Schädigungen des Lagers und Freisetzung von Radioaktivität bedeutend kleiner als im Falle von gesellschaftlichen Ereignissen. In kurzen Worten gefasst: die Gesellschaftsentwicklung ist nicht prognostizierbar, jene von erdwissenschaftlichen Prozessen dagegen zum Teil über längere Zeiten absehbar (Buser 1998, Tabelle 1).
- **„Hüten“ und Dauerlagerung:** Beide Strategien setzen ein hohes Mass an Verantwortlichkeit der an diesem Prozess beteiligten Gesellschaften, Institutionen und Menschen voraus. Je mehr Generationen in einer Kette der Verantwortung eingebunden sind, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Fehler ereignen, mit ernsthaften Konsequenzen für die direkt betroffenen Gemeinschaften. Wie diese Kette aufrechterhalten werden soll, ob mit Hilfe von „Atompriesterschaften“ oder anderen Institutionen mit langer Laufdauer, kann kaum ermessen werden. Die

⁶ Ronnie D. Lipschutz (1981): Das Problem des Atommülls, S. 158, in Philipp Kreuzer, Peter Koslowski, Reinhard Löw: Atomkraft – ein Weg der Vernunft, R. Piper & Co. Verlag

⁷ Zum Beispiel Philipp R. Hammond (1979): Nuclear waste and public acceptance, American Scientist, Vol. 67

Geschichte zeigt in dieser Hinsicht klar auf, dass auch langlebige Institutionen wie Kirchen und monastische Bewegungen nicht von gewalttätigen Umbrüchen verschont blieben. Dauerhafte gesellschaftliche Stabilität lässt sich nicht herstellen. Die menschliche Natur folgt nun einmal nicht den Vorstellungen eines brüderlichen und schwesterlichen Umgangs untereinander. Mystische Weltbilder verdienen Achtung und Respekt, können aber bei der konkreten Bewältigung des Abfallproblems direkt wenig beitragen.

- **Wandel:** Der gesellschaftliche Wandel stellt auch Fragen zur Tradierung und Übergabe von Information wie auch zum Wandel von Werten. Diese Prozesse hängen einerseits eng mit dem technischen Wandel zusammen und den verwendeten Techniken der Lagerung, Bewahrung, Erneuerung und Restauration von Informationsträgern. Andererseits sind auch grundsätzliche gesellschaftliche Wandlungsprozesse historisch feststellbar, die eine Kontinuität in der Wissensvermittlung und Tradierung über längere Zeiten in Frage stellen. Historisch lassen sich Bruchsituation mit der bewussten Zerstörung von Kulturgut anhand von zahlreichen Beispielen nachzeichnen. An der Oberfläche liegende Bauwerke sind solchen Wandlungsprozessen bedeutend stärker ausgesetzt, als in der Tiefe errichtete Objekte.
- **Entsorgungssystem:** Es gibt kein ideales Entsorgungssystem für den Umgang mit radioaktiven Abfällen. Es gibt auch bei der Strategie der Endlagerung eine Anzahl von Schwierigkeiten und Unwägbarkeiten, die ernst zu nehmen sind. Es ist darum wichtig, pragmatische Lösungsvorschläge auf einer soliden wissenschaftlich/technischen Basis zu entwickeln. Dies sollte den Dialog mit der Gesellschaft und das Finden von gemeinsamen Lösungsstrategien vereinfachen.
- **Ethische Imperative:** Es besteht ein ethischer Anspruch, die nukleare Entsorgung durch die nutzniessenden Generationen voranzutreiben. So unbequem dies auch sein mag: die Generationen, die für die Entstehung der Abfälle verantwortlich sind, haben diesbezüglich auch eine Schuldigkeit ihren Nachkommen. Sie stehen in der Pflicht, den Prozess der nuklearen Entsorgung möglichst gezielt voranzutreiben.

Bald 20 Jahre nach Verfassung dieser ersten vergleichenden Analyse zwischen „Endlager“ und dauerhaften „Hüten“ stellt sich natürlich die Frage, wie sich die technischen Systeme, die Gesellschaft und die konkrete Bewältigung der Aufgabe inzwischen entwickelt haben und ob sich eine grundsätzliche Neubewertung dieser Entsorgungsschienen aufdrängt. Die Ausleuchtung dieser Fragen ist Gegenstand des vorliegenden Berichts.

2 „Hüten“ versus „Endlagern“: eine erste Standortbestimmung seit 1998

Bevor die Zwischenlagerung und die „Hüte“-Optionen beziehungsweise die Entwicklung bei der Planung, Forschung und Umsetzung von Endlagern vertieft untersucht werden, werden die wichtigsten Schlussfolgerungen aus dem Bericht von 1998 aus der heutigen Perspektive nochmals kurz betrachtet. Es soll zunächst geprüft werden, ob grundsätzliche Verschiebungen stattgefunden haben, die eine Neubewertung der Ergebnisse der "Hüte"-Studie 98 erfordern würde.

- **Prognosen:** Bezüglich der grundsätzlichen Feststellung, dass Gesellschaftsentwicklungen auch kurzfristig (wenige Jahre) kaum prognostizierbar, die Entwicklungen von erdwissenschaftlichen Prozessen dagegen deutlich länger absehbar sind, hat sich in der Beurteilung seit 1998 grundsätzlich nichts geändert. Inzwischen (2014) hat sich die wissenschaftliche Basis bei der Beschreibung relevanter Teilsysteme im Untergrund (Beschreibungsmodelle) und der darin ablaufenden Prozesse (Erklärungsmodelle) deutlich verbessert, wie sich etwa auch am Beispiel der Forschungen im internationalen Laboratorium Mont-Terri zeigen lässt (siehe publizierte und zugängliche Berichte und Technical Notes der verschiedenen Forschungen). Doch bleibt die Möglichkeit beschränkt, aus diesen Datensätzen Gesetze über die Entwicklung von Systemen und damit Prognosen abzuleiten. Dies ist generelle Erkenntnis bei nicht-linearen Systemen, die auch bei Forschungen in anderen Fachdisziplinen bestätigt werden (Malchow 2012; Lentz 1993; Ruge 2011; Eiden et al. 1999 etc.).
- **„Hüten“ und Dauerlagerung:** Die Erwartung Ende der 90er Jahre, dass die Langzeit-Zwischenlagerung oder das "Hüten" mit den Jahren stark an Attraktivität verlieren würde, hat sich nicht bestätigt. Im Gegenteil: die gesellschaftlichen Positionen in Bezug auf das "Hüten" beziehungsweise die definitive Lagerung der Abfälle in eine geologische Senke haben sich im Laufe der Jahre tendenziell gefestigt. Die Zweifel an der dauernden, sicheren Endlagerung verstärkten sich im Anschluss an Misserfolge bei der konkreten Umsetzung bergbaulicher Projekte. Die Vorkommnisse um das deutsche Versuchsendlager Asse beziehungsweise der Unfall im Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) vom Februar 2014 (DOE 2014) nähren die Zweifel an der Planbarkeit und dem sicheren Betrieb von tiefen Lagern.
- **Gesellschaftlicher Wandel:** Die Erkenntnis, dass sich der gesellschaftliche Wandel beschleunigt und die gesellschaftliche Entwicklung noch weniger voraussagbar ist, wurde durch die Entwicklungen seit dem Mauerfall und dem Ende des Ostblocks verstärkt. Das Ende des kalten Krieges stellt das Schreckensszenario eines Atomkriegs zwischen den grossen Mächten grundsätzlich in Frage, doch sind inzwischen neue Bedrohungssituationen erkennbar geworden. Wesentlich dazu beigetragen haben Entwicklungen beim Einsatz von computergestützter Technik, welche zu einer dramatischen Beschleunigung der Arbeitsprozesse geführt haben. Um nur ein Beispiel zu nennen: Dass etwa die Börsen als Motor der weltweiten Finanzwirtschaft und damit der Weltwirtschaft als solcher durch Algorithmen gesteuert werden und der Mensch die Kontrolle über diese Prozesse an "Maschinen" abgegeben hat, erschüttert das Vertrauen in die gesellschaftliche Plan-

barkeit von Prozessen. Die Sorge bezüglich gesellschaftlicher Kollapse hat zugenommen, wie sich unschwer an der publizierten Literatur aufzeigen lässt. Die Zweifel an der Stabilität der Gesellschaften lassen auch Befürchtungen an die Tradierbarkeit von Wissen und Information aufkommen und bestärken die Befürchtungen in Bezug auf die Dauerlagerung radioaktiver Abfälle in den Händen der Gesellschaften.

- **Entsorgungssystem:** Die Entwicklungen der letzten anderthalb Jahrzehnte stützen die Erkenntnis, dass es kein ideales Entsorgungssystem für den Umgang mit radioaktiven Abfällen gibt. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat sich das Konzept der Endlager mit Option auf Rückholbarkeit (EKRA 2000) zunehmend durchgesetzt (so genannte geologische Tiefenlagerung in Kavernensystemen in 500 bis 1000 m Tiefe). Vom Tiefbohrkonzept (Nagra 1978, Nirex 2004) einmal abgesehen, haben sich alle anderen Konzeptionen oder Vorschläge zur dauerhaften Entsorgung radioaktiver Abfälle bisher als nicht umsetzbar erwiesen: Verdünnung im Meer, Einlagerung im Eis der Antarktis, Endlagerung in ozeanischen Gräben („trenches“), Endlagerung in Subduktionszonen, Endlagerung in den Sedimenten der Tiefsee (sud-seabed), kontinentale Selbstverschmelzung (deep underground melting) oder die Entsorgung im Weltraum. Inwieweit das Verpressen hochaktiver Abfälle in den Untergrund, das lange Zeit in der Sowjetunion umgesetzt wurde, noch praktiziert wird, wurde nicht mehr im Detail abgeklärt. Alle Abfall produzierenden Länder verfolgen heute das Konzept der rückholbaren Tiefenlagerung.⁸ Die Erkenntnis, dass auch die lokalen oder regionalen Gemeinschaften in den Prozess der Realisierung eines Tiefenlagers eingebunden werden müssen, hat sich international durchgesetzt (OECD 2006). Ohne die Unterstützung dieser Bevölkerungsgruppen sind heute nukleare Projekte nicht mehr durchsetzbar. In diesem Sinne verstärken die Unsicherheiten im Umgang mit Lagerprojekten für radioaktive Abfälle die Debatten zwischen gesellschaftlichen Gruppen und Akteuren.
- **Ethische Imperative:** Die Erkenntnis, dass die nutzniehenden Generationen der Nuklearenergie Verantwortung für die Lösung des Entsorgungsproblems tragen müssen, hat sich definitiv durchgesetzt. Der absehbare freiwillige oder durch wirtschaftliche Zwänge begünstigte Ausstieg fördert diese Haltung. Unterschätzt werden aber weiterhin die Dauer, die für die Umsetzung von Lösungen benötigt wird, oder Probleme wie etwa der Wissensverlust beim Ausstieg. Zudem zeichnet sich ab, dass sich die effektiven Kosten der Entsorgung nur schwer beziffern lassen und dass damit gerechnet werden muss, dass künftige, nicht an der Nutzung der Kernenergie beteiligte Generationen dafür aufkommen müssen. Die Plan- und Wünschbarkeit von Transgenerationsprojekten stellt sich anhand von Risikoprojekten wie dem der Nuklearenergie neu.

⁸ Rückholbar im Sinne von EKRA (1999), also im Fall erkennbarer Probleme und zwecks Behandlung bzw. Wiedereinbringung in den Tiefuntergrund

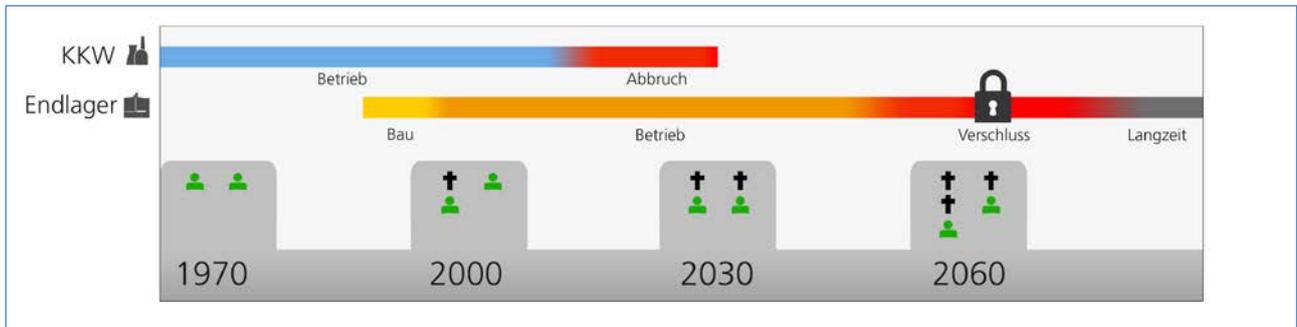
Von ethischen Leitprinzipien aus gesehen stellen die Atomenergie und ihre Aschen eine ethisch fragwürdige Hinterlassenschaft dar⁹. In diesem Sinne hat die ethische Debatte um die radioaktiven Abfälle an Kontur gewonnen.

Fassen wir eine erste Beurteilung der Situation 2014 zusammen, so kommen wir zum Schluss, dass sich im Vergleich zur Situation 1998 keine wesentlichen Verschiebungen ergeben haben. Gewisse Aspekte sind heute weniger bestritten, als sie dies vor anderthalb Jahrzehnten waren. Die Wandelbarkeit von Gesellschaften etwa und ihre teils rasche Transformationen sind heute allgemein im Bewusstsein, und damit auch die limitierten Möglichkeiten von Prognosen in diesem komplexen gesellschaftlichen Umfeld. Der Ausstieg aus der Kernenergie vereinfacht die Diskussion über die ethischen Grundlagen und die Erfordernis der Entsorgung. Bei der Wahl des Entsorgungssystems steht die Tiefenlagerung weiterhin im Vordergrund. Die Langzeitzwischenlagerung im Sinne eines Hüterns der Abfälle über lange gesellschaftliche Zeiträume stellt weiterhin keine Alternative zur Tiefenlagerung dar.

Jedoch zeigt sich, dass die Umsetzung der bisherigen Strategien der Tiefenlagerung sehr viel aufwändiger ist als bisher angenommen und sich die Umsetzung um Jahrzehnte gegenüber den ursprünglichen Zeitplänen verzögert (Damveld et al. 2012). Grosse Kernenergie nutzende Länder wie die USA, Grossbritannien oder Deutschland stehen nach dem Scheitern ihrer Standortprojekte in Yucca Mountain (Nevada), West Cumbria und Gorleben (Niedersachsen) praktisch wieder am Nullpunkt der Standortsuche. Die Umsetzung der Tiefenlagerprojekte verzögert sich auch in anderen Ländern: das Standortwahlprogramm in Spanien ist seit mehr als einem Jahrzehnt aufs Eis gelegt worden, Belgien setzt vermehrt auf die Transmutation hochaktiver Abfälle (Myrrha-Projekt der belgischen Studienzentrums für Kernenergie SCK-CEN), Japan steht nach der Katastrophe von Fukushima vor anderen Herausforderungen. In der Schweiz haben sich die ursprünglichen Realisierungszeitpläne in wenigen Jahrzehnten um Jahrzehnte verschoben (Figuren 2.1 und 2.2). Im Konzept von 1978 ging die Nagra noch von einem Betrieb des Endlagers für hochradioaktive Abfälle vor dem Jahr 2000 aus (Nagra 1978, Anhang A6-25). Wenige Jahre danach war der Betriebsbeginn zwischen 2000 und 2020 angesetzt und der Verschluss 2050 bis 2060 vorgesehen (Figur 2.1).

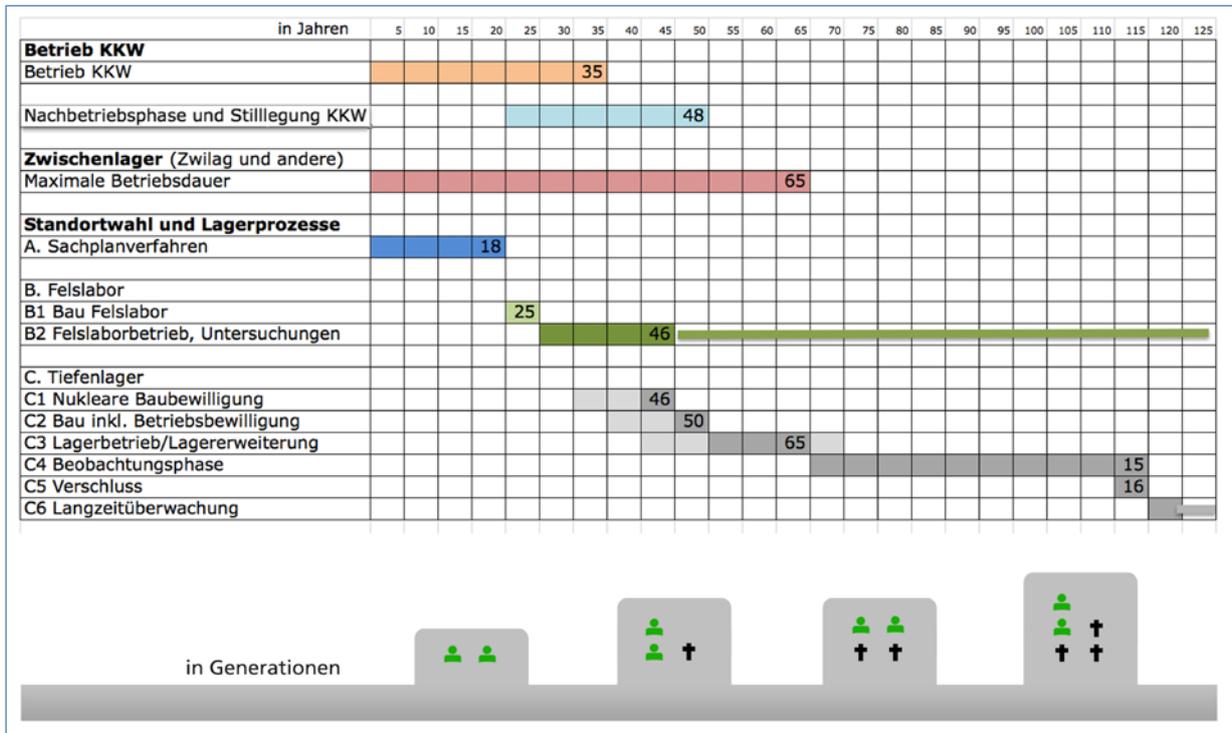
Seither ist der Realisierungszeitplan erneut in die Zukunft herausgeschoben worden. In der vorletzten Etappe wurde laut Entsorgungsprogramm 2008 (Nagra 2008) die früheste Betriebsaufnahme für das Tiefenlager für hochaktive Abfälle im Jahre 2040 angesetzt (Figur 2.2). Heute wird nicht mit einer Betriebsaufnahme vor dem Jahr 2060 gerechnet (BfE 2014). Vorsichtigeren Planungen gehen davon aus, dass eine Betriebsaufnahme für dieses Lager nicht vor ca. 2080 machbar ist (Figur 2.3).

⁹ Siehe dazu Anders Günther (1984/2011): Die Zerstörung unserer Zukunft, Diogenes

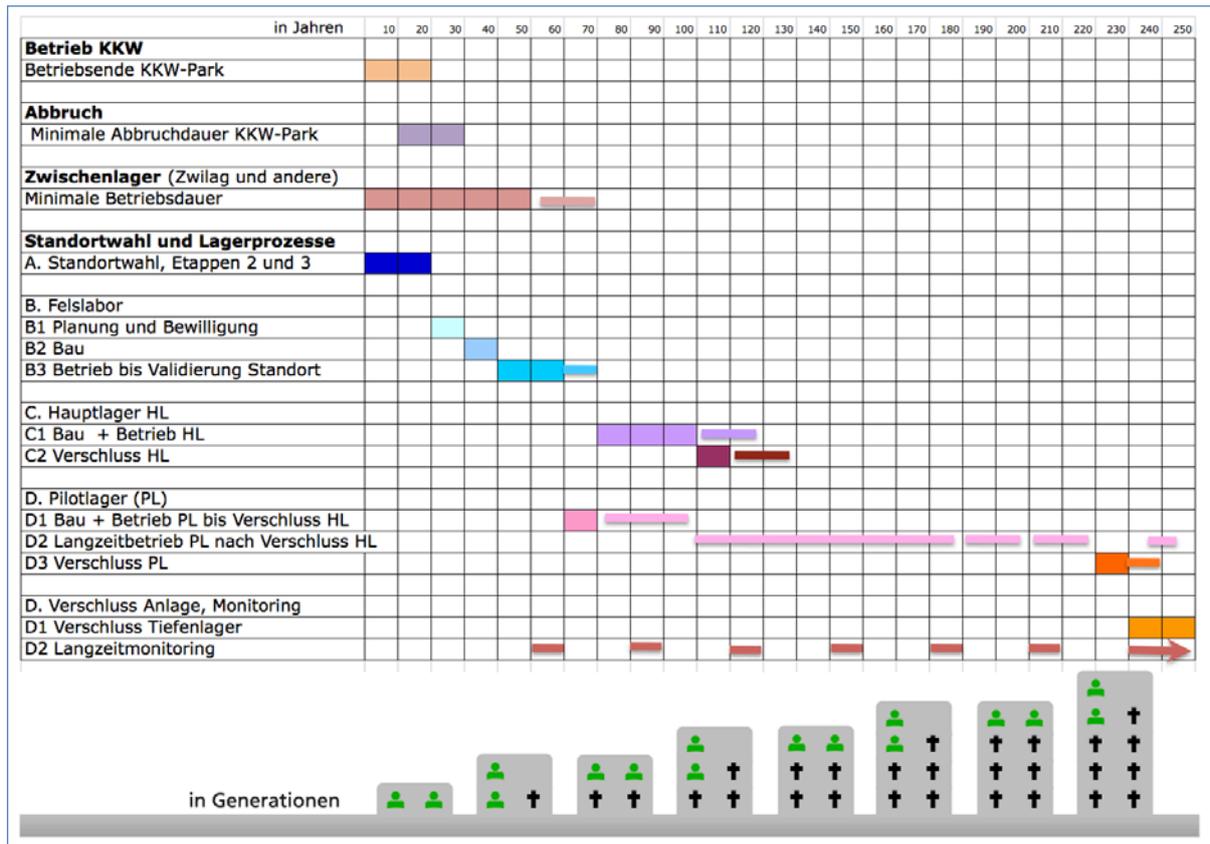


Figur 2.1: Realisierungszeitplan aufgrund des Schweizerischen Entsorgungskonzepts in den achtziger Jahren und beteiligte Generationen.

Viele Länder haben angesichts dieser Entwicklungen ihre Strategien verändert oder angepasst und haben der Langzeitzwischenlagerung den Vorzug gegeben. Die Niederlande haben sich aufgrund ökonomischer Überlegungen und den sehr kleinen Mengen an hochradioaktiven Abfällen aus ihrem Nuklearprogramm schon seit geraumer Zeit für eine Langzeitzwischenlagerung in der Größenordnung von 100 Jahren entschieden und hierfür ein entsprechendes Zwischenlager (Habog, Centrale organisatie voor radioactief afval COVRA N.V.) auf dem Gelände des Kernkraftwerks Borssele eingerichtet (Codée 2014). Die Abfälle werden trocken gelagert und luftgekühlt. Spanien plant aufgrund der fehlenden Zwischenlagermöglichkeiten in Kernkraftwerken und Kostenüberlegungen ein zentrales Langzeitzwischenlager für alle hochaktiven Abfälle aus dem spanischen Kernkraftwerkprogramm nach dem Modell des niederländischen Habog (Enresa, o.J.). 2011 wurde die Ortschaft Villar de Cañas (Cuenca) als Standort für das „Almacén Temporal Centralizado (ATC)“ genannte zentrale Langzeitzwischenlager ausgewählt. Es ist für eine Zwischenlagerung von 60 Jahren vorgesehen, aber für mindestens 100 Jahre ausgelegt. Eine spezielle Form der Zwischenlagerung wurde mit dem CLAB in Oskarshamn (Schweden) im untiefen geologischen Kristallin umgesetzt (SKB, o.J.). Zwei grosse Kavernen mehr als 30 m unter der Oberfläche beherbergen je vier Becken für die Nasslagerung von abgebrannten Brennelementen. Diese Anordnung im Untergrund ist gegenüber natürlichen Risiken wie Menschen gemachten Risiken besser geschützt. Andere zentrale Zwischenlager – Nass- wie Trockenlager – sind auch in anderen Ländern errichtet worden (Zwilag, Schweiz; Sellafield GB; La Hague Frankreich, usw.).



Figur 2.2: Realisierungszeitplan gemäss Schweizerischem Entsorgungsprogramm von 2008 (Nagra 2008, Fig 5.1a) und beteiligte Generationen. Angegebene Zahlen = Jahreszahlen ab 2000 (18 = 2018)

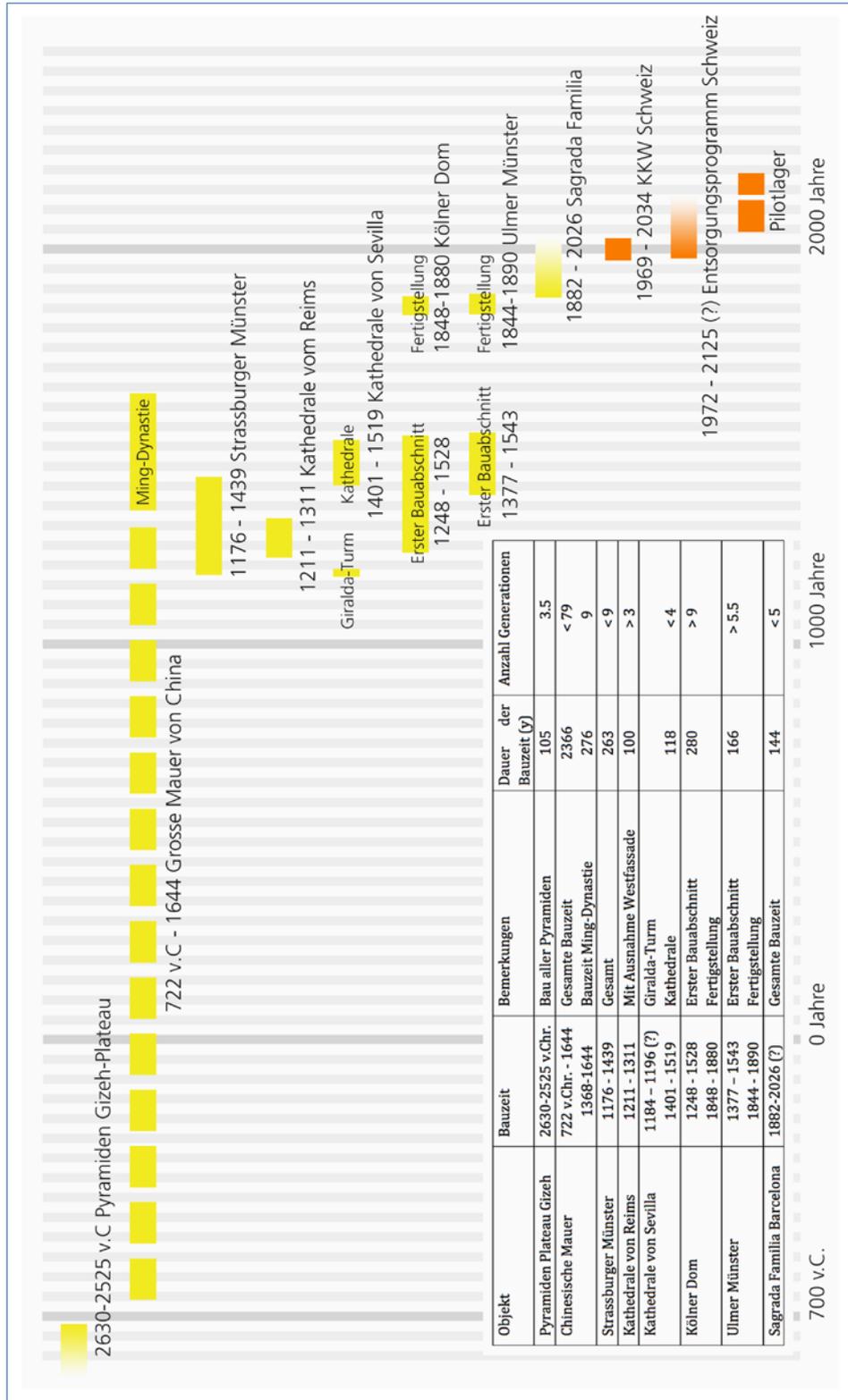


Figur 2.3: Realisierungszeitplan aufgrund von Erfahrungswerten (siehe INA 2011), Anzahl beteiligter Generationen: Angegebene Zahlen = Jahreszahlen ab 2010

Generell zeichnet sich in den letzten Jahren weltweit die Tendenz ab, die zu einer längerfristigen zentralen Trockenlagerung an wenigen Standorten hinzielt und die sowohl den Verzögerungen bei den nationalen Programmen wie auch der Problematik der dezentralen Zwischenlagerung an den Produktionsstandorten Rechnung trägt (siehe Kapitel 3). In dieser Übergangsphase, die Zeiträume von bis zu oder sogar mehr als 100 Jahre betragen kann, werden zentrale Zwischenlager gebraucht. In dieser Zeitspanne sollten die möglichen Wege für die Sicherung der Abfälle beziehungsweise ihrer Behandlung und Verbringung in den geologischen Untergrund geklärt werden. Diese langen Zeiträume von 2 bis 3 Generationen, die für die Entwicklung und Umsetzung der verschiedenen Entsorgungsstrategien voraussichtlich gebraucht werden, mögen auf den ersten Blick erschrecken. Sie sind aber nicht aussergewöhnlich, wie ein Blick in die Geschichte zeigt (Figur 2.4). Es gibt viele Beispiele für Jahrhundert- ja selbst Jahrtausendbauwerke. Wer die grossen Infrastrukturprogramme der letzten paar hundert Jahre betrachtet (Strassen-, Eisenbahn-, Wasser- und Kanalisationsnetze, Produktionsstandorte der chemischen Industrie usw.) stellt fest, dass auch moderne Gesellschaften viele Generationen übergreifende Planungen und Projekte in Gang gesetzt haben. Der einzig wirklich grosse Unterschied liegt im Risiko, welches die atomare Technologie gegenüber den meisten anderen modernen Techniken und Infrastrukturvorhaben des militärisch-industriellen Komplexes auszeichnet. Die Sicherung dieser Gefahrenquellen über die Zeit stellt eine besondere Herausforderung für die betroffenen Gesellschaften dar.

Eine erste Beurteilung der Situation bestätigt alles in allem die Ergebnisse der Studie vom 1998. Aus der Langzeitperspektive gesehen kann keine Gesellschaft eine Hüte-Pflicht über unbestimmte Zeiträume übernehmen. Im kurz- und mittelfristigen Zeitrahmen, also mindestens über die nächsten 100 Jahre, möglicherweise aber bis über 10 Generationen oder 300 Jahre, werden andere Strategien im Umgang mit den Abfällen benötigt. Innerhalb dieses Zeitraums ist mit Entscheiden für eine schrittweise Umsetzung des Tiefenlagerkonzeptes, einer anderen Lagervariante oder technischen Innovationen bei der Behandlung der Abfälle (z.B. Rekonditionierungstechniken, Transmutation) zu rechnen.

In dieser Zwischenzeit stehen die Fragen zur Belastbarkeit von Entscheiden im Zentrum des Interesses. Wissensdefizite und Unsicherheiten und Zweifel spielen in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle (Figur 2.5). „Wie sicher ist sicher genug?“ und „Wie unsicher darf unsicher sein?“ stellen die gleiche Frage nach der Belastbarkeit des Wissens aus unterschiedlichen Perspektiven. Diese Fragen werden sich im Laufe der fortschreitenden Erkenntnis immer wieder aus Neue stellen und erfordern ihre Überprüfung in wiederkehrenden Abständen. Zugleich fordert diese Erkenntnis auch eine Antwort im Umgang mit neu hinzugekommenem Wissen. In letzter Konsequenz kann jedes neue Wissen das bisher Erworbene und alle darauf beruhenden Entscheide grundsätzlich in Frage stellen.



Figur 2.4: Historische Realisierungszeitpläne von bedeutenden Bauwerken und Vergleich mit Umsetzungsprogrammen für radioaktive Abfälle



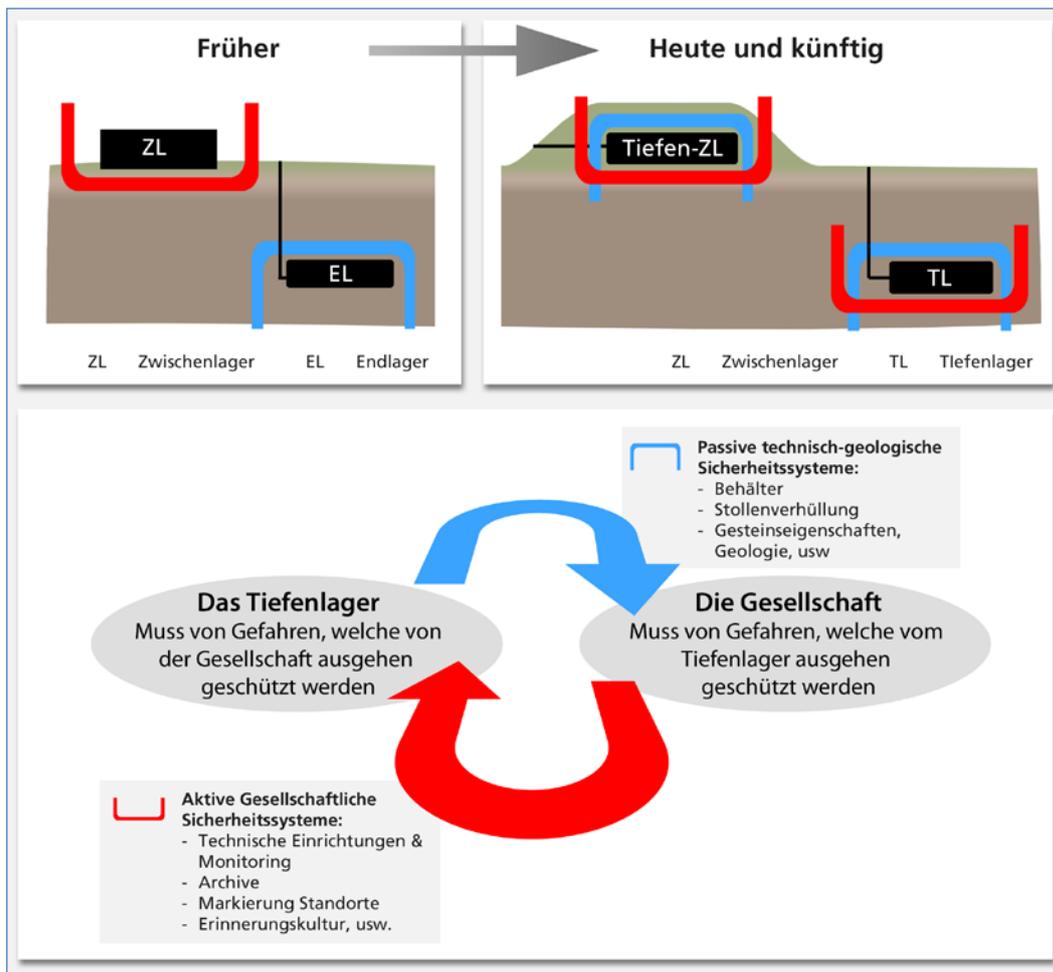
Figur 2.5: Grundfragen bei Entscheiden und erkenntnistheoretische Bezüge. Siehe: Ingenieurbüro Heierli (1979): „Wie sicher ist sicher genug?“ und Watzlawick Paul (1976): „Wie wirklich ist die Wirklichkeit?“ (Wie unsicher darf unsicher sein?)

Die Zeitspanne von 100 bis eventuell 300 Jahren steht im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Vordergrund der Erörterungen. Die Kernfrage, die sich also in diesem Zusammenhang stellt ist die, welche Bedingungen erfüllt werden müssen, damit Entscheide für die Freigabe eines Tiefenlagers oder für die Weiter-Behandlung von Abfällen als belastbar gelten können. Solche Entscheide sind Prozesse, die sich über verschiedene Etappen der Ausführung und des Betriebs unterschiedlicher Anlagen sowie über verschiedene Generationen hinziehen. Jede grössere Veränderung an einer Teilanlage wird sich im gesamten Planungssystem durchpausen. Diese Erkenntnis gilt es bei der Planung und Entscheidungsfindung in der Zukunft zu bedenken.

3 „Hüten“ versus „Endlagern“: Abgrenzung und Risiken

Wie der „Hüte“-Bericht aus dem Jahre 1998 (Buser 1998) bereits feststellte, kann die Strategie der Verbringung von radioaktiven Abfällen in eine geologische Senke („Endlager“) nie vollständig von der Strategie des „Hütens“ abgegrenzt werden. Die „Endlagerung“ ist immer mit einem, wenn auch kleinen Anteil an Tätigkeiten im Bereich des „Hütens“ verbunden. So ist z.B. die Aufbewahrung und Tradierung von Information ein fester Bestandteil eines jeden Zwischenlager- oder Tiefenlagerprojektes. Zudem gibt es Übergänge zwischen einem Zwischenlager und einem Langzeit-Zwischenlager (im Sinne des Begriffs „extended storage“ über 100 bis 300 Jahren [Nirex 2004b] oder den Konzeptionen des „Away From Reactor AFR“ oder des Negotiated Monitored Retrievable Storage Facilities (NMRS, Schrader Frechette 1993), beziehungsweise der Überführung von Abfällen eines Langzeitzwischenlagers in ein rückholbares Tiefenlager.

Allerdings waren diese Unschärfen in den frühen Zeiten der Kernenergienutzung weniger sichtbar. Frühe Konzeptionen gingen noch von klar getrennten Systemen der „Zwischenlagerung“ und der „Endlagerung“ aus (siehe Figur 3.1), wie eine kurze historische Analyse zeigt.



Figur 3.1: Vom separaten Zwischenlager und Endlager zu einem sicherheitstechnisch vernetzten System.

Die ersten Überlegungen zur Zwischenlagerung finden sich bereits Ende der 40er Jahre des letzten Jahrhunderts, vorwiegend in Zusammenhang mit der Kostenreduktion solcher Praktiken (de Laguna 1959). Schon frühzeitig war den meisten Forschern aber klar, dass eine Zwischenlagerung über längere Zeitspannen nicht zu verantworten war (Hatch 1953), oder aber spezielle und weitab gelegene Lagerkonstellationen in kaum besiedelten Wüstengebieten gesucht werden mussten (Western 1948, Huber 1957). Nachdem das Abfallproblem in den ersten Jahrzehnten weltweit auf die lange Bank geschoben worden war, zeichneten sich nach gesellschaftlichen Protesten gegen die friedliche Nutzung der Kernenergie in den siebziger Jahre eine Vielzahl von konkreten Programmen zur Standortsuche von Endlagern ab. Allerdings wurde den zuständigen Institutionen bald klar, dass diese Suche mehr Zeit in Anspruch nehmen würde und Übergangslösungen notwendig waren. Vor allem für die hochaktiven Abfälle mussten die bisher verfolgten Strategien überprüft und eine längerfristige Zwischenlagerung ins Auge gefasst werden (IAEA 1972).

Nationale Programme begannen Strategien für die Langzeitzwischenlagerung zu entwerfen, wie sich dies ab Februar 1972 am Beispiel der amerikanischen Atomenergie Kommission (Atomic Energy Commission AEC) nachzeichnen lässt. In den USA wurde die Langzeitzwischenlagerung zunächst auf dem Gelände der Plutoniumfabrik Hanford (Washington USA) geprüft, ab Juni 1972 in Mausoleenartigen Bauten an der Oberfläche, die als „Retrievable Surface Storage Facilities“ (RSSF) bezeichnet wurden. Diese Langzeitzwischenlager sollten einen Zeitraum von Jahrzehnten überbrücken, bis die benötigten Endlager bereit stünden. Im Laufe der Jahre wurde dieses Konzept der zentralen Langzeitzwischenlagerung weiterentwickelt, vom Konzept der von Reaktoren unabhängigen Zwischenlagern („Away from reactor“ [AFR]) unter Präsident Jimmy Carter bis hin zum „Rückholbaren überwachten Zwischenlager“ (Monitored Retrievable Storage MRS, siehe auch SEI 1998). Diese Konzepte wurden im Nuclear Waste Policy Act von 1982 gesetzlich verankert. Sie stellten die Endlagerung (permanent disposal) nicht in Frage, sondern beabsichtigten in erster Linie der Forschung mehr Zeit und Sicherheit für die Umsetzung der Tiefenlagerstrategie zu geben. Verschiedene Autoren wiesen in dieser Zeit darauf hin, dass Übergänge zwischen den Konzeptionen der Zwischenlagerung und der definitiven Endlagerung möglich und wünschbar seien und die Rückholbarkeit Teil einer solchen Strategie sei (Zen 1980).

Ähnlich argumentierten auch die Vertreter der Strategie des verhandelten, rückholbaren und überwachten Zwischenlagers (Negotiated Monitored Retrievable Storage NMRS), die im Laufe der achtziger und neunziger Jahre zunehmend Unterstützung fanden (siehe Shrader-Frechette 1993, S. 218. ff), auch seitens von prominenten Kernkraftbefürwortern wie Alvin Weinberg, dem ehemaligen Direktor des Oak Ridge National Laboratory (Tennessee USA), der sich anlässlich von Hearings im US-Kongress für diese Strategie aussprach (Weinberg 1987, zitiert in Shrader-Frechette 1993). Die in diesem Kontext geführten gesellschaftlichen Debatten beeinflussten natürlich auch die Entwicklung von Strategien für eine spätere Bergbarkeit von Abfällen.

Vor kurzem (2011) hat sich die amerikanische Blue-Ribbon-Kommission, welche das Nuklearprogramm der USA überprüfte, das Konzept des „Away-from-Reactor-Storage“ aufgegriffen und empfohlen, ein oder mehrere zentrale, gut gesicherte Langzeitzwischenlager („consolidate interim stora-

ge facilities“) einzurichten (Blue Ribbon Commission 2012). Die Dauer dieser Langzeit-Zwischenlagerung wird mit einigen Jahrzehnten bis hundert Jahre oder mehr angegeben. Der Betrieb der Zwischenlager würde solange gewährleistet werden müssen, bis Lösungen, die im Rahmen eines integrierten Planungsprozesses („integrated waste management strategy“) erarbeitet wurden, industrielle Reife erreicht hätten. Als wichtigste Gründe für diese zentralen Zwischenlager figurieren die Sicherung, die Sicherheit und die Reduktion der Kosten durch die Zentralisierung.

Auf der Seite der definitiven „Lösungen“, insbesondere der generell favorisierten Strategie der Tiefenlager in geeigneten geologischen Formationen in einigen hundert Metern Tiefe, kam es im Laufe der Jahrzehnte ebenfalls zu strategischen Anpassungen und Umstellungen. Die Wichtigste betraf die Erkenntnis, dass keine absolute Sicherheit eines „Endlagers“ über die betrachteten Lagerzeiten von 100'000 oder mehr Jahre gewährleistet werden könnte. Damit verbunden war die Erkenntnis, dass Korrekturmaßnahmen für so einen Fall vorzusehen seien, insbesondere über die Bergung der Abfälle. Waren Fragen zur Rückholbarkeit bereits in den späten siebziger Jahren thematisiert worden (cf. Buser 1998, S. 34 ff.), so wurden diese ab den 90er Jahren vermehrt aufgegriffen und debattiert (IAEA 1999). Die Berücksichtigung der Reversibilität und der Rückholbarkeit in den EKRA-Berichten um die Jahrtausendwende (EKRA 2000, EKRA 2002) spiegelt das zunehmende Bewusstsein innerhalb der Wissenschaft wider, Fehler basierte Entscheidungssysteme zuzulassen und die entsprechenden Korrekturprogramme einzuplanen. Viele Länder entwickelten ab dem Beginn der 90er Jahre ähnliche Strategien, allen voran Frankreich, welche die Reversibilität bereits 1991 in der sogenannten Loi Bataille festhielt.

Dennoch überzeugten die Konzeptionen der definitiven Verbringung von radioaktiven Abfällen in geologischen Senken nie vollständig. Wir finden im Laufe der Debatte um die Endlagerung immer wieder abweichende Konzeptionen, welche einzelne Elemente der Zwischenlagerung wie die dauerhafte Kontrolle mit Elementen der geologischen Lagerung, zum Beispiel in Kavernen im Untergrund, zu verbinden versuchten. Eine der vorgeschlagenen Strategien betraf etwa den Standort Yucca Mountain, dessen hydrogeologische Eignung in Frage gestellt wurde. Roseboom (1994) entwickelte auf der Basis dieser Ausgangslage das Konzept des permanent offen zu haltenden Endlagers mit Option auf dauerhafte Rückholbarkeit. Diese Konzeption unterschied sich nur in einem wesentlichen Punkt von der Strategie von Hammond (1979), der – aufgrund von Zweifeln an der geologischen Langzeitsicherheit – eine Kavernenlagerung mit einer Rekonditionierung der Abfälle alle 100 Jahre vorgeschlagen hatte.

Parallel zu diesen Entwicklungen begannen auch Umweltbewegungen und technikkritische Strömungen die dauerhafte Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle zu thematisieren. Zweifel an der Sicherheit von Endlagern und den geologischen Prognosen führten dazu, dass ab dem Beginn der 90er Jahre in den USA ein völlig neues Konzept des dauerhaften „Hütens“ der Abfälle („nuclear guardianship“) in Mausoleen an der Oberfläche vorgeschlagen wurde (Macy 1991, Macy 1992, Kreuzer 1990). Dieses Konzept beruhte auf der Überlegung, dass klosterähnlich organisierte, theologisch orientierte Gemeinschaften Aufsicht und Pflege von Langzeitzwischenlagern übernehmen sollten.

Die Idee des „Hüte“-Konzepts fand neben den USA besonders in Deutschland und in der Schweiz Beachtung. Die Argumentation der Verfechter der „Hüte“-Idee wird in Buser (1998, S. 22.ff.) ausführlich dargelegt. Diese Hüte-Konzeption, die auch geistig-spirituell untermauert ist („Wächter des giftigen Feuers“), wird weiterhin von verschiedenen Gruppierungen vertreten (siehe Holon 2013).

Im Laufe des letzten Jahrzehnts sind noch zwei weitere Konzeptionen für die gesellschaftlich getragene Langzeitzwischenlagerung vorgeschlagen worden. Die erste Konzeption wird durch den Wiener Risikospezialisten Wolfgang Kromp (2009a, 2009b) vertreten, der oberflächennahe, dezentrale Bunker für einen gewissen Anteil von Atommüll vorgeschlagen hat, ohne diese Ideen allerdings zu konkretisieren. Kromp steht in gewissem Sinne in der Tradition der Wiener Schule für phantastischen Realismus von Anton Lehmden, der in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts eine Konzeption zur dezentralen Lagerung von radioaktiven Abfällen in meterhohen Stahleibern vorlegte (de la Ferté 1992, siehe auch Buser 1997). Auch diese Konzeption wurde nur ästhetisch begründet, aber nie konkret ausgeführt. Die zweite Konzeption von Walter Darge (2011, 2012) schlägt ein geordnetes, permanentes Atommüll-Lager in der Form von Pyramidenbunker vor, mit Atommüll-Lager-Service für den Betrieb und Reparaturservice. Dieses Lager soll entsprechend den Fortschritten der Technik (Transmutation, Raketentechnik zum Transport von Abfällen in den Weltraum usw.) schrittweise verkleinert werden. Dieses Konzept zeichnet sich ebenfalls dadurch aus, dass grundsätzliche Zweifel an der Machbarkeit der Endlagerung in geologischen Senken geäußert werden. Doch folgt dieses, im Gegensatz zu den „Hüte“-Konzeptionen, nicht theologischen oder spirituellen Überzeugungen, sondern ist technisch sauber abgestützt.

Die Debatte zwischen dauerhaften Hüten und Endlagerung ist auch heute noch im Gang. Seitens der offiziell mit der Entsorgung betrauten Institutionen besteht der Konsens, dass dauerhafte Lösungen im Umgang mit radioaktiven Abfällen am ehesten durch ihre Lagerung in tiefen geologischen Senken erreicht werden können – trotz allen verbleibenden Unsicherheiten und methodischen Zweifeln¹⁰. Gemessen an den längerfristigen Risiken birgt eine Einlagerung im Tiefuntergrund bedeutend weniger Risiken für die Gesellschaft, als ein aktives „Hüten“ radioaktiver Abfälle an der Erdoberfläche. Langzeitzwischenlager oder gesellschaftlich getragene Hüte-Konzeptionen welcher Art auch immer stellen somit keine langfristige Alternative gegenüber den Konzepten des dauerhaften Einschlusses von radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen dar.

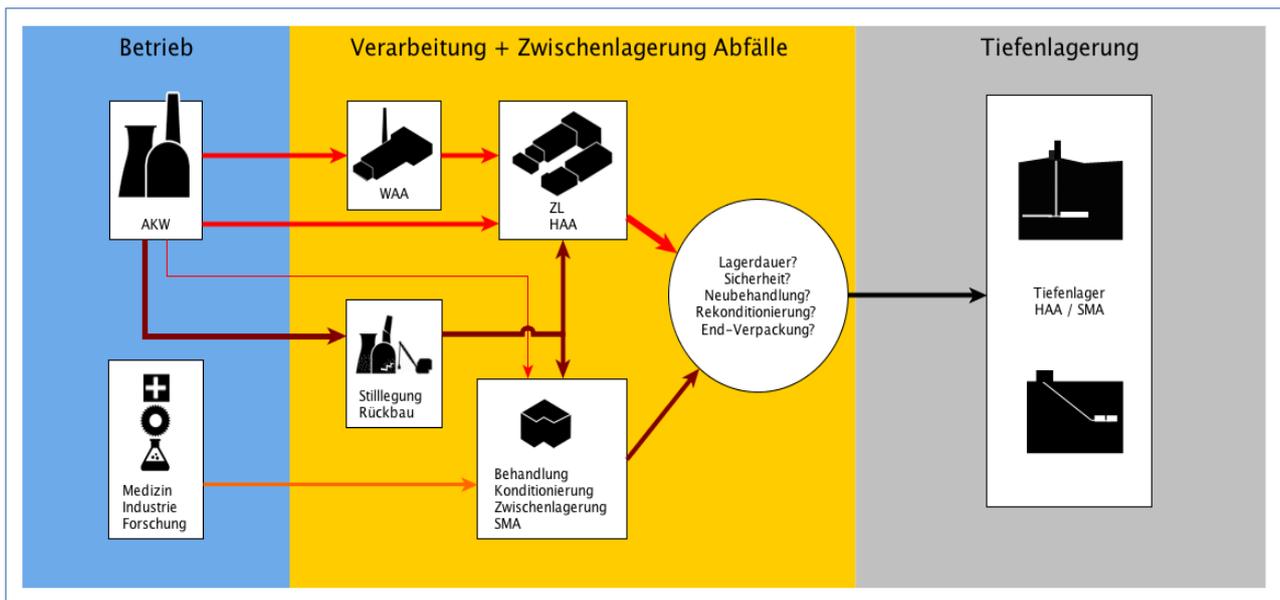
Zugleich hat sich vor allem im letzten Jahrzehnt auch die Erkenntnis durchgesetzt, dass aktive gesellschaftliche Massnahmen zum Schutz von Untergrundbauwerken vor Intrusion über Zeiträume von tausenden von Jahren einen Sicherheitsgewinn erbringen können (Buser 2013). Die Erinnerung an diese Untergrundbauwerke und die von diesen ausgehenden Langzeitgefahren sind so lange als möglich wach zu halten. Die heutigen Sicherheitskonzeptionen verbinden also beide Überlegungen: der Schutz der Biosphäre vor radioaktiven Abfällen soll durch passive Massnahmen sichergestellt werden, der Schutz des Tiefenlagers vor allzu aktiven künftigen Gesellschaften bedingt aktiver Mass-

¹⁰ Zum Beispiel die schon von Donath et al. (1982) aufgeworfene Frage, ob Modellberechnungen für einen Sicherheitsnachweis ausreichen

nahmen (siehe Figur 3.1). Neuere Untersuchungen der Atomenergieagentur der OECD (Nuclear Energy Agency)¹¹ dokumentieren die Bedeutung, welche die Fragen des längerfristigen „Hütens“ – insbesondere die Markierung von Standorten, Dokumentation und Archivierung – erlangt haben. Die Konzeptionen des Endlagers ohne jegliche Überwachung und des Hütens auf ewige Zeiten werden heute gesellschaftlich und institutionell kaum mehr getragen.

Das Generationenprojekt „nukleare Entsorgung“ steht heute in einer Zwischenphase. Die erforderlichen Anlagen für die dauerhafte sichere Endlagerung im Tiefuntergrund stehen auf absehbare Zeit (mindestens Jahrzehnte) nicht zur Verfügung. Viele technische, wissenschaftliche und bergmännische Probleme sind noch nicht gelöst und die industrielle Umsetzung der Endlager steht noch aus. Es braucht darum in dieser Zwischenphase Zwischenlager, die über längere Zeitspannen betrieben werden können (siehe Figur 3.2).

In den beiden folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Formen der zentralen Langzeit-Zwischenlagerung beziehungsweise definitive Lösungsansätze wie Endlagerung und Transmutation daher auf ihre Vorteile und Risiken vertieft ausgeleuchtet. Diese kurze Analyse soll dazu dienen, die wesentlichen heute sichtbaren Vorzüge und Stärken der jeweiligen Strategien heraus zu arbeiten, wie auch ihre Schwächen und Risiken sichtbar zu machen (Tabelle 3.1).



Figur 3.2: Wichtigste Anlagen im nuklearen Entsorgungssystem

¹¹ Siehe das diesbezügliche Projekt der Nuclear Energy Agency, Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations, <http://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/>

Risiken bei Zwischenlagerung

- Globale gesellschaftliche Krisen in Zusammenhang mit Klimaveränderungen und anderen Umwelteinflüssen: Systemzusammenbrüche infolge Übernutzung, Klimawandel, Hunger, Krieg usw.
- Terroristische Bedrohungen (erhöht bei Zwischenlager an der Oberfläche)
- Generell, besonders aber für Anlagen mit erforderlichen aktiven Sicherheitsmassnahmen: Desinteresse der Gesellschaft, Laxismus, Defizite in der Sicherheitskultur (Bequemlichkeit, Kompetenz- und Effizienzdefizite etc.)
- Insbesondere Zwischenlager an der Oberfläche: Absturz von Flugkörpern; Gefahren aus dem „Weltall“; Meteoriten, Asteroiden, Weltraumschrott usw.
- Gesellschaftlicher Wandel, Politische Neuorganisation
- Lagerdauer
- Desinteresse der Gesellschaft, Laxismus, Defizite in der Sicherheitskultur (Bequemlichkeit, Kompetenz- und Effizienzdefizite etc.)
- Ökonomie: Finanzielle Kernschmelzen wie Wirtschaftskrisen vom Typ ab 1929 bzw. ab 2007. Wertverluste beziehungsweise Plünderung von Rückstellungs-Fonds, Geldmangel
- Lager mit aktiven Sicherheitsmassnahmen : Desinteresse der Gesellschaft, Laxismus, Defizite in der Sicherheitskultur (Bequemlichkeit, Kompetenz- und Effizienzdefizite)

Vorteile bei Zwischenlagerung

- Erfahrungsgewinn, strukturelle Anpassungen und Neuorganisation
- Technische Entwicklungen

Risiken bei Tiefenlagerung

- Planungsvorgänge: Projektierungsschwachstellen im Entsorgungssystem, nicht erkannte Probleme
- Gekoppelte Probleme: Risikoketten, nicht erkannte Probleme
- Ökonomie: Finanzielle Kernschmelzen wie Wirtschaftskrisen vom Typ ab 1929 bzw. ab 2007. Wertverluste beziehungsweise Plünderung von Rückstellungs-Fonds, Geldmangel
- Desinteresse der Gesellschaft, Laxismus
- Defizite in der Sicherheitskultur (Bequemlichkeit, Kompetenz- und Effizienzdefizite)

Vorteile bei Tiefenlagerung

- Technische Entwicklungen, Technologiesprünge
- Erfahrungsgewinn, strukturelle Anpassungen und Neuorganisation
- Abklärung der Unsicherheiten, Forschung & Entwicklung
- Längerfristige Kühlung der Abfälle, Abklingen der Temperatur und Radioaktivität, Sicherheitsgewinne im Handling sowie im Tiefenlager (Wärmepuls)

Tabelle 3.1: Anlagen in der nuklearen Entsorgung und Aspekte, die Einfluss auf die Qualität des Entsorgungssystems haben.

4 Zwischenlagern und „Hüten“: Vorteile, Herausforderungen, Risiken

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, ist das Projekt der Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle ein Mehr- oder Transgenerationenprojekt, das nach heutigen Schätzungen auch bei der kürzest möglichen Umsetzung noch mindestens 3 Generationen dauern wird. Eine nüchterne Analyse der heutigen Situation zeigt aber, dass diese Zeitspanne auch weit über hundert Jahre und bis zu wenigen hundert Jahren dauern könnte. Verschiedene Kernenergie nutzende Länder richten sich mittlerweile immer stärker auf eine Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle ein. Zentrale nationale Zwischenlager an der Erdoberfläche befinden sich gegenwärtig im Aufwärtstrend.

Im vorliegenden Kapitel sollen nun Vorteile wie auch Nachteile und Herausforderungen an die Zwischenlagerung über längere Zeiträume in geraffter Form diskutiert werden (Tabelle 3.1). Wir unterscheiden verschiedene Bereiche: Risiken durch Flugkörper, insbesondere von solchen aus dem Welt- raum, gesellschaftliche und politische Auswirkungen und Neuordnungen, die grösseren Naturkata- strophen oder gesellschaftlichen Veränderungen unmittelbar folgen, sodann technische Entwicklun- gen, wirtschaftliche Krisensituationen, schliesslich planerische Schwachstellen beziehungsweise komplexe, vernetzte Prozesse (gekoppelte Prozesse).

Die ersten beiden Bereiche, vermutlich die Naheliegendsten, beziehen sich auf natürliche und gesell- schaftliche Risiken von oberflächennahen und nicht hinreichend geschützten Anlagen.

4.1 Risiken durch Flugkörper ("Natur"-Risiken)

Zu diesen Risiken gehören insbesondere die Gefahren durch Flugkörper aus dem „Weltall“:

Eine besondere Form von Bedrohung ist jene durch Weltraumschrott, Satelliten- und Flugzeugab- stürze beziehungsweise jene durch Meteoriten, Asteroiden und anderen kleineren Himmelskörpern. In den letzten 50 Jahren sind rund 17'000 vom Menschen gemachte Objekte („man made objects“) wieder in die Erdatmosphäre eingetreten (laut Angaben der Nasa ca. 1 pro Tag). 1978 zerbarst ein Sowjetischer Satellit mit seiner radioaktiven Fracht über den nordwestlichen Territorien Kanadas. Allein in den letzten 5 Jahren wurden drei weitere Satelliten-Abstürze registriert, mit dem Nieder- gang von grösseren Bruchstücken. Diese Gefahrenquellen sind aber gering im Vergleich zu den po- tentiellen Gefahren von abstürzenden Himmelskörpern.

Im Februar 2013 erinnerte der Absturz eines kleinen Meteoriten in der Gegend von Tscheljabinsk (Russland) an solche Gefahren. Im April 2014 wurde in Murmansk (Russland) ein weiterer Meteorab- sturz beobachtet. Schon 1908 war im sibirischen Gebiet von Tunguska ein Steinmeteorit niederge- gangen, der laut neueren Berechnungen eine Sprengkraft von bis zu 5 Megatonnen TNT besass¹². Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses wird mit 1 Ereignis pro 300 bis 1000 Jahre angegeben. Die Risiken von identifizierten bedrohlichen Annäherungen von Asteroiden und Kometen an die Erde werden mit Hilfe von Skalen (Torino bzw. Palermo Impact Hazard Scale) erfasst. Während neue, grö- sere Himmelsobjekte nur noch selten entdeckt werden, wächst die Anzahl der aufgespürten kleinen

¹² im Vergleich zu den 13 Kilotonnen TNT der Atombombe von Hiroshima oder den 15 Megatonnen TNT der stärksten je getesteten Bombe Bravo auf Bikini

Objekte (Durchmessern < 100 m) stark. an Die Geschwindigkeit der Objekte, die Grösse (grösstes Objekt des Tscheljabinsk-Ereignisses: 570 kg) wie auch das in Bruchstücke zerfallende Auseinanderbrechen von Himmelsobjekten legen nahe, solche Phänomene künftig vermehrt in Risikobetrachtungen von nuklearen Anlagen an der Oberfläche mit einzubeziehen. Diese Risiken sollten angesichts der potentiell verheerenden Folgen auch für Zwischenlager äusserst ernst genommen werden. Aus diesen Überlegungen resultieren zwei Erkenntnisse: zum einen ist es für die absehbare verlängerte Dauer der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle sinnvoll, die Anzahl der Anlagen massiv zu reduzieren. Aus betriebsökonomischen wie wirtschaftlichen und historischen Gründen ist es nachvollziehbar, dass vor allem hochaktive Abfälle an ihren Entstehungsstandorten zwischengelagert wurden. Mit Blick auf eine länger andauernde Zwischenlagerung nach definitiver Ausserbetriebnahme der Reaktoren ist diese Strategie sowohl aus der Sicht der Risikoverminderung wie auch aus wirtschaftlichen Überlegungen neu zu überdenken.

4.2 Gesellschaftliche und politische Risiken und Möglichkeiten

Wir unterscheiden zwischen folgenden Risiken und Möglichkeiten:

- **Globale gesellschaftliche Krisen in Zusammenhang mit politischen Ereignissen oder Umwelteinflüssen:** Das letzte Jahrhundert war reich an globalen gesellschaftlichen Krisen, mit zwei Weltkriegen und dem Zusammenbruch eines Herrschaftssystems zu Beginn der neunziger Jahre (siehe auch ökonomische Risiken). Diese letzte Krise verlief verhältnismässig glimpflich, vor allem wenn man an das Potential an Kernwaffen und Atomreaktoren in den Ländern der ehemaligen Sowjetunion denkt. Schwere Umweltkrisen sind als Auslöser massiver gesellschaftlicher Krisen historisch belegt (Diamond 2011). Dazu gehören nicht nur die Übernutzung der natürlicher Ökosysteme, Epidemien oder Klimasprünge mit verheerenden Nebeneffekten in der Landwirtschaftsproduktion. Als Beispiele seien hier etwa genannt: Das gut dokumentierte Massensterben der indigenen Völker Amerikas infolge von Epidemien (Grippe, Pocken) oder die Beulenpest, welche Europa ab dem 14ten Jahrhundert in mehreren Wellen überzog und zu einem erschreckenden Bevölkerungsrückgang führte oder neuerdings auch Grippewellen (Vasold 1991). Klimaveränderungen mit katastrophalen Folgen sind ebenfalls gut belegt, wie das Beispiel der Vulkanausbrüche des Tambora 1812-15 und die Konfluenz mit einer Periode geringer Sonnenaktivität zeigen, welche eine globale Verminderung der Sonneneinstrahlung zur Folge hatten. 1816 ist in Europa als Jahr ohne Sommer dokumentiert (Pfister 1999), mit Fehlernten, Hungersnöten und entsprechenden gesellschaftlichen Ausschreitungen. Die Sicherung der Atomanlagen und –materialien gehört in einer neu auftretenden Situation zu den überlebensnotwendigen Aufgaben einer Gesellschaft.
- **Terroristische Bedrohungen:** Die potentiellen Bedrohungen durch terroristische Attentate sind stärker im Bewusstsein der heutigen Gesellschaft verankert, als jene durch Himmelskörper. Seit dem 11. September 2001 ist jedenfalls eine der frühen Befürchtungen der Risiken der Atomenergie (Rossnagel 1983) bestätigt worden. Im Vergleich mit kosmischen Ereignissen sind Wucht und Druckwellen von Impakten, die durch Flugzeugabstürze ausgelöst werden, sehr klein, wenn diese mit denen von Himmelskörpern verglichen werden, welche die Erdoberfläche erreichen. Den-

noch ruft auch diese Bedrohungssituation nach den erforderlichen Massnahmen zur Sicherung nuklearer Anlagen (siehe Kapitel 4.1). Die rasch sich entwickelnde Militärtechnologie, die zunehmenden gesellschaftlichen und geopolitischen Instabilitäten und die Unberechenbarkeit ideologisch geleiteten Terrors lassen solche Szenarien als ernste Bedrohung für Nuklearanlagen erscheinen.

- **Desinteresse der Gesellschaft:** Eine der grössten Gefährdungen für Risikoanlagen liegt im Nachlassen des gesellschaftlichen Interesses an den längerfristigen Folgen des eigenen Handelns. Dieses Erkenntnis ist schon heute in vielen Bereichen nachweisbar (Klimaschutz, Kohlebergbau und Untertagebergbau und dessen langfristige Folgen, Plastikmüll auf Weltmeeren, Verseuchung Grundwasser usw.) und ist auch im Bereich der konventionellen Abfallbeseitigung gut belegt (NEA 2014a). Das Motiv der Entfremdung der Gesellschaft vor selbst gemachten, aber der Zukunft vererbten Problemen (Erblasten) muss bei Generationen übergreifenden Projekten besonders aufmerksam betrachtet und verfolgt werden. Der Gedanke der Nachhaltigkeit entspringt dieser Erkenntnis.
- **Gesellschaftlicher Wandel und politische Neuorganisation:** Dazu gehört insbesondere die Neustrukturierung der Lebensräume. Wiederholte und rasche Grenzverschiebungen wie etwa für Deutschland im 19ten und 20sten Jahrhundert (Buser 1998) können zu paradoxen Situation führen: Morsleben und Asse, die beiden ursprünglich grenznah angelegten Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle, liegen heute im Zentrum des wiedervereinten Deutschlands. Grenzverschiebungen (Zerfall Jugoslawien 1989-1998¹³, Russifizierung der ukrainischen Krim 2014) und regionale Abspaltungstendenzen (Schottland, Baskenland und Katalonien, Bretagne, Irland usw.) begleiten auch die jüngste Geschichte Europas.

Unter dem Suchbegriff „EurAtlas“¹⁴ können die politischen Karten Europas der letzten 2'000 Jahre mit zeitlicher Aequidistanz von 100 Jahren konsultiert werden. Im Zeitraffer sind diese Karten äusserst aufschlussreich und zeigen grosse wie kleinere politische Brüche sehr schön auf (z.B. IV.-V. Jahrhundert: Zerfall des grossrömischen Reichs; V. – VIII. Jhd: Vasconia [Baskenland]; VII. Jhd: Umbruch Islam im südlichen mare nostrum und der Levante; XIII: Fragmentierung Heiliges Römisches Reich [deutscher Nationen]; XVII. Jhd.: grösste Ausdehnung osmanisches Reich). Die Frage nach der Konzentrierung von Standorten für die Zwischenlagerung von hochaktiven Abfällen sollte auch unter diesem politisch wie ökonomisch wichtigen zeitlichen Aspekt betrachtet werden.

- **Lagerdauer:** Störfall- und Unfall-Risiken nehmen grundsätzlich mit zunehmender Lagerdauer zu. Dies gilt in jedem Fall für die technischen Risiken. Ein Blick auf die Geschichte zeigt aber, dass die politischen Risiken dieser Korrelation nicht folgen. Paradoxerweise waren die globalen nuklearen Risiken beim weltweiten Aufbau der Kernenergie in der Zeit des kalten Krieges am höchsten (siehe Figur 4.1): die nukleare Aufrüstung mit den oberirdischen Atombombentests, die Kuba-Krise, welche die Welt an den Rand des dritten Weltkriegs brachte, der aus einem Fehlalarm fast aus-

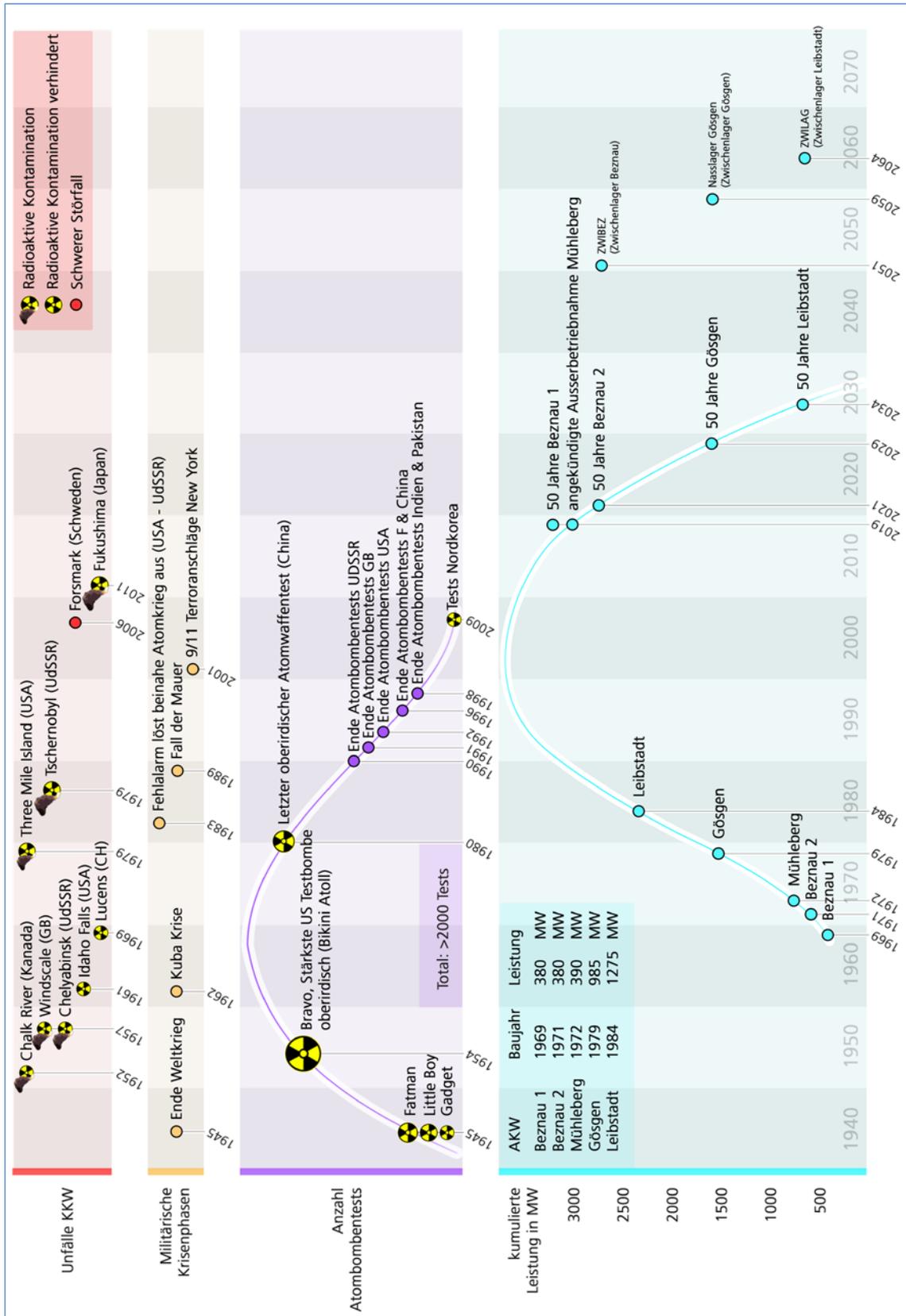
¹³ http://de.wikipedia.org/wiki/Jugoslawienkriege#mediaviewer/Datei:Former_Yugoslavia_wartime_animation_92-95.gif

¹⁴ <http://www.euratlas.net/history/>

gelöste nukleare Krieg Mitte der 1980er Jahre. Im Zeitalter der Globalisierung, der schrittweisen Deeskalation und dem Abbau des Nukleararsenals dürften kriegerische Bedrohungsszenarien für Nuklearanlagen tendenziell abnehmen. Die Lagerdauer bleibt aber die kritische Grösse für die Gesellschaft. Sie lässt sich nur beschränkt umgehen und fordert zu einer kohärenten Sicherheitspolitik heraus.

- **Dezentrale Zwischenlager und „Providurien“:** Die heute grosse Anzahl an Zwischenlagern bei Kernkraftwerken beziehungsweise von zentralen Zwischenlagern (28 in Deutschland, 9 in der Schweiz, > 60 in Frankreich usw., siehe auch länderspezifische „Nuclear Waste Profile“ der IAEA) zeigt die oben aufgeführte Dimension der Probleme einer länger andauernden dezentralen Zwischenlagerung beziehungsweise Deponierung radioaktiver Abfälle in Anlagen auf, die über ein Land verteilt sind. Die Dezentralität dieser Strategie erschwert auf die Dauer ein sicherheitsgerichtetes Management der Zwischenlager-Standorte und macht Störfälle in den unterschiedlich geführten Anlagen wahrscheinlicher. Nationale Kernenergieprogramme halten mit den Transformationsprozessen einer zunehmend globalisierten Welt nicht mit. Die auf jede einzelne Anlage fokussierte Genehmigung beziehungsweise Verlängerung der Betriebsbewilligung für die Zwischenlagerung von Abfällen führt tendenziell zu einer Zementierung des Status Quo und erhöht das Risiko, dass Zwischenlager auf Dauer zu „Providurien“ mit unbestimmter Lagerzeit umfunktionierte werden (siehe Shrader-Frechette 1993, S. 245.ff). Die bereits heute absehbare Notwendigkeit einer längerfristigen Zwischenlagerung von radioaktiven, insbesondere von hochaktiven Abfällen sollte eine solche Entwicklung und die daraus resultierenden Risiken (Alterung) frühzeitig in Erwägung ziehen und Strategien entwerfen, um solche Entwicklungen zu vermeiden.
- **Erfahrungsgewinn, strukturelle Anpassungen und Neuorganisation:** Neben zahlreichen Nachteilen hat eine länger andauernde Zwischenlagerung über den in der Zeit resultierenden Erfahrungsgewinn und die historisch belegte generelle Tendenz zur technischen Innovation (siehe Kapitel 4.3) aber auch einen gewichtigen Vorteil: sie erlaubt es, Verbesserungen in der Organisation und Umsetzung eines solchen Programms umzusetzen, wenn auch Risiken bei der Amalgamierung von Techniken aus unterschiedlichen Entwicklungsstadien bestehen (siehe weiter unten).

Zugleich aber gilt es auch zu bedenken, dass in Institutionen mit langer Laufdauer auch dazu tendieren, ihre Strukturen und ihre Pflichtenhefte zu vereinfachen und öfters nachlässiger werden, was sie anfälliger gegenüber bestehenden Risiken macht. Ein letztes Beispiel für eine solche sich laufend verschlechternde strukturelle Entwicklung sind die Ereignisse im Februar 2014 im „Waste Isolation Pilot Plant WIPP“ (New Mexico, USA, siehe dazu Nature 2014, DOE 2014, 2014a).



Figur 4.1: Risikoentwicklung am Beispiel des schweizerischen Kernkraftwerkprogramms

4.3 Technische Risiken

- **Technische Risiken bei der Zwischenlagerung über längere Zeiträume sowie Wartungs- und Unterhaltsdefizite:** Die Probleme der Alterung von Anlagen, Abfallgebinden (inkl. Gebinde für abgebrannte Brennelemente bzw. verglaste hochaktive Abfälle) werden seit geraumer Zeit untersucht. IAEA und NEA/OECD wie auch nationale Programme haben sich in den letzten Jahren der Frage der Alterung der Systeme und Komponenten der verschiedenen zwischengelagerten Abfälle vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt (IAEA 1998, 2003, 2006a, 2006b). Es zeigt sich, dass auch bei der Trockenlagerung mit Castor-Behältern signifikante Wissenslücken bei einer längeren Zwischenlagerung bestehen (GRS/öko-Institut 2010, S. 44.ff, 122.ff.), sowohl was die Brennelemente, ihre Elongation und Deformation, Versprödungseffekte und Schweißnahtprobleme angeht, wie auch jene von Behältereinbauten wie den Brennelementkörben. Die mögliche Deformierung dieser Tragkörbe (GRS/öko-Institut 2010, S. 124) könnte zur Folge haben, dass „Brennelemente nicht oder nur schwer entladen werden“ könnten. Nicht oder nur teilweise entladbare Castor-Behälter müssten in solchen Fällen geöffnet werden, was völlig andere Sicherheits-Anforderungen an die Umpackung der Abfälle stellen würde. Die Verifizierung der Entladbarkeit von abgebrannten Brennelementen gehört als zu einer der heute offenen Schlüsselfragen bei der länger dauernden Zwischenlagerung hochaktiver Abfälle.

Ähnliche Fragen der Alterung (Korrosion, Gasbildung usw.) stellen sich auch bei anderen Komponenten des Zwischenlagerungssystems. Die Langzeitzwischenlagerung erfordert deshalb, dass alle diese Fragestellungen laufend bearbeitet und verifiziert werden. Systematische Inspektions-, Überprüfungs- und Instandhaltungsprogramme im Sinne von Management-Plänen (Buser 1998) sind für die Bewältigung der Langzeitzwischenlagerung von essentieller Bedeutung. Dies gilt auch für die Amalgamierung von technischen Systemen unterschiedlicher Entwicklungsgenerationen.

Wartung und Unterhalt sind bekannte Schwachstellen in Deponie- oder Lagersystemen und stellen – wie im Extremfall bei den Lagertanks für flüssige hochaktive Abfälle (z.B. Hanford, siehe unten) – grösste Herausforderungen an die Sicherheit der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle dar. Hinzu kommen die Probleme der Dokumentation, des Wissenserhalts, der Tradierung technischer Information usw. mit den bekannten Risiken des Wissensverlusts (NEA 2014a).

Schliesslich soll auch darauf hingewiesen werden, dass sich sowohl Anlage spezifische Unterschiede innerhalb eines Landes wie auch beträchtliche Unterschiede in den nationalen Verpackungs- und Zwischenlagerungsstrategien (GRS/öko-institut 2010) zu grösseren Problemen bei der Zuordnung der Abfälle im Tiefenlager und der geeigneten definitiven Konditionierung und Verpackung der Abfälle für das Tiefenlager führen könnte. Die Erfahrungen der nationalen Zwischenlagerprogramme sind nur sehr beschränkt von Land zu Land übertragbar. Alles in allem zeigt sich, dass auch die Langzeitzwischenlagerung nicht frei vor grösseren Problemen ist und weit davon entfernt ist, als ein System zu gelten, das uns von den Sorgen und Risiken um die Sicherheit befreit.

- **Safeguards und Kritikalität:** Safeguards ist insofern in die vorliegenden Betrachtungen mit einzu-beziehen, solange nicht klar ist, ob die spaltbaren Materialien abgetrennt oder aber definitiv mit den abgebrannten Brennelementen im Tiefuntergrund eingelagert werden sollen. Diese Frage ist nicht nur in Bezug auf die Sicherung wichtig, sondern ist von übergeordneter planerischer Bedeutung. Sie hat grundsätzliche Auswirkungen auf den gesamten nuklearen Zyklus (Wiederaufarbeitung und Abtrennung von spaltbaren Materialien, Verbrennung/Transmutation der spaltbaren bzw. langlebigen Materialien, Zwischenlagerungs- und Tiefenlagerprojekte usw.), sofern ein solcher technisch und wirtschaftlich überhaupt wünschbar und möglich ist (Matthes et al. 2006).

Die Frage der Kritikalität betrifft in erster Linie die Lagerung flüssiger hochaktiver Abfälle, wie sie etwa in Hanford (Pabalan et al. 1998) oder an ähnlichen Atomfabriken in den USA oder der ehemaligen Sowjetunion praktiziert wurde. Sie ist aber insofern von grosser sicherheitstechnischer Bedeutung: Zwischenlager müssen so konzipiert und betrieben werden, dass Unterkritikalitätsbedingungen gewährleistet werden können. Diese Bedingungen sind bei der Trockenlagerung grundsätzlich einfach zu gewährleisten. Ähnlich wird das Problem auch bei der Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente eingeschätzt (GRS 2004), obschon sich hier ganz andere Fragen bezüglich Langzeitsicherheit stellen (siehe Kapitel 5).

- **Technologiesprünge:** Eine besondere Herausforderung stellen Technologiesprünge bei der Behandlung oder Konditionierung der Abfälle dar. Technik wird laufend verbessert und angepasst, wie dies etwa auch bei der trockenen Verwahrung abgebrannter Brennelemente zu beobachten ist (cf. Areva [2013], NRC [o.J.]). Technologiesprünge sind im Wesentlichen kaum zu prognostizieren und sollten daher nicht als Grundlage für die Planung von Entsorgungssystemen Eingang finden. Dies dürfte auch die wichtigste Schwachstelle für die immer wieder zur Diskussion stehenden Transmutationsstrategien sein, die heute als unausgereift (intac 2013) und als eindeutig unökonomisch zu bezeichnen sind. Unabhängig davon, ob diese Technik letztendlich umsetzbar ist: auch eine erfolgreich durchgeführte Transmutation hinterlässt – wenn auch deutlich weniger langlebige – hochaktive und mittelaktive Abfälle, die entsprechend konditioniert, zwischengelagert (ca. 50 Jahre) und schliesslich endgelagert werden müssen (Jülich 2007). Eine Experimentalanlage (Myrrha) ist gegenwärtig in Belgien (SCK-CEN) in Planung und sollte den Betrieb in rund zehn Jahren (2023/ 2025) aufnehmen.

Technologiesprünge haben in einem komplexen Transgenerationenprojekt wie jenem der nuklearen Entsorgung insofern eine besondere Bedeutung, weil die verschiedenen Teilsysteme und Komponenten des Entsorgungssystems direkt voneinander abhängen. Jede grundsätzliche Änderung in einem Teilsystem wird auch zu Anpassungen in den anderen Teilsystemen führen. Die Amalgamierung verschiedener Techniken aus verschiedenen Planungs- und Umsetzungsphasen dürfte eine besondere technische, organisatorische wie finanzielle Herausforderung bei der Umsetzung der Entsorgung radioaktiver Abfälle darstellen.

4.4 Ökonomische Risiken

Zwei Risiken stehen im Vordergrund, die bei einer längeren Zwischenlagerung immer wahrscheinlicher werden (Stichwort „Zyklizität von Wirtschaftskrisen“):

- **Finanzielle Kernschmelzen:** Die Krisenjahre nach 1929 (Galbraith 2005) beziehungsweise nach 2007 zeigen Muster, welche sehr schweren Krisen des Finanzsystems folgen und den sicheren Betrieb von Abfallanlagen und die Sicherung von Risikoanlagen ernsthaft betreffen können. Bislang wurden die Auswirkungen solcher Szenarien und die damit verbundenen Risiken im komplexen Netzwerk-Systemen nur beschränkt wenn überhaupt untersucht (Stichwort „Kaskaden-Ausfälle“).
- **Wertverluste und Plünderungen von Rückstellungs-Fonds:** Ähnliche, wenn vermutlich weniger gravierende Auswirkungen sind von Wertverlusten bei Rückstellungsfonds oder deren Plünderung zu anderen Zwecken zu erwarten, namentlich in schweren Krisenzeiten. Die IAEA stellte bereits 2003 fest, dass die Entwicklung der Kapital-Verzinsung und der Inflationsraten über eine Generation heraus kaum vorhersagbar sei¹⁵. Selbst in diesem, eher günstigen Szenario ist mit Auswirkungen auf den sicheren Betrieb beziehungsweise die Sicherung solcher Anlagen zu rechnen. Soweit bekannt liegen keine langfristigen Betrachtungen für solche, historisch vielfach belegte Szenarien vor (Stichwort „Plünderung von Staatskassen“).

4.5 Planerische Risiken

Diese sind heute vorab bei einer nur beschränkt vernetzten Planung zu orten:

- **Projektierungsrisiken im Entsorgungssystem:** die Qualität von Planungen im Sinne von systemisch vernetzten und belastbaren Konzeptionen sind für den Erfolg bei der Umsetzung von Projekten entscheidend. Was bei grossen Infrastrukturprojekten (Nationalstrassen, Bahnnetzen, regionale Infrastrukturvorhaben der Wasser- oder Gasversorgung usw.) gang und gäbe und vielfach erprobt ist, tut sich bei der nuklearen Entsorgung vieler Länder schwer. Auch in der Schweiz. Dafür gibt es etliche Gründe, wie etwa das Fehlen einer strategischen wie auch integrierten Planung, die diesen Namen verdient.

Kernanlagen werden als eigenständige Industriebetriebe betrachtet, die von den zuständigen Behörden individuell genehmigt werden. Diese in separate Einheiten unterteilte Struktur der Branche erschwert eine kohärente Planung aller Prozesse, die der Energieerzeugung folgen. Die Zusammenführung der Konditionierungs- und Lagerungsstrategien der verschiedenen Anlagen zu einer kohärenten Entsorgungsstrategie ist sehr anspruchsvoll. Sie wird heute über die Koordination zwischen Anlagebetreiber sichergestellt. Mit Blick auf die Zukunft erscheint eine integrierte Gesamtplanung der Entsorgung unter einer Führung (mit zentral geführtem Rückbau der Kraftwerke und zentralem Zwischenlager, mit integrierter Konditionierung, Planung und Ausführung

¹⁵ IAEA (2003), S. 10: „Long term interest and inflation rates cannot be predicted with accuracy; cost projections for actions beyond one generation (about 30 years) would have a great deal of associated uncertainty.“ und „Hence, any estimate for the funding required to sustain long term storage will have large uncertainties“.

eines Tiefenlagers) zielführender, da sie die Herausforderungen, die aus unterschiedlichen technischen Systemen resultieren, grundsätzlich und systematischer bewältigen können sollte. Spät oder zu spät erkannte Schnittstellenprobleme können die Ausführung von Teilprojekten stark verzögern oder behindern und treiben die Kosten in die Höhe. Zumindest teilweise kann diesen Planungs- und Projektierungsrisiken durch Strukturreformen begegnet werden. Sie sollen den Aufwand vermindern und durch den integrierten Ansatz unnötige Eigenentwicklungen möglichst vermeiden.

4.6 Gekoppelte Risiken

Zu diesen Risiken gehören insbesondere die Risikoketten mit auslösenden und daran anknüpfenden, sich verkettenden Ereignissen. Diese Ketten sind bei grosstechnischen Systemen derart komplex, dass sie in der Regel von den zuständigen Institutionen nicht weiter analysiert oder nur selten weiter verfolgt werden. Bei gekoppelten Risiken wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Massnahmen, welche für die einzelnen Teilsysteme entwickelt und umgesetzt wurden, genügen, damit keine weitergehenden Probleme entstehen. In Anlehnung an Perrow's Theorie der „normalen Katastrophen“ (Perrow 1992) ist die Koppelung von komplexen Systemen derart vielschichtig und verschlungen, dass Vorhersagen über den Ablauf von Ereignisketten kaum zu leisten sind. Szenarienanalysen können helfen, solche Ketten zu konstruieren und probabilistische Risikoanalysen mögen Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt solcher Szenarien rechnen.

Ein weiterer interessanter Gedanke stammt von Günther Anders (1984/2011), der darauf hinweist, dass Gefahren oder Risiken nicht oder schwer zu erkennen sind, wenn sie sogenannten „überschwellig“ sind, d.h. die „Schwelle des Wahrnehmbaren oder Vorstellbaren überschreiten“. Bei der verfolgten Strategie der Langzeit-Zwischenlagerung sollte der Frage der Überschwelligkeit von Risiken und Gefahren in diesem hochkomplexen vernetzten System nachgegangen werden.

4.7 Zusammenfassende Bewertung

Wie aus den obigen Betrachtungen erkennbar wird, stellt das grosstechnische System der Kernenergie mit Reaktoren, Wiederaufarbeitung und anderen, teils auch nur geplanten Behandlungsanlagen, sowie mit Zwischenlagern und Endlagern (siehe Figur 3.2) eine transgenerationale Herausforderung besonderer Art dar. Die Risiken, die von radioaktiven Stoffen dieser Anlagen ausgehen, sind gross und lang andauernd. Es besteht daher kein Zweifel, dass diese Stoffe künftigen Generationen nicht dauerhaft aufgebürdet werden dürfen. In einigen Generationen spätestens (der Zeitpunkt ist heute aber nicht bestimmbar) sollten diese Abfälle dann in eine tief gelegene geologische Senke verbracht werden. Passive Sicherheitssysteme müssten zu diesem Zeitpunkt die Rückhaltung der Schadstoffe in einer solchen Senke gewährleisten können. Bis ein solches System aber soweit entwickelt, getestet und umgesetzt ist, werden mindestens einige Jahrzehnte wenn nicht mehr als hundert Jahre vergehen. In dieser Zeit, zwischen dem Heute und der Versenkung in den Tiefuntergrund, sind die Kernenergie nutzenden Gesellschaften gezwungen, ihre Abfälle zu „Hüten“, das heisst sachgerecht zwischen zu lagern, bei Bedarf und nach Stand von Wissenschaft und Technik zu konditionieren oder zu

rekonditionieren und die Anlagen gegen äussere Gefahren wie gegen innere strukturelle Erosion zu sichern und zu schützen. Diese Aufgaben sind äusserst anspruchsvoll, aufwendig und politisch sensibel. Das wachsende Bewusstsein der Gesellschaft für (nicht-individuell gewählte) Risiken dürfte den Druck zur erhöhten Sicherheit und Sicherung solcher Anlagen steigern. Hochtechnisierte Gesellschaften sind im Zeitalter der Kommunikation kaum mehr bereit, Risiken mit einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen zu akzeptieren, wie jüngst im WIPP. In diesem Sinne dürften die Anforderungen an die „Hüte“-Pflicht der Gesellschaft und ihrer Institutionen bis zur beabsichtigten definitiven Versenkung der Abfälle in den geologischen Tiefuntergrund tendenziell wachsen.

5 Langfristig sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle in einer geologischen Senke: Stand der Entwicklung bei der Planung, Forschung und Umsetzung

Parallel zur Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle suchten die verantwortlichen Institutionen in den Kernenergie nutzenden Ländern während Jahrzehnten nach Wegen, wie sich die strahlenden hochtoxischen Abfälle beseitigen lassen würden. Eine Vielzahl von Lösungsvorschlägen wurden insbesondere für die Entsorgung von hochaktiven Abfällen eingebracht, von der Verdünnung im Meer, über die Lagerung in ariden Zonen, die Entsorgung im Eis der Antarktis, in ozeanischen Platten und Gräben oder im Weltraum (siehe dazu Buser 1998, EKRA 2000). Seit den 1970er Jahren setzte sich das Konzept der Endlagerung in tiefliegenden geologischen Formationen schrittweise durch. Dieses Konzept gilt seit mehreren Jahrzehnten als erfolgversprechende Strategie für die Beseitigung aller radioaktiven Abfalltypen und wird von allen Kernenergienutzenden Staaten verfolgt (IAEA 2009). Alle heutigen Konzepte beruhen, mit kleineren Abweichungen, auf den gegen Ende der 1970er Jahre in Schweden entwickelten und später erweiterten KBS-Konzepten (KBS1, KBS 2 und 3, siehe SKB 1977 und folgende Berichte). Umgesetzt wurde in der Kategorie der langlebigen transuranhaltigen Abfälle bisher lediglich das „Waste Isolation Pilot Plant WIPP“ (New Mexico USA). Drei Projekte für Tiefenlager für hochaktive Abfälle sind gegenwärtig in Planung bzw. im Bau (Bure Frankreich; Forsmark, Schweden; Olkiluoto, Finnland).

Bei den schwach- und mittelaktiven Abfällen wurden zunächst alte Bergwerke in verschiedenen Gesteinsformationen als Endlagerstätten ins Auge gefasst. Einige dieser Projekte wurden in der Folge umgesetzt, wie etwa das Versuchsbergwerk und Endlager Asse (Ipsen et al. 2010), das Endlager Morsleben in der ehemaligen DDR (IAEA 2003a) oder das Endlager „Mina Beta“ von El Cabril in der Sierra Albarrana in Südspanien (IAEA 2003a).

Die bisher geplanten und umgesetzten Tiefenlagerprojekte waren bisher nicht besonders erfolgreich. In den USA musste das Projekt einer Demonstrationsanlage für ein Endlager für hochaktive Abfälle in einem ehemaligen Salzbergwerk in der Nähe von Kansas aufgegeben werden (Blue Ribbon Commission 2012a), nachdem in dessen Nahfeld alte Gas- und Erdölexplorationsbohrungen entdeckt worden waren. Das Projekt für die Endlagerung der hochaktiven Abfälle in Yucca Mountain wurde 2009 (vorübergehend?) aufgegeben (Flynn et al. 1997, Blue Ribbon Commission 2012a). Asse und Morsleben sind Sanierungsfälle aufgrund hydraulischer Gefährdungen und Standfestigkeitsproblemen. Über die Umsetzung des Projektes in „Mina Beta“ liegen keine Informationen vor.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Endlagerung von chemotoxischen Abfällen in ausgedienten oder speziell aufgefahrenen Bergwerken bisher kaum besser umgesetzt wurde. Die elsässische Untertagedeponie „StocaMine“, deren Flutung unabwendbar ist, ist ebenfalls ein Sanierungsfall (Copil 2011). Erschwerend kommt bei Stocamine hinzu, dass das Projekt als „rückholbares Endlager“ geplant wurde, die Rückholbarkeit innerhalb der gesetzten Fristen heute aber offiziell als zu gefährlich gilt. Mit Schwierigkeiten und Akzeptanzproblemen kämpfen auch andere Endlagerstandorte für chemotoxische Abfälle in ehemaligen Salzbergwerken in Deutschland.

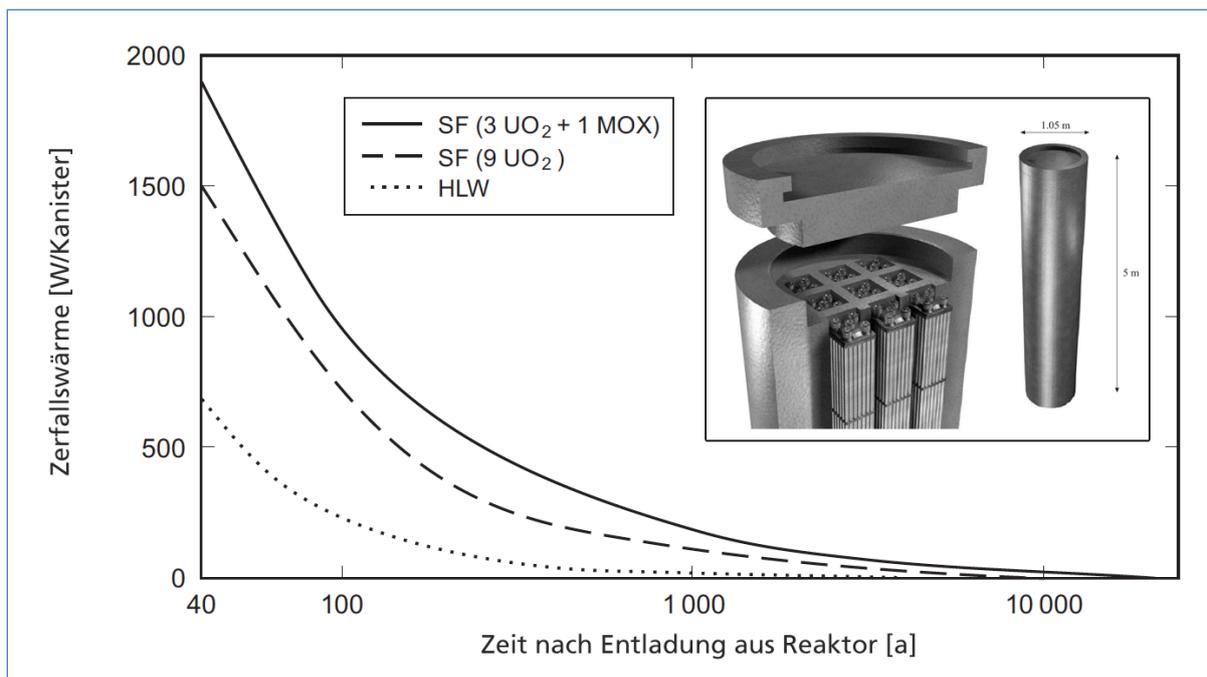
Es zeigt sich generell, dass die Schwierigkeiten von Untertagelagern für toxische und radioaktive Abfälle unterschätzt wurden. Als besonders kritisch hinsichtlich hydraulischer Gefährdungen beziehungsweise Brand-, Explosions-Gefahren und Gefahren mit radioaktiver Strahlung sind die Betriebszeiten mit offenen Hohlräumen, beziehungsweise die Phasen bis Verschluss und zum vollständigen Einschluss des Lagergutes (Buser 1998). Diese Grundproblematik wurde im Februar 2014 durch zwei Unfälle im WIPP (New Mexico, USA) mit einem Brand beziehungsweise einer Explosion und Freisetzung von Transuranen unterstrichen (DOE 2014, 2014a). Die Risiken der Betriebszeit mit offenen Galerien dürfen nicht unterschätzt werden. Es gebietet sich daher, die Planung und Umsetzung von Tiefenlager mit äusserster Sorgfalt und ohne unnötigen Zeitdruck vorzunehmen. Die bisherigen Erfahrungen bei der Umsetzung von standortspezifischen Projekten zeigen, dass die zuständigen Institutionen in den verschiedenen Ländern die Realisierungszeitpläne von Tiefenlagern grundsätzlich als viel zu optimistisch eingeschätzt haben.

Mit Blick auf die Erfahrungen, die auch bei der konventionellen Deponierung von Sonderabfällen beziehungsweise von industriellen Abfällen gemacht wurden, sollte überstürztem Handeln und unsorgfältiger Planung durch eine weitsichtige und qualitativ hochstehende Projektierung vorgegriffen werden. Es ist weder den Entsorgungsprojekten, noch den umsetzenden Institutionen und schon gar nicht der betroffenen Bevölkerungen gedient, wenn nukleare Altlasten geschaffen werden. Aus diesem Grunde empfiehlt der vorliegende Bericht, die Realisierungsarbeiten an Tiefenlagern nicht zu überstürzen und notfalls Zwischenlösungen in besser gesicherten, oberflächennahen Zwischenlagern vorzusehen und die Forschung und Entwicklung bei den offenen Fragen zu intensivieren.

Die folgenden Ausführungen betreffen drei Fragestellungen oder Bereiche, die besonders aufmerksam verfolgt werden sollten: zum ersten handelt es sich um Fragen zu den Einwirkungen auf das Wirtgestein, etwa um die Frage der Temperaturentwicklung bei den Endlagerkanistern und dem Zeitpunkt ihrer Verbringung ins Tiefenlager; zum zweiten wird die Frage der Forschungsentwicklung aufgeworfen, insbesondere der heute vorhersehbaren Zeiträume, während denen Forschung betrieben werden müsse, bis die Modelle der Langzeitsicherheit so weit validiert sind, dass mit der Einlagerung begonnen werden kann; zum dritten sind die Bedingungen des sicheren Betriebs während den verschiedenen Aktivitätsphasen detailliert auszuleuchten und darzulegen.

5.1 Einwirkungen auf das Wirtgestein

Eine der für die Sicherheit zentralen Parameter bei der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle ist die Temperatur der Kanister und der Temperaturpuls, der im Laufe der ersten Lagerzeit an das Gestein abgegeben werden (Nagra 2002a, 2002b). Die Figur 5.1 zeigt die Kurve der Zerfallswärme von Abfallkanistern mit radioaktiven Abfällen, zum einen mit 9 Brennelementen aus Siedewasserreaktoren (BWR), mit 4 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren [PWR, davon 1 mit MOX-Brennstoff]) beziehungsweise Abfallkanistern mit verglastem Abfall. Diese Kurven zeigen, dass bei hochaktiven Abfällen eine signifikante Temperaturabnahme erst weit nach 200 Jahren zu erwarten ist (insb. bei MOX-Brennelementen oder solchen mit hohem Abbrand). Für das Umgebungsgestein eines Tiefenlagers, insbesondere für die schlechter Wärme leitenden Tongesteine, ist die thermische Last eine bedeutende sicherheitstechnische Größe. Je niedriger diese bei der Einlagerung ist, desto kleiner ist der Impact (gekoppelte Prozesse) auf das Gestein. Ein Zuwarten bei der Einlagerung würde es erlauben, die Abfälle dichter zu deponieren, unter Einschränkung der Rahmenbedingungen, die bezüglich der Kritikalität zu erfüllen sind.



Figur 5.1: Entwicklung der Zerfallswärme von Abfallkanistern unter Berücksichtigung der Zeitdauer nach der Entladung aus dem Reaktor (nach Nagra 2002b, S. 124 bzw. 103)

Weitere zentrale Fragen betreffen das Auffahren des Tiefenlagers, die Bildung der „Excavation Damaged Zone EDZ“ und deren Schutz, insbesondere während der Phase bis zum Ende der Aufsättigung der verfüllten Lagerstollen und des Tiefenlagers.

5.2 Forschungsplanung und -entwicklung

Die bisher international verfolgten Endlagerungskonzepte weichen nur in beschränktem Mass voneinander ab. Wie bereits erwähnt, wurde das schwedische KBS-Konzept (mit Einlagerungsfeldern bestehend aus parallel angeordneten horizontalen Lagerstollen) von allen anderen Kernenergie nutzenden Ländern übernommen. Alle Forschungslaboratorien der Welt haben diese Lageranordnung ihren Forschungen zu Grunde gelegt. Wie die Forschungspläne solcher Programme oder Laboratorien zeigen (SKB 2013, MTP 2014) sind viele grundlegende Fragestellungen noch offen, etwa Fragen zu den effektiven Korrosionsraten von Kupfer (Hultquist et al. 2008, 2011, Sandia 2012, Swedish National Council for Nuclear Waste 2009), Fragen zum Verschluss der Zugänge durch Sand-Bentonit-Gemische bei Strahlung und Temperaturpuls, oder Fragen zu Strahlen bedingten Auswirkungen auf Tone (Sorptions). Viele dieser Fragen benötigen intensive Forschungsarbeit, die sich über Jahrzehnte oder länger hinziehen dürfte. Figur 5.2 gibt einen Überblick über wichtige Forschungsbereiche im Labor Mont-Terri.

Die Forschung und Entwicklung ist eines der zentralen Arbeitsfelder für ein Tiefenlager radioaktiver Abfälle. Grundlegende Fehler oder Unterlassungen rächen sich. Bekanntlich lassen sich alle Deponiesanierungen ausnahmslos auf Fehlentscheide im Management von Unternehmungen bzw. gutachterliche Fehlleistungen zurückführen, die wiederum in Sachzwängen, fehlender oder ungenügender Forschung und Entwicklung und eingeengten Sichtweisen der beigezogenen Experten begründet sind. Forschung und Entwicklung sollten daher gemäss wissenschaftlichen Prinzipien und Usancen ausgeführt werden, eigenständig und möglichst unabhängig von Interessen. Forschung und Entwicklung, die „kompetente“, „ungebundene“ und „freie“ Institutionen und Personen einbindet, sollten daher stark gefördert werden. Gute Beispiele für umfassend angelegte Forschungs- und Entwicklungsprogramme sind in den USA, der Schweiz oder Schweden entwickelt worden (DOE et al. 1979, swisstopo 2014, SKB 2013). Die IAEA hat bei der letzten Prüfung der Schweizer Nuklearinstitutionen empfohlen, die Forschung gemäss Kernenergiegesetz, Art. 86., zu fördern (IRRS 2012, S. 20-21) und das bisherige Erfahrungs- und Forschungsprogramm (siehe z.B. ENSI) stark auszudehnen.

5.3 Integrale Gesamt- und Massnahmenplanung

Wie in Kap. 4.5 ausgeführt, ist die Qualität von Planungen für den Erfolg bei der Umsetzung von Projekten entscheidend. Einer der zentralen Gründe für das Scheitern von Entsorgungsprojekten ist das Fehlen einer strategischen wie auch integrierten Planung. Die nuklearen Systeme der Kernenergie nutzenden Länder sind in eine Serie von Einzelanlagen mit Einzelbewilligungen unterteilt, die von Anlagebetreibern, Elektrizitätsgesellschaften teils auch von Eignern der öffentlichen Hand verwaltet und kontrolliert werden. Dieses Defizit erschwert eine integrale Gesamtplanung des Entsorgungssystems und erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass nachgelagerte Probleme auftauchen, die wiederum zu technischen Nachbearbeitungen und Verbesserungen, Zeitverlust und Akzeptanz verbunden sind. Die Figur 5.3 gibt einen Überblick über wichtige Felder, die bei der Planung und Projektierung eines Endlagers zu berücksichtigen wären. Deren Erforschung sollte baldmöglichst initiiert oder vertieft wer-

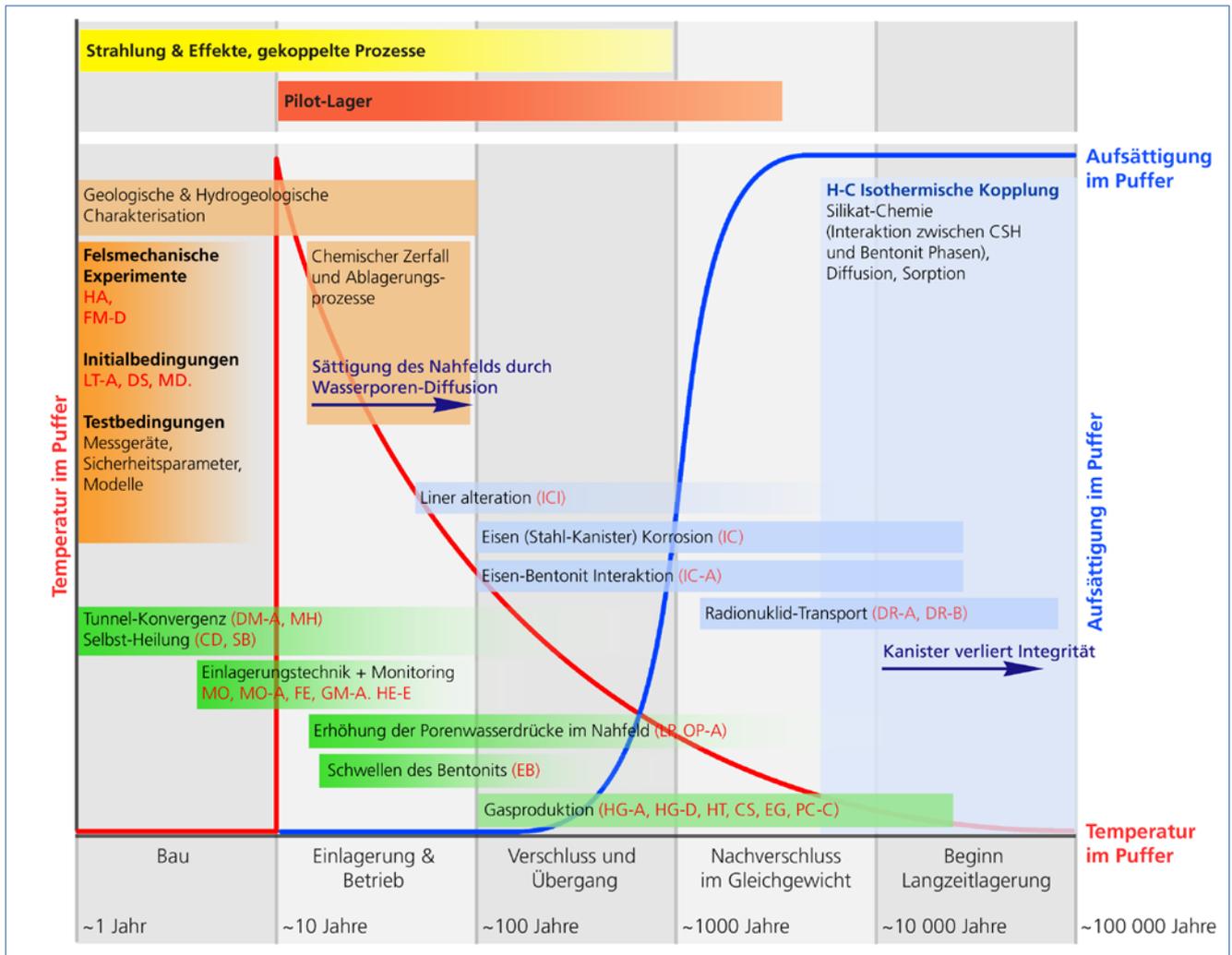
den. Integrale Gesamt- und Massnahmeplanungen sind ein wesentlicher Pfeiler für die Sicherheit von Anlagen.

5.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Ziel einer definitiven Lagerung von radioaktiven chemotoxischen Abfällen in geologischen Senken im Tiefuntergrund ist – wie schon mehrfach erwähnt – im Allgemeinen unbestritten. Es steht im Einklang mit dem Grundprinzip, toxische und gefährliche Abfälle vom Lebensraum künftiger Generationen dauerhaft fernzuhalten. Kritisch anzumerken bleibt aber, dass dieses an sich breit anerkannte Konzept bisher noch nie erfolgreich umgesetzt wurde: zum einen waren die Lagerzeiten zu kurz, um den Erfolg einer dauerhaften Isolation von Abfällen in Tiefenlagern von der Biosphäre nachzuweisen, zum anderen konnten bei solchen Lagern (insbesondere im Wirtgestein Salz) hydraulische Kurzschlüsse nicht vermieden werden. Es ist darum bei der weiteren Umsetzung dieses Konzeptes grosse Vorsicht geboten, im Hinblick darauf, die grossen Vorteile dieses Konzeptes nicht durch überstürztes Handeln zunichte zu machen. Die Misserfolge im Versuchsbergwerk Asse beziehungsweise in der Untertagedeponie StocaMine haben die Glaubwürdigkeit des Tiefenlagerkonzeptes erschüttert und die Akzeptanz solcher Projekte geschmälert.

Aus den bisherigen Erfahrungen lassen sich daher drei Erkenntnisse bezüglich der weiteren Planung und Umsetzung von Tiefenlagern gewinnen:

- Qualität geht vor Eile vor: Es besteht kein Anlass, die Umsetzung des Tiefenlagerkonzeptes zu überstürzen. Bis die letzten Kernkraftwerke in der Schweiz ihren Betrieb einstellen und die hochaktiven Abfälle so weit abgekühlt sind, dass sie eingelagert werden können, vergehen mindestens noch zwei weitere Generationen.
- Diese Feststellung sollte aber nicht zum Verlangsamten der bisherigen Bestrebungen bei der Standortsuche verleiten oder die notwendigen Forschungen abbremsen. Im Gegenteil: hier sollte gezielt und auf breiter Basis weiter gemacht werden. Besonders die Forschung sollte schon jetzt massiv ausgebaut werden, insbesondere auch die regulatorische Sicherheitsforschung, und zwar im Einklang mit den Empfehlungen der IAEA.
- Schliesslich ist eine integrale Gesamt- und Massnahmenplanung zu gewährleisten, welche das gesamte nukleare System umfasst und vernetzte, kohärente Planungen und Projektierungen in den verschiedenen Teilbereichen sicherstellt.



Figur 5.2: Zusammenstellung wichtiger laufender Forschungsbereiche im Opalinuston des Labors Mont-Terri (unten) beziehungsweise wichtiger weiterer Forschungen (oben), abgeänderte und ergänzte und Darstellung nach Bossart 2014



Figur 5.3: Zusammenstellung einiger wichtiger Aufgaben im Rahmen der Massnahmenplanung (Massnahmen-Barriere MB)

* Stilllegungs- und Entsorgungsfonds

Figur 5.3: Zusammenstellung einiger wichtiger Aufgaben im Rahmen der Massnahmenplanung

6 Schlussbetrachtungen, Empfehlungen

6.1 Schlussbetrachtungen

Im Rahmen der vorliegenden Analyse zum Stand „Endlagerung im Untergrund“ versus „Hüten der Abfälle durch die Gesellschaft“ wurden eine Anzahl grundlegender Fakten festgestellt, die wie folgt zusammengefasst werden können (Tabelle 6.1):

- einem „Hüten“ von Langzeit-Risiken wie jenem der radioaktiven Abfälle über lange gesellschaftliche Zeiträume kann nicht zugestimmt werden. Die historischen Evidenzen in Zusammenhang mit dem Unvermögen der Vernunft bei der Bewältigung von gesellschaftlichen Krisen beziehungsweise dem Versagen des Humanismus bei der „Domestizierung“ des Menschen (Sloterdijk 1999) sind derart eindeutig, dass nicht auf eine dauerhafte Stabilität von Gesellschaften gesetzt werden kann. Die hegelsche Deutung vom „Ende der Geschichte“ (Fukuyama), 1992 noch mit einem zwangsläufigen Triumph der Marktwirtschaft in Verbindung gebracht, ist spätestens seit dem Attentat auf das World Trade Center im September 2001 und den darauffolgenden Kriegen im mittleren Osten, vom Tisch. Die Menschheit kann sich auch künftig nicht auf das allseits lang ersehnte Paradies einstellen. Die Idee des ewigen „Hütens“ radioaktiver Abfälle und die Konzeptionen des Dauerlagers sind aus diesem Blickwinkel als obsolet anzusehen;
- in den letzten beiden Jahrzehnten hat sich die geologische Tiefenlagerung international zunehmend als das von der Fachwelt getragene Entsorgungskonzept entpuppt. Eine Vielzahl von Forschungslaboratorien wurden weltweit in verschiedenen möglichen Lagergesteinen (Kristallin-Gesteine, Tone, Salz, Diatomeen-Sedimente, siehe NEA 2013) eingerichtet. Trotz einer Vielzahl von Experimenten und guten Forschungsergebnissen, bleiben aber viele Fragen in Bezug auf die Langzeitsicherheit offen. Es wird erwartet, dass die experimentelle Forschung für Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle über Zeiträume von mindestens Jahrzehnten wenn nicht sehr viel länger weitergeführt werden muss, um die entsprechenden Nachweise für die Langzeitsicherheit zu erbringen. Generell scheint sich heute auch deshalb eine Tendenz zur Verlangsamung bei der konkreten Umsetzung der Tiefenlager für hochaktive Abfälle abzuzeichnen. Konkret bedeutet dies, dass die Zwischenlagerung dieser Abfälle über längere Zeiträume weitergeführt werden muss, was auch neue Herausforderungen in Bezug auf die Konditionierung von Abfällen darstellen könnte aber auch Vorteile bringt, was den Temperaturpuls im Tiefenlager angeht, der frisch eingelagerten Abfällen entstammt. Das „Hüten“ über eine bestimmte Zeit und die Dauer von bis zu einigen Generationen scheint in diesem Sinne fest zu stehen. Das Risiko eines zunehmenden Desinteresses der Gesellschaft an der Lösung der nuklearen Entsorgung ist ernst zu nehmen.
- Fest steht heute auch, dass beim Tiefenlagerkonzept nicht mehr allein passive Sicherheitsbarrieren vorzusehen sind. Eine aktive Begleitung des Tiefenlagers durch die Gesellschaft ist in der Zukunft ebenfalls notwendig, vor allem in den rund ersten tausend Jahren bis ein grosser Anteil der Spaltprodukte zerfallen ist. Mensch und Umwelt müssen also nicht nur vom Inhalt des Tiefenlagers geschützt werden, auch die Integrität des Lagers gegenüber möglichen Eindringversuchen des Menschen ist zu gewährleisten. Dass eine Gesellschaft sich über einen solchen Zeit-

raum aktiv einbringt erscheint im Lichte der historischen Erfahrungen grundsätzlich als machbar. Es braucht eine Kultur des „Hütens“, wenn sich diese auch „nur“ auf die Erinnerungskultur, die Archive oder die Markierung von Standorten bezieht (siehe dazu Buser 2013, NEA 2014).

- Bei schwach- und mittelaktiven Abfällen gibt es keinen Grund zuzuwarten und Zwischenlager über längere Zeiträume zu betreiben. Es sollten grundsätzlich zwei Strategien verfolgt werden. Für sehr schwachaktive Abfälle mit Lagerzeiten von unter 300 Jahren bis zur Erreichung der Freigrenze sollte überlegt werden, ob es nicht sinnvoller ist, eine „Hüte“-Strategie umzusetzen und Abklinglager für solche Abfälle einzurichten. Dies könnte etwa durch eine Lagerung in gesicherten Kavernen erreicht werden. Der Vorteil ist, dass sich hier Materialien mit grösserem Störpotential (z.B. Gasbildung) aus dem SMA-Endlager entfernen und teils wiederverwenden oder normal deponieren lassen (z.B. CERN-Abfälle). Die Umsetzung dieser Strategie bedingt in der Schweiz eine Anpassung der Gesetzgebung.

Für den grossen Teil der schwach- und mittelaktiven Abfälle sollte die Forschung und die Projektplanung eine Umsetzung eines Tiefenlagers in absehbaren Zeiträumen (einige Jahrzehnte) erlauben. Es ist davon auszugehen, dass gewisse Abfallkategorien nachzubehandeln sind – dem zu diesem Zeitpunkt entsprechenden Stand der Wissenschaft und Technik.

Tabelle 6.1 fasst diese 4 wichtigen Folgerungen graphisch zusammen.

	Zwischenlager	Abklinglager < 300 y <small>(Dauerlager bis Freigrenze erreicht)</small>	Langzeit- zwischenlager <small>(extended storage / AFR / NRMS)</small>	Dauerlager (Hüten)	Bemerkungen
SMA (<300 y) <small>Kurzlebige Abfälle</small>					Neuer Lagertypus
SMA (>300 y)				nicht anwendbar	Umsetzung möglichst bald
TRU-Wastes HAA				nicht anwendbar	bis Tiefenlager oder andere Option bereit
Zeitraum (Jahre)	<60		100-300		∞

Tabelle 6.1: „Hüte“- oder Zwischenlager-Strategien im Umgang mit radioaktiven Abfällen

6.2 Empfehlungen

Im Hinblick darauf, die oben dargelegten Strategien umzusetzen, wird empfohlen:

- a) Abklinglager für kurzlebige schwachaktive Abfälle vorzusehen, gesetzlich zu erlauben, zu planen und einzurichten; aufgrund der Lagerdauer von 300 Jahren sollten solche Abklinglager im Auftrag des Staates betrieben werden.
- b) SMA-Tiefenlager möglichst gezielt anzugehen und umzusetzen. Dabei sollen auch Lösungen für Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) bereitgestellt werden, die weit über das bisher vorgesehene Verschlussdatum hinausgehen (siehe dazu Zeitpläne der Nagra in Nagra 2008) ¹⁶
- c) ein zentrales, gut geschütztes oberflächennahes Langzeitzwischenlager insbesondere für hochaktive und langlebige Abfälle einzurichten bis ein Tiefenlager oder eine andere Lösung umsetzbar wird. Es ist zentral dafür zu sorgen, dass Sicherheit auch bei weniger stabilen gesellschaftlichen Situationen möglichst gut gewährleistet werden kann; die Ausleuchtung solcher Situationen sollte möglichst gezielt erfolgen;
- d) die Planung für Tiefenlager für hochaktive Abfälle fortzusetzen unter Einbezug der Möglichkeiten von internationalen Beteiligungen;
- e) die Forschung und Entwicklung gemäss Art. 86 Kernenergiegesetz stark auszudehnen, insbesondere auf von Betreibern von Kernkraftwerken unabhängige wissenschaftliche Institutionen, Fachbüros und Experten

Zürich, im August 2014

Marcos Buser

¹⁶Gemäss der im Entsorgungsprogramm 2008 der Nagra dargelegten Planung endet der Einlagerungsbetrieb im SMA-Lager etwa um das Jahr 2050. Der Bund (Bundesamt für Gesundheit) hat die sachgerechte Entsorgung der Abfälle aus den Bereichen Medizin, Industrie und Forschung (MIF) zu beaufsichtigen. Da abzusehen ist, dass die MIF-Abfälle auch nach dem Ende der Einlagerung weiter produziert werden, ist dieser Widerspruch auszuräumen.

Literatur

Anders Günther (1984/2011): Die Zerstörung unserer Zukunft, Diogenes

Areva (2013): Managing degradation of materials in used nuclear fuel dry storage, TN International Areva Group, France, IAEA TM 45455, Used Fuel Storage Options, Vienna 2-4 July 2013

Baeten P. (2012): Myrrha Project – status update, Advance fission research in Horizon 2020, ESNII Conference, Brussels 25 June 2012

http://www.snetp.eu/www/snetp/images/2.p.baeten_myrrha_technical_esnii_25.06.pdf

BfE (2014): Newsletter Tiefenlager, April 2014, Bundesamt für Energie

Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (2012): Transportation and Storage Subcommittee, Report to the Full Commission, Updated Report, January 2012

Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future (2012a): Disposal Subcommittee, Report to the Full Commission, Updated Report, January 2012

Buser Marcos (1997): Guardianship versus disposal: a modern-day conflict with implications for the future, Nagra bulletin No. 30

Buser Marcos (1998): „Hüte“-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblick, im Auftrag der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Januar 1998

Buser Marcos (1998): Bergversatz von Sonderabfällen in deutschen Salzbergwerken: Evaluation der heutigen Beseitigungs- und Versatzpraxis im Zusammenhang mit den Exportanträgen für Abfälle aus der Schweiz, Entwurf August 1998, unveröffentlichtes Gutachten zuhanden Bundesamt für Umwelt Bern

Buser Marcos (2011): Erfahrungswerte bei der Planung und Umsetzung des Sachplans und des Realisierungsplans geologische Tiefenlager und Planungsgrundlagen für das weitere Vorgehen, Version 3, zuhanden Eidgenössische Kommission für die nukleare Sicherheit (KNS), Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft INA GmbH, Zürich, September 2011

Buser Marcos (2013): Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories, NEA/RWM/R(2013)5, December 2013

Butler Declan (2014): Call for better oversight of nuclear waste storage, accident at US repository need for tougher safety monitoring, say experts, Nature 15 May 2014, Vol. 509, p. 267-268

Claus Walter D. (1955): Considérations fondamentales sur l'élimination d'importantes quantités de déchets radioactifs dans le sol et la mer, Actes de la Conférence Internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève 8 – 20 août 1955, Vol. 9, 1956

Codée Hans (2014): Radioactive Waste Management in the Netherlands: Long-Term Storage and Disposal, Covra N.V., 19. 02.2014, presentation to Entria

Copil (2011): Comité de Pilotage Stocamine, Rapport d'expertise, juillet 2011

Damveld H., Bannink D. (2012): Management of spent fuel and radioactive waste, nuclear monitor may 2, 2012

Darge Walter (2011): Permanentes Atommüll-Lager, Pyramiden-Modell, Burger Landstrasse 70C1, 29227 Celle, 30.01.2011

Darge Walter (2012) Für ein permanentes Atommüll-Lager im Rahmen von „Arbeit an unlösbaren Problemen“, Denkerei Berlin, Oranienstrasse 2, 12. April 2012

de la Ferté Jacques (1992): L'art au service des déchets radioactifs, Bulletin de l'AEN, Agence de l'énergie nucléaire OECD, printemps 1992

De Laguna Wallace (1959): What is safe waste disposal? Bull. Atomic Scientists Vol. 15, p. 35-43

Diamond Jared (2011): Kollaps, Warum Gesellschaften überleben oder untergehen, Fischer Taschenbuch Verlag

DOE & USDS (1979): Earth Science Technical Plan for Mined Geologic Disposal of Radioactive Waste, Draft, Department of Energy & U.S. Geological Survey, TID 29-018

DOE (2012): Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-Term Storage and Transportation of Used Fuel, Rev. 0, Fuel Cycle Research & Development

DOE (2014): Accident Investigation Report, Phase 1, Radiological Release Event at the Waste Isolation Pilot Plant on February 14, 2014, Department of Energy, Office of Environmental Management, April 2014

DOE (2014a): Accident Investigation Report, Underground Salt Haul Truck Fire at the Waste Isolation Pilot Plant on February 5, 2014, Department of Energy, Office of Environmental Management, March 2014

Donath Fred, Pohl Robert (1982): Debate on radioactive waste disposal, Physics Today, December 1992

Eiden W., Heidenreich M. (1999): Modellierung und Simulation dynamischer Systeme, mit DYNASYS-Anwendungsbeispielen, Universität Kaiserslautern

ENSI (2014): Erfahrungs- und Forschungsbericht 2013, Entwicklungen im Bereich der Grundlagen der nuklearen Aufsicht, Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat

EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Schlussbericht, im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 31. Januar 2000

Enresa (o.J.): El Almacén Temporal Centralizado, Dossier de Prensa, sin fecha

Enresa (2006): Sexto Plan General de Residuos Radioactivos, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Junio 2006

Flynn J., Kasperson R., Kunreuther H., Slovic P. (1997): "Redirecting the US High-Level Nuclear Waste Program, Environment, Vol. 39, April 1997

Fukuyama Francis (1992): The End of History and the Last Man, Free Press

Galbraith J.K. (2005): Der grosse Crash 1929, Ursache, Verlauf, Folgen, Finanzbuchverlag München

GRS (2004): Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen, Gesellschaft für Anlage- und Reaktorsicherheit, Dezember 2004

Hammond Philip R. (1979): Nuclear Waste and Public Acceptance, American Scientist, Vol. 67

Hatch L.P. (1953): Ultimate disposal of radioactive waste, American Scientist, Vol. 41, Nr. 3

Hollocher Thomas (1975): The nuclear fuel cycle, MIT Press, Cambridge Massachusetts / London England, p. 244

Holon (2013): Projektidee – Konzeption zur Wächterschaft von Atommüll, HüterInnen des giftigen Feuers, Holon-Institut

Huber Konrad (1957): Die universale Ordnung der friedlichen Verwendung der Atomenergie, Europa-Archiv, 12. Jahr, 20. August 1957

Hultquist G., Szakalos P., Graham J., Sproule G. et al. (2008): Detection of hydrogen in corrosion of copper in pure water, 17th International Corrosion Conference

Hultquist, G., Graham, M. J., Szakalos, P., Sproule, G. I. et al. (2011): Hydrogen gas production during corrosion of copper by water, Corrosion Science 53(1), 310-319.

IAEA (1972): Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 6-16 September 1971, IAEA Vol. 11, p. 465-471

IAEA (1998) Interim Storage of Radioactive Waste Packages, Technical Report Series No. 390, International Experts, International Atomic Energy Agency, October 1998

IAEA (1999): Retrievability of high-level waste and spent nuclear fuel, Proceedings of an international seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in Co-operation with the International Atomic Energy Agency, Kasam, held in Saltsjöbaden, Sweden, 24–27 October 1999

IAEA (2003): The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability, A Position Paper of International Experts, International Atomic Energy Agency, June 2003

IAEA (2003a): Radioactive Waste Management – Status and Trends, International Atomic Energy Agency, WMDB/ST/3, August 2003

IAEA (2006a): Storage of Radioactive Waste, International Experts, International Atomic Energy Agency, November 2006

IAEA (2006b): Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities, International Atomic Energy Agency, May 2006

IAEA (2009): Geologic Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability, International Atomic Energy Agency, NW-T-1.19, January 2009

IAEA (2011): Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Switzerland, 20 November to 2 December 2011, Department of Nuclear Safety and Security, International Atomic Energy Agency, IAEA-NS-IRRS-2011/11

Ingenieurbureau Heierli (1979): Forschungs- und Entwicklungsbedürfnisse im Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb eines tiefliegenden Kavernenendlagers für hochaktive verglaste Abfälle in der Schweiz, z.Hd. Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (EIR), 30. August 1979, Nr. 1005, S. 11

Intac (2013): Ersteinschätzung des Ökotoxizitätspotentials, Kurzstudie, zuhanden Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech, März 2013

Ipsen D., Kost S., Weichler H. (2010): Analyse der Nutzungsgeschichte und der Planungs- und Beteiligungsformen der Schachtanlage Asse II, Endbericht, Arbeitsgruppe Empirische Planungsforschung, Universität Kassel

Jülich (2007): RED-IMPACT, Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal, Synthesis Report, September 2007, Forschungszentrum Jülich GmbH

Kreuzer Konradin (1990): Nukleare Ethik – Das Hüte-Konzept, Wasser-Boden-Luft 12/90

Kromp Wolfgang (2009a): Atommüll-Tiefenlager: Welche Technik hält schon eine Million Jahre, Beobachter 14/09

Kromp Wolfgang (2009b): Atommüll XY ungelöst, Von der Unbeherrschbarkeit langer Zeiträume, Institut für Risikoforschung der Universität Wien, Vortrag Schweizerische Energie-Stiftung SES, Zürich, 16. Juni 2009

Le Roy Ladurie Emmanuel (1983): Histoire du climat depuis l'an mil, Champs histoire

Lentz Wolfgang (1993): Neuere Entwicklungen in der Theorie dynamischer Systeme und ihre Bedeutung für die Agrarökonomie, Volkswirtschaftliche Schriften Heft 432, Duncker&Humblot Berlin

Lipschutz Ronnie D. (1981): Das Problem des Atommülls, S. 158, in Philipp Kreuzer, Peter Koslowski, Reinhard Löw: Atomkraft – ein Weg der Vernunft, R. Piper & Co. Verlag

Macy Joanna (1991): Guardians of the future, context no. 28

Macy Joanna (1992): Projekt Verantwortung vor der Zukunft, Spuren, Heft 23

Malchow Horst (2012): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft, Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück, Beitrag Nr. 54

Matthes Felix, Appel D., Frogatt A., Kreusch J. et al. (2006): Mythos Atomkraft, ein Wegweiser, Heinrich-Böll-Stiftung

Nagra (1978): Die nukleare Entsorgung in der Schweiz, VSE, GKBP, UeW, Nagra, 1978

Nagra (2002a): Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay, Nagra Technical Report 01-04, October 2002

Nagra (2002b): Project Opalinus Clay, Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, December 2002

Nagra (2008): Entsorgungsprogramm der Entsorgungspflichtigen, Technischer Bericht NTB 08-01, Oktober 2008

NEA (2006): Comprendre les attentes de la société dans la gestion des déchets radioactifs et s'y adapter, enseignements principaux et expériences du Forum sur la confiance des parties prenantes, Agence pour l'Énergie Nucléaire, OECD, NEA No. 5297

NEA (2013): Underground Research Laboratories (URL), NEA RWM/R(2013)2, February 2013

NEA (2014): Expert Group on Preservation of Records, Knowledge and Memory Preservation across Generations, Summary Record of the Sixth Meeting of RK&M Across Generations, 5-6 February 2014, Issy-les-Moulineaux, France

NEA (2014a): Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2014)3, March 2014

Neeft Erika (2014): Dutch Research Programs in Geological Disposal of Radioactive Waste, Covra N.V., Entria – 19.02.2014

Nirex (2004a): A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, Nirex Report N/108, June 2004

Nirex (2004b): Literature Review of Approaches to Long-Term Storage of Radioactive Waste and Materials, Nirex Report N/107, July 2004

NRC (o.J.): Dry Cask Storage of Nuclear Spent Fuel Division of Spent Fuel Storage and Transportation, U.S. Nuclear Regulatory Commission

<http://www.sseb.org/downloads/Presentations/TRU/Easton.pdf>

Perrow Charles (1992): Normale Katastrophen, Campus-Verlag GmbH Frankfurt/New York

Pfister Christian (1999): Wetternachsage, 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen, Verlag Paul Haupt Bern Stuttgart Wien

Pabalan Roberto T., Jarzempa Mark S., Abrajano Jr. Teofilo A., Pickett David A. et al. (1998): Hanford Tank Waste Remediation System, High-Level Waste Chemistry Manual, Prepared for Nuclear Regulatory Commission, Contract NRC-02-97-009, Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, Texas, CNWRA 97-008, Revision 1, June 1998

Roseboom Eugene (1994): Case for retrievable high-level nuclear waste disposal, Proceedings of the 5th Annual International Conference on High Level Radioactive Waste Management, Las Vegas, NV, USA, 22 May 1994 through 26 May 1994

Roßnagel Alexander (1983): Bedroht die Kernenergie unsere Freiheit, C.H. Beck München

Ruge, M. (2011). 'Stimmungen und Erwartungen im System der Märkte – eine Analyse mit DPLS-Modellen.', Prognosen mit dynamischen Strukturgleichungsmodellen – ein Ausblick, in Nikitina T., Schöler K., Beiträge zur Sektoralen Ökonomie, Universität Potsdam

Sandia (2012): Technical Work Plan: Environmental Degradation of Materials Relevant to Interim Storage and Permanent Disposal of Used Nuclear Fuel, Fuel Cycle Research & Development, FCRD-UFD-2012-000052, SAND2012-0532P

SEI (1998): Proceedings of the International Symposium on Radioactive waste Disposal: Health and Environmental Criteria and Standards, August 31 – September 4 1998, Stockholm Environment Institute

Shrader-Frechette K. (1993): Burying Uncertainty, Risk and the Case Against Geological Disposal of Nuclear Waste, University of California Press

SKB (1977): Project for handling and storage of vitrified high-level waste, KBS TR 35

SKB (o.J.): Clab – Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel

SKB (2013): RD&D Programme 2013, Programme for research, development and demonstration methods for the management and disposal of nuclear waste, Technical Report TR-13-18 September 2013

Sloterdijk Peter (1999): Regeln für den Menschenpark, Suhrkamp Sonderdruck

Sousselier Y., Pradel J. (1971): La gestion des déchets radioactifs et leur stockage à long-terme, IAEA Proceedings Series, Conférence Internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève 6 – 16 septembre 1971, Vol. 11

Swedish National Council for Nuclear Waste (2009) : Mechanisms of Copper Corrosion in Aqueous Environments, Workshop November 16th, 2009

Swisstopo (2014): Mont Terri Project, Agreed Programme Proposal for Phase 20, Federal Office of Topography swisstopo, Swiss Geological Survey, 22 May 2014

Thommen Lukas (2009) : Umweltgeschichte der Antike, Beck'sche Reihe, Verlag C.H. Beck München

Vasold Manfred (1991) : Pest, Not und schwere Plagen, C.H. Beck München

Watzlawick Paul (1976): Wie wirklich ist die Wirklichkeit? Wahn, Täuschung, Verstehen. Piper München 1976

Western, Forrest (1948): Problems of waste disposal, Nucleonics, August 1948

Zen E-An (1980): Dedicated-site, interim storage of high-level nuclear waste as part of the management system, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol 77, nr. 11, p. 6269-6271

Figuren und Tabellen

- Figur 2.1: Realisierungszeitplan aufgrund des Schweizerischen Entsorgungskonzepts in den achtziger Jahren und beteiligte Generationen
- Figur 2.2: Realisierungszeitplan gemäss Schweizerischem Entsorgungsprogramm von 2008 und beteiligte Generationen.
- Figur 2.3: Realisierungszeitplan aufgrund von Erfahrungswerten 2011, Anzahl beteiligter Generationen
- Figur 2.4: Historische Realisierungszeitpläne von bedeutenden Bauwerken und Vergleich mit Umsetzungsprogrammen für radioaktive Abfälle
- Figur 2.5: Grundfragen bei Entscheiden und erkenntnistheoretische Bezüge
- Figur 3.1: Vom separaten Zwischenlager und Endlager zu einem sicherheitstechnisch vernetzten System.
- Figur 3.2: Wichtigste Anlagen im nuklearen Entsorgungssystem
- Figur 4.1: Risikoentwicklung am Beispiel des schweizerischen Kernkraftwerkprogramms
- Figur 5.1: Entwicklung der Zerfallswärme von Abfallkanistern unter Berücksichtigung der Zeitdauer nach der Entladung aus dem Reaktor
- Figur 5.2: Zusammenstellung wichtiger laufender Forschungsbereiche im Opalinuston des Labors Mont-Terri
- Figur 5.3: Zusammenstellung einiger wichtiger Aufgaben im Rahmen der Massnahmenplanung
- Tabelle 3.1: Anlagen in der nuklearen Entsorgung und Aspekte, die Einfluss auf die Qualität des Entsorgungssystems haben.
- Tabelle 6.1: „Hüte“- oder Zwischenlager-Strategien im Umgang mit radioaktiven Abfällen

ENSI 33/380

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, E-Mail Info@ensi.ch, www.ensi.ch