



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Abteilung Recht und Sicherheit

Mai 2010

Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle

Literaturstudie zum Stand der Markierung von geologischen Tiefenlagern



Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Marcos Buser, Gutachten und Projekte, Funkackerstrasse 19, 8050 Zürich

Autor:

Marcos Buser

Begleitgruppe:

Dr. Michael Aebersold, Bundesamt für Energie BFE

Simone Brander, Bundesamt für Energie BFE

Dr. Markus Hugli, Eidgenössisches Nuklearinspektorat, ENSI

Stefan Jordi, Bundesamt für Energie BFE

Dr. Hans Wanner, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Titelbild:

Gedenkschrift zur Grenzsicherung im ersten Weltkrieg auf einem Kalkfelsen am Bahnhof St-Ursanne (Kanton Jura), Marcos Buser

Lektorat:

Adrian Lüthi

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist allein der Autor verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	4
1	Einleitung	6
2	Das System: Prognostizierbarkeit von Wandel und methodische Fragestellungen	7
3	Grundsatzfragen bei der Analyse des heutigen Wissensstandes, Vorgehen.....	11
3.1	Grundsatzfragen zu den Markierungsabsichten und -zielen	11
3.2	Fragen zu den spezifischen Teilsystemen	11
4	Grundsatzfragen bei der Analyse des heutigen Wissensstandes	14
4.1	Schutzziele und Handlungsmotive für das Eindringen in ein Tiefenlager	14
4.2	Grundsatzfragen zu den Markierungsabsichten und -zielen	18
4.3	Fragen zu den spezifischen Teilsystemen	26
4.4	Markieren oder nicht markieren?	57
5	Zum Stand der Markierungsprojekte in Kernenergie nutzenden Ländern: ein Überblick	59
	Folgerungen	62
	Literatur	64
	Glossar wichtiger im Text verwendeter Begriffe	75

Zusammenfassung

Der Mensch pflegt einen eigenartigen Umgang mit Abfällen. Auf der einen Seite sollen Abfälle möglichst weit weg aus der eigenen Lebenswelt entfernt werden, denn Abfälle stinken, ziehen Ungeziefer an, sind gefährlich oder, schlimmer noch, strahlen. Auf der anderen Seite üben Abfälle aber auch eine spezielle Faszination auf den Menschen aus, welcher er sich nur schwer entziehen kann. Das Gefährliche und Abstossende an den Abfällen hat auch einen gewissen Lockcharakter. Kaum befinden sich Gefahrenstoffe in der Umgebung des Menschen, klammert er sich gerne psychologisch an solchen Risiken fest, denn diese faszinieren auch, wie viele Beobachtungen an Altlastenstandorten, Sondermülllagern oder eben auch Zwischenlagern mit radioaktiven Abfällen zeigen. So ist anzunehmen, dass diese widersprüchliche Beziehung des Menschen zu seinen Abfällen sich auch in der Zukunft fortsetzen wird.

Bei radioaktiven Abfällen ist diese Beziehung besonders stark ins Bewusstsein der öffentlichen Wahrnehmung gedungen. Anders als für chemische Sonderabfälle, die mehr oder weniger ungehindert in tiefe ehemalige Bergwerke versenkt werden und die kaum als grössere Bedrohung empfunden werden, entspinnen sich um Tiefenlager für radioaktive Abfälle äusserst hitzige Debatten. Dabei werden von der Gesellschaft Sicherheiten eingefordert, die sich bis zu einer Million Jahre erstrecken. Es gibt inzwischen in der publizierten Literatur Millionen von Büchern, Reporten, Artikel und Analysen, welche die Gefahren radioaktiver Abfälle thematisieren und aufzeigen, wie allenfalls die in Tiefenlagern versenkten Abfälle wieder freigelegt werden könnten. Deshalb kam auch schon frühzeitig der Gedanke auf, wie man einen zusätzlichen Schutz solcher Tiefenlager errichten könnte, welcher das Risiko eines Eindringens in den Untergrund zwar nicht verhindern, aber doch stark vermindern könnte. Das aus solchen Überlegungen hervorgegangene Programm der «Markierung» von Endlagerstätten nahm in den frühen Achtzigerjahren des letzten Jahrhunderts in den USA seinen Anfang und wurde in der Zwischenzeit von vielen Nuklearenergie nutzenden Ländern weiter entwickelt.

Die vorliegende Studie greift das Thema der «Markierung» von Tiefenlagern aus der Sicht der Schweizer Behörden erstmals auf. Sie folgt damit den Empfehlungen der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), den in der Folge im Kernenergiegesetz und dessen Ausführungserlassen aufgenommenen Regelungen zur Markierung von Tiefenlagern sowie der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (AGNEB) koordinierten Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle vom 26. August 2008.

Die vorliegende Studie zur Markierung von Tiefenlagern ist als Literaturstudie konzipiert. Sie trägt das Wissen und die Erfahrung, welche in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Markierung gewonnen wurden, in gebündelter Form zusammen und ermöglicht einen Überblick über den derzeitigen Stand der Diskussionen in der Frage der Markierung von Tiefenlagern. Die Studie wurde bewusst inter- oder transdisziplinär angelegt. Es sollten möglichst unterschiedliche Perspektiven eingebracht werden, unter denen die Markierung betrachtet wird, sowohl was Sicherheit, Risiken und Techniken der Markierung oder Möglichkeiten der Kommunikation mit der Zukunft anbelangt. Aus dieser Auseinandersetzung sollten Möglichkeiten wie Probleme, Stärken und Widersprüche der Markierung von Tiefenlagern sichtbar gemacht werden können und die Diskussion auf eine möglichst emotionsarme Basis gelegt werden. Zu diesem Zweck wurden 28 verschiedene Themen ausgeleuchtet, die unter sechs Themenblöcken zusammengefasst wurden: Grundsatzfragen zum Thema Markierung (Block 1), Fragen zu Mensch und Gesellschaft (Block 2), zu Umwelt und Untergrund (Block 3), zu Markierung und Bauwerk (Block 4), zur Informationstradierung über die Zeit (Block 5) sowie über die Fehleranfälligkeit von Markierungssystemen (Block 6). Jede dieser thematischen Blöcke wird durch eine kurze Problemstellung eingeleitet. Darauf folgt eine Ausleuchtung der Frage in der Fachliteratur. Schliesslich wird jede Frage kurz aus der persönlichen Optik des Autors gewürdigt.

Im Ergebnis zeigt die Markierungsstudie, dass im Wesentlichen alle relevanten Fragestellungen zur Markierung bereits in der Literatur auf die eine oder andere Art angesprochen wurden. Ob es sich nun um Szenarien des möglichen künftigen Eindringens in ein Tiefenlager handelt, um die Dauerhaftigkeit von Trägermaterialien für den Informationstransfer, um gesellschaftliche Stabilität und den Verlust von Information, um Strategien, wie Redundanz hergestellt werden kann: All diese Fragen wurden bereits

aufgeworfen, diskutiert, entwickelt und vertieft. Natürlich bleiben auch viele Fragen ungeklärt – nicht in erster Linie im technischen Bereich, der als weitgehend geklärt angesehen werden kann, sondern viel mehr in der Art und Weise, wie Markierung dereinst umgesetzt werden könnte.

Neu an dieser Studie ist der Blickwinkel, aus dem Markierung oder Sicherheit betrachtet wird: Es werden die möglichen Antriebskräfte des Menschen und der Gesellschaft betrachtet, die Markierungsprogramme beeinflussen oder überflüssig machen könnten. Es wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass künftige Generationen kaum darauf warten, unsere Abfälle an die nächste Generation zu übergeben, sondern dass sie vermutlich froh sein werden, wenn wir ihnen ein möglichst einfach zu handhabende Lösung hinterlassen. Ob unsere Gedanken so weit reichen, dass wir alle denkbaren Gefährdungspfade prospektiv richtig ausgeleuchtet haben, bleibt natürlich offen. Dennoch lässt die wiederkehrende Deckungsgleichheit von Gedanken in der Literatur, die von vielen spezialisierten Institutionen, Gremien sowie Autorinnen und Autoren wie auch von Laien über Jahrzehnte geäussert wurden, den Schluss zu, dass die wesentlichen Sicherheitsprobleme und die wichtigsten Schwachstellen im Informationstransfer über die Zeit vermutlich vollständig erkannt wurden. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang die Feststellung, dass Erkenntnisse aus Geschichte und Gesellschaft auch einen korrekativen Einfluss auf heutige Konzepte und Projekte der Tiefenlager in den verschiedenen Nuklearenergie nutzenden Ländern ausüben sollten. Ein solcher Faktor soll an dieser Stelle bereits genannt werden: Die Geschichte zeigt, dass der Mensch ein absolut optimaler Verwerter ist. Anders gesagt soll der wesentliche Leitfaden für die Sicherheit eines Endlagers darauf beruhen, keine wiederverwertbaren Materialien oder Gegenstände einzulagern oder für die Markierung eines Tiefenlagers zu benutzen. So bleibt denn nur zu hoffen, dass die vorliegende Studie zur Klärung der Markierungsfrage in der Schweiz beiträgt und eine umfassende Diskussion der Markierungsfrage fördert.

Im Mai 2010

Marcos Buser

1 Einleitung

Die technischen Konzeptionen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle wurden bereits in den späten 40er- und 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt. Die Palette der betrachteten Lösungen war von Beginn weg sehr breit und umfasste – nebst der klassischen Endlagerung in tiefen geologischen Schichten – etwa Strategien zur Verpressung von flüssigen Abfällen in ausgedienten Bohr- und Förderlöchern, zur Verdünnung von flüssigen Abfällen im Meer, zur Lagerung der Abfälle in Wüsten oder zu ihrer Einlagerung im Eis des Südpols. Im Laufe der Zeit erwies sich aber, dass nur die Endlagerung der radioaktiven Stoffe im Tiefuntergrund der Kontinente wirklich durchführbar ist und die erforderlichen Sicherheitsansprüche über die langen zu betrachtenden Einschliesszeiten zu erfüllen vermag. Die Strategie der Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund hat sich heute durchgesetzt.

Parallel zu dieser Entwicklung fanden aber seit den 70er-Jahren auch andere Fragestellungen zunehmend Beachtung, etwa Fragen zur Rückholbarkeit der Abfälle, zur Überwachung der Endlager oder zu politischen und gesellschaftlichen Auswirkungen solcher Lagerkonzepte. Thematisiert wurde schon bald unter prägnanten Titeln wie etwa «Warnungen an die ferne Zukunft» auch die Übermittlung von Information über Risikotechnologien an künftige Generationen. Diese Fragestellungen sollten im Laufe der Jahre sukzessive vertieft und an konkreten Standorten oder Entsorgungsprogrammen detailliert werden. In der Schweiz sind in den 80er- und 90er-Jahren erschienene Publikationen Ausdruck der Auseinandersetzung mit diesem Thema. Die vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) eingesetzte Expertengruppe «Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle» EKRA nahm die Frage der Markierung von Endlagern in ihre Empfehlungen zur unabhängigen Forschung auf (EKRA 2002, S. 10). Im Rahmen der Konkretisierung dieser unabhängigen Forschung beauftragte das Bundesamt für Energie eine Arbeitsgruppe, die Schwerpunkte dieser Forschungstätigkeit festzulegen. Aufgrund ihrer Empfehlungen wurde das Thema «Markierung und Wissenserhalt» in die Liste der wichtigen Forschungsvorgaben aufgenommen (Arbeitsgruppe Forschungsprogramm 2008, S. 7 – 8).

Das Thema Markierung bewegt die Diskussion rund um geologische Tiefenlager. Eine zentrale Frage, die auch in der Literatur immer wieder auftaucht und kontrovers debattiert wird, ist, ob eine Markierung überhaupt die erhoffte Warnfunktion an künftige Gesellschaften wahrnehmen kann. Diese Debatte zeigt, dass es unterschiedliche Argumente für und wider die Markierung gibt. Diese Debatte spiegelt die Schwierigkeit wieder, kohärente Antworten auf die gestellten Fragen zu finden.

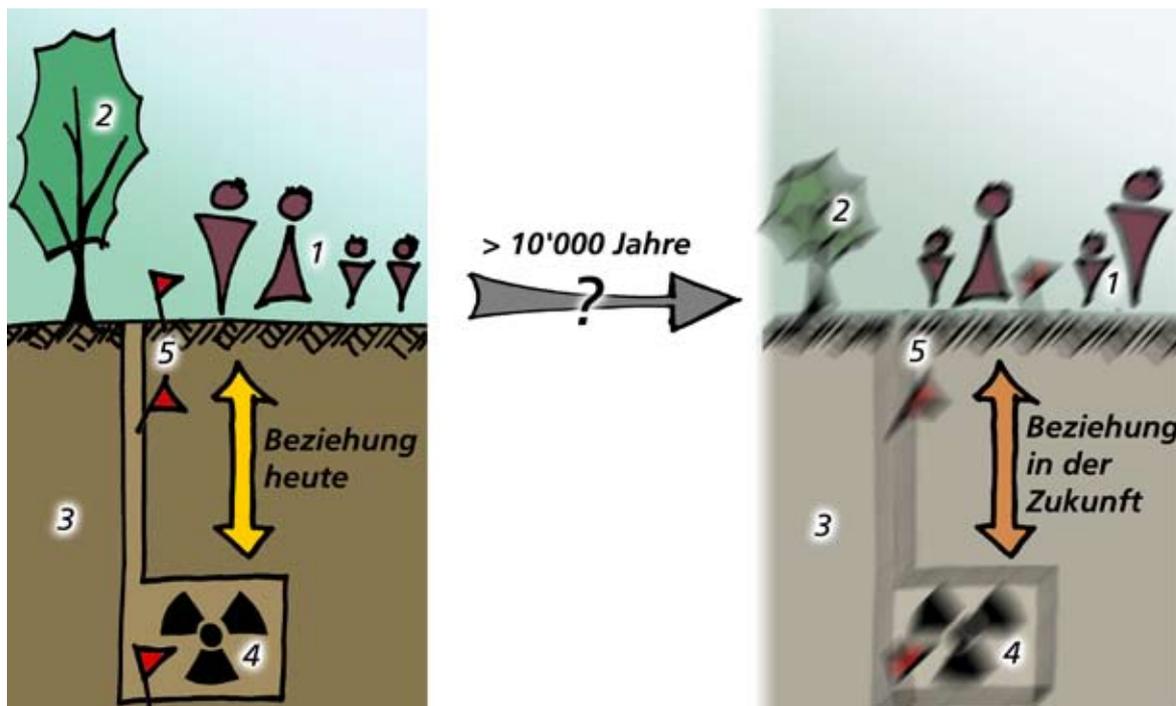
Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, einen Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich Markierung und Wissenserhalt darzustellen. Sie soll eine Grundlage zur Diskussion liefern, wie die Schweiz diese Fragen handhaben soll. Zuerst wird in der Studie der Frage nachgegangen, was Markierungen grundsätzlich können sollen und welche Aufgaben sie erfüllen können oder müssen. Danach wird ausgeleuchtet, welche Bedingungen für den Wissenserhalt über die langen Lager-Zeiträume in Betracht zu ziehen sind. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Frage, wie lange eine Markierung sinnvoll oder funktionstüchtig sein kann.

Gegliedert ist der Bericht wie folgt: In Kapitel 2 werden das System des geologischen Tiefenlagers und dessen Veränderungen in der Zeit umrissen. Aufgrund dieser groben Systemdarstellung werden in Kapitel 3 Grundfragen ermittelt, welche erforderlich sind, um zu ermitteln, ob ein Markierungsprojekt für ein Endlager sinnvoll ist oder nicht. Kapitel 4 versucht einen Teil der publizierten Literatur nach eben diesen Grundfragen auszuwerten. Schliesslich werden in Kapitel 5 erste Antworten auf diese Frage gegeben, in welche Richtung sich die Diskussion um «Markierung» entwickeln könnte.

2 Das System: Prognostizierbarkeit von Wandel und methodische Fragestellungen

Eine der wesentlichen Grundfragen, die sich das Individuum wie auch eine Gesellschaft stellt, betrifft die Zukunft. In der Tat verlangt das Erkennen der Zukunft dem Menschen eine besonders hohe Abstraktionsfähigkeit über die Möglichkeiten ab, wie sich die Zukunft entwickeln könnte. Experimente haben gezeigt, dass die Fähigkeit, künftige Zeiträume zu erfassen, bei Tieren zeitlich eng begrenzt ist (Minuten, Stunden, evtl. Tage). Allein der Mensch ist in der Lage, die Zeit bis weit über seinen Tod hinaus gedanklich zu erfassen. Aus dieser, dem Tierreich unbekanntem Fähigkeit leitet sich wohl auch der Wunsch ab, den Inhalt und die Entwicklung dieser Zeiträume zu erkennen. Ursprung und Wesen der Prognostik entspringen diesem tief im Menschen verwurzelten Wunsch, Gewissheit über die künftigen Ereignisse und Entwicklungen zu erlangen. Damit sind wir am Ausgangspunkt angelangt, an dem auch das Thema «Markierung» ansetzt, nämlich an der Frage, inwieweit Wandel vorhersehbar ist und ob Wissen über die – auch für Menschen – ausserordentlich langen Zeiträume übermittelt werden kann, um den Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten. Zudem stellt sich die Frage, welche Bedingungen allenfalls erfüllt sein müssen, damit ein solches Unterfangen gelingen könnte.

Diese Fragen zu beantworten verlangt Informationen darüber, wie sich ein System als Ganzes oder seine Teilsysteme im Laufe der Zeit verändern können. Die Prozesse und Prozessgeschwindigkeiten in diesen Systemen und Teilsystemen zu erfassen und in Beziehung zu setzen, stellt eine der Grundlagen dar, um die Richtung und die Geschwindigkeit von Wandel zu ermitteln. In den folgenden Ausführungen wird



Figur 1: Schematisches Bild eines Tiefenlagers in der heutigen Zeit (t_0) beziehungsweise in einer fernerer Zukunft (t_1) und Unterscheidung von fünf Teilsystemen zur Ermittlung des Wandels in den Teilsystemen

Betrachtete Teilsysteme:

- 1 Mensch
- 2 Umwelt (Biosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre)
- 3 Wirtgestein und Geologie (Lithosphäre)
- 4 Bauwerk (Tiefenlager mit Abfällen)
- 5 Markierungen (Elemente des Bauwerks oder in der Umwelt als Langzeitwarnungsmassnahme)

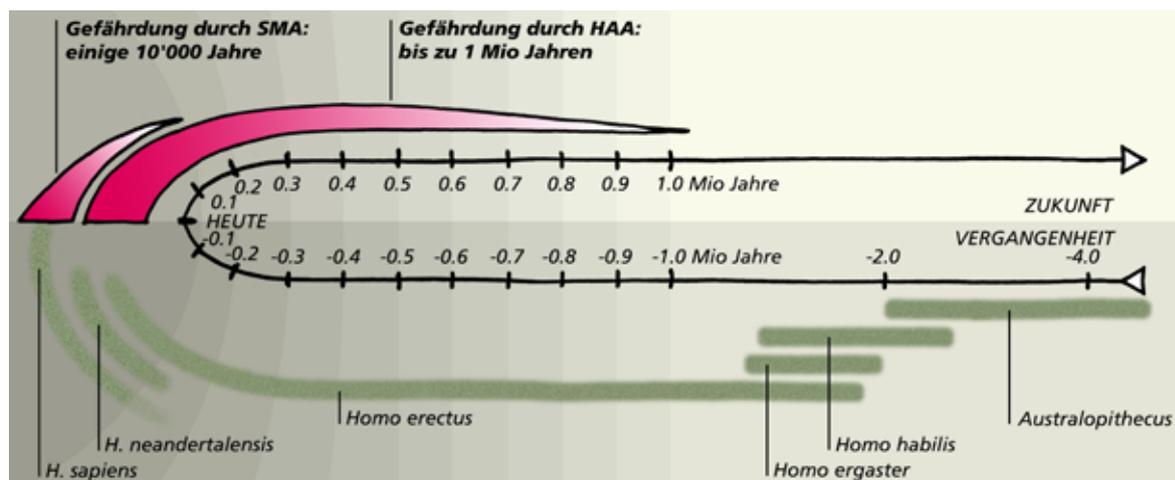
daher versucht, die wichtigsten Grössen des Systems «geologisches Tiefenlager» zu bestimmen und zu charakterisieren, insbesondere mit Bezug auf die Wandlungsprozesse und -geschwindigkeiten der Teilsysteme im Laufe der Zeit.

In Figur 1 ist ein schematisches Bild eines geologischen Tiefenlagers in der heutigen Zeit (t_0) beziehungsweise in einer ferneren Zukunft (t_1) dargestellt. Wir unterscheiden dabei folgende fünf Teilsysteme, welche zeitlichen Veränderungen (Wandel) unterworfen sind:

- der Mensch, respektive die Gesellschaft, und ihre gesamten Handlungen und Tätigkeiten, zu denen auch Technik und Wissenschaft gehören. Mensch und Umwelt müssen einerseits vor den Gefahren eines Tiefenlagers geschützt und andererseits davon abgehalten werden, das Tiefenlager zu gefährden;
- die Umwelt (Bio-, Hydro- und Atmosphäre), welche starke Auswirkungen auf die Krisenanfälligkeit von sozialen Systemen haben kann;
- der geologische Untergrund mit seinen spezifischen Eigenschaften (Schichtaufbau, Tektonik usw.) und dessen mögliche Veränderungen, welche die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers und seiner Markierungen betreffen können;
- das Bauwerk «geologisches Tiefenlager», welches einerseits die Abfälle aufnimmt und andererseits spezielle bauliche Charakteristiken (Schächte, Stollen, Verschlüsse usw.) aufweist; die Eigenschaften der radioaktiven Abfälle und ihre Wirkung auf lebende Zellen bestimmen den Zeitmassstab, während dem ein Markierungssystem funktionell sein muss;
- die Gesamtheit aller möglichen zu betrachtenden Markierungstechniken eines geologischen Tiefenlagers, ob es sich um bauliche oder technische Elemente im Tiefenlager, an der Oberfläche oder in den Kommunikationssystemen der Gesellschaften handelt.

Der Erfolg eines Markierungssystems für ein geologisches Tiefenlager hängt von der Entwicklung dieser fünf Teilsysteme ab. Dabei verändern sich diese fünf Systeme auf unterschiedliche Art. Während die meisten geologischen Prozesse für das menschliche Empfinden langsam ablaufen, erfolgt der Wandel bei den gesellschaftlichen Systemen schnell. Die vielfach von technischen Innovationen gesteuerten Veränderungen in Gesellschaften laufen bekanntlich sehr schnell ab und sind daher nicht oder schwer prognostizierbar. Aber auch die biologischen Systeme reagieren verhältnismässig rasch, selbst im Fall der Entwicklung der Menschen. Wie die evolutiven Prozesse zeigen, haben sich – laut neusten Erkenntnissen aus Anthropologie und Neurologie – verschiedene Menschenarten in der letzten Million Jahre abgelöst (Figur 2). Der moderne Mensch (*homo sapiens sapiens*) ist der bisher letzte biologische Schritt in der Entwicklung der Hominiden. Über die lange zu betrachtende Zeitspanne des Einschlusses kann zu Recht die Frage gestellt werden, ob dieser *Homo sapiens* tatsächlich noch da sein wird, wenn die Radioaktivität im Tiefenlager weitgehend abgeklungen ist. Die zunehmende Anwendung von Medizinaltechnik im menschlichen Körper könnte diesen Prozess über genetische Eingriffe, die Implantationsmedizin oder andere medizinische Techniken massiv beschleunigen.

In natürlichen Systemen – von der Atmosphäre über die Hydrosphäre bis zur Lithosphäre – verändern sich die Prozesse mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Während klimatische Prozesse und Wasserhaushalt in der Regel rasche Prozesse darstellen, laufen die Prozesse in der Erdkruste – von einigen Ausnahmen abgesehen – für das menschliche Empfinden sehr langsam ab. Prozessgeschwindigkeiten – zum Teil weit unterhalb von cm/a – sind für grossräumige Bewegungen oder für solche im Tiefuntergrund die Regel. Veränderungen in der belebten Umwelt und insbesondere gesellschaftliche Wandlungsprozesse laufen demgegenüber extrem rasch ab, auch wenn sich gewisse Gesetzmässigkeiten menschlichen Handelns über die Geschichte herauslesen lassen. Davon ausgenommen ist de facto der technische Wandel in der Neuzeit, der über eine längere Zeitspanne (Jahrzehnte bis max. 1 Jahrhundert) nicht wirklich vorhergesagt werden kann.



Figur 2: Zeiträume der Evolution von Hominiden, historische Meilensteine in der menschlichen Entwicklung und Risikozeiträume von Abfalltiefenlagern

Künftiges Ereignis	Zeit (Jahre)		Ereignis in der Vergangenheit
Schmutzwasserdrainagen von Deponien nicht mehr funktionstüchtig	100	vor 100	Becquerel entdeckt natürliche Radioaktivität (1896), Erste Offshore-Bohrungen für Erdöl (1900), Russisch-Japanischer Krieg (1905), Beginn erster Weltkrieg (1914)
Zeitraum einer ersten Risikoeinschätzung (Beispiel Deponie Riet Winterthur)	200	vor 200	Erste Leuchtgaslampe (1792), Farbenlehre Goethes (1810), Epoche der Aufklärung, Aera Napoleons
Technische Barrieren von TVA-konformen Deponien ausser Kraft	400 bis 800	vor 400 bis 800	Zeitalter Galileis und Keplers (um 1600), Edikt von Nantes (1598), Katharerfeldzüge (Anfang 13. Jahrhundert)
Ionenaustauschkapazität für das Reaktor-Kompartiment Deponie Feldmoos ZH erschöpft	2500	vor 2500	Griechische Wasseruhren; Stahlherstellung in Indien; Walöllampen mit Asbestdochten in China, Griechisch-persische Kriege, Beginn der Blütezeit des Hellenismus
		vor 9000	Steinzeitanlage von Göbekli tepe (Urfa, Anatolien)
Ionenaustauschkapazität für das Inertstoff-Kompartiment Deponie Feldmoos ZH erschöpft	30000	vor 30000	Oberes Paläolithikum, Verwendung von Strichzeichen (5er Gruppen) zwecks Zählungen (z. B. Herden); Neanderthaler sterben sukzessive aus
		vor 37000 bis 43000	Erster nachgewiesener Schmuck bei Neanderthalern; homo sapiens erstmals in Europa nachgewiesen; altsteinzeitliche Flöte (vor 37000 Jahren) auf der Schwäbischen Alb («Hohle Fels»)
		– 50000	Nachweis von homo erectus-ähnlichen Menschen in Südostasien
		vor 40000 bis 70000	Neanderthaler bestatten ihre Toten; Neanderthaler gewinnen Birkenpech durch Destillation
		vor 65000 bis 70000	Auswanderung von homo sapiens aus Afrika
Maximaler Isolationszeitraum für SMA	bis 100000	vor 100000	Erstnachweis von Schmuck bei homo sapiens, Erstnachweis von Bestattungen bei homo sapiens
Größenordnung Isolationszeitraum für HAA	bis 1 Mio.	vor ?	Erster und letzter Nachweis von Homo heidelbergensis (vor 800000 und vor 200000 Jahre)

Diese unterschiedlichen Prozesse und Prozessgeschwindigkeiten werfen die Frage auf, welches Markierungssystem für ein Tiefenlager in welcher Zeitspanne überhaupt relevant sein könnte. Markierungssysteme könnten in unterschiedlichen Zeitspannen und gesellschaftlichen Zuständen anders wahrgenommen werden. In gesellschaftlichen Krisenzeiten dürfte ein Tiefenlager samt dazugehöriger Markierung einen anderen Stellenwert haben als in Zeiten des Überflusses und der Risikominderung. Oberirdische Markierungen könnten dadurch eine andere Bedeutung erlangen. Sicher ist eine Markierung im Untergrund bedeutend kleineren Veränderungen ausgesetzt als an der Oberfläche. Auch nimmt die von den radioaktiven Abfällen ausgehende Gefährdung im Laufe der Zeit ab, womit die Markierung ihren Stellenwert verlieren könnte. Es sollte zusätzlich der andere Fall beleuchtet werden, wo die Gefahr durch das geologische Tiefenlager gebannt ist, die Markierung aber weiter besteht. Schliesslich ist die Frage zu stellen, wie lange eine Markierung überhaupt notwendig oder wünschbar erscheint. Ist sie auf das Ende des Gefährdungszeitraums anzusetzen? Kann ein ähnlich langer Zeitraum wie jener seit der neolithischen Revolution¹ begründet werden? Oder ist der Massstab bis zu den Hochkulturen Mesopotamiens wie Sumer und Akkad im vierten und dritten vorchristlichen Jahrtausend bestimmend? Alle diese Gedanken legen nahe, Markierungssysteme nicht nur inhaltlich, sondern auch zeitlich zu differenzieren und die Lebensdauer der einzelnen Marker in die Überlegungen mit einzubeziehen.

¹ Neolithische Revolution: vor rund 12 000 Jahren einsetzender Prozess zunehmender Sesshaftigkeit des Menschen, der einherging mit der Entwicklung von neuen und effizienteren Wirtschaftsformen.

3 Grundsatzfragen bei der Analyse des heutigen Wissensstandes, Vorgehen

Im Hinblick darauf, den heutigen Wissensstand in Wissenschaft, Technik und Gesellschaft zum Thema Markierung zu erfassen, wird eine Auswahl von Fragen zusammengestellt, anhand der sich die publizierte Literatur auswerten lässt. Dabei unterscheiden wir zwischen generellen Fragen zu den Absichten und Zielen der Markierung (Kapitel 3.1) und Fragen zu den spezifischen Teilsystemen (Kapitel 3.2).

3.1 Grundsatzfragen zu den Markierungsabsichten und -zielen

- 01 Warum soll markiert werden? Oder anders gesagt: Welche Gründe werden aufgeführt, um eine Markierung zu begründen oder abzulehnen?
- 02 Unter welchen Voraussetzungen ist eine Warnung künftiger Generationen möglich?
- 03 Ist Markierung mit vertretbarem Aufwand machbar?
- 04 Wie weit soll der Schutz künftiger Generationen gehen?
- 05 Was soll künftigen Generationen übergeben werden?
- 06 Sind Missdeutungspotential, Manipulation und/oder Fehler- und Störanfälligkeit des Markierungssystems als wesentliche Elemente erkannt?

3.2 Fragen zu den spezifischen Teilsystemen

A Mensch und Gesellschaft

- A1 *An wen richtet sich die Markierung in der Zukunft («primitive» Gesellschaft oder Hochkultur? Homo «stupidus» oder Homo «megasapiens» etc.)? Werden evolutive Aspekte in der Markierungsliteratur behandelt? Sind Prozesse und Veränderungen dieser Art überhaupt erkennbar (z. B. Szenarienanalysen)?*
- A2 *Wie lange soll markiert werden? Oder anders gesagt: Für welche Zeiträume soll Markierung vorgesehen werden? Sind verschiedene Markierungstechniken für verschiedene Risikozustände vorzusehen?*
- A3 *Welche Rolle spielt die Technik und die Technikentwicklung in der Frage der Markierung?*
- A4 *Wer soll markieren? Welche Strukturen sind für ein Langzeit-Sicherheits-Management von Bedeutung? Welche Strukturen / Organisationsmerkmale können eventuell nach Verschluss der Anlage zwingend werden (z. B. Rechtstitel, Verantwortlichkeiten)?*
- A5 *Welche Motive sind für die bewusste/unbewusste Freilegung (Exhumierung) der Abfälle zu beachten?*
- A6 *Inwieweit kann Wissenschafts- und Technikgeschichte dazu beitragen, die Frage nach dem Sinn von Markierung zu klären (insb. ob die Frage nach dem Sinn des Markierens überflüssig ist, da das Markieren mit dem Bau der Schacht- und Oberflächenanlagen nur kurzfristig festgelegt ist [fingerprints])?*

B Umwelt (Biosphäre) und Untergrund (Lithosphäre)

- B1 Welche Veränderungen der Umwelt und der Erdoberfläche sind während der erforderlichen Einschliesszeit zu berücksichtigen?
- B2 Sind Umweltkrisen und Gesellschaftskrisen hinreichend abschätzbar (historische Studien) und extrapolierbar, sodass sie für die Fragestellung der Markierung beigezogen und relevant werden könnten?
- B3 Welche Veränderungen in der Erdkruste können die Integrität des Bauwerks und seine Markierung betreffen (Prozesse und Eigenschaften)? In welcher Art und Weise verändern sich die zu betrachtenden Teilsysteme: Können wir deren Veränderungen auf der Basis von historischen Studien und Modellen hinreichend genau vorhersagen? Sind Veränderungen über die betrachtete Einschliesszeit im tieferen Untergrund für ein Markierungssystem relevant?
- B4 Ist es möglich, ein Tiefenlager so zu tarnen und zu verschliessen, dass eine Erinnerung an den Eingriff dauerhaft ausgelöscht werden kann (Tarnungspotential)?

C Markierung und Bauwerk

- C1 Kann die Entwicklung des Bauwerks «Tiefenlager» eingeschätzt werden (natürliche und historische Analoga, Szenarienanalysen etc.) und damit die mögliche Auswirkung auf ein Markierungsprogramm?
- C2 Welche Eindringungsszenarien (Intrusion) sind für ein Tiefenlager zu betrachten (Gefahrenanalyse) und welche Markierungsvorkehrungen sind in diesem Kontext grundsätzlich denkbar? Welche Markierungstechniken sind für den Schutz des Bauwerks und seines Inventars vor beabsichtigtem Eindringen ohne Zerstörungsabsicht vorgesehen, z. B. für die zielgerichtete Rückholung?
- C3 Wie ist der Stand der Technik bezüglich verschiedener Markierungstechniken an der Oberfläche und im Bauwerk? Kann die Lebensdauer verschiedener technischer Marker (physikalische, chemische oder biologische Marker etc.) realistisch eingeschätzt werden?
- C4 Sollen Verpackungen (z. B. Kanister) und Lagerkavernen als Markierungselemente verwendet werden?

D Markierungen und Information

- D1 Wie können «aktive» von «passiven» Markierungssystemen unterschieden werden? Wurden «aktive» Markierungstechniken und Tradierungssysteme systematisch in allen möglichen Gebieten erhoben?
- D2 Was und wie soll übermittelt werden? Welche gestalterische Möglichkeit bietet Markierung an der Oberfläche in einem grösseren Gebiet über dem Tiefenlager (Makroebene)? Kann eine solche Gestaltung zeitinvariant überliefert (tradiert) werden?
- D3 Welche Techniken zum Wissenstransfer sind vorgesehen (Wissensmanagement, Tradierungstechniken, Codifizierungstechniken usw.)? Wie lässt sich der Erhalt dieser Techniken über die Zeit heute einschätzen?
- D4 Welche gesellschaftlichen Strukturen sind bei der konkreten Wissenstradierung zum Tiefenlager zu beachten? Sind Erfahrungen mit historisch stabilen Strukturen (z. B. Institutionen, Körperschaften) in diesem Kontext relevant? Können lokale Gemeinschaften die «Erinnerungs»-Funktion über lange Zeiträume wahrnehmen?

E Fehleranfälligkeit und Störfälle des Markierungs- und Tradierungssystems

- E1 Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit Kommunikation über die Zeit nicht versagt? Können Risikokataloge die möglichen Versagensmöglichkeiten hinreichend erfassen und beschreiben?*
- E2 Wie reparierbar und/oder korrigierbar sind Markierungssysteme (Wartung/Unterhalt)? Wie fehleranfällig sind Markierungssysteme?*
- E3 Welche Voraussetzungen sind für die Entzifferung von Markierungs- und Tradierungssystemen erforderlich (Informationsträger, strukturelle Voraussetzungen, Enkodierungs- und Dekodierungssysteme usw.)? Wie gross ist das Missdeutungspotential von Markierung? Kann die Markierung ein Tiefenlager gefährden? Anders gesagt: kann die Markierung dazu verleiten, ein Endlager gezielt auszuräumen?*
- E4 Sind die Relaisstrukturen für den Langzeittransfer von Information gegenüber Verlust- und Verzerrungsprozessen hinreichend abgesichert? Kann Manipulation innerhalb solcher Strukturen verhindert werden?*

4 Grundsatzfragen bei der Analyse des heutigen Wissensstandes

Die in Kapitel 3 gestellten Fragen werden nach dem gleichen Vorgehen wie folgt behandelt:

Problemstellung

Unter diesem Titel wird die Fragestellung möglichst genau umschrieben und soweit präzisiert, dass die Auswertung der Literatur gezielt erfolgen kann. Es wird dabei Wert darauf gelegt, die Information aus der Literatur ohne eigene Bewertung darzustellen.

Auswertung in der Literatur

Die Auswertung der Literatur erfolgt nach folgendem Muster.

- Zunächst werden die Standardwerke zusammengetragen, die sich auf dem Gebiet der Tiefenlagerung bereits mit dem Thema der Markierung befasst haben. Es handelt sich um Berichte und Reports, die von Projektanten von Endlagern oder von internationalen Agenturen wie der Internationalen Atomenergie-Agentur (IAEA) oder der Atomenergie-Agentur der Organisation für wirtschaftliche Kooperation und Entwicklung (NEA/OECD) verfasst wurden. Berücksichtigt werden auch die in diesen Berichten enthaltenen Literaturangaben. Die Auswertung deckt die Literatur auf dem Gebiet der Markierung gut ab, auch wenn nicht alle Projekte im gleichen Ausmass berücksichtigt werden können. So wird z. B. den Markierungsprojekten für den amerikanischen Standort «Waste Isolation Pilot Plant» bedeutend mehr Raum eingeräumt als den später entwickelten Projekten in Hanford oder Yucca Mountain.
- Ergänzend werden Lehr- und Fachbücher sowie Kompendien und Synthesen, teils auch Artikel in der Fachliteratur in Gebieten wie Archäologie und Geschichte, Semiotik und Sprachwissenschaften, Religionskunde und Philosophie oder Wirtschaftswissenschaften und Organisationssoziologie, ausgewertet. Viele der zitierten Werke gehören zu anerkannten Standardwerken. Die Studie berücksichtigt zwar nur einen kleinen Anteil der über die verschiedenen Thematiken existierenden Werke und Artikel. Das Wissen, welches diesen Werken entnommen werden kann, genügt jedoch als Beleg für die gewonnenen Erkenntnisse. Zu einzelnen Fragestellungen wurden wenn nötig auch noch spezifische Literaturrecherchen durchgeführt.

Würdigung

Die Würdigung enthält eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Gedanken des Autors mit den allerwichtigsten Erkenntnissen zum jeweiligen Frageblock. Der Autor versucht auch, die gestellten Fragen wo möglich zu beantworten, und auf offene Fragen hinzuweisen.

4.1 Schutzziele und Handlungsmotive für das Eindringen in ein Tiefenlager

Bevor die Frage nach der Markierung in Kapitel 4.2 und folgende untersucht werden, soll geklärt werden, welche Interessen eine Gesellschaft in der Zukunft an einem Tiefenlager haben könnte oder welche Bezüge zwischen Tiefenlager und Gesellschaft herzustellen sind. Konkret wird gefragt, welche Einstellungen eine Gesellschaft oder Individuen derselben zum Lager haben könnten und wie sich diese Einstellungen in der Zeit entwickeln könnten. Solche Überlegungen stellen wichtige Grundlagen dar für Entscheide, ob Markierungsprogramme letztlich umsetzbar sind.

Grundlage für diese Überlegungen bilden das Gefährdungspotential der Abfälle und der ethische Imperativ, künftige Generationen vor schädlichen Auswirkungen aus dem Lager zu schützen. Dieser Schutz erstreckt sich nicht nur gegenüber passiv oder natürlich ablaufenden Gefährdungen durch einen Trans-

port von Strahlung bis in den Lebensbereich des Menschen, sondern auch gegenüber aktiven Gefährdungen durch das Eindringen (human intrusion) künftiger Generationen in ein Tiefenlager.

Das Motiv des Eindringens in ein Tiefenlager kann unterschiedliche Hintergründe haben (siehe Tabelle 4-1, S. 17). Wir betrachten eine Anzahl solcher Motive, ohne Anspruch auf eine vollständige Erfassung der menschlichen Antriebskräfte, und kommentieren diese im Folgenden in Kürze:

- Gier: Gier ist eine der mächtigsten Antriebskräfte des Menschen und lässt sich bei antiken Plünderungen, den Raubzügen während der Kolonisierung der Welt bis hin in die Kriege der Neuzeit verfolgen (Kulturgutraub, Blutdiamanten usw.). In einer modernen Form äussert sie sich als Raffgier, etwa bei Beutezügen an den Börsen (Galbraith 1992, Galbraith 2005a, Galbraith 2005b) oder bei der Schatzsuche und Plünderung von Schiffwracks oder Schätzen im Boden (vgl. börsenkotierte Unternehmen wie «Odyssey marine exploration»).
- Elend: Elend hat ein ähnliches Grundmuster wie Gier und beruht auf einem materiellen Bedürfnis. Allerdings ist hier die Triebkraft nicht der kurzfristige Gewinn, der über die Plünderung einer Stätte zu erwarten ist, sondern die gezielte Suche nach einem wieder verwertbaren Gut, das ökonomisch das Elend lindern könnte. Beispiele der Neuzeit für solche Handlungen sind etwa die weltweit immer wieder vorkommenden Unfälle bei der Entwendung von radioaktiven Strahlungsquellen, z. B. aus stillgelegten Spitälern (IAEA 1988; IAEA 2001; IAEA 2002).
- Neugier: Geschichte und Archäologie sind stark mit Neugier verknüpft. Oft steht in solchen Fällen nicht nur Wissensdurst im Vordergrund, sondern persönlicher Ehrgeiz und Ruhmsucht. Die Geschichte der Entdeckung archäologischer Fundstätten legt dafür Zeugnis ab, und zwar bereits seit der Antike. Zugleich zeigt die Geschichte der Archäologie ein weiteres interessantes Phänomen auf. Viele der grossen Fundstellen und Funde wurden durch ein systematisches Abtasten der Erdoberfläche wiederentdeckt.
- Gewinnmaximierung: Bei diesem Szenarium geht es im Wesentlichen um die gezielte Rückholung von Wertstoffen. Dieses Szenarium kann nicht ausgeschlossen werden, insbesondere dann, wenn Metalle wie Kupfer eingelagert werden, die spätestens seit der Bronzezeit durchgehend von vielen Kulturen gewonnen und verwendet wurden. Spaltbare Materialien können als Brennstoff dienen.
- Verantwortungsgefühl: Dieses Motiv spricht dafür, Massnahmen gegenüber möglichen negativen Folgen von gesellschaftlichem Handeln zu ergreifen. Es ist ein Handeln, das in allen stabilen Gesellschaften zu beobachten ist. Im schlechtesten Fall (worst case), nämlich bei Leckagen aus einem Tiefenlager, ist es wahrscheinlich, dass künftige Generationen Sanierungsmassnahmen ergreifen (z. B. wie bei den heutigen Altlasten Bonfol und Kölliken).
- Herostratismus, Mutwille, Fanatismus: Seit Herostrat im Jahr 356 v. Chr. den Tempel der Athene in Ephesos (Kleinasien) zu Ruhmeszwecken zerstören und Nero im Jahr 64 n. Chr. den Brand von Rom folgen liess (siehe «Der Kleine Pauly», II, S. 1110; IV, S. 71 ff.), lieferten selbst die letzten 100 Jahre Anschauungsmaterial für herostratischen Grössenwahnsinn und ideologischen Fanatismus (z. B. Hitlers Befehl, Paris 1944 vollständig zu zerstören, vgl. von Choltitz 1950; Kulturrevolution China; Zerstörung des nicht-islamischen Kulturguts durch radikalislamische Kräfte). Diese Triebfeder menschlicher Unberechenbarkeit sollte in die Liste der Bedrohungen für ein Tiefenlager aufgenommen werden, so unwahrscheinlich sie heute auch erscheinen mag.
- Desinteresse: Desinteresse kann als eine Lebenseinstellung verstanden werden, in der vor allem unmittelbare Bezüge zum eigenen Leben wahrgenommen und gelebt werden (Eigennutz). In diesem Sinne ist Desinteresse für die Frage von Tiefenlagern ein zentrales Handlungsmotiv, welches ein Vergessen der Lagerstätte stark unterstützt.
- Nachlässigkeit: Nachlässigkeit hat ähnliche Wurzeln wie Desinteresse und kann ebenfalls als Vorstufe für Vergessen betrachtet werden. Nachlässigkeit bedeutet auch eine Verschiebung in der Wahrnehmung der Gefährdung. Man beginnt mit dem Risiko zu leben und gewöhnt sich daran.

- Unwissen: Unwissen setzt ein vollständiges Vergessen voraus und ist als kumulierter gesellschaftlicher Prozess des Desinteresses zu betrachten. Die meisten in der Literatur diskutierten Eindringungsszenarien gehen von einem vollständigen Verlust der Kenntnisse über ein Tiefenlager aus.
- Gekoppelte Prozesse: Viele der oben kurz diskutierten Motive sind gekoppelt. So ist durchaus denkbar, dass bei Intrusionsszenarien auch Neugier mitspielt und in der einen oder anderen Form eine Ausräumung oder Teilausräumung mit nachträglicher Nutzung erfolgen könnte.

Die Triebfedern und die Wirkung menschlichen Verhaltens sind also unterschiedlich und sollten daher sehr wohl bedacht werden, wenn Markierungsprogramme zur Diskussion stehen.

	Risikotyp	Antriebsmotive für das Handeln oder Gründe für das Nicht-Handeln	Risikowahrnehmung	Form der Umsetzung	Schutzfaktor (Wirkung) eines Markierungsprogramms auf das Eindringen
1	Gier	Rücksichtsloses Profitdenken von Einzelinteressen (Spekulierende, Beispiel «Börse» oder «Schatzsuche», siehe Punkt 4)	Tendenziell gering, da Profitdenken überwiegt und Risikowahrnehmung stark beeinflusst	Gewaltsame und gezielte Plünderung einer Stätte zwecks Aneignung wertvoller Gegenstände	Geringe bis minimale Wirkung, da Antriebsmotiv mögliche Vorsichtsmassnahmen untergräbt, Zerstörung von Markierung vorprogrammiert
2	Elend	Linderung materiell unerträglicher Lebensbedingungen (Armut in «3. Welt-Ländern», Beispiel «Diebstahl von Tumorbestrahlungsquellen»)	Minimal, in der Elendssituation unerheblich	Gewaltsame Plünderung einer Stätte im Hinblick auf die Aneignung wertvoller Gegenstände zwecks Verbesserung der existenziellen Not	Geringe bis minimale Wirkung, da Not bedrohlicher eingestuft wird als Risiko aus der Lagerstätte, Zerstörung der oberflächennahen Markierungen wahrscheinlich
3	Neugier	Stillung des Antriebs durch Erfüllung des Bedürfnisses: Aneignung eines Wissensguts zu individuellem Nutzen (Forschende; Beispiel «Archäologie»)	Mittel bis hoch, je nachdem welche individuellen Vorlieben im Vordergrund stehen	Gezieltes Eindringen in Untergrund und Lager wahrscheinlich	Relativ grosse Wirkung von Markierung, insbesondere im Untergrund
4	Gewinnmaximierung	Rückholung von eingelagerten, wirtschaftlich potentiell lukrativen Stoffen wie Abfallgut (Schatzsuchende, Beispiel «Bergung Gold und Silber sowie Gebrauchsstücke in versunkenen Schiffen»)	Klein bis gross, je nachdem ob es sich um gekoppelte Prozesse handelt	Gezieltes Eindringen in das Lager, Kosten des Eingriffs determinierend für den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens	Relativ grosse Wirkung von Markierung, insbesondere bei Untertagebauten
5	Verantwortungsgefühl	Gefahrenabwehr durch leck gewordenes Tiefenlager (Sanierungsprogramme, Beispiele «Rückbau von Sondermülldeponien in der Schweiz»)	Hoch, Kenntnisse über Gefahrenpotential gross	Gezieltes Eindringen in das Lager, Kosten des Eingriffs steht in Relation mit Gesundheitsrisiko	Grosse Wirkung von Markierung, insbesondere bei Untertagebauten und Lagerstollen
6	Herostratismus, Muttwille und Fanatismus	Stillung des Antriebs durch Erfüllung des Bedürfnisses: Aneignung eines Gefahrenguts zu Zerstörungszwecken und zum Schaden anderer (Terrorismus, Beispiel «Al-Kaida»)	Hoch, weil gezielt nach dem Gefahrenherd gesucht wird, um diesen für zerstörerische Zwecke einzusetzen	Gezieltes, vermutlich rasches und gewaltsames Eindringen zwecks Aneignung des Gefahrenguts	Grosse Wirkung von Markierung, insbesondere bei Untertagebauten und Lagerstollen
7	Desinteresse	Absolute Gleichgültigkeit gegenüber dem Gefahrenherd, vollkommene Ausblendung der Gefahr	Minimal, Risiko wird nicht wahrgenommen oder im besten Fall heruntergespielt	Risiko des Eindringens nur bei Erkundung des Untergrunds möglich	Vermutlich nur beschränkte Wirkung von Markierung
8	Nachlässigkeit	Gleichgültigkeit gegenüber dem Gefahrenherd, Ausblendung der Gefahr	Minimal, Risiko wird nicht richtig wahrgenommen	Risiko des Eindringens nur bei Erkundung des Untergrunds möglich	Vermutlich nur beschränkte Wirkung von Markierung
9	Unwissen	Verlust der Kenntnisse über das Gefahrenpotential sowie des Wissens und der Möglichkeiten, die Gefahr zu erkennen: Erkundung und Nutzung des Untergrunds des möglich	Keine Risikowahrnehmung, weil Gefahrenherd nicht bekannt	Risiko des Eindringens bei Erkundung des Untergrunds möglich	Vermutlich nur beschränkte Wirkung von Markierung
10	Gekoppelte Prozesse (z. B. Unwissen & Neugier)	Neuausrichtung Interesse und Gefahreneinschätzung möglich	Minimal bis gross, je nach Szenario	Risiko des Eindringens bei Erkundung des Untergrunds möglich	Wirkung von Markierung kann unterschiedlich sein

Tabelle 4-1: Übersicht über mögliche Risiko-Szenarien für das Eindringen in ein Lager für radioaktive Abfälle und Schutzfaktoren von Markierungsprogrammen

4.2 Grundsatzfragen zu den Markierungsabsichten und -zielen

01 Warum soll markiert werden? Oder anders gesagt: Welche Gründe werden aufgeführt, um eine Markierung zu begründen oder abzulehnen?

Problemstellung

Die Konzentrierung, Umwandlung und Nutzung von radioaktiven Materialien hinterlässt nach allgemein anerkannter Beurteilung Abfälle, die über sehr lange Zeiträume eine ernsthafte Gefahr für Lebewesen darstellen. In der Regel gehen heute zuständige Behörden wie mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle betraute Institutionen von Zeiträumen von bis zu 1 Million Jahre aus (Milnes et al. 1980 [S. 359]; Nagra 2008a [S. 14–16]; Nagra 2008b [S. 27], AKEnd 2002, HSK 2005 [S. 33, 45, 237], ENSI-G03), während der diese Abfälle aus dem Lebensraum von Mensch und Umwelt verbannt werden sollten (siehe auch Abschnitt 04). Diese für menschliche Massstäbe unvorstellbar langen Zeiträume stellen eine neue Herausforderung für die damit konfrontierten Gesellschaften dar und erhalten in diesem Sinne eine neuartige Bedeutung, was das Handeln des Menschen mit seiner Zukunft betrifft.

Da sich die Radioaktivität des Abfalls grundsätzlich nur beschränkt steuern lässt und Langzeitauswirkungen bestenfalls durch Transmutation beeinflusst werden können, sind Tiefenlager in Gesteinsformationen die allgemein anerkannte Strategie im Umgang mit einem seit Jahrzehnten sich verschärfenden Problem (EKRA 2000). Die Massnahmen zum Schutz der Umwelt vor radioaktiven Stoffen sind im Wesentlichen technischer Natur, doch sind entsprechende Vorgaben auch für die Markierung der Tiefenlager formuliert worden. Für die Schweiz hat EKRA (2000 [S. 57]; EKRA 2002 [S. 10, 13, 26]) und darauf basierend das Kernenergiegesetz (Art. 40 Abs. 7) sowie die Kernenergieverordnung (Art. 69 Abs. 3) Markierungsvorgaben definiert respektive vorgeschrieben. Es wird aber nicht begründet, welche Ziele die Markierung verfolgt.

Angaben in der Literatur

In der Literatur scheint allgemeine Einstimmigkeit darüber zu herrschen, dass Markierung in erster Linie Warnfunktion für die Zukunft hat (Cameron 1981, S. 184; Posner 1990a; Ohuchi et al. 2003, S. 1227; Sugiyama et al. 2003, S. 1). Es wird aber auch darauf abgezielt, künftigen Generationen Informationen zu übermitteln und auf diesem Wege ihre Entscheidungsfindung zu vereinfachen (Ohuchi et al. 2003, S. 1227; Sugiyama et al. 2003, S. 1). Allerdings sind diese Zielsetzungen nicht völlig unumstritten. Seit geraumer Zeit sind Zweifel an diesen Zielen geäussert worden und es wurde auch die Frage aufgeworfen, ob ein kollektives Vergessen über den Lagerstandort nicht vorzuziehen wäre. Eine andere Zielrichtung wird von Pescatore et al. (2007, S. 1) und NEA (2007a, 2008) verfolgt, die vorschlagen, das Tiefenlager als Bestandteil einer gesellschaftlichen «Fabrik» zu betrachten, die – zusätzlich zu den schon anvisierten Zielen – die Erinnerung an das Tiefenlager von Generation zu Generation weitergibt. Diese Konzeption konvergiert teils mit den alten Vorstellungen des «Hütekonzepts» (Macy 1992) oder der Einbindung von Stakeholderinnen und Stakeholdern (Tannenbaum 1984, S. 13), was die Rolle der kulturellen Wissensvermittlung angeht.

Die Debatte über Langzeitnutzen oder -schaden von Markierung ist immer noch im Gang. Die Argumentation lautet: Würde ein Vergessen der Lagerstätte letztlich nicht deren potentielle Gefährdung durch künftige Generationen mindern?

Würdigung

Wie man diese Frage auch dreht: Eindeutige Antworten dürften kaum Bestand haben, da die Wege, Sicherheit in einer ungewissen Zukunft bieten zu wollen, stark wert- und positionsabhängig und damit nicht prognostizierbar sind. Hingegen lohnt es sich, einzelne Detailfragen der Markierung näher auszuleuchten, da sie sehr wohl Begründungen für die generelle Zielsetzung stützen oder untergraben können. In den Abschnitten A5, B4, C2 und E2 werden Einzelaspekte aus einem weiteren Blickwinkel beleuchtet. Möglicherweise stellt sich dabei heraus, dass diese übergeordnete Frage ohnehin obsolet

wird, weil sich ein Tiefenlager bei Erhalt eines gewissen Wissensstands ohnehin nicht aus dem kollektiven Gedächtnis verbannen lässt.

Auf den ersten Blick ist es naheliegend, dass Atomenergie nutzende Staaten in der Sorge um die Sicherheit künftiger Generationen davon ausgehen, sichtbare oder erkennbare Markierungen von Tiefenlagern an der Erdoberfläche anzubringen. Aus dieser Sicht wird Markierung im Sinne einer Warnung an künftige Generationen klar bejaht.

Angesichts der starken Abhängigkeit von gesellschaftlichen Werten und dem tiefgreifenden Wandel, dem solche in historischen Prozessen in der Regel unterliegen, fragt sich, ob das, was heute gedacht wird, morgen dann tatsächlich auch Sinn macht. Wie bei allen gesellschaftlichen Systemen sind Wandlungsprozesse schlecht oder nicht wirklich vorhersehbar, wenn es sich nicht um generelle Linien handelt, nach denen sich Gesellschaften orientieren. Es ist daran zu zweifeln, ob je bessere Methoden zur Verfügung stehen werden, um Veränderungen dieser Art über grössere Zeitspannen zu überblicken. Deshalb regt sich bei einzelnen Forschenden auch Widerstand, Markierung à priori als Allerheilmittel gegen ein Eindringen künftiger Generationen in ein Tiefenlager anzuerkennen. Es kann darum nicht erwartet werden, dass die gegensätzlichen Positionen geklärt werden. Die Frage des Pro und Kontra der Markierung bleibt eine Ermessensfrage.

02 Unter welchen Voraussetzungen ist eine Warnung künftiger Generationen möglich?

Problemstellung

Diese Grundfrage ist systemischer Art. Sie fragt, unter welchen Voraussetzungen die Enkodierung von Botschaften, die Wissensvermittlung und die Dekodierung der Information erfolgen muss, damit keine – zumindest wesentliche – Verzerrung des Informationsinhalts stattfindet. In diesem Sinne ist eine ganze Serie von Zusatzfragen angesprochen, nämlich die Techniken der En- und Dekodierung, die generelle Frage nach dem Verlust von Information, die historisch belegbaren Mechanismen von Informationsverlust sowie die Handlungsbereitschaft und -fähigkeit künftiger Gesellschaften. Die Anforderungen, die erfüllt sein müssen, damit Informationen tatsächlich und richtig übermittelt werden, sind enorm. Alle künftigen historischen Bruchsituationen mit zeit- und teilweisem Verlust an Wissen oder an Kontrolle über dieses Wissen, müssen überbrückt werden können. Dies setzt voraus, dass künftige Gesellschaften immer wieder zu Vernunft basierten gesellschaftlichen und politischen Systemen zurückfinden müssen. Bricht eine solche Entwicklung ab, ist der Transfer von Information über die Zeit kaum mehr prognostizierbar.

Angaben in der Literatur

In dieser Frage steckt eine ganze Serie von Fragestellungen, die semiotischer, sprachhistorischer und gesellschaftspolitischer Natur sind. Enkodierung und Dekodierung von Mitteilungen und Botschaften sind Techniken, die nach definierten Handlungsanleitungen (Algorithmen) erfolgen, mit teilweise hohem Abstraktionsgrad und komplexen Enkodierungseigenschaften (Pierce, Verón 2004). Sprachentwicklung und -wandel an sich sind kaum steuerbar und stellen – rückwärts betrachtet – grösste Herausforderungen an die Entziffernden, wenn Informationen verloren gingen. Die Erfolge bei der Dekodierung antiker oder vergessener Sprachen und Schriften hingen – ohne die Glanzleistungen der einzelnen Forschenden herabwürdigen zu wollen – in wesentlichem Ausmass davon ab, dass noch sprachhistorische Brücken vorlagen, welche es ermöglichten, das verlorene Wissen zu rekonstruieren (Doblhofer 1993). Ohne diese Brücken ist eine Entzifferung verlorener Schriftsprachen auch mit den heute verfügbaren EDV-gestützten Auswertungstechniken kaum machbar (siehe auch E3). Technikentwicklung und gesellschaftliche Entwicklung werfen ebenfalls Fragen auf. Wie Kowalski (2002) am Beispiel der Technikentwicklung aufzeigte, sind Prognosen über deren Wandel, Ausrichtung und Geschwindigkeit der Umsetzung nicht oder bestenfalls ansatzweise möglich. Noch deutlicher zeigt sich die Situation bei gesamtpolitischen Prozessen, die keiner Entwicklungslogik folgen und damit Ereignisprognosen überflüssig machen.

In der Literatur werden im Wesentlichen Einzelfragen behandelt (siehe Abschnitte A5, B2). Die übergeordnete Frage, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit Kommunikation über lange Zeiträume erfolgen kann, ist, zumindest was die vorliegende Auswertung angeht, im Ansatz zu erkennen (Hauser 1990a, S. 187 ff.), aber nicht systematisch ausgeleuchtet worden. Interessante methodische Ansätze für die Behandlung solcher Fragen sind etwa Fehlerbaumanalysen (wie sie bei Szenarien für das Eindringen in ein Lager entwickelt wurden, siehe etwa Trauth et al. 1993; Appendix A Human Intrusion Szenarios), die einen Risikoprozess systematisch in logische Handlungsketten aufgliedern und auf diese Weise die Anfälligkeiten der diversen Teilsysteme erfassen können.

Würdigung

Die Frage, unter welchen Voraussetzungen künftige Generationen mittels Markierung über ein Tiefenlager informiert gehalten werden können, lässt sich, wie die Frage nach den Gründen für Markierung (siehe 01), heute nicht abschliessend beantworten. Will man an diese äusserst komplexe Fragestellung herangehen, sind alle möglichen Voraussetzungen zu prüfen, die entwickelt und umgesetzt werden müssen, damit Kommunikation über lange Zeiträume gepflegt und sichergestellt werden kann. Gegenwärtig steht kein methodisches Instrumentarium zur Verfügung, mit dem diese Frage angegangen werden könnte. Allerdings könnten Techniken der Fehlerbaumanalyse verwendet werden, um die Anfälligkeiten und Schwachstellen einzelner Teilsysteme zu erkennen.

Interessant wäre ein solcher Ansatz deshalb, weil er erlauben würde, den gesamten Prozess der Informationsvermittlung über eine längere Zeitspanne gedanklich durchzuspielen. Dieses komplexe Unterfangen könnte wesentliche Hürden oder Schwachstellen in diesem Prozess sichtbar machen.

03 Ist Markierung mit vertretbarem Aufwand machbar?

Problemstellung

Diese Frage geht nicht der technischen Machbarkeit auf den Grund, sondern thematisiert letztlich die wirtschaftliche oder politische Umsetzbarkeit eines Markierungskonzeptes. Einzelne Fragestellungen, die sich daraus ableiten lassen, sind etwa: Sind ökonomische Kriterien berücksichtigt? Ist eine Gesellschaft auf die Dauer überhaupt interessiert, ein Markierungskonzept umzusetzen oder Markierungsmassnahmen fortzuführen und zu unterhalten? Ist in diesem Sinne eine atomare Denkmalpflege möglich und wünschbar? Impliziert ein Markierungsprojekt auch die Schaffung von autonom werdenden Strukturen («Atompriesterschaft»), deren Kontrolle der Gesamtgesellschaft entgleiten könnte? Die Komplexität dieses Fragenkatalogs ist gross. Dennoch sollte es ein Ziel sein, faktisch hinreichend abgestützte Antworten auf die Grundfrage zu erarbeiten.

Angaben in der Literatur

Wie bereits bei den vorhergehenden Fragen sind Teilaspekte der Grundfrage in der ausgewerteten Literatur sehr wohl berücksichtigt und abgehandelt. Grosses Interesse und relativ harsche argumentative Auseinandersetzung bestehen um die Frage der «Atompriesterschaft» (Sebeok 1990, S. 141 ff., Weinberg 1972; Weinberg 1999; Blonsky 1990, S. 181 ff., Hauser 1990b, S. 195 ff.; Garfield 1994), die bis heute anhält. Ausgangspunkt dieser Diskussion sind die 1971 im Rahmen einer Tagung der IAEA einsetzenden Meinungsverschiedenheiten zwischen Nuklearexperten (IAEA 1971, S. 467 ff.), die Weinberg 1972 dazu bewogen, seinen Standpunkt in einem Artikel in der Wissenschaftszeitschrift «Science» zu publizieren (Weinberg 1972). Er berief sich in diesem Zusammenhang auf einen «faustischen Pakt», den die Nukleargemeinschaft geschlossen habe, welcher unermessliche Energiequellen zur Verfügung stellte, dafür aber Wachsamkeit und Langlebigkeit der sozialen Institutionen verlangte. Weinberg prägte später auch den Begriff des wissenschaftlichen Millenarismus (Weinberg 1999, S. 531, 537 ff.), der sich an der Wiederkunft Jesu und seines Tausendjährigen Reiches sowie am Credo apokalyptischer religiöser Strömungen im Mittelalter orientiert (siehe z. B. Cohn 1961; Minois 2002) und den Glauben an die ab-

solute Vorbestimmtheit der Geschichte übernimmt, der chiliastischen Bewegungen² eigen ist. Die Frage nach der institutionellen Kontrolle in der Zukunft ist aber nur eine der Kernfragen in diesem Kontext.

Sehr viel weniger Staub aufgewirbelt haben ökonomische Fragestellungen, auch wenn solche genauso folgenschwere Konsequenzen nach sich ziehen können wie Strukturdefizite. Die Literatur zu Themen wie Kosten der Entsorgung, Kosten-Risiko-Analysen oder ökonomische Effizienz ist breit (WIPP 2000; Neill et al. 2003, WIPP 2004a). Meistens begnügen sich solche Studien aber mit dem Hinweis, dass ökonomische Prognosen nur Trends widerspiegeln (NEA 2006, S. 14).

Erfahrungsgemäss sind grössere Projekte ökonomisch effizienter, was ohne Zweifel für die Strategie internationaler Tiefenlagerprojekte spricht, wie sie etwa Chapman et al. (2003) oder McCombie et al. (2002, S. 6 ff.) vertreten. Der Ruf nach einer atomaren Denkmalpflege ist aus einer ökonomischen Perspektive wirtschaftlich ruinös und würde die nukleare Stromerzeugung ernsthaft infrage stellen (Schüring 1995, S. 174). Würden einzelne Kostenpunkte einer atomaren Denkmalpflege über 10 000 Jahre extrapoliert, wäre ein solches Unterfangen ökonomisch kaum durchführbar³.

Würdigung

Ähnlich wie bei der vorhergehenden Frage steht keine umfassende Methode zur Verfügung, die es erlauben würde, den Aufwand für die Markierung verlässlich zu ermitteln. Grobe Schätzungen des finanziellen Bedarfs unter sehr vereinfachten Annahmen führen zur Erkenntnis, wonach Aufgaben dieser Art vom Wirtschaftlichen her gesehen schwer abschätzbar sind und kaum durch die nutzniessenden Generationen abgedeckt werden. Noch unsicherer ist die strukturelle Absicherung eines Markierungsprogramms, sodass über generelle Grundsätze hinaus wenig Konkretes über künftige Organisationsformen einer atomaren Denkmalpflege gesagt werden kann. Dennoch steckt viel politischer Sprengstoff in dieser Frage, insbesondere was die ethischen Komponenten jetzigen gesellschaftlichen Tuns angehen.

04 Wie weit soll der Schutz künftiger Generationen gehen?

Problemstellung

Die Frage thematisiert ethische Prinzipien, insbesondere wann Sicherheit aus der Sicht der nutzniessenden Generationen als erfüllt zu betrachten ist. Diese Frage ist eng an das Prinzip der Nachhaltigkeit gebunden, welches heute als Grundsatz gesellschaftlichen Handelns akzeptiert ist.

Mit der Frage, wie weit der Schutz künftiger Generationen gehen soll, wird eine Messlatte gelegt, die bestimmen soll, wie viel aus heutiger Sicht zu machen ist, damit dem Prinzip der Nachhaltigkeit genüge getan wird, und zwar nicht nur aus der Optik des Strahlenschutzes. Damit einher geht auch eine Gewissensfrage, die an verantwortungsvolles Handeln gestellt wird und die eine ethische Entlastung der nutzniessenden Generation erbringen soll. Wie weit soll mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle – und im spezifischen mit der Markierung des Tiefenlagers – gegangen werden, damit die «Pflicht» erfüllt wird, die sich aus der Nutzung und dem Umgang mit der atomaren Technologie für die Zukunft ergibt?

Natürlich wird die Beantwortung einer solchen Frage mehrdimensional sein, da «Sicherheit» oder «Pflicht» Wertkategorien widerspiegeln, die kultur- und zeitabhängig sind und somit starkem Wandel unterworfen sein dürften. «Sicher» ist für die Befürwortenden der Technologie ein geologisch sicheres Tiefenlagersystem, während Gegner/innen dann von Sicherheit sprechen werden, wenn die Produktion von radioaktiven Abfällen eingestellt ist. Ein Markierungssystem kann von praktisch null Massnahmen bis hin zu einem ausgeklügelten und monumentalen System vielfältiger Komponenten reichen, die in

² Chiliasmus: radikale christliche Erwartungslehre des unmittelbaren Anbrechens des Tausendjährigen Reiches, siehe Glossar.

³ Je nach Deponie und Zustand derselben kostet deren Überwachung und Wartung zwischen einigen Zehntausend und Millionen von Franken jährlich, was extrapoliert milliardenschwere Rückstellungen für eine atomare Denkmalpflege erfordern würde. Zinsmaschinen, die über längere Zeitphasen (> wenige Jahrzehnte) eine mehr oder weniger konstante Rendite abwerfen, sind undenkbar, wie die gegenwärtige Finanzkrise wieder einmal vor Augen führt (siehe dazu Einträge zur Geschichte der Spekulation, siehe insbesondere Galbraith J.K. [1992]).

der Zukunft zu pflegen wären. Von Bedeutung in diesem Zusammenhang ist aber nicht nur, was unternommen werden soll, damit Nachhaltigkeit sichergestellt werden kann, sondern wie es philosophisch oder ethisch begründet wird.

Angaben in der Literatur

Fragen dieser Art sind in erster Linie von international wirkenden Körperschaften thematisiert worden, wie der IAEA oder der Atomenergie-Agentur der Organisation für wirtschaftliche Kooperation und Entwicklung (NEA/OECD). Diese internationalen Körperschaften setzen sich seit den 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts intensiv damit auseinander, Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Tiefenlagern zu definieren (siehe z. B. Linsley et al. 1989; IAEA 2006, NEA 2007), wobei eine breite Palette technischer und naturwissenschaftlicher Anforderungen zur Anwendung gelangt. Als «erfüllt» und damit nachhaltig gilt, wenn ein Tiefenlager umgesetzt werden kann, das über die anvisierte Einschlussdauer den Schutz von Mensch und Umwelt sicherstellt, und zwar allein auf der Basis von passiven Sicherheitsmassnahmen (siehe Pescatore et al. 2007, S. 2; Blonsky 1990, S. 171).

Die Umsetzung eines Tiefenlagers, dessen Sicherheit auf passiven Systemen beruht, soll jedoch durch weitere Massnahmen ergänzt werden. Diese reichen von relativ konventionellen Massnahmen der Informationstradierung (z. B. nachgeführte und beständige Archive sowie ausgeklügelte Markierungstechniken, siehe WIPP 2000, WIPP 2004a, WIPP 2004b) bis hin zu neuen Vorschlägen über kulturelle Tradierung (Pescatore et al. 2007, NEA 2007a), die weit über rein sprachliche oder ethnologisch gesteuerte Informationsvermittlung hinausgehen.

Ungeachtet dieser Tradierungsfragen ist die technische Sicherheit unabdingbar. Dabei sollten auch die Lehren aus den negativen Erfahrungen und den planerischen Misserfolgen der konventionellen Deposition von Abfällen (Altlasten) gezogen werden, die ein weites Spektrum von Fehlentscheiden in der Vergangenheit sichtbar machen. In erster Linie heisst dies vermehrte Planungssicherheit und Erhöhung der Planungsqualität, Einbezug von Behörden und Standortregionen in planerische Entscheide (Pescatore et al. 2007, S. 5, NEA 2007a, S. 35 ff.), Reduzierung der Fehleranfälligkeit von technischen Systemen, Einbezug von Sollbruchstellen usw. Diese technischen Verbesserungen lassen sich nicht in geschlossenen Expertengremien entwickeln, sondern bedürfen einer Kontrolle und einer Anerkennung durch die betroffenen Kreise. Probabilistische Sicherheitsanalysen genügen dieser Herausforderung nicht.

Würdigung

Die Rolle der nutzniehenden Generationen ist in der Literatur klar nachzuvollziehen: Es wird von ihnen verlangt, dass sie ein passiv sicheres Tiefenlagersystem entwickeln und umsetzen, das funktionsfähig bleibt, solange die radioaktiven Abfälle gefährlich sind. Unklar oder umstritten ist aber, mit welchen Mitteln dieses Ziel erreicht und wer an ihm beteiligt werden soll. Wie die konkreten Planungen der Tiefenlager heute zeigen, sind noch lange nicht alle Lehren aus den vergangenen Planungsfehlern im Altlastenbereich gezogen worden.

Über das Ausmass des Schutzes der künftigen Generationen herrscht heute keinen Konsens. Die meisten Naturwissenschaftler/innen, die in der Fachliteratur zu Wort kommen, halten den Schutz künftiger Generationen für erfüllt, wenn Tiefenlager gemäss Modellen und Prognosen sicher betrieben werden können. Sobald aber gesellschaftliche Aspekte mit einbezogen werden, wird die Frage komplex. Wie soll man etwa, um nur ein Beispiel zu nennen, mit der Frage der Rohstoff- und Nutzungskonflikte umgehen, die künftige Generationen mit einbindet? Für künftige Generationen wird jeder direkte Umgang mit den Abfällen ihrer Vorfahren zu einer Last.

05 Was soll künftigen Generationen übergeben werden?

Problemstellung

Die Frage bezieht sich in erster Linie auf den Inhalt der Information an die künftigen Generationen. Welche Informationen sollen überhaupt tradiert werden? Geht es im Wesentlichen um das Gefahrensystem als solches (das Lager und seine Eigenschaften), oder sollen zusätzliche Informationen, wie z. B. der Kontext, in dem das Tiefenlager entstand, einbezogen werden? Soll ein ganzes Markierungssystem übergeben werden, konkret also ein definitives und möglichst robustes Informationssystem, oder wird eher darauf gesetzt, dass Information von den künftigen Generationen mitgestaltet werden soll. Wie sollen Entscheidungen getroffen werden, was tradiert oder nicht tradiert werden soll?

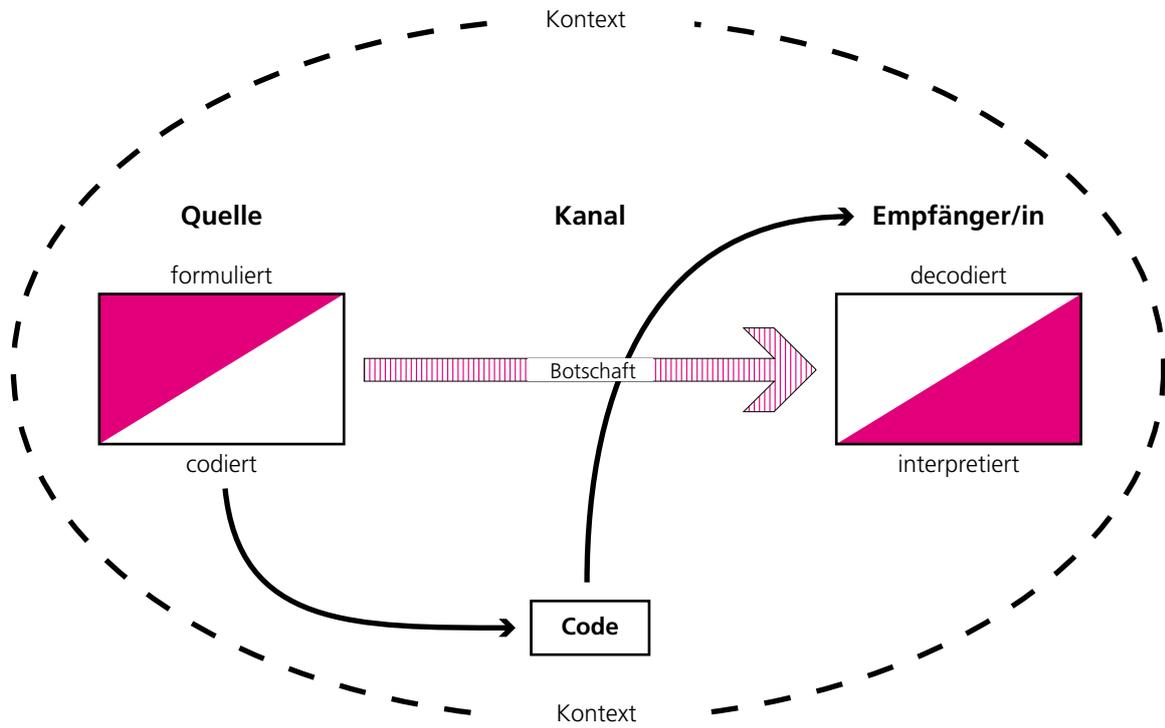
Die Frage an sich ist alles andere als trivial, auch wenn sie auf den ersten Blick banal erscheint. Wir finden – wie in der Literatur in den Abschnitten D1-D4 und E1-E4 aufgeführt – viele konkrete Ideen und Techniken zur Markierung eines Lagers, zu den verwendeten Materialien und ihrer Lebensdauer, zu semantischen Überlegungen, zu Enkodierungs- und Dekodierungsfragen usw. Die naheliegende Frage, was überhaupt tradiert werden soll, steht weniger im Blickpunkt der Überlegungen.

Angaben in der Literatur

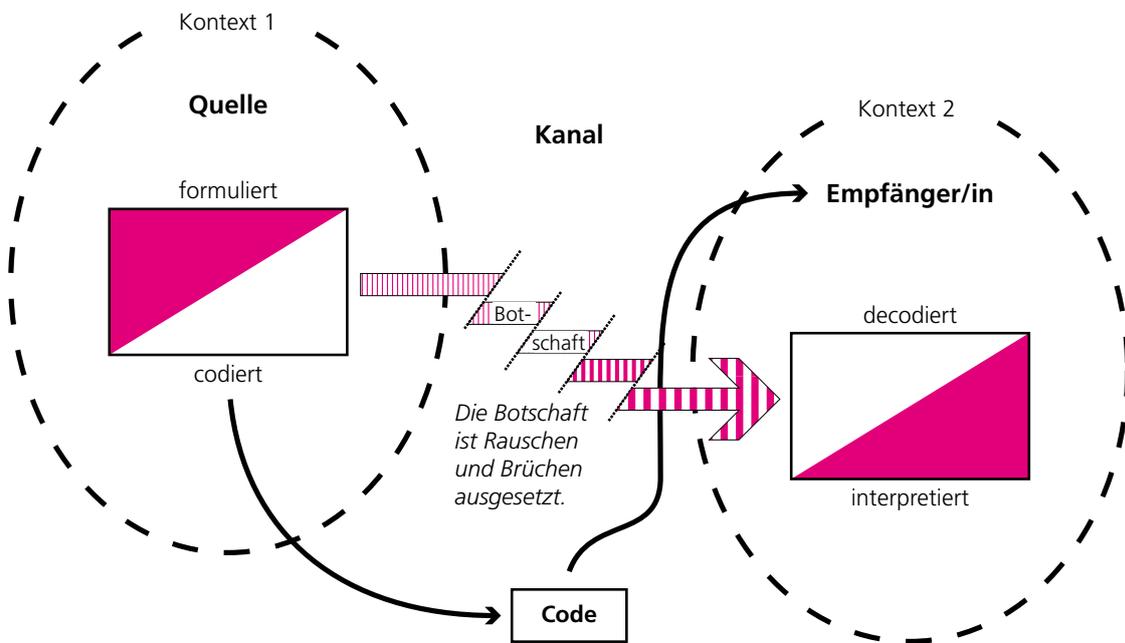
Wie die Grundlagen und Literatur eines jeden Entsorgungsprogramms zeigen, gibt es eine Unzahl von Unterlagen, die von Forschungsanträgen und -projekten (Forschungspläne, Skizzen, Anträge, Experimente usw.) über das tägliche Handling des Geschäftes (Budgetplanungen, Finanzkontrolle, Jahresberichte, Briefe, Protokolle, E-Mails usw.), Informationsunterlagen (Fotos, Filme, Flyer, Info-Broschüren, Presseartikel usw.) bis hin zu wissenschaftlichen Berichten (Tagungsunterlagen, interne und externe Berichte) und die Charakterisierung der Abfallstoffe (Datensets für die zu beseitigenden Abfälle und Gebinde, Codes usw.) reichen. Synthesen eines Gesamtprojektes sind selten, wie auch die systematische Abhandlung von Standortdaten, eine systematisch nachgeführte Datei von Plänen und standortspezifischen Untersuchungsdaten, Unfälle und Störfälle, Tradierungstechniken usw., welche künftige Generationen über Inhalt und Risiken des Lagergutes sowie der Konfiguration der Anlage aufklären würden. Dieses Problem ist bei Deponien sehr wohl bekannt, weshalb der Aufwand bei deren Sanierung meistens sehr gross ist und trotzdem nur ein Bruchteil der wichtigen Information zu beschaffen ist. Bei der Informationstradierung ist zu beachten, dass nicht jedes Datenset oder Dokument, das nicht wesentliche Information vermitteln kann, tradiert wird, da künftige Generationen vermutlich bei der Auswertung von grossen Informationsmengen und unterschiedlichen Datenträgern ein echtes Problem bekämen (Cohen 2005). Das Problem ist tatsächlich: Was übergebe ich in welcher Form der Zukunft, damit unsere Nachkommen sinnvolle und auswertbare Informationen erhalten. Solche Überlegungen führten dazu, eine Anzahl von Informationsebenen zu unterscheiden (siehe C3).

Diese Aspekte sind – wie gesagt – in der gesichteten Literatur beschränkt angedacht worden. Es finden sich zwar eine Unzahl von Information über was wie und wo möglich ist, aber keine systematische Analyse, welche Informationsauswahl übergeben werden soll. Manche Autorinnen und Autoren (Kaplan 1982, S. 74; HITF 1984, S. 43–52; Tannenbaum 1990, S. 133 ff.) unterschieden zwar verschiedene Informationsniveaus (levels), die künftigen Generationen tradiert werden sollten (siehe C3). Sie werfen u. a. auch Fragen nach der Verständlichkeit einer Information in der Zeit auf, greifen aber nicht auf, welche Information dann tatsächlich in welcher Form übergeben werden soll. Auch Sprenger (2007, S. 28 ff.) geht nicht konkret auf den zu tradierenden Informationsgehalt ein. WIPP (2004a, S. 7) erläutert andererseits, dass genügend Information übergeben werden soll, spezifiziert diese aber nicht⁴. An anderer Stelle zeigt WIPP (2000, S. 49 ff.) ein imposantes Testprogramm für die Prüfung der Beständigkeit der Informationsträger von Markiersystemen auf. Auch die Rückverfolgbarkeit (traceability) solcher Daten, etwa entsprechend QS-Programmen (WIPP 2000, S. 45), wird in solchen Projekten ausgewiesen, nicht aber auf die Informationsobjekte zurückprojiziert. Die Frage lautet nämlich, ob solche QS-Regelungen

⁴ «To inform an intruder about the degree and nature of the danger, permanent markers must [...] contain sufficient information about the site and its dangers to dissuade intrusion and should be identifiable within the first four levels of understanding (as discussed in the CCA, Appendix PIC).»



Figur 3a: Semiose nach Sebeok (1990)



Figur 3b: Semiose für Nachrichten für lange Zeiträume

in 10 000 Jahren Sinn machen können, da eine Rückverfolgung von Prozessen kaum oder nicht mehr möglich ist.

Würdigung

Die fundamentale Frage nach Art und Menge der zu tradierenden Information wird offensichtlich als derart trivial angesehen, dass sie bisher nicht in umfassender Art angedacht wurde. Eine grundsätzliche Auseinandersetzung damit wäre aber für jede Risikotechnologie vorteilhaft.

06 Sind Missdeutungspotential, Manipulation und/oder Fehler- und Störanfälligkeit des Markierungssystems als wesentliche Elemente erkannt?

Problemstellung

Die Frage geht im Wesentlichen auf die potentiellen Veränderungen des Markierungssystems im Laufe der Zeit ein. Hier sind unterschiedlichste Ein- und Auswirkungen zu betrachten. Die Transformationen am Informationsgehalt können das Markierungssystem als eine Art «Rauschen» begleiten und es in vieler Hinsicht verfälschen; auch durch natürliche Prozesse an der Erdoberfläche, wie etwa Erosion, Frostschäden, Bewüchse usw. Diese Stör- und Fehleranfälligkeit kann aber nicht nur durch vielfältige systemische Veränderungen eintreten, sondern kann bewusst herbeigeführt werden. In diesem Fall tritt eine neue Qualität der Transformation hinzu, nämlich die bewusste Manipulation oder Zerstörung eines Systems durch künftige Generationen und Kulturen.

Angaben in der Literatur

Einzelne Aspekte – etwa die Transformation von Information, z. B. im Sinne des Wandels in den Sprachen oder Enkodierungs- und Dekodierungsprobleme – sind seit geraumer Zeit erkannt worden, und zwar in erster Linie von Semiotikern (Sebeok 1984; Tannenbaum 1984). Dies erstaunt insofern nicht, weil Semiotik sehr grundsätzlich nach Transformationsprozessen von Information fragt und diese systematisch ausleuchtet. Dabei werden auch unterschiedliche Stör- und Verfälschungsquellen sichtbar, die bei der Transformation von Information zu beachten sind und Sinn und Gehalt von Information grundsätzlich verändern können. Das Modell von Semiosen (nach Pierce, vgl. Sebeok 1984; Verón 2004 und Figur 3a) geht aber nicht nur den Transformationsprozessen einer bestimmten Nachricht auf den Grund, sondern auch jenen, die sich aus kontextuellen gesellschaftlichen Änderungen ergeben, also Veränderungen, die von äusseren Faktoren abhängig sind. Beispiele sind kulturelle Umwälzungen und Brüche (Imhof et al. 1989), die zum teilweisen oder vollständigen Verlust kultureller Identitätsmerkmale führen, wie etwa Sprache, Mythen, Werte, Bräuche und andere Tradierungssysteme. In anderem Zusammenhang wurden solche Gedanken in Hermeneutik oder Dekonstruktionstheorie formuliert, und in einer noch generelleren Art und Weise bei den Konstruktivisten aufgeworfen (z. B. Sozialkonstruktivismus, siehe Berger 1966; radikaler Konstruktivismus siehe Watzlawick 1976). Immer wieder stehen Wahrnehmung, Wirklichkeit und Verfälschung im Vordergrund und die vielfältigen Möglichkeiten, diese – bewusster oder unbewusster – zu beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, ist jener der bewussten Manipulation, Beeinflussung oder Zerstörung von Information. Auch hier ist viel aus archäologischen und historischen Prozessen abzuleiten, insbesondere die gezielte Zerstörung der kulturellen Identität besiegter Völker (Kiernan 2007), angefangen bei der Bibel und der Landnahme des «heiligen Landes», der Ausradierung von Moab in Kanaan und die Landnahme des Westjordanlands durch die Israeliten (Bibel, Numeri 50-56, Josua 6,20-21; 8,24-29 usw.) bis hin zu den weitverbreiteten Gräueln des 20. Jahrhunderts, mit richtiggehenden Exterminationsfeldzügen (Armenien ab 1915 [Balakian 2003]; Deutschland unter Hitler [Bloxham 2003]; Sowjetunion unter Stalin [Courtois 1998]; China unter Mao [Halliday et al. 2005]; Kambodscha unter Pol-Pot [Chandler 2007] usw.). Dass diese Auslöschungswellen offenbar zur Ausstattung des Menschen gehören, zeigen die bereits im neuen Jahrtausend in Gang gesetzten Schlächtereien (Darfur in West-Sudan; Ostkongo usw.). Von der Antike bis zur Moderne haben die siegreichen Kulturen im Zuge solcher Auslöschungen das kulturelle Erbe der Besiegten auszulöschen versucht, ganz zu schweigen von der Befürchtung, dass

Genozide zur Grundausstattung des Homo gehören (Leakey 1999, S. 133). Ein neueres Beispiel der Zerstörung kulturgeschichtlichen Erbes aus Motiven religiösen Fundamentalismus' hat sich im März 2001 im multikulturellen Bamiyan, Afghanistan, ereignet: die Sprengung zweier bis 1500 Jahre alten Buddha-Statuen⁵.

Würdigung

Für radioaktive Abfälle sind sowohl Transformation wie Manipulation betrachtet oder angedacht worden, in erster Linie von Semiotikerinnen und Semiotikern (Sebeok 1990, HIFT 1984), teilweise auch von internationalen Agenturen (NEA 2002). Eine vertiefte Analyse von Manipulation und Zerstörung von Information und die daraus für ein geologisches Tiefenlager zu ziehenden Konsequenzen konnten in der betrachteten Literatur nicht ermittelt werden. Eine trans- oder interdisziplinäre Aufarbeitung dieser weitgefächerten Problematik wäre im jetzigen Stadium der Planung hilfreich bei der grundsätzlichen Auslegung der Lagerkonzeption, der Wahl der einzulagernden Behältermaterialien und der Definition der Markierung. Wertvolle Erkenntnisse dürften aus archäologischen und kulturanthropologischen Studien gewonnen werden, namentlich in Zusammenhang mit kulturellen Bruchsituationen. Die Universalität solcher Phänomene (Grinsell 1975) sollte Grund genug sein, dieser Fragestellung höchste Priorität einzuräumen.

4.3 Fragen zu den spezifischen Teilsystemen

A Mensch und Gesellschaft

A1 An wen richtet sich die Markierung in der Zukunft («primitive» Gesellschaft oder Hochkultur? Homo «stupidus» oder Homo «megasapiens» etc.)? Werden evolutive Aspekte in der Markierungsliteratur behandelt? Sind Prozesse und Veränderungen dieser Art überhaupt erkennbar (z. B. Szenarienanalysen)?

Problemstellung

An wen soll die Warnung vor einem Tiefenlager gerichtet werden? Dies ist eine der Grundfragen, die sich stellt, wenn Sicherheitszeiträume von 1 Million Jahren betrachtet werden und zugleich auf die Entwicklung der Hominiden in einem Zeitraum gleicher Grössenordnung zurückgeblendet wird (siehe Figur 2). Wer in die Vergangenheit zurückblickt, muss feststellen, dass der moderne Mensch eine «Karriere» (Schneider 2008) von gut 100 000 Jahren hinter sich hat und die Frage berechtigt ist, welchen Formen von – möglicherweise höher entwickelten – Wesen wir unseren «Müll» hinterlassen. Sie kann zwar nicht geklärt werden, ist aber trotzdem von grosser ethischer Relevanz, sofern Nachhaltigkeit als leitendes Prinzip modernen gesellschaftlichen Handelns angesehen und vor allem umgesetzt werden soll.

Angaben in der Literatur

Verschiedene Autorinnen und Autoren haben dieses Problem grundsätzlich erkannt, wenn auch unterschiedlich interpretiert. Die Diskussion um Herkunft und Zukunft des homo sapiens ist ohnehin ein Dauerthema in der Erkenntnisgeschichte des Menschen, bekam aber mit Darwins «Entstehung der Arten» eine vollkommen neue Bedeutung. Das späte 19. und die ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts sind von diesem Thema richtiggehend besetzt (Boia 1989), von der literarischen Aufarbeitung des Themas (z. B. Bulwer-Lyttons futuristischer Roman «The Coming Race» oder Maupassants «Horla») bis hin zu den vielfältigen Programmen zur sozialbiologischen und eugenischen Zurichtung des Menschen (Wess 1989). Im letzten Jahrzehnt hat sich die anthropologische und neurobiologische Forschung wieder ver-

⁵ www.zeit.de/2001/11/200111_taliban.xml; www.afghanistan.adra.de/buddha-statuen-zerstoerung-und-wiederaufbau-in-bamiyan/.

mehrt auf diese Themen konzentriert. Weitere Erkenntnisse leiten sich aus entwicklungsgeschichtlichen Abhandlungen über Sprache ab (Berger 2008, Watson 2005), die zeigen, dass Entwicklungsprozesse innerhalb einer Hominidenspezies stufenweise ablaufen und Rückkoppelungen zwischen biologisch-neurologischen und geistig-technischen Fähigkeiten bestehen.

In der nuklearen Entsorgung wurde diese Frage bereits anfangs der 70er-Jahre kontrovers diskutiert (IAEA 1972) und ausgeleuchtet, in welche grundsätzliche Richtung sich die Gesellschaft entwickeln könnte. Markierungsstudien zu Beginn der 80er-Jahre greifen diese Fragestellungen wieder auf. Tannenbaum (1984, S. 4 ff.; 1990, S. 127 ff.) analysiert mögliche Entwicklungsszenarien und streicht die Bedeutung des Informationstransfers bei Veränderungen von Spezies und Technik heraus. Er weist auf die enorme Geschwindigkeit bei der Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung hin, die allein über technische Prozesse der letzten 100 Jahre erfolgt sind (siehe auch Buser 1997, S. 51), und schliesst wie Kowalski (2002) für die Technikfolgeabschätzung, dass evolutive Prozesse nicht beantwortbar sind. Auch sozialbiologische und genetische Veränderungen in der technischen Zurichtung des modernen Menschen könnten dabei eine Rolle spielen, sodass der heutige «homo sapiens» über genetisch-medizinale Eingriffe in seiner Erbsubstanz mittelfristig bereits stark betroffen sein könnte.

Andere Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass Änderungen in der menschlichen Evolution weniger ausgeprägt sein könnten. Bastide et al. (1990, S. 92) vermuten, dass sich menschliche Morphologie und Ausdrucksweisen in 10 000 Jahren wenig ändern werden, da sie bereits wesentlich länger existieren. Ähnlich argumentiert Givens (1990, S. 96), der eine isomorphe Entwicklung für die Spezies «homo sapiens» annimmt und etwa Sprach- oder Wissenstradierung als mehr oder weniger uniformen Prozess auffasst. Deshalb vertritt er auch die Ansicht, dass ein Warnsystem für den heutigen «homo sapiens» entworfen werden soll, und nicht für eine unbekannte Spezies.

Einigkeit besteht in der Literatur, dass Prognosen über die effektive Entwicklung von Spezies und Gesellschaft nicht möglich sind und somit nur beschränkt behandelt werden können. Als Szenarien können sie aber wertvolle Hinweise darauf liefern, wie der Informationstransfer für die verschiedenen Entwicklungszustände vorzusehen wäre (Benford et al. 1991, S. 5, siehe dazu auch B2).

Würdigung

Die Frage nach den Empfangenden einer Botschaft oder Warnung vor einem Tiefenlager ist zweifelsfrei schon frühzeitig identifiziert worden, ist aber nur von beschränktem Interesse, da sie keine zusätzliche Erkenntnis für Handlungsanweisungen verspricht. Das systematische Durchdenken von Szenarien könnte aber wichtige Hinweise über die Gestaltung von Information geben, je nachdem, wer die Adressatinnen und Adressaten in Zukunft sein könnten (homo «stupidus» Haeckelii versus homo «megasapiens», d. h. «primitive» Gesellschaft versus Hochkultur.

A2 Wie lange soll markiert werden? Oder anders gesagt: Für welche Zeiträume soll Markierung vorgesehen werden? Sind verschiedene Markierungstechniken für verschiedene Risikozustände vorzusehen?

Problemstellung

Die Frage nach der Dauer der Markierung hängt sehr stark davon ab, was konkret markiert werden soll und ob es sich allein um die Oberfläche, um bestimmte Anlageteile oder mehr oder weniger um die Gesamtanlage handelt – d. h. um Tiefenlager, Zugänge und die darüber liegende Sicherheitszone. Solange Tiefenlager und Zugänge (Schachtanlagen) nicht durch natürliche Ereignisse freigelegt oder durch menschliches Eindringen beschädigt oder ausser Kraft gesetzt werden, ist die Frage nach der Dauer von Markierung nicht besonders wichtig oder gar obsolet. Anders sieht es mit an der Oberfläche oder oberflächennah liegenden Objekten und Anlagen aus, beziehungsweise mit Dokumenten, die in Archivform verwahrt werden sollen, die gesellschaftlichen Prozessen und Umweltkräften unmittelbar unterliegen. Hier sind natürlich Fragen nach der Dauer der Markierung von grosser Bedeutung.

Angaben in der Literatur

Beim Umgang mit Tiefenlagern werden in der Literatur zwei vollkommen unterschiedliche Zeiträume betrachtet. Die Angaben über den ersten Zeitraum folgen Überlegungen zur Abfallqualität und der Abnahme ihrer Radiotoxizität im Laufe der Zeit. Im schweizerischen Entsorgungsprogramm werden in Übereinstimmung mit anderen nationalen Programmen Isolationszeiten zwischen 100 000 Jahren (SMA-Lager) und 1 Million Jahre (HAA-Lager) angegeben (Nagra 2008b, S. 27), wobei die Radiotoxizität der Abfälle in den ersten 1000 Jahren stark abnimmt. Der für die Dauer der Markierung betrachtete Zeitraum wird in den meisten Studien auf 10 000 Jahre angesetzt (Benford et al. 1991).

Der Zeitraum von 10 000 Jahren wird auf unterschiedliche Art und Weise begründet: Blonsky (1990, S. 171) weist darauf hin, dass die Zeitspanne von 10 000 Jahren der Halbwertszeit von radioaktivem Abfall aus Waffenprogrammen entspricht. Ähnlich argumentiert HITF (1984, S. 11). Givens (1990, S. 95) gibt zu bedenken, dass Nachrichten, die Tausende von Jahren überdauern haben, nicht für künftige Generationen gedacht waren und begründet auf diese Weise die Zeitmarke von 10 000 Jahren. Kaplan (1982, S. 1) argumentiert, dass dieser Zeitraum konsistent ist mit den Kriterien der EPA⁶ für das Management von Abfällen. Tannenbaum (1984, S. 1) bemerkt, der Zeitraum von 10 000 Jahren sei eine vernünftige Zeitspanne für die Neutralisierung der Radioaktivität. Sebeok (1990, S. 141 ff.) wiederum weist darauf hin, dass die 10 000-Jahr-Marke willkürlich sei. Tatsächlich fällt auf, dass die «harten» naturwissenschaftlichen Zeitmarken und die gesellschaftlich als akzeptabel veranschlagten Zeiträume für die Kommunikation mit der Zukunft nicht in Einklang zu bringen sind. Bereits eine Kommunikation über 300 Generationen (ca. 10 000 Jahre) ist – was die Transmission von Information angeht – eine Herausforderung besonderer Art, und möglicherweise nur über spezielle Relaisfunktionen zu gewährleisten (siehe auch Sebeok 1984, S. 2).

Aus den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Kommunikation über lange Zeiträume lassen sich die Anforderungen an mögliche Transmissionstechniken einerseits und an die standortspezifischen Rahmenbedingungen andererseits ableiten (HITF 1984). Die Transmissionstechniken verlangen ein hohes Mass an Redundanz, sodass die Information auf vielen unterschiedlichen Kanälen und mit unterschiedlichen Techniken, Materialien und Anordnungen überdauern kann. Bei den standortspezifischen Rahmenbedingungen sind die Gegebenheiten der Umwelt von ausschlaggebender Bedeutung was das Klima wie auch die Besiedelungs- und Nutzungsszenarien angeht (siehe HITF 1984, S. 31 ff.). Die sich daraus ergebenden Folgen für die Markierungstechniken und deren Beständigkeit in der Zeit (siehe B1, E2) sind aus archäologischer und materialtechnischer Sicht schon frühzeitig ausgeleuchtet worden (Kaplan 1982, Berry 1983).

Bei Untertagebauten ist Markierung aufgrund der Forderung nach Rückholbarkeit sinnvoll. Dieser Themenkreis ist – was die Problematik der Beständigkeit von Markierungsmaterialien angeht – aber nicht kritisch.

Würdigung

10 000 Jahre sind ein langer Zeitraum, der – was die gesellschaftliche Betreuung oder Begleitung angeht – nicht wirklich begründet werden kann. Diese Zeitmarke entspricht dem historischen Zeithorizont der neolithischen Revolution, die Ackerbau, Viehzucht und Vorratshaltung hervorbrachte. Sie liegt in vielen Kulturen dieser Welt zwischen einigen Tausend Jahren und etwas mehr als 10 000 Jahren zurück. Weiter vorwärts zu gehen und eine noch längere Markierungszeitdauer in Betracht zu ziehen, macht aber wenig Sinn, auch wenn es technisch möglich ist, Markierungsmaterialien von sehr viel grösserer zeitlicher Beständigkeit herzustellen (siehe A3, C3 und E2).

⁶ US Environmental Protection Agency

A3 Welche Rolle spielt die Technik und die Technikentwicklung in der Frage der Markierung?

Problemstellung

Die Frage nach Anwendbarkeit und materialtechnischer Beständigkeit von eingesetzten Informationsträgern mündet direkt zur Frage nach Technik und Technikentwicklung. Damit einher geht die Frage, ob die technische Entwicklung überhaupt vorhersagbar ist und welche Risiken bei einem rapiden Fortschreiten der Technik für ein Tiefenlager zu beachten wären. Schliesslich stellt sich aber auch die Frage, ob Technik allein genügt, um einen hinreichenden Schutz eines Tiefenlagers zu gewährleisten.

Angaben in der Literatur

Bei der rasanten Technikentwicklung und der absehbaren Erweiterung der Nutzung des Tiefuntergrundes durch den Menschen⁷ ist das vordringlichste Problem für die Langzeitsicherheit der Schutz eines Tiefenlagers vor Prospektionen und Grossprojekten im Untergrund (z. B. Geothermie, Swisssmetro). Die Technik entwickelt sich so rasch, dass optimierte oder neue, billigere Erschliessungsverfahren im Untergrund sich bereits abzeichnen (siehe Häring 2007; Verfahren wie z. B. Schmelzbohrverfahren mit Flamm- oder Plasmastrahl, Dampf-Jet-Schmelzbohrverfahren durch Hochtemperaturdampf). Durch diese potentielle Gefährdung eines möglichen Tiefenlagers kommt den Markierungstechniken künftig grössere Bedeutung zu.

Geometrisch gesehen bietet eine Markierung über dem Perimeter eines Tiefenlagers keinen ausreichenden Schutz mehr vor Intrusion mittels waagrechter Bohrtechnik (siehe Benford 1991, S. 20; Häring 2007, S. 37) und schon gar nicht vor Tunnelbauten. Sollte die Nutzung des Untergrundes im Tempo der letzten 100 Jahre fortschreiten, was zum heutigen Zeitpunkt anzunehmen ist, werden auch Markierungsstrategien gegen ein seitliches Eindringen in ein Lager zu entwerfen sein (siehe C2).

In der Literatur können viele Belege dafür gefunden werden, dass bereits in historischen Zeiten «einfache» Technik ein Vordringen in die Tiefe ermöglichte. Buja (2003, S. 654) zeigt im Rahmen einer geschichtlichen Aufarbeitung der Bohrtechnik auf, wie in China bereits 600 v. Chr. mehrere Hundert Meter tiefe Bohrungen ausgeführt wurden. Seit der Ölbohrung in Spindletop (Beaumont, Texas), welche den Beginn der modernen Erdölbohrtechnik markiert, gilt die Rotarytechnik für Bohrungen in Tiefen von mindestens einigen Hundert Metern als erprobt. Gleiches gilt für Bergbau- und Tunneltechnik. Die Erschliessung von tief liegenden Bergwerken geht bis in die Urzeiten zurück und ist in vielen Gebieten sehr gut belegt (siehe etwa Internet unter Stichworten Bergbau Antike, z. B. die an Erzen reiche Insel Thasos; für Literatur aus dem Altertum siehe Kleiner Pauly 1975). Im Mittelalter wird die Förderung von Salz, Kohle und Erzen in Europa in Tiefen von Hunderten von Metern intensiviert (Agricola 1557/1928). Die Dampfmaschine verhilft der modernen Bergbautechnik endgültig zum Durchbruch. Im 19. Jahrhundert werden vielerorts auf der Welt Bergwerke mit bis über 1000 m Tiefe errichtet, seit dem 20. Jahrhundert sogar mit bis über 3500 m Tiefe (Western Deep Mine, Südafrika). Ähnliches gilt für die Erschliessung des Untergrundes durch Eisenbahn-Tunnels, die ab dem 19. Jahrhundert grosse Erfolge verbucht (siehe etwa Gotthard). Diese Beispiele zeigen, wie wichtig es ist, Markierungen gegenüber Eindringenszenarien im Bauwerk selber zu entwerfen.

Würdigung

Markierungstechniken und die Charakteristiken der hierfür verwendeten Materialien sowie die möglichen Prozesse, die zur Degradation dieser Materialien führen können, werden von der Literatur gut erfasst (siehe B1, B3, C2). Für Markierungen in Oberflächennähe sind bereits Strategien und industrielle Markierungstechniken so weit entwickelt, dass eine Umsetzung bei konkreten Projekten realistisch ist. Für eine Markierung des Lagers selber und seiner Zugänge bleiben hingegen viele Fragen offen, namentlich bei einer Bedrohung von der Seite. Eine Markierung des Lagers mit starken Eisenmagneten oder an-

⁷ Western Deep Mine wird in den nächsten Jahren bis 5 km Tiefe erweitert, Bohrungen bis 10 km Tiefe sind seit Jahrzehnten Stand der Technik (Kola Russland: 12 262 m; Sachalin Russland: 11 680 m; Bertha Rodgers Oklahoma: 9583 m usw.).

deren korrosiven Materialien (siehe C2) ist aufgrund der Gasbildung durch Korrosion und den Einbussen der Funktionsfähigkeit fragwürdig. Hinzu kommt, dass der Erfolg bei der Tradierung von Information mit Hilfe von semiotischen Techniken aufgrund der Ungewissheit kultureller und gesellschaftlicher Entwicklung offen bleibt (siehe D3).

Markierungssysteme im Untergrund können durch Technikentwicklung zweifelsohne verbessert werden. Grundsätzlich spielt die Technik in diesem Falle nach heutigem Stand des Wissens aber eine eher untergeordnete Rolle. Offen bleibt, welche Schutz- und Markierungsmaßnahmen gegen seitliches Eindringen möglich sind und wie solche technisch ausgestaltet werden könnten.

A4 Wer soll markieren? Welche Strukturen sind für Langzeit-Sicherheits-Management von Bedeutung? Welche Strukturen / Organisationsmerkmale können eventuell nach Verschluss der Anlage zwingend werden (z. B. Rechtstitel, Verantwortlichkeiten)?

Problemstellung

Die Frage nach den Strukturen für das Langzeit-Sicherheits-Management bezieht sich im Wesentlichen auf zwei Aspekte: die Frage nach der Rolle der in Entsorgungsprogrammen eingebundenen staatlichen Instanzen und die Übernahme von Verantwortlichkeiten nach dem Verschluss eines geologischen Tiefenlagers. Beide Fragestellungen sind für den Bereich der Markierung essentiell.

Angaben in der Literatur

Im Rahmen der Definition fundamentaler Prinzipien für die nukleare Entsorgung weist IAEA (1995, Ziffer 323) darauf hin, dass die Langzeitverantwortung und die Kontinuität der Verantwortlichkeiten zu regeln sind. IAEA (1999, S. 12) wirft die Frage nach der institutionellen Kontrolle von Lagerstätten auf und beantwortet sie in dem Sinne, dass der Staat die Organisationen für die institutionelle Kontrolle eines Tiefenlagers identifizieren und bestimmen soll (z. B. staatliches Departement, staatliche Agentur oder andere vom Staat bezeichnete Organisation). In die gleiche Stossrichtung zielen die Definitionen der amerikanischen Umweltbehörde (US EPA 1993). Chapman et al. (2003, S. 149) diskutieren die Bedeutung von Regulationen bezüglich der Nutzung von Land und Ressourcen, die sich aus der amerikanischen Gesetzgebung ergeben. Sugiyama et al. (2003, S. 2) weisen ebenfalls auf die Vorteile einer Einbindung von Staat oder speziellen Körperschaften für die institutionelle Kontrolle des Standorts für ein Tiefenlager hin.

Die Frage, wer tatsächlich markieren soll, ist stark abhängig von den Strukturen, die ein Land bei der Bewältigung der Entsorgungsfrage geschaffen hat. Das Verursacherprinzip, wie es in der Schweiz im Kernenergiegesetz festgehalten ist, wird in anderen Ländern nicht in diesem Sinne angewendet. Die Mehrheit der Kernenergie nutzenden Länder wie Frankreich, Spanien, Deutschland, Belgien, USA oder Kanada haben staatliche Gesellschaften mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle betraut. Die Elektrizität produzierenden Gesellschaften haben somit die Verantwortung für die Planung und Ausführung von Tiefenlagern staatlichen Instanzen übergeben. Demgegenüber hat die Schweiz das Verursacherprinzip auch für die radioaktiven Abfälle konsequent angewendet.

Elektrizitätsproduzierende Unternehmen – in erster Linie die Kernkraftwerksgesellschaften – sind somit hierzulande direkt für die Planung und Umsetzung von Lagern verantwortlich. In diesem Zusammenhang sind bereits Fragen aufgetaucht, ob eine auf optimierte Rentabilität ausgerichtete Organisation tatsächlich alle Fragen der Langzeitsicherheit mit einbeziehen wird (Buser et al. 1981, S. 175).

Würdigung

Eine starke öffentliche Einbindung demokratisch legitimierter öffentlicher Institutionen für die Langzeitkontrolle geht also zweifelsohne bereits aus den verschiedenen internationalen und nationalen Regulierungen hervor, hat aber bisher zu keiner Festlegung von generell akzeptierten Markierungsstrategien geführt. Im schweizerischen Recht sind diese Fragen heute ansatzweise in Art. 70 der Kernenergie-

verordnung geregelt, speziell was die Rechtstitel (Servitute) von privatem Eigentum im Schutzbereich Tiefenlager angeht.

Die Teilnahme der öffentlichen Hand an der Langzeitkontrolle für Tiefenlager ergibt sich in der Schweiz daraus, dass die Eigentümerin oder der Eigentümer eines Tiefenlagers nach dessen Verschluss als juristische Person nicht mehr vorhanden sein wird. Alle Fragen zum Schutz eines Tiefenlagers werden deshalb von irgendeiner öffentlichen Institution zu übernehmen sein. In der Schweiz sind diesbezügliche Vorstellungen im Kernenergiegesetz (Art. 39 und 40) und in der Kernenergieverordnung (Art. 69 und 70) festgehalten.

A5 Welche Motive sind für die bewusste/unbewusste Freilegung (Exhumierung) der Abfälle zu beachten?

Problemstellung

Es geht bei dieser Problemstellung darum, zu verstehen, was künftige Menschengenerationen dazu verleiten könnte, ein Tiefenlager bewusst oder unbewusst zu exhumieren. Die Archäologie hat die Motive für das Eindringen in Gräber identifiziert und beschrieben (Grinsell 1975) und auch die Motive ausgeleuchtet, die solchem Handeln zugrunde liegen (Grinsell 1975, S. 101 ff.). Die Liste der Motive, die solches Handeln leiten, scheint seit alters her unverändert: Not, Rohstoffsuche, Gier, «Grab»-Schändung, Vandalismus, Herostratismus oder Neugier sind als Motive durch die Zeit erkennbar (siehe Kapitel 4.1). Die Frage nach dem Motiv des Eindringens ist nicht nur für die Planung des Tiefenlagers, sondern auch für Markierungsstrategien von grösster Bedeutung.

Angaben in der Literatur

Die Literatur zum Thema Grabraub ist fast unerschöpflich und spiegelt in diesem Sinne die Universalität des Phänomens in allen Kulturen und Zeiten wieder. Im Sinne einer aktualistischen Auffassung, wonach heutige Prozesse und Handlungen auch in der Vergangenheit Gültigkeit hatten, darf davon ausgegangen werden, dass die Exhumierung von Tiefenlagern auch in der Zukunft vorausgesetzt werden muss. Die Motive dafür dürften den gleichen Antrieben folgen, unterscheiden sich allerdings stark voneinander.

Der Begriff Exhumation oder Exhumierung, welcher ursprünglich Graböffnung und Leichenbergung bezeichnete, wurde in seiner neuen Bedeutung in Zusammenhang mit der gezielten Bergung (Rückholung) von oberflächennahen radioaktiven Altlasten eingeführt, die insbesondere seit 1970 in den USA einsetzte (Noyes 1995). In diesem Sinne antizipiert der Begriff bereits die Rückholung von radioaktiven Abfällen aus Tiefenlagern, die z. B. bei alten SMA-Tiefenlagern wie Asse und Morsleben Gegenstand von Abklärungen wurde (Hartmann et al. 2008; www.bfs.de/de/bfs/wir/Aktenplan.pdf) respektive bei neu anzulegenden End- und Tiefenlagern in Betracht gezogen wird (Nagra 1998; Nagra 2002a). Technisch betrachtet liegen heute die notwendigen Geräte und Erfahrungen vor, um Abfälle aus Tiefenlagern zu bergen (Nagra 1999a; siehe auch Rückbau bei Sanierungen in Sondermülldeponien), wobei sicherheitstechnische und ökonomische Betrachtungen in solchen Fällen limitierend sind oder sein können. Als bisher nicht in der Literatur beschriebenes Szenarium ist die gezielte Rückholung der Abfälle aus raumplanerischen Gründen (z. B. sehr dicht besiedelte Gebiete mit grossem Heizenergiebedarf) oder aus Risikoüberlegungen (z. B. neue und bessere Verpackungstechniken, zu grosses Risikopotential der alten Konzepte, Verdichtung des Tiefenlagers) in einigen Hundert Jahren denkbar.

In Zusammenhang mit der Langzeitsicherheit von geplanten Tiefenlagern geben Szenarien eines bewussten oder unbewussten Öffnens oder Anbohrens einer Lagerstätte zu Sorgen Anlass. Bei der unbewussten Exhumierung steht in erster Linie das Anbohren der Lagerstätte bei einer künftigen Rohstoffexploration (inkl. Geothermie) oder die Verpressung von flüssigen Abfallstoffen im Raum (Posner 1990, S. 44; Hora et al. 1991, S. IV–9 ff.).

Die gezielte menschliche Intrusion in ein Tiefenlager thematisiert in erster Linie die Rückholung von Wertstoffen. Im Vordergrund stehen waffenfähiges Plutonium (Merz 1996, S. 29) oder nukleare Brenn-

stoffe (Nagra 2002a, 140 ff.; HSK 2005 S. 93 ff.). Selten thematisiert sind hingegen Szenarien wie die Rückholung anderer eingelagerter Wertstoffe, etwa gediegenes Kupfer von Kupferbehältern oder Stahlbehälter (Trauth et al. 1993, S. 4–6, Greenpeace o. J.). Dabei sind solche Szenarien historisch gut belegt, wie die Geschichte des Rückbaus alter Erzhalde und die Wiederverwertung von Metallen lehren. Dieses Langzeit-Verwertungsprinzip durch Auslagerung deponierter Abfälle wird z. B. auch von der Untertagedeponie Herfa-Neurode (Hessen) verfolgt (K+S, o. J.), obschon sich das breite Inventar von eingelagerten chemischen Abfallstoffen kaum je vollständig verwerten lassen wird.

Als weitere Intrusionsszenarien gelten die Erweiterung eines geschlossenen Tiefenlagers, Bombentests im geologischen Untergrund, Untertage-Archäologie und der Bau von Dämmen mit Infiltration in den Untergrund (Hora et al. 1991). Die bewusste Rückholung der Abfälle zu Zerstörungszwecken (Politik der «verbrannten Erde»⁸, siehe B2) sollte mit Blick auf die historischen Präzedenzfälle auch im Bereich der atomaren Tiefenlagerung in Betracht gezogen werden (siehe Abschnitt B2), auch wenn dies z. T. bisher ausgeklammert wurde (Forinash 2002, S. 184).

Würdigung

Die Motive für das Eindringen in ein Tiefenlager sind fassbar, bekannt und soweit ersichtlich mehrheitlich erkannt. Als vermutlich wahrscheinlichstes Szenarium in der Zeit dürfte sich die Rohstoffsuche oder eine andere Exploration und Nutzung des Untergrundes erweisen, und als weitere mögliche Szenarien die Wiederöffnung eines Lagers zwecks Erweiterung der Ablagerung, zwecks Verdichtung des Lagers, zur Auslagerung von Wertstoffen (Behälter) oder zum Transfer des Tiefenlagers. Eine raumplanerische Ordnung in der Tiefe, in der bisherige Nutzungen im Untergrund festgehalten sind, könnte das Risiko unbeabsichtigten Eindringens vermindern. Dies setzt voraus, dass solche Kataster systematisch angelegt und durch die Zeit transportiert werden, ähnlich der Daten aus Grundbuch- und Eigentumsregistern. Gegen andere Szenarien in schweren gesellschaftlichen Krisen (Bombentests, Zerstörung usw.) sind vermutlich keine vorkehrenden Schutzmassnahmen wirksam.

A6 Inwieweit kann Wissenschafts- und Technikgeschichte dazu beitragen, die Frage nach dem Sinn von Markierung zu klären (insb. ob die Frage nach dem Sinn des Markierens überflüssig ist, da das Markieren mit dem Bau der Schacht- und Oberflächenanlagen festgelegt ist [fingerprints])?

Problemstellung

Eine zentrale Frage, die immer wieder diskutiert wird, ist, ob Markierungen an der Oberfläche letztlich die Sicherheit eines Tiefenlagers nicht doch massiv beeinträchtigen könnten und zum Eindringen in ein Bauwerk einladen könnten. Wichtigstes Argument für diese Befürchtung ist die – historisch und archäologisch – vielfach belegte Schändung von Bauwerken, im Wesentlichen zu Raubzwecken, die auch bis in moderne Zeiten anhält. Umgekehrt stellt sich aber auch die Frage, ob die Zugänge zu einem Tiefenlager so maskiert werden können, dass diese für künftige Generationen nicht mehr erkennbar wären.

Angaben in der Literatur

Die Fragestellung wird in der Literatur weitgehend behandelt und beantwortet. Vor Grabraub ist grundsätzlich kein Bauwerk geschützt. Raub findet in der Regel dann statt, wenn Aussicht auf einen wirtschaftlichen Erfolg besteht. Bei Tiefenlagern gilt es heute zu bedenken, dass ein unbemerktes Eindringen oder Vorstossen in ein mehrere Hundert Meter tief liegendes Tiefenlager selbst für eine Gruppe von bestausgerüsteten Grabraubenden technisch und finanziell praktisch aussichtslos wäre.

In der Literatur finden sich relativ klare Aussagen über die Problemstellung, nämlich der Frage nach dem absichtlichen Eindringen in ein Tiefenlager. Givens (1990) stellt zu Recht fest, dass viele Nachrichten –

⁸ «Verbrannte Erde»: der Terminus wurde zwar erst 1907 im Rahmen des Völkerrechts geprägt, beschreibt aber sehr gut eine Praxis, die seit Menschengedenken in kriegerischen Auseinandersetzungen grassierte.

von Höhlenmalereien über Keilschrifttafeln bis hin zu Bauwerken – in erster Linie für die zeitgenössische Bevölkerung gedacht waren (Givens 1990, S. 95). Dennoch gibt es fließende Übergänge zu einem Informationstransfer, der sehr viel längere Zeiträume mit einschliesst und auch für künftige Generationen gedacht war. Dazu gehören beispielsweise zu allen Zeiten und für viele Kulturen Hoheitsmarken, Weg- oder Besitzmarkierungen, aber auch Warnungen an die Zukunft. Grinsell (1975, S. 94 ff.) hat auf verschiedenen Trägermaterialien encodierte Warnungen, Flüche und Verbote aus alten Kulturen zusammengetragen, die klar belegen, dass sich schon antike Kulturen des Phänomens der Schändung von Werten enthaltenden Bauten sehr wohl bewusst waren. Genützt haben diese Warnungen nichts oder nur wenig. Wo es etwas Wertvolles zu holen gab, holte es sich der Mensch später, ob es sich um etruskische Gräber handelt, ägyptische Mumien oder versunkene Schiffe. Auch Geldfonds waren in der Geschichte immer wieder Gegenstand von Raubzügen.⁹

Zugleich haben Warnungen erstaunlich lange überlebt, selbst wenn sie als solche auf Dauer nichts oder nur wenig genützt haben. Dies liegt häufig daran, dass die Dekodierung der Warnung nicht mehr möglich war oder uninteressant wurde, weil Sprache oder Schrift nicht mehr verstanden oder gelesen werden konnte (Sprenger 2007, S. 4), wie etwa sehr schön an Hieroglyphen oder der Keilschrift gezeigt werden kann, die erst über einen mühevollen Entzifferungsprozess wieder verständlich gemacht wurden (siehe Doblhofer 1993).

In den letzten Jahrzehnten wurden in grosser Menge neue Erkundungsverfahren des Bodens und des Untergrundes entwickelt. Die Frage, ob es möglich wäre, ein Tiefenlager beim heutigen technischen Kenntnisstand zu tarnen, ist negativ zu beantworten (siehe B4). Wie die Technikgeschichte zeigt, ist in der Vergangenheit der Menschheit ein genereller Entwicklungstrend hin zu höheren Organisationsformen und komplexerer Technik nachzuweisen, trotz gelegentlich grosser Krisen und der Auslöschung von Völkern. Die in der utopischen Literatur verarbeiteten Schreckensvisionen, die sich stark an alten apokalyptischen Existenzängsten des Menschen nähren (Minois 2002), haben sich in den meisten Fällen als gegenstandslos erwiesen (z. B. Huxleys «Ape and essence»; Wells «Die Insel des Dr. Moreau»; siehe auch Analysen in Esselborn 2003). Die Alltagswelt verläuft letztlich in relativ pragmatischen Bahnen, wie auch die Bewältigung der grossen Krisen der Menschheit im Laufe der Geschichte zeigt.

Würdigung

Aus der Sicht der Wissenschafts- und Technikgeschichte spricht grundsätzlich kein Argument gegen eine Markierung eines Tiefenlagers. Die Analyse der Beweggründe für das Eindringen in ein Lager spiegelt sehr banale Handlungsmotive wieder, im wesentlichen Desinteresse und Vergessen, oder Bereicherungsabsicht und Recycling von Materialien. Natürlich können in Krisenzeiten auch zerstörerische Motive im Vordergrund stehen. Die Wissenschafts- und Technikgeschichte legt aber nahe, dass ein Standort kaum dauerhaft getarnt werden kann. Aus dieser Sicht spricht nichts Grundsätzliches gegen Markierung. Man kann die technische Ausgestaltung optimieren, um den menschlichen Triebfedern für eine Ausserbetriebnahme der Markierung wenig Platz zu lassen. Letztlich wird es aber an der Entscheidung der künftigen Generationen liegen, ob sie Markierungsvorkehrungen unserer Generation folgen wollen oder nicht.

B Umwelt und Untergrund (Lithosphäre)

B1 Welche Veränderungen der Umwelt und der Erdoberfläche sind während der erforderlichen Einschliesszeit zu berücksichtigen?

Problemstellung

Die Liste möglicher Einwirkungen auf ein Markierungssystem über lange Einschliesszeiten ist umfassend. Viele dadurch aufgeworfene Fragen wurden in der Literatur umfassend behandelt (z. B. Gera et al. 1972; Geotech. Engineers 1980a; Geotech. Engineers 1980b; Fairbridge 1980; Milnes 1985). Besonders in-

⁹ Zur Geschichte der Finanzspekulation und den Raubzügen auf Geldfonds siehe Galbraith 1992, Galbraith 2005a.

teressante Einblicke in mögliche Prozesse, die ein Lager betreffen können, geben Gera et al. (1972) und Milnes (1985) im Zusammenhang mit der Diskussion oberflächennaher Lagerstätten. Hier spielen Prozesse wie Denudation und Erosion, Überflutung usw. eine sehr grosse Rolle bei der Freilegung eines Lagers. Die tiefenwirksame Freilegung eines geologischen Tiefenlagers benötigt andere Kräfte, wie tiefe Gletschererosion, Vulkanismus oder Meteoriteneinschlag, die das Lager als solches teilweise oder vollständig zerstören würden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird auf diese Ereignisse mit maximalem und tiefenwirksamem Zerstörungspotential nicht eingegangen, da die Tiefenlager mit Bedacht ausserhalb von Risikozonen errichtet werden sollen oder weil ein Grossereignis wie ein Meteoriteneinschlag mit Tiefenwirkung von einigen Hundert Metern jegliche Markierungsstrategie zunichte machen würde.

Angaben in der Literatur

Wie oben aufgeführt, wurden schon frühzeitig geologische, hydrologische und andere umweltbedingte Gefahren für ein oberflächennahes Lager aufgelistet. Milnes (1985) ging bei dieser Beschreibung besonders systematisch vor und bezog alle möglichen Prozesse ein: oberflächenwirksame Prozesse wie Bodenbildung, wetterbedingte Einflüsse sowie klimatische und fluvio-terrestrische Einwirkungen. Bei den wetterbedingten Einflüssen ist die Palette möglicher Einwirkungen gross und reicht von klassischen physikalischen Prozessen wie Niederschlag, Oberflächenabfluss, Grundwasserbildung, über chemische Einwirkungen (Säure-Angriffe, Redoxreaktionen, Ausfällungen und Krustenbildungen) über biologische Prozesse (Humin- und Fulvinsäuren, Bewüchse, mikrobielle Aktivität, Pilze) hin zu Pflanzenbewuchs und Grabungsaktivität durch Pflanzen und Tiere (vgl. Milnes 1985, S. 99 ff.; Cadwell et al. 1993, S. 2.7–2.9). Ähnliche Überlegungen sind auch bei Deponieplanungen erfolgt (z. B. Deponieprojekt Oberholz Suhr, Aargau, Planungsunterlagen 1989 bis 1998; Deponie Gummersloch Köniz, Bern, Sanierungsetappe 1989–1992). Die zitierten Arbeiten beschränken sich auf die Beschreibung der Prozesse.

Bezüglich Markierungen sind die Ein- und Auswirkungen von umweltbedingten Prozessen im Wesentlichen in konkreten Projekten angegangen worden. Darnay et al. (1969, S. 119 ff.) wiesen schon früh auf Wechselwirkungen zwischen Abfall und Umwelt in oberflächennahen Lagern hin und stellten die «Haltbarkeit» oder «Dauerhaftigkeit» (durability) der eingelagerten Materialien in den Vordergrund. Anfangs der 80er-Jahre verlagerte sich diese Diskussion im Zusammenhang mit den Arbeiten der Human Interference Task Force (HITF 1984, Berry 1983, WIPP 2000; WIPP 2004a). Semiotiker/innen, Archäologinnen und Archäologen (Kaplan 1982, S. 8 ff.; TIFF 1984, S. 30 ff.) beschäftigten sich mit der Frage der «Dauerhaftigkeit» der Überlieferungen und der Trägermaterialien, die anhand von archäologischen Analoga diskutiert wurden. Diesbezügliche Auflagen und Empfehlungen seitens des amerikanischen Gesetzgebers (40 CFR 191/194) führten zu entsprechenden Projektentwicklungen (siehe dazu Adams et al. 1986; Benford et al. 1991; WIPP 2000, S. 20, 23–25, 26 usw.; WIPP 2004a, S. 22 ff.), die aufwändige Selektions- und Testprozesse von Trägermaterialien vorsehen (siehe auch B3).

Die konkrete projektbezogene Erforschung der «Haltbarkeit» von Trägermaterialien und die möglichen umweltbedingten Einflüsse sind aber nicht abschliessend erforscht. Das Markierungssystem als Ganzes wird unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen haben, je nachdem oberflächennahe Markierungen oder Markierungen von Schachtanlagen und Tiefenlager (siehe B3) zur Diskussion stehen.

Würdigung

Die Frage nach den Auswirkungen natürlicher Prozesse auf die Markierungen eines Tiefenlagers ist vom Grundsatz her in aller Breite und Tiefe erkannt, insbesondere was Trägermaterialien von Informationen und ihre Lebensdauer angeht. Kaum angegangen sind allerdings die Fragen nach dem Umgang bei konkreten Lagerprojekten, insbesondere bei klimatischen Extrembedingungen oder einer zunehmenden Nutzung des Raumes.

B2 Sind Umweltkrisen und Gesellschaftskrisen¹⁰ hinreichend abschätzbar (historische Studien) und extrapolierbar, sodass sie für die Fragestellung der Markierung beigezogen und relevant werden könnten?

Problemstellung

Umwelt- und Gesellschaftskrisen können direkte Auswirkungen auf die Sicherheit eines Tiefenlagers haben. Für Markierungsaktivitäten können sie in zwei Fällen von Bedeutung sein. Im ersten Fall ist denkbar, dass eine Krise oder ein schwerer Störfall während der Betriebszeit eines Tiefenlagers ein Markierungsprogramm teilweise oder vollständig unterbricht, sodass nur ein Teil der Information für die Nachwelt verfügbar wäre. Im anderen Fall könnten während einer länger andauernden Betriebs- oder Nachbetriebsphase Brüche in der Ausrichtung eines Markierungs- oder Unterhaltungsprogramms dazu führen, dass wesentliche Anteile der Markierungsstrategie ihren Sinn verlieren könnten. Es stellt sich die Frage, ob und allenfalls wie solchen möglichen Entwicklungen entgegengewirkt werden kann.

Angaben in der Literatur

Der Zusammenhang zwischen Umwelteingriffen durch menschliche Aktivität und ihren Auswirkungen wurde bereits seit dem Altertum im weitesten Sinne erkannt, namentlich was Abholzung, Erosion und Einfluss auf das Klima angeht (siehe Kritias-Dialog von Platon). Die in der Antike häufig praktizierte Verwüstung von gegnerischem Territorium (siehe etwa Beschreibungen in Thukydides, Der Peloponnesische Krieg; Flavius Josephus, Der jüdische Krieg usw.) zeigt auch anschaulich, dass sich unsere Vorfahren sehr wohl über verheerende Wirkungen des Menschen auf seine Umwelt bewusst waren, eine Haltung, die bis ins Atomzeitalter hinein bedacht wird (Rhodes 1988; Jungk 1963; Zahn 1955)¹¹. Erst ab dem 18. Jahrhundert wird diese Erkenntnis zwischen Umwelt und Gesellschaft systematisch hergestellt und untersucht (Buffon, de Saussure, Humboldt, Kropotkin siehe Glacken 1988) und setzt sich über die Analysen des Club of Rome bis zur Ausleuchtung von Mechanismen gesellschaftlicher Kollapse in der Folge auf Umweltkrisen fort (siehe etwa Diamond 2005). Gesellschaftliche Zusammenbrüche sind in der Literatur über radioaktive Abfälle bereits frühzeitig thematisiert worden (z. B. IAEA 1972) und fanden darum auch Verwendung als Szenarien für die Diskussion und Entwicklung von Markierungsstrategien (Sandia 1991, Posner 1990b; Benford et al. 1991).

EKRA (2000) leitete aus der Erkenntnis gesellschaftlicher Krisensituationen die Forderung nach Schnellverschlüssen von Tiefenlagern ab. Wird dieser Gedanke aufgenommen und auf eine Markierungsstrategie übertragen, stellt sich die Frage nach der Fortführung von Markierungsprogrammen im Falle von Umwelt- und Gesellschaftskrisen. Diese Fragen waren in der gesichteten Literatur nicht auffindbar, da Störfallszenarien während der Betriebszeit eines Tiefenlagers, soweit in ihr verfolgt, nicht behandelt werden.

Würde während des Betriebs eines Tiefenlagers eine Krisensituation eintreten, könnten sich grundsätzliche Änderungen in einer eingeschlagenen Markierungspolitik einstellen, sodass Teile einer Anlage anders oder gar nicht mehr wie ursprünglich vorgesehen gekennzeichnet würden. Für Markierungsprogramme leitet sich aus solchen Gedankenspielen ab, dass die konkrete Umsetzung einer gesamten Anlage in einem relativ kurzen und zeitlich überschaubaren Rahmen in klar definierten Prozessen und Etappen erfolgen sollte.

¹⁰ Umweltkrise im Sinne Karl-Heinz Hillmanns «Überlebensgesellschaft» (1998), als Summe aller menschlich induzierten Veränderungen der Umwelt mit den entsprechenden Rückkoppelungen auf Natur und Lebenswelt des Menschen.

¹¹ Enrico Fermi soll laut Rhodes (1988, S. 519) 1943 Robert Oppenheimer, dem Leiter des Manhattan-Projektes, bereits vorgeschlagen haben, die radioaktiven Spaltprodukte für die Vergiftung der deutschen Nahrungsmittelversorgung zu verwenden. E.O. Lawrence, ebenfalls ein am Manhattan-Projekt in leitender Stellung beteiligter Physiker, suchte 1949 James Conant (Mitglied des «General Advisory Committee», Rektor der Universität Harvard) «für die Kriegsverwendung von radioaktivem Giftstaub zu interessieren». Die Idee, radioaktive Abfällen als Waffe zu benutzen, war bei der Militärführung in Ost und West offensichtlich verbreitet: «Im Falle eines Krieges» [zwischen West und Ost, Anmerkung Marcos Buser] «sollen nämlich USA-Flugzeuge quer durch Westdeutschland einen breiten Streifen Atommüll ausstreuen. «Dadurch wird es den östlichen Truppen unmöglich gemacht, diese Zone zu durchstossen [...]» wird in der kommunistischen Propagandaschrift von Zahn (1955, S. 113) vermerkt.

Würdigung

Umwelt- und Gesellschaftskrisen sind wichtige Faktoren, die eine in Gang befindliche Markierungsstrategie grundsätzlich verändern können. Der Einfluss von Krisen betrifft in erster Linie die Umsetzung oder aber den Bruch mit einer bis zu diesem Zeitpunkt vertretenen Strategie. Die Risiken eines solchen Szenariums können durch ein gezieltes Störfall- und Risikomanagement (siehe Teil E) wesentlich verringert werden.

B3 Welche Veränderungen in der Erdkruste können die Integrität des Bauwerks und seine Markierung betreffen (Prozesse und Eigenschaften)? In welcher Art und Weise verändern sich die zu betrachtenden Teilsysteme: Können wir deren Veränderungen auf der Basis von historischen Studien und Modellen hinreichend genau vorhersagen? Sind Veränderungen über die betrachtete Lagerzeit im tieferen Untergrund für ein Markierungssystem relevant?

Problemstellung

Diese Frage ist in Zusammenhang mit der Forderung nach Rückholbarkeit der Abfälle relevant. Die Markierung am Bauwerk sollte es künftigen Generationen im Bedarfsfall erlauben, wieder ins Lager vorzustoßen. Damit einher geht die Frage der Beständigkeit von Materialien in verschiedenen geologischen Milieus unter möglichen Einflüssen. Allerdings sei bereits einschränkend vermerkt, dass künftige Generationen ein Tiefenlager auch mit anderen Techniken und auf anderen Wegen erschliessen könnten, und nicht unbedingt den vorgezeichneten Pfaden folgen müssten. Unter diesen Voraussetzungen wären Markierungsvorkehrungen im Untergrund nur beschränkt relevant, wenn überhaupt.

Angaben in der Literatur

Wie schon in Abschnitt B1 aufgezeigt, sind die verschiedenen Teile einer Entsorgungsanlage unterschiedlichen Kräften und Belastungen ausgesetzt. Von Prozessen im Erdinnern wie Erdbeben abgesehen, sind tiefer liegende Gesteinsformationen bedeutend besser vor Schädigungen geschützt, als dies für oberflächennah liegende Schichten zutrifft. Klima, Wasserhaushalt und dahintergeschaltet auch Biologie können Markierungen an der Oberfläche sehr viel stärker beeinflussen als in der Tiefe. Im Untergrund bis rund 1000 m Tiefe sind in erster Linie geochemische Faktoren für die Alterung von Materialien – und damit für eine Markierung – von Bedeutung.

Die Frage nach der Lebensdauer von Materialien unter Einbezug äusserer Einflüsse in der betrachteten Zeitspanne von 10000 Jahren (siehe unten) wird in der Literatur häufig indirekt angesprochen. Wissenschaftler/innen, allen voran Archäologinnen und Archäologen, wiesen schon frühzeitig auf die Belastbarkeit oder Dauerhaftigkeit («durability») von Materialien für die Markierung hin (siehe B1, siehe HITF 1984; Kaplan 1982; WIPP 2000; WIPP 2004a, 2004b). Einzelne Arbeiten versuchen, auch quantitative Aussagen über die Dauerhaftigkeit von Materialien zu machen (Berry 1983; WIPP 2000 Tab. 1; Sugiyama et al. 2003), wobei die effektive Lebensdauer eines Materials stark von den geochemischen Eigenschaften des Umfelds abhängt. Die Bedingungen im Untergrund sind in der Regel um Dimensionen weniger reaktiv als an der Oberfläche oder in Oberflächennähe.

Trockenes Klima begünstigt die Erhaltung von vergrabenen organischen Materialien bis zu Tausenden von Jahren (siehe Seidenfunde aus Loulan, Seidenstrasse; Papyrus-Codizes von Nag Hammadi, Ägypten; Leder- oder Papyrus-Rollen vom Toten Meer usw.), saure, nasse Milieus und das Fehlen von Sauerstoff erhalten ebenfalls organische Stoffe bis zu Jahrtausenden (siehe Moorleichen). Der Erhalt solcher Materialien ist aber die Ausnahme und nicht die Regel. Sobald biologisch aktive Bedingungen vorherrschen, werden diese Materialien biologisch sehr rasch zersetzt. Als Langzeit-Informationsträger für Markierung sind solche Materialien wenig geeignet. Selbst für Archivierungszwecke (siehe «papier permanent» der Andra) sind Fragezeichen angebracht.

Gediegene Metalle wie Gold und Platin sind auch über den Zeitraum von 10 000 Jahren praktisch verwitterungsresistent, ebenfalls Silber, Blei sowie Kupfer (Berry 1983, S. 9–10). Eisen und Eisenlegierungen sind hingegen stark korrosionsanfällig, wie auch archäologische Daten zeigen. Der Römer-Helm aus Augusta Raurica (vgl. Nagra-Informationsbroschüren) dürfte sicher als eines der ausnahmslos gut erhaltenen Metallobjekte der Antike gelten. Hingegen sind Legierungen häufig langlebig, etwa die seit der Eisenzeit ebenfalls vorkommenden Bronze und Messing. Moderne Legierungen wie Hastelloy C, Inconel 625 oder Titan dürften Zeiträume von 10 000 Jahren «überleben» (Berry 1983, S. 15 ff.). Diverse Steine (Kalk- und Sandsteine, Marmor, Granite/Gneise) haben ihre Verwitterungsfestigkeit ebenfalls seit Jahrtausenden unter Beweis gestellt. Sehr resistent ist die Tonkeramik, insbesondere Steingut (siehe unterirdische Wasserleitungen). Auch Gläser zeigen unter chemisch aggressiven Bedingungen eine bemerkenswerte Langzeitstabilität. Zemente haben eine sehr unterschiedliche Lebensdauer. Insgesamt liegen hinreichende Informationen vor, die es erlauben, Materialien zu wählen, die für die Markierung von Oberflächenanlagen wie auch Schächten und Galerien im Tiefuntergrund über mehr als 10 000 Jahren Bestand haben.

Würdigung

Die natürlichen Prozesse, die Markierungen im Untergrund beeinträchtigen können, sind sehr gut bekannt. Die archäologischen Befunde bezüglich der Dauerhaftigkeit von Materialien in Oberflächennähe sind hinreichend für die Auswahl von langzeitresistenten Materialien für ein Markierungsprogramm.

B4 Ist es möglich, ein Tiefenlager so zu tarnen und zu verschliessen, dass eine Erinnerung an den Eingriff dauerhaft ausgelöscht werden kann (Tarnungspotential)?

Problemstellung

Diese Frage geht aus den Betrachtungen über den Sinn von Markierung hervor (siehe 01) und wurde bereits im Rahmen des WIPP-Projektes gestellt (Benford et al. 1991; Benford 1999). Für diesen Fall wären allerdings verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. Zum einen müssten nach dem definitiven Verschluss des Tiefenlagers alle Bauwerke an der Oberfläche zurückgebaut und die ursprüngliche Landschaft mit ihren besonderen geomorphologischen Merkmalen wiederhergestellt werden. Zum anderen wären in einem solchen Fall auf messbare Markierungseinrichtungen im Untergrund zu verzichten, die mit Hilfe von Sensoren an der Oberfläche ermittelt werden könnten.

Angaben in der Literatur

Seit über 100 Jahren werden Luftbild- und Satellitentechnik zur Erkundung der Erdoberfläche eingesetzt. Die Anwendungen sind breit gestreut und umfassen etwa Kartierung, Morphologie- und Reliefmodellierung, Rohstoff- wie Wassersuche, bis hin zu Altlastenerkundung und Archäologie. Der Einsatz verschiedener Techniken (Luft- und Satellitenbilder, Infrarotaufnahmen, multispektrale Fernerkundung wie Spektrofotometrie, MOMS-2 usw.) wurde in den letzten Jahrzehnten mit derart viel Erfolg vorangetrieben, dass kleinste Anomalien an der Geländeoberfläche (etwa Schattenwurf, Bewuchsunterschiede, Schneeverwehungen und Reif, thermische Reflexion usw.) Rückschlüsse auf Beschaffenheit und frühere Nutzungen des Bodens ermöglichen. Auch in der Schweiz werden Techniken wie die Luftbildarchäologie seit zwei Jahrzehnten mit grossem Erfolg angewendet. Sie erlauben die systematische Erhebung von verschütteten Objekten aus früherer Zeit (von keltischen Gräberfeldern, römischen Villen und mittelalterlichen Siedlungen bis zu Drainagesystemen in der Landwirtschaft und dem Einsatz von Sprinkleranlagen, siehe umfangreiche Dokumentation im Internet).

Soweit feststellbar wurde der Zusammenhang zwischen Markierungssystemen für Tiefenlager, insbesondere die Frage nach Tarnung, in der Literatur nur im Ansatz erwähnt (Benford 1999), aber nicht systematisch analysiert. Dies mag insbesondere daran liegen, dass sich die Frage nach konkreten Markierungstechniken für Tiefenlager erst bei konkreten Projekten stellt und technische Detailfragen erst in diesem Stadium behandelt werden.

Die Antwort auf die Frage nach der Zweckmässigkeit einer Tarnung von Schachtbauten und Lagerzugängen hängt im Wesentlichen vom Interesse und Potential einer Gesellschaft ab, Bodenerkundungstechniken sicherzustellen. Die grossen Fortschritte in der interdisziplinären Fernerkundung und die Verknüpfung verschiedener Techniken wie Luftbilddaufnahmen, Satellitenbilder, GIS, digitale 3D-Modellierungen und -Visualisierungen usw. machen aus der heutigen Perspektive Bestrebungen zur Tarnung von Anschlussbauwerken eines Tiefenlagers zunichte. Die Techniken der Tiefenerkundung des Untergrundes (Georadar, Seismik usw.) lassen es als höchst unwahrscheinlich erscheinen, dass in der Zukunft grössere Strukturen im Untergrund nicht erkennbar sein werden, insbesondere wenn solche bewusst mit magnetischen oder akustischen Markern versehen sein sollten (Benford et al. 1991, S. 18–20; WIPP 2000, S. 32 ff.). Hinzu kommt die sich abzeichnende Tiefennutzung des Untergrundes (z. B. Geothermie), die ebenfalls eine deutliche Begrenzung eines Lagergebietes zur Folge haben könnte. Schliesslich wären auch sicherheitstechnische Fragen zu beachten (Metalle und Gasbildung, siehe A3, C4).

Andererseits sind Szenarien einer Rückentwicklung von Gesellschaften entworfen und diskutiert worden, mit der ein wesentlicher Verlust moderner Technik einhergehen würde. Die Entwicklung von Markierungssystemen (siehe etwa Sebeok 1984; Tannenbaum 1984; Benford 1999) beruht ja gerade auf solchen Überlegungen zum Schutz künftiger, technisch «regredierter» Kulturen (siehe Diamond 2005 und B2). Ein Verzicht auf Oberflächenmarkierung käme in diesem Sinne dem Aufgeben des Markierungsprinzips gleich.

Würdigung

Eine kohärente Markierungspolitik ist beim Verzicht auf Oberflächenmarkierung praktisch unmöglich: Ziele und Grundprobleme der Markierung widersprechen sich unter diesen Voraussetzungen. Markierung weckt Neugier und somit das Risiko eines bewussten Eindringens. Keine Markierung erzeugt hingegen das Risiko für unbeabsichtigtes Eindringen. In diesem Sinne sind keine wirklich begründbaren Entscheide für oder wider Markierung an der Oberfläche ableitbar. Es bleibt dem Ermessensspielraum der Planenden und der umsetzenden Generation überlassen, welche Schutz- und Informationsmassnahmen umgesetzt werden sollen. Für technisch «regredierte» Kulturen in der Zukunft sind letztlich keine begründbaren Prognosen abzugeben, was Markierung bewirken kann. Bei technisch hochentwickelten Gesellschaften ist die Frage obsolet, weil eine Tarnung eines Tiefenlagers ohnehin nicht umsetzbar ist.

C Markierung und Bauwerk

C1 Kann die Entwicklung des Bauwerks «Tiefenlager» eingeschätzt werden (natürliche und historische Analogie, Szenarienanalysen? etc.) und damit die mögliche Auswirkung auf ein Markierungsprogramm?

Problemstellung

Diese Frage ist bei den verschiedenen betrachteten Wirtgesteinen anders anzugehen. Bei standfesten Gesteinen ist zu erwarten, dass auch gekoppelte thermo-mechanische Prozesse zu keiner wesentlichen Verformung des Gesteins führen und somit ein Tiefenlager selbst in seinem Verbund nicht wirklich beeinflusst wird. Anders sieht es bei plastischen Gesteinen, insbesondere bei Salzen aus, die sich bei Spannungsänderung im Untergrund gut und rasch verformen und gerade bei einem durch das Lager ausgelösten thermo-mechanischen Puls in Bewegung gesetzt werden können. In solchen Fällen kann das Bauwerk oder Teile desselben wie der Inhalt «wandern», was bei Kriechbewegungen in Salzgesteinen zu ansehnlichen Verschiebungen führen könnte. Markierungsprogramme im Untergrund sollten solchen Phänomenen Rechnung tragen.

Angaben in der Literatur

Geologische Prozesse laufen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ab. Grosse Bewegungen sind in erster Linie in seismisch aktiven Zonen und bei sehr grossen Erdbeben zu erwarten (Grössenordnung cm/

Jahr oder bis zu Metern pro Ereignis bei sehr schweren Erdbeben entlang von grossen Verwerfungszonen). Durch eine sicherheitsgeleitete Standortevaluation kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Tiefenlager nicht in eine derart aktive Zone zu liegen käme.

Fokussiert auf die Schweizer Verhältnisse und insbesondere auf die von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für Tiefenlager in der Nordschweiz sind drei Phänomenen Aufmerksamkeit zu schenken, die sich nachteilig auf ein Markierungsprogramm auswirken könnten:

Glaziale Erosion (siehe C2): Nagra (2002b) weist auf eine erhöhte Gefährdung des Untergrundes durch die Bildung neuer glazialer Rinnen hin. Übertiefungen von einigen 100 m Tiefe sind zwischen Alpenrand und Nordschweiz entlang der alten Talachsen der Gletschervorstösse nachgewiesen. Innerhalb von 10 000 Jahren wäre eine substanzielle Eintiefung im Bereich eines Tiefenlagers theoretisch möglich, sofern sich das Klima sehr rasch abkühlen würde und nach einigen Tausenden von Jahren eine zwischenzeitliche Wärmephase folgen sollte. Die Standortwahl des Tiefenlagers wird dieser potentiellen Bedrohung höchste Aufmerksamkeit schenken. Ein Lager in einer exponierten Lage wäre nicht akzeptabel. Grundsätzlich wäre in der Schweiz eine Tiefenerosion denkbar. Potentiell gefährdete Gebiete entlang alter Gletscherachsen müssen daher ausgeschlossen werden. Unter diesen Voraussetzungen wären tiefe Markierungen von solchen Szenarien auch nicht betroffen.

Hebungen: Bei konstanten durchschnittlichen Hebungsraten von 0,1 mm/Jahr in der Nordschweiz (Nagra 1999b) würde das Tiefenlager für hochaktive Abfälle nach 1 Million Jahren rechnerisch 100 m weiter oben liegen. In 10 000 Jahren liesse sich eine durchschnittliche Hebung des gesamten Bauwerks in einer Grössenordnung von 1 m annehmen. In Kombination mit der Oberflächenerosion ist davon auszugehen, dass der Einfluss auf das Markierungssystem im schlimmsten Fall marginal ist (z. B. Bereich Schachtkopf, siehe dazu auch Auswirkungen im oberflächennahen Bereich B1).

Entwicklung Bauwerk: Die grossräumigen Spannungsumlagerungen im Untergrund führen auch im Tiefuntergrund zu Relativbewegungen des Gesteins. In diesem Sinne sind Relativbewegungen der Gesteine ein nicht zu unterschätzendes Phänomen, insbesondere während der Einlagerungsphase. Betrachtet man den Zeitraum von 10 000 Jahren sind diese Bewegungen jedoch irrelevant für einigermaßen standfeste Gesteine. Ein weiteres Phänomen, das für die Markierung von Bedeutung sein könnte, sind die thermomechanischen Effekte auf den Kanister mit einem potentiell möglichen Absenken desselben nach der Aufsättigung der Bentonit-Barriere. Solche «Bojen-Effekte» sind in der Literatur bereits im Zusammenhang mit dem «Subseabed disposal»-Projekt beschrieben worden (NEA 1988, S. 139–140). Für die Markierung ist dies nur für den Fall der Rückholung der eingelagerten Kanister oder Brennelemente von Bedeutung.

Würdigung

Die Entwicklung des Bauwerks Tiefenlager kann relativ verlässlich vorhergesagt werden, insbesondere nach Verschluss des Lagers. Während der Einlagerungsphase sind die grössten Auswirkungen über die Spannungsumlagerung im Gestein zu erwarten. Für Tiefenlager ausserhalb plastischer Wirtgesteine wie Salz haben solche Entwicklungen nur begrenzte Auswirkungen. Markierungsprogramme im Untergrund wären dabei nur marginal betroffen.

C2 Welche Eindringungsszenarien (Intrusion) sind für ein Tiefenlager zu betrachten (Gefahrenanalyse) und welche Markierungsvorkehrungen sind in diesem Kontext grundsätzlich denkbar? Welche Markierungstechniken sind für den Schutz des Bauwerks und seines Inventars vor beabsichtigtem Eindringen ohne Zerstörungsabsicht vorgesehen, z. B. der zielgerichteten Rückholung?

Problemstellung

Grundsätzlich sind verschiedene Eindringungsszenarien denkbar, die auch unterschiedliche Zeiträume betreffen (siehe A5, A3). Ein erster Typ von Szenarien betrifft ein zufälliges Eindringen ins Tiefenlager bei

der Prospektion des Untergrundes, sei es von der Oberfläche aus, sei es von der Seite her (horizontales Anbohren, evtl. auch mit Verzweigungen [vgl. «multilateral drilling»]). Ein zweiter Szenariotyp ist die gezielte und kontrollierte Freilegung (Exhumierung) des Lagergutes zur Beschaffung von Rohstoffen (Materialien/Energie), Speicherung von Abfällen (z. B. CO₂-Sequestration) oder ein Eindringen aus archäologischer Neugier oder aus Sicherheitsüberlegungen.

Die Forderung nach Rückholbarkeit der Abfälle stellt neue Anforderungen an die Markierung des tiefen Bauwerks. Will man den Eindringungsvorgang für solche Fälle erleichtern, indem man gezielt Markierungen setzt? Sind Warnmarkierungen anzubringen, um Kanister leichter bergen zu können? Oder sind solche Markierungen überflüssig, da eine Bergung nicht auf dem gleichen Wege erfolgen wird? Und schliesslich: kann der Schutz des Bauwerks und seines Inventars vor unbeabsichtigtem Eindringen von der Seite gewährleistet werden?

Angaben in der Literatur

Die Frage der Rückholbarkeit war – auch in der Schweiz – seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Erörterungen und Diskussionen (Buser 1998, S. 34 ff.). Sie wurde bei uns, wie in anderen Ländern (Frankreich, Loi Bataille 1991), aber erst seit kurzem rechtlich verankert. Das Kernenergiegesetz hält in Art. 37 fest, dass eine Betriebsbewilligung unter der Bedingung erteilt wird, dass die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zum Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist. Die Kernenergieverordnung hält in Art. 11 fest, dass das Tiefenlager so auszulegen ist, dass Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen. In Art. 67 wird präzisiert, dass die Verfüllung so vorzunehmen ist, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand möglich ist. Diese Bestimmungen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Markierungsprogramme der Schweiz. Folgt man den Erfahrungen aus den Sanierungen der grossen Sondermülldeponien der Schweiz (z. B. Deponien Bonfol, Kölliken), werden Lagerkavernen so ausgestattet und markiert werden müssen, dass ein Bergen der bereits verfüllten Lagerbehälter möglichst genau erfolgen kann.

Im Falle eines Rückbaus des Lagers zwecks Wiederverwertung, Umlagerung oder Dichterpackung der Abfälle sowie im Fall von Sanierungen, wie etwa bei Sondermülldeponien in der Schweiz, können Markierungen im Untertagebauwerk wertvolle Hilfen darstellen, obschon unsicher ist, ob eine erneute Erschliessung den verschlossenen Zugängen des Tiefenlagers folgen würde. Markierungsszenarien für solche Fälle sind in der Literatur selten angesprochen (z. B. Pescatore et al. 2008; S. 27; Tolan 1993, S. 38 ff.; siehe konkrete Ausgestaltung in C4). Dies mag daran liegen, dass die Rückholbarkeit erst im letzten Jahrzehnt stärker thematisiert wurde.

Seit zwei Jahrzehnten wird die Möglichkeit von oberflächennahen Schutzbarrieren untersucht, die wenige Meter unter der Terrainoberfläche angelegt werden, wie etwa Kapillarsperren, Asphaltabdichtungen usw. (siehe Referenzen weiter unten), wie sie auch im Deponiebau Anwendung finden (Melchior 1993). Am Standort Handford erfolgten in den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts umfangreiche Untersuchungen (protective barrier), von konzeptuellen Grundlagen (Adams M. et al. 1987; Tolan 1993) bis hin zu detaillierten Studien über die Einbringung der Barrieren (Asphalt-Test-Plan, Freeman et al. 1994), deren Wirkung (Evapotranspirations-Studien; Link et al. 1992) oder Monitoring-Aufgaben (Wasserinfiltrationsmonitoring [Lysimeter-Versuche]; Bio-Intrusionskontrolle usw.; Cadwell et al. 1993).

Würdigung

Ein Markierungsprogramm kann nicht auf alle möglichen Intrusionsszenarien zugeschnitten werden (insb. Tunnelbauten wie das Projekt Swissmetro, multilateral horizontal drilling, mole miner usw.). Die mögliche Bedrohung eines Tiefenlagers durch seitliches Eindringen stellt gewissermassen das grösste Risiko für ein nicht an der Oberfläche markiertes Lager dar. Der vermutlich wirksamste Schutz für ein Tiefenlager gegen seitliches Eindringen ist ein relativ weit gezogener sekundärer Sicherheitsperimeter an der Oberfläche, was aber die Aufwendungen für die oberflächennahe Markierung stark erhöhen würde (siehe unten). Warnmarkierungen für diesen Fall sind eng an das Bauwerk gekoppelt. Die Forderung nach Rückholbarkeit impliziert Markierungsprogramme im Bauwerk selber, auch wenn ein Rückbau des Lagers nicht unbedingt über die alten Zugänge erfolgen muss.

	Intrusionsszenarien	Referenz	Motiv	Erforderliche Technik	Abwehrmassnahme
1	Unbeabsichtigtes Erbohren des Tiefenlagers aufgrund von wirtschaftlichen Faktoren. Eindringen erfolgt vertikal oder von der Seite (Anreize z. B. Gasprospektion Forest Oil Weibach 2004, Ausbeutung Kohleflöze Permo-Karbon-Trog, Wasser [Zurzach], Geothermie, Salzsäure)	Kaplan 1982, S. 3; HIFF 1984, S. 4; Hora et al. 1991, S. IV-9; Posner 1990, S. 44	Rohstoffsuche, Wasser, Vergessen des Lagerstandorts oder dessen Gefährlichkeit	Rotarytechnik von 1900 (Spindletop 1901)	Markierung im oberflächennahen Bereich
2	Unbeabsichtigte Errichtung eines Lagerspeichers (Gas, Erdöl usw.), von Tunnels (z. B. Swissmetro) und anderen Untertage-Bauwerken (vertikal oder von der Seite erfolgreiches Eindringen)	Kaplan 1982, S. 3; Hora et al. 1991, S. IV-10; Benford et al. 1991, S. 20; Tolan 1993, S. 21	Suche nach Speicherraum, Vergessen des Lagerstandorts oder dessen Gefährlichkeit	Bohrtechnik 1900 Bergbautechnik 1900 Tunneltechnik 1870	Markierung im oberflächennahen Bereich, in den Zugangsschächten und dem Lager möglich; Abwehrmassnahme durch Markierung schwierig, wenn ausserhalb Lagerperimeter
3	Unbeabsichtigte Verpressung von flüssigen Abfallstoffen (CO ₂ -Sequestration, flüssige Abfälle usw.)	Hora et al. 1991, S. IV-10; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993, S. 21	Suche nach Speicherraum, Vergessen des Lagerstandorts oder dessen Gefährlichkeit	Rotarytechnik von 1900 (Spindletop 1901)	Markierung im oberflächennahen Bereich
4	Unbeabsichtigtes Erbohren des Tiefenlagers oder seiner Nachbarschaft zwecks Erprobung neuer Waffensysteme (z. B. unterirdische Kernwaffentests ab 26. Juli 1957 [Bombe Pascal A] im Nevada Test Site)	Hora et al. 1991, S. IV-12, IV-24; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993, S. 21	Suche nach Teststandort, Vergessen des Lagerstandorts oder dessen Gefährlichkeit	Rotarytechnik von 1900 (Spindletop 1901)	Markierung im oberflächennahen Bereich
5	Beabsichtigte Öffnung des Tiefenlagers zwecks Einbringens neuer Abfälle	Hora et al. 1991, S. IV-10, IV-16;	Erweiterung oder Wiedernutzung Tiefenlager	Bergbautechnik 20. Jh.	Keine Abwehrmassnahme zielführend, respektive Markierung im oberflächennahen Bereich, in den Zugangsschächten und dem Lager
6	Beabsichtigte Öffnung des Tiefenlagers zwecks Rückbaus von Wertstoffen (Kupferbehälter, Stahl usw.)	HIFF 1984, S. 3; NEA 1995, S. 57	Wiederverwertung Rohstoffe	Bergbautechnik 19. Jh.	Ausschliessliche Verwendung von nicht-verwertbaren Materialien (z. B. Keramik), zusätzlich Markierung (Oberfläche, Tiefe)
7	Beabsichtigte Rückholung des Lagerinventars aufgrund einer raumplanerischen Neubewertung oder von Risikoüberlegungen (keine Sanierungsnotwendigkeit)	AEN 2002	Rückbau des Tiefenlagers oder von Teilen des Lagers	Bergbautechnik 20. Jh.	Markierung im oberflächennahen Bereich, in den Zugangsschächten und dem Lager
8	Beabsichtigte Rückholung des Lagerinventars zwecks Sanierung des Untergrundes (Sanierungsnotwendigkeit)	AEN 2002	Rückbau des Tiefenlagers oder von Teilen des Lagers	Bergbautechnik 21. Jh.	Markierung im oberflächennahen Bereich, in den Zugangsschächten und dem Lager
9	Beabsichtigtes Erbohren des Tiefenlagers zur Schädigung einer Gesellschaft («Politik der verbrannten Erde»)	HIFF 1984, S. 3; NEA 1995, S. 57	Herostratismus / Fanatismus	Rotarytechnik von 1900 (Spindletop 1901)	Keine Abwehrmassnahme zielführend
10	Beabsichtigtes Eindringen in das Tiefenlager zur Schädigung einer Gesellschaft («Politik der verbrannten Erde»)	HIFF 1984, S. 3; NEA 1995, S. 57	Herostratismus / Fanatismus	Bergbautechnik 19. Jh.	Keine Abwehrmassnahme zielführend
11	Archäologische Exploration oder Erforschung des Untergrundes	Hora et al. 1991, S. IV-11, IV-23; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993, S. 21	Historische Neugier («Schatzsuche»), Forschungserkundung Untergrund	Bergbautechnik 19. Jh., Rotarytechnik 1900	Keine Abwehrmassnahme zielführend, respektive Markierung im oberflächennahen Bereich, in den Zugangsschächten und dem Lager
12	Unbeabsichtigte Exploration des Untergrundes im Umfeld des Lagers mit hydraulischem Kurzschluss	HIFF 1984, S. 3; Tolan 1993, S. 21	Rohstoffsuche, Wasser, Vergessen des Lagerstandorts oder dessen Gefährlichkeit	Rotarytechnik von 1900 (Spindletop 1901)	Abwehrmassnahme durch Markierung schwierig, wenn ausserhalb Lagerperimeter
13	Bauten an der Oberfläche mit Wirkungen auf das Tiefenlager (z. B. grosse Dammbauwerke)	Hora et al. 1991, S. IV-12, IV-25;	Wasserversorgung, Energieerzeugung, Bewässerung	Dammtechnik 20. Jh.	Markierung im oberflächennahen Bereich

Tabelle 4-2: Übersicht über mögliche Intrusions-Szenarien in ein Lager für radioaktive Abfälle in 1000 m Tiefe, erforderliche Technik und mögliche Abwehrmassnahmen

C3 Wie ist der Stand der Technik bezüglich verschiedener Markierungstechniken an der Oberfläche und im Bauwerk? Kann die Lebensdauer verschiedener technischer Marker (physikalische, chemische oder biologische Marker etc.) realistisch eingeschätzt werden?

Problemstellung

Diese Frage beschäftigt sich mit dem Stand der Markierungstechnik bei konkreten Projekten, insbesondere was die Markierung eines Tiefenlagers an der Oberfläche oder in Oberflächennähe angeht sowie mit den Markierungen im Zugangs- und Lagersystem. Grundlage für die Auslegung von Markierungssystemen ist die Intrusionsgefahr durch künftige Generationen (human intrusion), wie sie in zahlreichen Arbeiten dargelegt worden ist (Cameron 1981; Hora et al. 1991; Trauth et al. 1993; NEA 1995; siehe auch A5).

Angaben in der Literatur

In der Literatur werden Markierungstechniken in drei verschiedenen Bereichen beschrieben:

- Lebende Umwelt: Für den Lebensraum des Menschen – und im weitesten Sinne für die Biosphäre – schlagen Bastide et al. (1990, S. 89) vor, die Markierung über eine Vielzahl sich reproduzierender Lebewesen sicherzustellen. Diese lebenden Strahlendetektoren – etwa Katzen – sollen genetisch so markiert werden, dass sie überempfindlich gegenüber Strahlung sind. Jeder Kontakt zu Strahlung würde eine sichtbare Schädigung (z. B. Flecken und Male auf der Haut des Tieres) zur Folge haben. Auf diese Weise würden Menschen davor gewarnt, dass radioaktive Strahlung bereits in ihrer Umwelt angelangt ist. Die biologische Markierung durch Erhöhung der Empfindlichkeit von Lebewesen auf Strahlung ist bisher nicht systematisch entwickelt worden.
- Oberflächenanlagen oder oberflächennahe Anlagen: In diesem Bereich konzentrieren sich die meisten Arbeiten, insbesondere jene, die sich mit der Umsetzung konkreter Projekte befassen (WIPP: vgl. Hora et al. 1991; Trauth et al. 1993; WIPP 2000; WIPP 2004a, 2004b, Tolan 1993). Die ersten konkreten Markierungsstudien (Kaplan 1982, S. 48 ff.; Tannenbaum 1984, S. 11 ff., usw.) befassten sich vor allem mit konzeptionellen Fragen, dem Inhalt der zu übermittelnden Information und den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit (durability) der verwendeten Materialien (siehe B1, B3, E2). Im konzeptionellen Bereich wurde eine Staffelung der Information in verschiedenen Ringen oder Niveaus (levels) vorgeschlagen (HITF 1984, S. 53, Tannenbaum 1990, S. 133 ff.), die später auch von konkreten Projekten übernommen wurde (vgl. Trauth et al. 1993). Dieses gestaffelte System unterscheidet folgende Ebenen: Ebene 1: Generelle Information, dass eine Gefahr vorhanden ist; Ebene 2: Präzisere Information, dass es sich um ein Tiefenlager handelt, mit räumlichen Charakteristiken des Lagers; Ebene 3: Detailangaben zu Abfallmengen, Lagercharakteristiken, Gefahrenkataloge; Ebene 4: Technische Detailinformation, Pläne, Tabellen usw.
- Die konkrete Ausgestaltung der Projekte umfasst: Grosse Markierungselemente (large surface markers) im Sinne von Monumenten mit eingraviertem Gefahrenhinweis (für WIPP 48 Stück, WIPP 2004, S. 13 siehe D2) im und ausserhalb des Perimeters über dem Lager; kleine, eingegrabene disketten-grosse Untergrundmarkierungen (z. B. Zeitkapseln, Trauth et al. 1993, S. G–42) über dem Perimeter des Tiefenlagers («Fussabdruck»); ein Dammbau (Berme) am äusseren «Fussabdruck» des Tiefenlagers mit eingegrabenen Magneten und Radar-Reflektoren (beide aus Stahl, siehe auch Trauth et al. 1993, S. 3–9); zwei nachgebaute Lagerkammern (storage rooms) in der Berme; ein Informationszentrum in der geometrischen Mitte über dem «Fussabdruck» des Tiefenlagers; eine «heisse Zelle» (hot cell), welche auf der ehemaligen Verpackungsanlage errichtet werden und als archäologisches «Gedächtnis» wirken soll. Andere Konfigurationen mit vier grossen Monumenten, einem Informationszentrum und Untergrundmarkierungen wurden für Yucca-Mountain entwickelt¹². Die Lebensdauer wird über die Dauerhaftigkeit der Materialien und die Wiederverwendung von Ressourcen bestimmt (siehe B3). Hanford orientierte sich vermehrt an einer oberflächennahen Schutzbarriere (siehe C2).

¹² www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0115.shtml

- Lagerstrukturen Untergrund: Es bestehen diverse Ideen, wie der Untergrund «markiert» werden könnte, z. B. mit grossen Magneten, akustischen Warnsignalen, Gummimatten, Farbtracern usw. (siehe C4). Die verschiedenen Möglichkeiten für die Untergrundmarkierungen wurden in Zusammenhang mit Intrusions-Szenarien entwickelt, jedoch nicht für die gezielte Rückholung. In diesem zweiten Feld ist die Markierung erst im Ansatz angedacht.

Würdigung

Die Ideenvielfalt für die technische Ausgestaltung der Markierung an der Oberfläche ist enorm gross, weit fortgeschritten und dürfte sich mit dem technischen Fortschritt rasch weiterentwickeln. Bei der Untergrundmarkierung wurden die Möglichkeiten für die Markierung nicht wirklich fortentwickelt, sowohl was das Ziel anbelangt (Rückholbarkeit) wie auch den Schutz (seitliches Eindringen) und die Lebensdauer von Untergrundmarkern (siehe B1, B3).

C4 Sollen Verpackungen (z. B. Kanister) und Lagerkavernen als Markierungselemente verwendet werden?

Problemstellung

Diese Frage steht in engem Zusammenhang mit dem zur Verfügung stehenden technischen Know-how einer Gesellschaft. Für «primitive» Gesellschaften¹³ werden solche Überlegungen obsolet, sind diese doch nicht in der Lage, anspruchsvolle Markierungstechniken korrekt zu entziffern. Hingegen ist die Frage interessant für technisch hochentwickelte Gesellschaften. Mit dieser Strategie kann sowohl die Markierung wie teilweise auch die Überwachung eines Tiefenlagers deutlich verbessert werden (siehe C2).

Angaben in der Literatur

Die Idee der Markierung von Bauwerkteilen im Untergrund wurde relativ frühzeitig in Zusammenhang mit Intrusionsszenarien entwickelt. Die vorgeschlagenen Techniken zur Markierung im Untergrund konzentrierten sich ausschliesslich auf die Warnfunktion und nur selten auf die technische Umsetzbarkeit oder die Langzeitsicherheitsaspekte.

Es bestehen diverse Ideen, wie der Untergrund «markiert» werden könnte (Bastide et al. 1990; Benford et al. 1991; WIPP 2000), z. B. mit grossen Magneten (Benford et al. 1991, S. 19 ff., Intrusionsszenario: mole miner), Strahlen-Markern mit einer Auswahl von radioaktiven Isotopen (Raimbault et al. 1993, S. 216) oder akustischen Warnsignalen (Bastide et al. 1990, S. 93–94), wie etwa starke Echos erzeugende Geräte¹⁴. Echogeräte im Innern des Tiefenlagers könnten durch raffinierte Klangsysteme moduliert werden, um den Abstand zum Gefahrenherd zu signalisieren und künftige menschliche wie nicht-menschliche Eindringlinge zu verwirren. Im Tiefenlager selbst erwägen Bastide et al. (1990, S. 92) die Kennzeichnung der Abfallcontainer mit Strahlenzeichen durch konventionelle piktografische Mittel. Es erfolgten auch Überlegungen zur Charakterisierung der verpackten Abfälle in ihrem Umfeld (Hugon et al. 1993) und der Markierung der Lagerkanister (ONWI 1987, S. 14–15), dies aber vor allem für die Identifizierung und Nachverfolgung des Inhalts und kaum zu Markierungszwecken.

Tolan (1993, S. 38 ff.) hat verschiedene Möglichkeiten zur Markierung von Lagerkavernen und Behältern aufgezeigt. Gegen Bohrungen wären die Lagerkavernen mit Armierungen oder anderen Schutzmassnahmen am Stollenfirst auszustatten, die einer Bohrkronen (Rotary-Verfahren) Widerstände entgegensetzen und ein Weiterbohren erschweren oder unterbinden würden (Tolan 1993, S. 39), etwa Gummi-Matten, Schutt, Metalle oder ähnliche Materialien. NST (2007, S. 2 ff.) geht dieser Idee neuerdings wieder nach. Ein Einbringen von Metallen wird aus Korrosionsgründen ausgeschlossen (NST 2004, S. 4). Organika wie

¹³ «Primitiv» im etymologisch korrekten Sinne von urzuständlich, urtümlich (aus lat: «der Erste in seiner Art»).

¹⁴ Einschränkung wird vermerkt, dass es schwierig sein könnte, Töne erzeugende Objekte herzustellen, die noch nach 10 000 Jahren funktionsfähig wären, obschon die aus getrocknetem oder gebranntem Ton hergestellten Ocarinas respektive aus Horn hergestellte Flöten grundsätzlich ihre Funktionsfähigkeit über solche Zeiträume erhalten können (altsteinzeitliche Flöten).

Gummimatten gehören wegen der Gasbildung nicht in ein Tiefenlager (KSA 2005, S. 31–32). Hartgummi wird in einem chemisch aggressiven Porenwasser spröde und ist bakterieller Zersetzung unterworfen (De Cannière et al. 2009, S. 73). Die Einbringung von Schutt würde die Sicherheitsanforderungen an die Durchlässigkeit des Lagerbereichs nicht erfüllen (Nagra 2008b, S. 59–60)¹⁵. Zudem ist auf die technisch extremen Anforderungen bei der Einbringung von Materialien in einem beispielsweise 800 m langen, 2,3 m im Durchmesser grossen Lagerstollen (Nagra 2002) hinzuweisen.

ONWI (1981, S. 8, zitiert in Tolan 1993, S. 40) schlägt die Verwendung eines chemischen Farbstoffs im Verfüllmaterial vor¹⁶, welcher bei einer Bohrung im Rotary-Verfahren den Bohrschlamm verfärben würde. NTS (2007, S. 1) nimmt die chemische Markierung im Untergrund nach ONWI (1981) und Tolan (1993) wieder auf. Die Dauerhaftigkeit von Tracern unter vielfachen Wechselwirkungen im Lagerbereich und unter Einwirkung von Radioaktivität wird in der betrachteten Literatur aber nicht behandelt. NEA (1995, S. 44) nennt auch radioaktive Marker im Untergrund sowie sphärische Gegenstände, die geophysikalisch erkennbar wären.

DOE (1987, S. 5–28) schlägt vor, Warnmarkierungen aus Keramik im Untergrund zu platzieren. Diese Idee erscheint in Zusammenhang mit der Rückholbarkeit interessant, da solche Warnmarkierungen Distanzen zu effektiven Lagerkammern angeben könnten.

Würdigung

Die Idee, Verpackungen wie Kanister oder Lagerkammern auch als Markierungselemente zu verwenden, ist heute noch nicht hinreichend definiert und diskutiert worden. Diese Lücke wäre insbesondere im Zusammenwirken mit Monitoring-Programmen zu schliessen. Die Markierung von Abfallbehältern ist sinnvoll, weil sie die Rückholbarkeit von Abfällen erleichtert und gewissermassen eine «Siegefunktion» erfüllt. Hingegen sollte vermieden werden, irgendwelche Fremdstoffe wie Gummimatten und Schutt oder grosse Mengen an Metallen in ein Tiefenlager einzubringen, welche dort Sicherheitsprobleme zur Folge haben.

D Markierungen und Informationstransfer

D1 Wie können «aktive» von «passiven» Markierungssystemen unterschieden werden? Wurden «aktive» Markierungstechniken und Tradierungssysteme systematisch in allen möglichen Gebieten erhoben?

Problemstellung

Die Strategie der Warnung künftiger Generationen beruht auf zwei Pfeilern: Zum einen soll das Bauwerk durch «passive» technische Massnahmen gegenüber menschlichem Eindringen (human intrusion) markiert werden (siehe C2-C4), und zwar so, dass möglichst wenig Wartungs- und Unterhaltsaufwand erforderlich ist. Zum anderen sollen Markierungen konkrete Nachrichten an künftige Generationen enthalten und sicherstellen, dass dieser Informationstransfer in die Zukunft gewährleistet ist. Damit übernehmen künftige Generationen eine aktive Rolle bei der Übermittlung von Information in die Zukunft. Dieser Untersuchungsansatz wirft die Frage nach Tradierungstechniken, ihrer Vollständigkeit und ihrer Beständigkeit auf.

Angaben in der Literatur

Die Unterscheidung von «aktiven» und «passiven» Markierungssystemen ist fließend. Gravuren oder Inskriptionen auf Trägermaterialien wie Stein, Ton oder Metall sind den gleichen Belastungsprozessen

¹⁵ Schutt erfüllt keine Barrierenfunktion, siehe dazu auch Anforderungen gemäss Sachplan für geologisches Tiefenlager, Kriterium 1.2, hydraulische Barrierenwirkung (Nagra 2008b, S. 59–60).

¹⁶ z. B. Tracer, die in hydrogeologischen Studien Verwendung finden (bezüglich organischen Tracern siehe Käss 2004).

unterworfen wie das Trägermaterial selber (siehe B1). Qualitätseinbussen am Trägermaterial werden also zwangsweise durch Überwachung des Informationsträgers, Wartung und Reparatur kompensiert werden müssen. Damit sind auch «passive» Marker bis zu einem gewissen Punkt «aktiven» Begleitmassnahmen unterworfen. Die Notwendigkeit von begleitenden Massnahmen zum Unterhalt tritt bei Archiven aus organischen Stoffen (Papier, Papyrus, Leder) und neuerdings von elektronisch gespeicherter Information besonders deutlich zu Tage (vgl. Internet unter Stichwort Langzeitarchivierung).

Grundsätzlich lassen sich drei Gebiete unterscheiden, in denen aktive Massnahmen zum Wissenserhalt erforderlich sind:

- Formgebung, Erhaltung und Weitergabe des Informationsgehalts: Dieser Ansatz fokussiert gezielt auf die grundsätzlichen Möglichkeiten, wie Information über die Zeit transportiert werden kann. Dazu gehören Form- und Materialauswahl, Gestaltung einer Anlage, Trägermaterialien wie auch das technisch fehlerfreie Kopieren von Nachrichten durch die Zeit (siehe dazu E3). Frühe Studien zur Markierung (z. B. Tannenbaum 1984, HITF 1984) haben auf einzelne dieser Fragestellungen hingewiesen. Internationale Gremien erarbeiteten Empfehlungen für den Wissenserhalt über lange Zeiträume (IAEA 1999, IAEA 2001, IAEA 2004; siehe dazu D2 und D3).
- Inhaltliche Weitergabe der Information (Wissenstradierung): Ist der Wissenserhalt über die Dauerhaftigkeit von Trägermaterialien und die Kopierung von Nachrichten gesichert, stellt sich die Frage nach der inhaltlichen Weitergabe von Information und damit der Wissenstradierung inner- und ausserhalb eines bestimmten Kulturkreises. Grundsätzliche Probleme bei der Wissenstradierung über lange Zeiträume wurden ebenfalls frühzeitig erkannt und diskutiert (Kaplan 1982; Hora et al. 1991). Verón (2004) hat den soziologischen Kontext der Semiose ausgeleuchtet und damit auch die Abhängigkeit des Wissenstransfers von Ideologie und Macht dokumentiert. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch das Verständnis, wie Wissen über historische Zeiträume verloren gehen kann (kulturelle Erosion und Brüche) und welche gesellschaftlichen und kulturellen Prozesse daran beteiligt sind (siehe D3).
- Strukturmassnahmen zur Wissenstradierung: Hier werden die einem Wissenstransfer zugrundeliegenden strukturellen Voraussetzungen angesprochen, die sichergestellt werden müssen, damit Wissenstradierung auf dem technisch erwünschten Qualitätsniveau überhaupt erfolgen kann. Bei diesen Fragestellungen stehen struktursoziologische und historische Fragestellungen im Vordergrund, etwa die Zweckmässigkeit und Stabilität von gesellschaftlichen Strukturen, historisch belegte Strukturen in der Zeit und ihre Fehleranfälligkeit, Organisationsformen einer Wissensgesellschaft, ökonomisch-technische Faktoren zur Sicherung von Kontinuität usw. Diese Fragestellungen sind in der gesichteten Literatur von verschiedenen Autorinnen und Autoren aufgeworfen worden (siehe dazu etwa Pescatore et al. 2007, Sebeok 1990, Blonsky 1990, siehe D4).

Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Hinweis, dass der Wissenserhalt über geologische Tiefenlager über die Zeit Massnahmen in den drei oben erwähnten Gebieten erfordert. Organisationsstrukturen und Regeln reichen allein nicht aus, den Informationstransfer über historisch lange Zeiträume zu gewährleisten.

Würdigung

Wie schon bei den Fragen um die Markierungstechniken am Bauwerk aufgezeigt, ist eine gesamtheitliche Aufarbeitung und Behandlung der inhaltlichen Tradierung von Wissen essentiell. Während technische Themen und semiotische Fragestellungen bereits vielfach bearbeitet wurden, ist die Ausleuchtung von Strukturfragen heute noch wenig fortgeschritten.

D2 Was und wie soll übermittelt werden? Welche gestalterische Möglichkeit bietet Markierung an der Oberfläche in einem grösseren Gebiet über dem Tiefenlager (Makroebene)? Kann eine solche Gestaltung zeitinvariant überliefert (tradiert) werden?

Problemstellung

Welche Informationen sollen übermittelt werden? Wie soll künftigen Generationen die Information über die Existenz eines Tiefenlagers übermittelt werden? Wie kann ihre Aufmerksamkeit dauerhaft auf die Anlage gelenkt werden? Welche Techniken der Raumgestaltung zwecks Informationsübermittlung stehen zur Verfügung? Wie kann durch Formgebung und Materialwahl Information auf lange Sicht bewahrt werden?

Angaben in der Literatur

Was soll den künftigen Generationen an Information übergeben werden? Diese Frage hat die Wissenschaftler/innen bei den konkreten Markierungsprogrammen lange beschäftigt. Aus diesem Grunde haben bereits die früh auf diesem Gebiet tätigen Forschenden verschiedene Informationsebenen unterschieden (HITF 1984, S. 92 ff.; Sebeok 1990, S. 154 ff.; Voigt 1990, S. 123 ff.; Givens 1990, S. 95 ff., IAEA 1999, IAEA 2001, IAEA 2004, siehe auch 05, C3, D3). Eng et al. (1996, S. 35, 51 ff.) haben die möglichen Informationsquellen (Gesetze, Informationen über die Gesellschaft, welche die Abfälle eingelagert hat, Sicherheitsanalysen, Abfalldaten, Information über das Tiefenlager usw.) erwähnt, nicht aber im Detail ausgeführt. Ähnliches lässt sich auch über andere Informationsquellen sagen, die sich mit der Langzeitarchivierung von Tiefenlagern befassen (z. B. IAEA 1995, S. 42) und immer wieder zur Frage führen, wie ein Relaisystem aufgebaut werden kann, das die Informationstradierung gewährleisten kann (Sprenger 2007, S. 61). Die Frage nach der konkreten Auswahl ist heute nicht abschliessend beantwortbar. Bei SMA-Lagern wie dem Centre de la Manche und dem Centre de l'Aube in Frankreich oder der Celda de almacenamiento del Cabril in Spanien werden Informationen über das Abfallinventar und die Anlage in Archiven am Standort sowie bei speziellen Institutionen aufbewahrt, die Langzeitarchivierung steht im Detail aber noch nicht fest.

Das «Wie» der Informationstradierung ist – im Gegensatz zum «Was» – in konkreten Projekten für Tiefenlager recht anschaulich entwickelt worden (siehe mögliche Konfiguration eines oberirdischen Markierungssystems für das Tiefenlager WIPP [WIPP 2004b] in C3). Andere Konfigurationen von Bauwerken, die topographischen und morphologischen Eigenschaften Rechnung tragen, wurden auch in anderen Projekten entwickelt (Figuren in Gaus et al. 2009, S. 22; Blonsky 1990, S. 172, Tolan 1993, S. 27). Raumordnung und Gestaltung von Oberflächenanlagen prägen eine Geländemorphologie. Dabei spielt die Anordnung der Elemente eine grosse Rolle, wie archäologische Erkenntnisse zeigen (z. B. Anordnung der Monolithe von Stonehenge, GB; Scharrbilder von Nazca, Peru; Serpent Mound-Dämme, Ohio USA; Grosse Mauer in China, vgl. Internet). Welche Funktion solche Anordnungen erfüllten, ist nicht immer geklärt. Bei anderen historischen Bauten wie Tempeln, Festungen, Verteidigungsmauern wiederholen sich häufig gewisse Grundmuster in der Anordnung der Bauten, und zwar unabhängig vom Kulturraum (z. B. Tempel auf Anhöhen; Festungen auf gut zu verteidigenden Bergrücken; Aquädukte).

Das Potential der Raumgestaltung von Oberflächenanlagen eines Tiefenlagers ist als Element der Informationsübertragung in der Literatur erkannt (Kaplan 1982, S. 48 ff.) und wurde bei der konkreten Planung von Markierungsprojekten gezielt genutzt (siehe oben). In diesen Projekten wurden Monumente auch als Kunstobjekte konzipiert, die spezielle Aufmerksamkeit wecken sollen. Einen futuristischeren Ansatz wählte der Maler Anton Lehmden von der Wiener Schule für phantastischen Realismus mit dem Projekt «Atom-Eier», womit eine kulturelle Brücke zwischen industrieller Technik mit ihren Abfällen und der Umwelt geschlagen werden sollte (NEA 1992, S. 41). Die SMA-Abfälle aus Österreich, so der Vorschlag, sollen in eierförmige Spezialbehälter verpackt und in die Landschaft gestellt werden. Lehmden verstand seine Atom-Eier als Symbol für die Existenz und den Umgang mit hochindustriellen Abfallpro-

dukten. Der Ansatz, Tiefenlagerstätten auch als Kulturplätze zu verstehen, wird in einem religiös bis ideologischen Sinne auch von weiten Teilen der «Hüte»-Bewegung¹⁷ geteilt (Buser 1998).

Der Ansatz Lehmdens, Abfälle auch als Kulturgut einer Zeit zu erkennen, führt dazu, Markierung auch unter dem Blickwinkel der Architektur und Gestaltung von Anlage und Kultur-Landschaft zu betrachten. Dazu gehören neben formalen und funktionellen Aspekten der Ausgestaltung auch die ästhetische Komposition, die Material- und Farbwahl, die Bezüge zwischen Elementen usw. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, die Warnfunktion der Markierung und die inhaltliche Information zu koppeln. Viele Autorinnen und Autoren (Kaplan 1982, HITF 1984, Sebeok 1984 etc.) haben bereits frühzeitig den Ansatz gewählt, verschiedene Warnstufen und Informationsebenen der Markierungsbauwerke gestalterisch erkennbar zu machen (siehe auch 05 und C3).

Würdigung

Die Fragen um die Techniken des Wissenserhalts sind bei verschiedenen Institutionen in Nuklearbereich rein technisch gesehen gut abgedeckt. Die möglichen Probleme der Langzeitarchivierung und die Strategien zu deren Bewältigung sind erkannt. Die Organismen (IAEA, NEA, Entsorgerinnen und Entsorger von verschiedenen Ländern usw.) räumen der Fragen der «record preservation» generell einen hohen Stellenwert ein.

Markierungskonzepte und ihre Konfiguration im Rahmen der Informationsvermittlung an einem konkreten Standort sind weit gediehen. Unsicher bleiben die ästhetische Relevanz von Bauten und Mahnmälern als Transportmittel der Warnfunktion und deren Beständigkeit in der Zeit. Die Verfälschungsgefahr von Botschaften durch kulturellen und ästhetischen Wandel sollte nicht unterschätzt werden.

Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass der ästhetische Ansatz von Markierung die subjektive Kunstwahrnehmung der Zeit transportiert. Gedenkstätten – wie etwa aus Konzentrationslagern oder aus Soldatenfriedhöfen bekannt – werfen kontextuelle Fragen auf, namentlich die Frage, ob die Absicht eines Mahnmals bei gesellschaftliche Wertverschiebung noch erkennbar ist. Ob Erhalt oder Kopierung von ästhetisch konzipierten Markierungsbauwerken unter diesen Voraussetzungen durch die Zeit gewährleistet ist, bleibt zu bezweifeln (siehe E3). Es muss damit gerechnet werden, dass die Warnfunktion eines Markierungsprojekts im Laufe der Zeit gestalterisch verändert und damit inhaltlich verfälscht werden kann.

D3 Welche Techniken zum Wissenstransfer sind vorgesehen (Wissensmanagement, Tradierungstechniken, Codifizierungstechniken usw.)? Wie lässt sich der Erhalt dieser Techniken über die Zeit heute einschätzen?

Problemstellung

Der Transfer von Information über lange Zeiträume setzt das Verständnis von Semiose in einer sehr umfassenden Art und Weise voraus. Information muss verschlüsselt (enkodiert), gespeichert und wieder entschlüsselt (dekodiert) werden, was bei einem lange andauernden Prozess vielfältige Fragen aufwirft. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass sich der Kontext der Semiose, oder anders gesagt die Rahmenbedingungen, auf denen Kommunikation durch die Zeit beruht, grundlegend verändern (siehe E1). Das komplexe Zusammenspiel von Umweltfaktoren, gesellschaftlichen und ökonomischen Faktoren sowie daraus hervorgehenden kulturellen Merkmalen beeinflusst Inhalt und Form der Warnbotschaft wie auch deren Verständnis.

¹⁷ «Hüte»-Bewegung oder Nuclear Guardian-Ship: ursprünglich in den USA hervorgegangene atomkritische Bewegung, welche eine Dauer-Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle unter Obhut der Gesellschaft propagiert.

Angaben in der Literatur

Über Techniken der Wissenstradierung ist seitens der Archäologie, der Ethnologie und der Kulturanthropologie viel Wissen zusammengetragen worden (Watson 2005), auf das im Rahmen von konkreten Markierungsstudien und -projekten zurückgegriffen werden könnte. Die kontextuelle Abhängigkeit von Wissenstradierung ist bei einer geschichtlichen Betrachtung der menschlichen Kulturentwicklung deutlich erkennbar. Diese Komplexitäts-Zunahme in der Informationsübermittlung lässt sich schon über die verschiedenen Etappen der Entwicklung von Sprache und Schrift aufzeigen: Auf einfache Zeichen, Abdrücke und Gravuren auf Tierknochen, Höhlenwänden und Steinen der frühesten Menschheitsgeschichte folgten komplexer werdende Bilder und Bildergeschichten, später abstraktere Piktogramme und Ideogramme, bis hin zu raffiniert verschlüsselten Schrifttechniken, wie sie spätestens aus dem Mesopotamien der Bronzezeit bekannt sind (Haarmann 1992; 2006). Kunstwerke (siehe D2) sind weitere mögliche Transportmittel für Information. Schliesslich braucht es die Aufbewahrung des Wissens durch Wartung, Unterhalt und Archive (siehe D2).

Die Techniken der Informationsübertragung wurden im Rahmen von Markierungsprojekten aufgearbeitet. Givens (1990, S. 98 ff.) etwa analysiert semiotische Eigenschaften vor- und frühgeschichtlicher Nachrichten und stellt aus diesen Erkenntnissen eine Liste von sieben wesentlichen Punkten zusammen, die bei der Markierung von Tiefenlagern zu beachten seien (Givens 1990, S. 106–107, 117 ff.). Zu diesen gehören die Verwendung ikonischer Zeichen und piktografischer Darstellungen, der Einbezug von Erzählprinzipien (Geschichten) und verschiedener Sprachen und Schriften, die Verwendung von grossen Monumenten, die Sicherstellung von Redundanz durch Üppigkeit und vielfacher Verwendung als Schutz gegen Verfall und Vandalismus, und schliesslich unterstützende Information. Diese Punkte tauchen in der Literatur immer wieder auf: Verschiedene Autorinnen und Autoren (Hewitt, zitiert in Posner 1990b, S. 44–45; Sebeok 1990, S. 154 ff.; HITF 1984, S. 38 ff., Trauth et al. 1993) entwerfen Strategien zur Kommunikation mit Bildgeschichten und Piktogrammen zur Warnung der künftigen Generationen. Erwähnt werden auch Tradierungssysteme, die eng mit Sprache und Wertsystemen zusammenhängen (Mythen, Erzählungen, Sprachkunst und Sprichwörter, Kunstwerke [Bastide et al. 1990, S. 88–90]). Pescatore et al. (2007, S. 3) unterstreichen die Redundanz der Information, etwa durch die Wichtigkeit von Duplikaten.

Parallel zu diesen Bestrebungen entwickelten diverse Organisationen sowie Autorinnen und Autoren Strategien zu Weitergabe und Erhalt von Information (record preservation, siehe Eng et al. 1996; Sugiyama et al. 2003; Ohuchi et al. 2003; NEA 2007). Dabei werden strukturelle, strategische wie technische Faktoren ausgeleuchtet. Erhalt und Weitergabe der Information beziehen sich vor allem auf die Weitergabe von Detailinformation, insbesondere zu Detailangaben über das Inventar des Tiefenlagers, die Lagercharakteristiken und die Gefahrenkataloge (Informationsebene 3, siehe C3) sowie die technische Detailinformation mit Plänen und Berechnungen (Informationsebene 4, siehe C3)¹⁸. Strukturell wurden Vorschläge eingebracht zur Übergabe der Verantwortung an eine speziell zu diesem Zweck geschaffene Institution (siehe D4, E4). Erhalt und Weitergabe der Information auf den Ebenen 3 und 4 verfolgen die gleichen Zielsetzungen: einfache, robuste und langlebige Systeme, Wahl beständiger Trägermaterialien (z. B. gesinterte Materialien auf der Basis von Siliziumcarbid, Aluminium oder Zirkon), beständige Gravierungstechniken (Sugiyama 2003, S. 26 ff.), langlebige Erhaltungsmethoden (insb. für Organika, z. B. «papier permanent», Mikrofilme, digitale Medien usw., siehe Eng et al. 1986, S. 53–74), günstiges Lagerungsmilieu unter Einbezug der Umweltfaktoren, permanente Lagerungstechniken vor Ort und dezentrales Relaissystem an diversen Orten (Archive, Bastide et al. 1990, S. 88; NEA 1995, S. 41 ff.), periodische Reproduktion der Information (Tannenbaum 1984, S. 9 ff.).

Die Unterscheidung zwischen dem Langzeit-Informationstransfer on-site (Infozentren und Markierung, z. B. Trauth et al. 1993, z. T. mit Unterstützung von lokalen Trägerschaften, vgl. Pescatore et al. 2007) und off-site (Archive, siehe Eng et al. 1996) ist von der Redundanz und der Störfallanfälligkeit des Informationssystems her gesehen zentral (E4).

¹⁸ Ebene 3: Detailangaben zu Abfallmengen, Lagercharakteristiken, Gefahrenkataloge; Ebene 4: Technische Detailinformation, Pläne, Tabellen usw.

Würdigung

Zu diesem Themenbereich sind die Angaben in der Literatur erschöpfend. Markierungstechniken lassen sich praktisch in jedem technischen Gebiet und für alle möglichen gesellschaftlichen Tradierungssysteme einsetzen. Die Zahl der Möglichkeiten, Technik anzuwenden oder umzusetzen, ist weitflächig und deckt vermutlich alle denkbaren wissenschaftlichen Gebiete ab. Diese Möglichkeiten dürften sich auch in der Zukunft kontinuierlich nach dem Stand der Erkenntnis und Technik weiter entwickeln.

Schwieriger zu beantworten ist die Frage nach den Verschiebungen des Informationsgehaltes während der Enkodierung und Dekodierung. Diese Wert-Verschiebung könnten beim Enkodierungs-Prozess erkannt werden. Es bleibt aber der Zukunft überlassen, ob diese Erkenntnis auch beim Dekodierungs-Prozess durch die Empfänger/innen in der fernen Zukunft vorhanden sein werden¹⁹.

D4 Welche gesellschaftlichen Strukturen sind bei der konkreten Wissenstradierung zum Tiefenlager zu beachten? Sind Erfahrungen mit historisch stabilen Strukturen (z. B. Institutionen, Körperschaften) in diesem Kontext relevant? Können lokale Gemeinschaften die «Erinnerungs»-Funktion über lange Zeiträume wahrnehmen?

Problemstellung

Soll Wissen über ein Tiefenlager erhalten werden, sind Wartung und Unterhalt von Anlagen oder Systemteilen sicherzustellen und die Vermittlung des Wissens (Wissenstradierung) zu gewährleisten. Dies bedingt wiederum, dass entsprechende Institutionen geschaffen oder erhalten werden, die diese Aufgaben langfristig und ohne grössere Brüche übernehmen können. Dieses Langzeit-Relaissystem der Wissensvermittlung verlangt aber nach Stabilität von Gesellschaften und gesellschaftlicher Strukturen, wobei u. a. auch historische Erfahrungen mit sogenannten «stabilen» Institutionen auszuleuchten wären. Zudem ist zu prüfen, ob dieses Relaissystem nicht auch lokale Gemeinschaften mit einbeziehen soll.

Angaben in der Literatur

Spätestens seit Alvin Weinbergs Aufsatz «Social Institutions and Nuclear Energy» (Weinberg 1972) ist die Frage der Informationsvermittlung einer Risikotechnologie über Generationen gesellschaftlich auf breiter Ebene wahrgenommen worden. Dem «Hüten» der Abfälle folgt nun das «Hüten» des Wissens über die langen zu betrachtenden Zeiträume. Dem Zeitgeist der nuklearen Aufbruchjahre und dem Sendungsbewusstsein einer «gläubigen» Gemeinschaft folgend, war die Nukleargemeinschaft davon überzeugt, selbst die Rolle der Wissensträgerin über die «Ewigkeit» zu übernehmen. Der «faustische Pakt» der Nukleargemeinschaft führte zwingend zu einer Rechtfertigung einer «Atompriesterschaft», wie sie Weinberg 1972 (S. 33–34) vorgeschlagen hatte. Sebeok (1990, S. 167) unterstützte diese Vision mit einem ähnlichen Auftrag an eine Körperschaft zur Langzeitvermittlung des Wissens über Tiefenlager, ein Vorschlag, der ihm harsche Kritik von Atomgegnerinnen und Atomgegnern einbrachte (Garfield 1994), aber auch von anderen Semiotikerinnen und Semiotikern hinterfragt wurde (Blonsky 1990, S. 173 ff.). Vorsichtiger formulierten weitere Autorinnen und Autoren die Rolle der Hüte-Elite des Wissens: Voigt (1990, S. 123) bezeichnete sie als «Nachrichtenhüterin», Bastide et al. (1990, S. 87) als jene wenigen «happy few», die noch Kenntnis über ein Tiefenlager haben würden. Andere (Hammond 1979; Tannenbaum 1984, S. 26) sprachen von einem ca. alle 100 Jahre umzusetzenden Erneuerungssystem (Relaissystem). In den letzten 15 Jahren hat sich in den USA für ein solches Relaissystem der Terminus «Long-Term Stewardship» eingebürgert (Tonn 2001; Pastina 2004; Sprenger 2007, S. 62 ff.; DOE 2007, S. 3).

Weinberg (1999) brachte neben dem «faustischen Pakt» der Nukleargemeinschaft (Weinberg 1972, S. 33–34) auch einen zweiten essentiellen Begriff ins Spiel, jenen des wissenschaftlichen Millenarismus²⁰. Der Rückgriff Weinbergs auf den Millenarismus und seine Vision, eine religiös-wissenschaftliche Tradierung des nuklearen Vermächtnisses in Betracht zu ziehen, knüpft an alte utopische Weltbilder der Aufklärung an, etwa den Vorschlag Saint-Simons zur Schaffung eines wissenschaftlichen Papsttums (Saint-

¹⁹ Offene Zukunft gemäss Karl Popper.

²⁰ Grundlegende Texte zum Verständnis von Millenarismus und Utopie siehe: Cohn 1961; Minois 2002; Cioran 1979.

Simon 1813/1973 S. 246 ff.)²¹. Die Schaffung stabiler sozialer Strukturen setzt aber auch die Schaffung und Durchsetzung normativer Regeln und kultureller Codes voraus. Die Durchsetzung solcher Normen und Codes durch eine bestimmte Institution über die Zeit erfordert eine Kanonisierung von Information und damit von Sprache, Form und Inhalt. Exakt an diesem Punkt tun sich langlebige religiöse Institutionen wie Kirchen schwer, weil die zu transferierenden Kanons und Codes in einem neuen Wertesystem nicht mehr Bestand haben. Die Tradierung von Wissen mit Hilfe von millenaristisch geprägten Strukturen ist daher zum Scheitern verurteilt.

Zielführender ist der Ansatz, lokale Gemeinschaften für solche Aufgaben zu gewinnen und nach anderen Wegen für die Wissensvermittlung über Generationen zu suchen. Lenkungsorgane wie DOE oder NEA denken heute über Strategien nach, wie ein aktives, gesellschaftlich gestütztes Relaisystem eingerichtet werden könnte, das lokale Gemeinschaften mit einschliesst (vgl. Pastina 2004; NEA 2007; Pescatore et al. 2008). Der Ansatz zur immer erneuten Enkodierung (Rekodierung) von Information beinhaltet allerdings auch Risiken von Fehlkodierung und Informationsverlust (siehe E3). Darum sind Wege ausgeleuchtet worden, ob ein Teil dieser Information nicht auch durch Rituale, Legenden, Mythen und folkloristische Manifestationen übermittelt werden könnte (Sebeok 1990, S. 161. ff.).

Würdigung

Die Frage nach der Tradierung von Information durch eine aktive Institution oder Körperschaft ist eine der schwierigsten. Wie solche Institutionen und Körperschaften letztlich ausgestaltet und funktionieren sollen, ist erst im Ansatz angedacht (z. B. Tonn 2001, S. 265 ff.; NEA 2007). Der Ansatz einer Koppelung von supranationalen Körperschaften und Standortgemeinschaften zur Langzeit-Wissenstradierung öffnet mögliche Perspektiven.

E Fehleranfälligkeit und Störfälle des Markierungs- und Tradierungssystems

E1 Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit Kommunikation über die Zeit nicht versagt? Können Risikokataloge die möglichen Versagensmöglichkeiten hinreichend erfassen und beschreiben?

Problemstellung

Die grosse Zeitspanne zwischen der Enkodierung und der möglichen oder wahrscheinlichen Dekodierung einer Botschaft macht die Speicherung des Inhalts zwingend. Die Botschaft muss auf ein Medium übertragen werden, das während langer Zeiträume gelagert, erhalten und bei Bedarf erneuert werden kann. Historische Erfahrungen zeigen aber, dass signifikante, wenn nicht vollständige Wissensverluste über die Zeit wahrscheinlich sind. Während die enkodierte Information zeitinvariant, inhaltlich also gesetzt und unveränderbar ist, stehen weder die Empfänger/innen einer Botschaft fest noch deren kultureller Hintergrund. Es ist anzunehmen, dass kultureller Wandel die Dekodierung der Botschaft stark beeinflusst, und zwar nicht nur im Sinne, dass die Empfänger/innen über einen Macht- und Interpretationsspielraum verfügen, sondern auch aus der Erkenntnis heraus, dass sich Wissen und Verstehen der Welt verändern (siehe E3). Es gibt keine Kontinuität in der Konstruktion von Wirklichkeit, besonders in einer wissenschaftlich sich ständig neu erfindenden Welt. Wirklichkeiten verändern sich in der Zeit, wie uns die Geschichte der Philosophie und die Wissenschaftsgeschichte zeigen. Für die Kommunikation über lange Zeiträume gilt es also, Prozesse und Mechanismen, die zu Wissensverlust führen können, zu verstehen und Erosions- und Bruchsituationen, die zu Informationsverlust oder Missdeutung führen, zu erfassen. Technisch ausgedrückt handelt es sich um eine Störfallanalyse im Kommunikationsbereich.

²¹ Siehe den Vorschlag Saint-Simons zu Schaffung einer wissenschaftlichen Priesterschaft.

Angaben in der Literatur

Die Analyse der Fehleranfälligkeit und der Störfälle in der Kommunikation folgt den Ebenen, die für die Markierungssysteme unterschieden wurden (siehe D1). Fehleranfälligkeit und Störfälle bei der Kommunikation können sich in drei Gebieten manifestieren, die sich wechselseitig beeinflussen:

- Störfälle bei der Enkodierung, Erhaltung und Weitergabe des Informationsgehalts: Bei diesen Störfällen geht es im Wesentlichen um Fragen der formalen Abfassung einer Botschaft, deren Vollständigkeit und Verständlichkeit und deren Erhaltung in der Zeit. Störfälle können bereits bei der Enkodierung der Nachricht auftreten, etwa durch bekannte Denk- und Übertragungsfehler. Beispiele sind etwa ein unvollständiges Verstehen des Langzeitriskos, die Wahl eines ungeeigneten Trägermaterials für den Nachrichtentransfer, eine unvollständige Enkodierung eines wichtigen Inhalts oder Fehler durch Nachlässigkeit, Desinteresse oder Manipulation. Weiter sind hier die Probleme der Langzeitarchivierung anzusprechen wie auch bewusste oder unbewusste Übertragungsfehler. Die Palette der möglichen Störfälle ist breit.
- Störfälle bei der Dekodierung des Informationsgehalts: Bei diesen Störfällen geht es um den umgekehrten Prozess, nämlich um Interpretations- und Übertragungsfehler, die etwa aus dem Wandel von sozialen Konventionen oder Sprache und Schrift entstehen (E3). Auch hier ist die gesamte Palette menschlicher Unvollkommenheiten zu betrachten, die zu ganz unterschiedlichen Interpretationen einer Nachricht führen kann: Gier und Gewinnmaximierung als mächtige Antriebskräfte des Menschen, welche jede Warnung außer Acht lassen, wie Grabräubertum und Raubbau eindrücklich belegen (Grinsell 1975, Galbraith 1992, 2005a); Elend, das in armen Ländern nachweislich immer wieder zu schweren Unfällen mit Strahlenquellen geführt hat, z. B. bei der Entwendung von Bestrahlungsquellen aus Spitälern (IAEA 1988; IAEA 2001; IAEA 2002); Fanatismus und politischer Grössenwahnsinn, an historischen Beispielen seit dem Altertum nachweisbar (siehe «Der Kleine Pauly», II, S. 1110; IV, S. 71 ff.; von Choltitz 1950); aber auch Desinteresse, Nachlässigkeit oder Unwissen.
- Kontextuelle Wandlung von Kultur: Zu nennen sind hier der Verlust des kontextuellen Kulturhintergrundes, Missdeutungspotential aufgrund von Wissensverlust und Kulturwandel, Manipulation der Botschaft usw. In diesem Zusammenhang wird nach der Fehleranfälligkeit einer Botschaft durch die Veränderung des sozialen und kulturellen Hintergrunds künftiger Gesellschaften gefragt. Sebeok (1990, S. 152 ff.) und Sprenger (2007, S. 12 ff.) haben die kontextuelle Abhängigkeit einer Nachricht von den Umgebungsbedingungen betont. Soziale Konventionen, Wertmassstäbe, sprachlicher Wandel innerhalb von Gesellschaften, Erosionen und Brüche innerhalb von Gesellschaftsstrukturen, grosse Paradigmenwechsel z. B. ethisch-religiöser oder ökonomisch-politischer Natur usw. (siehe E2, E3, E4).

Würdigung

Fehleranfälligkeit und Störfälle des Markierungs- und Tradierungssystems sind von vielen Autorinnen und Autoren sehr wohl erkannt, aber nicht systematisch und vollständig ausgeleuchtet worden²². Diese Aufgabe stellt sehr hohe Ansprüche, sowohl was die inhaltliche Ausleuchtung der künftig möglichen Probleme der Dekodierung (Dechiffrierung) angeht, wie auch die Erkennung und Beschreibung von kontextuellem Wandel. Sie könnte aber interessante Rückschlüsse über den Sinn von heute angedachten oder vorgeschlagenen Markierungs- und Tradierungssystemen liefern.

²² Z. B. wurden solche Bedingungen nur für Intrusion systematisch ausgeleuchtet (Hora et al. 1991; IAEA 1995).

E2 Wie reparierbar und/oder korrigierbar sind Markierungssysteme (Wartung/Unterhalt)? Wie fehleranfällig sind Markierungssysteme?

Problemstellung

Ziele und Rahmenbedingungen eines Projektes verschieben sich häufig im Laufe der Zeit. Auf diese Weise können sich auch veränderte Anforderungen an ein Markierungssystem ergeben. Damit stellt sich die Frage nach Korrektur und Ergänzung von Markierungssystemen nicht allein aus der technischen Perspektive, sondern auch aus dem Blickwinkel des sozialen Wandels. Hinzu kommt die historisch gut belegte Verschiebung kultureller Identität, die bei grossen historischen Umwälzungen mit einem signifikanten Wert- und Kulturbruch einhergehen. Alle auf semiotischen Prozessen beruhenden Tradierungssysteme werden deshalb mit zwei Fragen konfrontiert: Sind Fähigkeit und Interesse künftiger Generationen für Wartung, Unterhalt und Ergänzung von Markierungssystemen zu erhalten? Welche gesellschaftlichen und technischen Verschiebungsprozesse können inhaltliche Interpretationsverschiebungen bei der Dekodierung der Botschaften bewirken?

Angaben in der Literatur

Wirkungsvolle Markierungssysteme müssen theoretisch alle denkbaren Szenarien von menschlichem Eindringen (human intrusion) abdecken. Bei den verschlossenen Teilen des Lagersystems – also dem Lager selbst und seinen Zugängen – wären Markierungen nach Verschluss der Anlage nicht mehr zugänglich. Dasselbe gilt für jene Marker, die oberflächennah vergraben sind, z. B. unter einer 2 m mächtigen Deckschicht (vgl. C3, D2). Die Frage nach der Reparierbarkeit und Wartung ist also nur für die zugänglichen Teile des Markierungssystems an der Oberfläche relevant. Dieses Thema wurde erschöpfend in der Literatur behandelt (siehe A5, C2, C3, D2, D4).

Information im zugänglichen Teil einer Anlage kann ohne Wartung und Unterhalt schnell verloren gehen (vgl. D2, D3). Als wiederverwertbar angesehene Stoffe und Materialien werden voraussichtlich zurückgeholt (A5), Gravuren sind beschränkt zeitbeständig, Klimaeinflüsse und gesellschaftliche Entwicklungen formen die Oberfläche – wie die Geschichte zeigt – grundsätzlich um. Sollen Oberflächenanlagen – wie etwa jene des WIPP – bestehen bleiben, werden Wartung und Unterhalt zwingend. Ob sie während längerer Zeit wahrgenommen werden sollen oder können ist von wirtschaftlichen und ideellen Faktoren (z. B. auch Risikowahrnehmung, Verfügbarkeit von Finanzressourcen, Betroffenheit) abhängig. Bezeichnenderweise werden im Bereich der klassischen Deponietechnik staatliche Instanzen mit diesen Überwachungs-, Wartungs- und Unterhaltsaufgaben betraut (siehe D4). Ein schrittweises Zerfallen der Markierungsmassnahmen an der Oberfläche würde zwar keine direkten Auswirkungen auf die Sicherheit haben. Dadurch würde aber die Warnfunktion ausser Kraft gesetzt und das Risiko eines unbeabsichtigten Eindringens erhöht (siehe C2 und C3, siehe auch Tabelle 4-1, S. 17).

Für die «vergrabenen» Markierungssysteme liegt das Risiko bei einer fehlerhaften Konzeption oder einer qualitativ ungenügenden materiellen Umsetzung der Konzeption (siehe E3). Die grösste Gefahr droht diesbezüglich über den Werteverstärkungen im Laufe der Zeit. Sebeok (1990, S. 152) und Sprenger (2007, S. 12 ff.) haben diese Gefahr in einem übergeordneten Sinn hervorgehoben (siehe E3).

Auch die Langzeiterinnerung, der Wissenserhalt (record preservation), ist ähnlichen Erosionskräften ausgesetzt wie die inhaltliche Tradierung von Information. Dabei stellen sich nicht nur Fragen zur naturgegebenen Dauerhaftigkeit von Materialien (Referenzen in B3). Soziale Stabilität ist für die Wissenstradierung genau so wesentlich. Historisch gesehen ist die Liste der Auslöschungsaktionen von Wissen unendlich lang, wobei sich diese immer stark an kulturellen und ideologischen Werthaltungen (z. B. Religionen, Kulturwerte) orientieren. Redundanz – im Sinne einer breit gestreuten Ablage der Information an geographisch weit voneinander gelegenen Standorten – mag das Risiko von Informationsverlust durch die Zerstörung von Archiven mindern (Weitzberg 1982). Weitere, nicht zu unterschätzende Risiken für Informationsverlust oder -verfälschung sind Kopierprobleme, sowohl was Trägermaterialien (z. B. EDV) angeht, wie auch den Informationsgehalt selber. Das Deutungs- und Manipulationspotential von Information ist seit alters her gross, wie ebenfalls unzählige historische Beispiele zeigen (siehe z. B. Assmann

2007). Technische Anlagen sind allerdings sehr viel weniger davon betroffen, als weltanschauliche und religiöse Werke (siehe E3 und E4).

Würdigung

Dem Problem der Informationsverfälschung durch die Zeit sollte grössere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die wichtigste Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, dass eine Untergrundmarkierung sehr genau und aus vielfältigen Blickwinkeln durchdacht werden muss. Dieses Problem ist in der Literatur kaum angesprochen, sicher auch deshalb, weil sich Markierungskonzepte bis heute in erster Linie mit Oberflächenanlagen beschäftigen.

Oberflächenmarkierungen sind Umwelteinflüssen und gesellschaftlichem Wandel ausgesetzt. Wartung, Unterhalt und gegebenenfalls Wiederaufbau sind daher Schlüsselemente, sollte die Markierung an der Oberfläche über einen Zeitraum von 10 000 Jahren erhalten werden.

Die konzeptuelle Auslegung des Untergrundmarkierungssystems sollte grundsätzlich durchdacht werden und sehr ausgereift sein, bevor es umgesetzt wird.

E3 Welche Voraussetzungen sind für die Entzifferung von Markierungs- und Tradierungssystemen erforderlich (Informationsträger, strukturelle Voraussetzungen, Enkodierungs- und Dekodierungssysteme usw.)? Wie gross ist das Missdeutungspotential von Markierung? Kann die Markierung ein Tiefenlager gefährden? Anders gesagt kann die Markierung dazu verleiten, ein Tiefenlager gezielt auszuräumen?

Problemstellung

Die grosse Zeitspanne zwischen Enkodierung und Dekodierung von Botschaften macht die Speicherung von Information zu einem Muss. In diesem Zeitraum sind grössere kulturelle Verschiebungen zu erwarten. Im günstigeren Fall liegt das Tiefenlager immer noch im gleichen Kulturbereich, sodass die kulturellen Wurzeln erhalten sind und wesentliche Voraussetzungen für die Dekodierung der Nachricht (wie etwa Sprache und Schrift) erhalten bleiben. Im schlechtesten Fall dagegen ist es zu einem grundsätzlichen Kulturbruch gekommen, sodass die kulturelle Identität ausgelöscht oder vollständig überprägt worden ist, und die Voraussetzungen für die Dekodierung der Nachricht nicht mehr unbedingt gegeben sind. Historisch sind solche tiefgreifenden Brüche mit einem Verlust der kulturellen Identität etwa bei Kulturen des Altertums (Hethiter, mesopotamische Kulturen, Ägypten der Pharaonen usw.) nachweisbar. Diese kulturellen Verschiebungsprozesse stellen nicht nur extrem hohe Anforderungen an die Kodierer/innen, sondern ebenso an die Nachrichtenempfänger/innen.

Angaben in der Literatur

Der Grundsatz der Wert- und Kulturverschiebungen wurde bereits in den frühesten Arbeiten über Markierung erkannt (Kaplan 1982, HITF 1984, Sebeok 1984) und leitete die damaligen Vorstellungen, wie Information über die Zeit zu transportieren wäre. Der Rückgriff auf die theoretischen Grundlagen der Informationsübertragung ist ein wesentlicher Grundbaustein, um die Risiken der Fehlübertragung zu erfassen und zu beurteilen. Sprenger (2007, S. 42–52) hat diese Grundlagen (Flussdiagramm von Shannon; Semiose von Sebeok) auf das Problem der nuklearen Tiefenlagerung übertragen. Die beiden vermutlich grössten Probleme, die sich in der Informationsübertragung stellen dürften, sind der kontextuelle Rahmen und der Kanal, über den die Botschaft transportiert wird. Der kontextuelle Rahmen für die Verfasser der Nachricht und die Empfangenden sind – betrachtet man die Geschichte – wahrscheinlich grundverschieden, sodass die Interpretation durch die Empfangenden ein beträchtliches Missdeutungspotential beinhaltet. Grösste Aufmerksamkeit ist den Wandlungen der Botschaften im Laufe der Zeit zu widmen, und auch den Wandlungen der in einer Botschaft verwendeten Zeichen. Die Übertragung von Botschaften wie auch die Verwendung von Zeichencodes ist einerseits dem Rauschen der Zeit, aber auch ganz konkreten Erosions- und Bruchprozessen ausgesetzt. Die Geschichte zeigt eindrucksvolle Beispiele für solche «Störfälle»: Papyrii aus NagHammadi wurden zur Feuerung verwendet und so zerstört; als

gefährlich angesehene Schriften von Philosophen oder Religionsgründern, wie etwa Epikur oder Mani, wurden von der christlichen Kirche radikal ausgelöscht (siehe E4); viel verwertbares, auch beschriftetes und somit enkodiertes Baumaterial älterer Provenienz wurde von neueren Kulturen abgetragen und damit den potentiellen Empfänger/innen entzogen; usw.

Die Reihe potentieller Störfälle ist lang: z. B. der Wandel bei sozialen Konventionen: Sebeok (1990, S. 150 ff.) zeigt auf, wie Konventionen kontextabhängig sind. Etwa, dass eine erhobene Hand, bei der Daumen und Zeigefinger zu einem Kreis geformt sind, unterschiedlichste Bedeutungen annehmen kann, von der Bedeutung OK (USA) zu «zéro» (Frankreich) zu «Geld» (Japan) bis hin zu obszöner Beleidigung im antiken Griechenland (Sebeok 1990, S. 1947). Ein ähnlicher Wandel im Verständnis ist bei ikonischen Darstellungen, Warnemblemen oder geschriebenen Botschaften zu erwarten (Sebeok 1990, S. 156). Bei der Dekodierung von Anweisungen sind Fehlinterpretationen praktisch vorprogrammiert, da ein anderer kultureller Hintergrund auch andere Schwerpunkte setzt (Givens 1990, S. 108). Auch die Sprache ist kein Garant für fehlerfreie Übermittlung: Aufgrund statistischer Analysen über den Wandel des Wortschatzes im Englischen wurde errechnet, dass nach 10 000 Jahren nur noch rund 12 % des Basiswortschatzes erhalten sein werden (Posner 1990b, S. 47). Andere Fehlerquellen sind: Missverständnis (Sprenger 2007, S. 6); Ablehnung einer Botschaft (Sprenger 2007, S. 7); Brüche in der Abfolge von Auslagerung, Speicherung und Wiedereinschaltung von Information (Sprenger 2007, S. 10); Verlust von sozialem Zusammenhalt, gesellschaftlicher Wandel (Sprenger 2007, S. 9). Eine interessante Frage wirft Sprenger auf (2007, S. 58): was geschieht, wenn Entwarnung für das Risiko gegeben werden könnte, die Markierung aber fortbesteht?

Würdigung

Die Zukunft ist offen. Dies ist wohl die prägnanteste Erkenntnis für jedes gesellschaftliche System. Damit kann nie ausgeschlossen werden, dass es zur Missdeutung von Markierung und der hinterlegten Information kommt. Je verbreiteter eine Kultur und ihre Sprache sind, desto besser sind die Voraussetzungen, dass Informationen aus dem Markierungsprogramm zumindest teilweise richtig gedeutet werden können. Das Potential zur Missdeutung wächst mit der Erosion wichtiger Kulturattribute. Besteht die Markierung noch nach weitergehendem Abklingen der radioaktiven Gefährdung eines Tiefenlagers, ist das weniger relevant. Das Lager kann dann nämlich angebohrt oder ausgeräumt werden, ohne dass gravierende Folgen befürchtet werden müssen.

E4 Sind die Relaisstrukturen für den Langzeittransfer von Information²³ gegenüber Erosions- und Verzerrungsprozessen hinreichend abgesichert? Kann Manipulation innerhalb solcher Strukturen verhindert werden?

Problemstellung

Wie jedes Lexikon der Natur- wie Humanwissenschaften zeigt, haben sich Wissen und Technik vor allem im Laufe der letzten Tausenden von Jahren kontinuierlich und enorm entwickelt. Seit der industriellen Revolution ist ein wissenschaftlicher und technischer Prozess in Gange gekommen, dessen Entwicklung und Ende nicht abzusehen ist. Dieser Prozess geht einher mit einem enormen Gesellschaftswandel, sowohl was die ökonomischen Rahmenbedingungen einer Gesellschaft angeht, als auch dem damit assoziierten Wert- und Kulturwandel. Die Revolution in der Informationsgesellschaft prägt die Versuche, die Kommunikation mit der Zukunft zu führen. Doch nehmen die Risiken für statische Anlagen wie Tiefenlager mit diesen technischen Entwicklungen auch entsprechend zu.

Angaben in der Literatur

Bisher fokussierten die Betrachtungen zum Thema Manipulation im Wesentlichen auf die Rolle einer mächtigen Institution, welche die Relaisfunktion für die Weitergabe der Information über den Zeitraum von bis zu 10 000 Jahren übernehmen würde (Weinberg 1999, Sebeok 1990, siehe O3 und D4). Die-

²³ Gemäss Ausführungen in D2, D4, A2 und Glossar.

ser Ansatz führte zu teils erbitterten Diskussionen um Rolle und Machtausstattung einer sogenannten «Atompriesterschaft». Dabei konvergierten die Meinungen der Befürwortenden einer starken führenden Institution («Atompriesterschaft», long-term stewardship) mit jenen, die sich an religiösen oder moralisch und spirituell unterlegten Strukturen («nuclear guardianship», vgl. Garfield o. J.; www.rmpjc.org/about+Nuclear+Guardianship) orientierten. Die Kritik an diesen Entwürfen hob die «Blässe der Gedanken und die Undeutlichkeit des Inhalts» solcher Atompriesterschaften hervor und verwies zudem auf die starke Bezogenheit solcher Entwürfe zur Gesellschaftsstruktur der Gegenwart (Blonsky 1990, S. 176, 182; Buser 1997, S. 50–53).

Zwar besteht in der gesichteten Literatur mehr oder weniger Konsens darüber, dass Information über Tiefenlager an die künftigen Generationen weitergegeben werden soll. Unklar ist aber der strukturelle Rahmen, der geschaffen werden sollte, um einen möglichst «verlustarmen» Transfer der Information in der Zeit zu gewährleisten. IAEA (1995, S. 5 ff.; 2006, S. 14 ff.) definiert zwar verschiedene Prinzipien, die als Leitfaden für die Organisation und Ausführung (Management) einer solchen Aufgabe zu berücksichtigen wären, wobei auch herausgestrichen wird, dass nationale gesetzliche Regelwerke, Verantwortung von Regierung, Verursachenden und unabhängiger regulatorischer Kontrollinstanz unabdingbar sind. Soll der Informationstransfer über die langen Zeiträume sichergestellt werden, müssten diese Verantwortlichkeiten in einem künftigen Relaisystem konstant aufrechterhalten werden.

Würdigung

Die Notwendigkeit, ein Tiefenlager in der Zukunft über eine Organisation mit Langzeitcharakter zu begleiten, ist heute im Wesentlichen anerkannt (siehe D4). Die mit einer solchen Struktur assoziierten Risiken sind aber in der betrachteten Literatur noch kaum angedacht worden. Die Organisationssoziologie, in dessen Gebiet solche Fragestellungen fallen, tut sich schwer mit Untersuchungen dieser Art. Die Störanfälligkeit eines Langzeit-Relaisystems, seine Beständigkeit in Krisenzeiten und seiner Resistenz gegenüber Manipulationsversuchen sind ernsthafte Bedrohungen, die frühzeitig ernst genommen werden sollten.

Eine Anzahl grundsätzlicher Schwächen und Risiken von Relaisystemen wurde literarisch von George Orwell in seinem Roman «1984» dargestellt, und zwar durch eine Gesellschaft, welche die Geschichte laufend korrigiert und neu schreibt. Orwell bezog seine Kritik auf das kommunistische System und seinen philosophischen Unterbau, den historischen Materialismus. Mit dieser Kritik deckte Orwell auch zwei Schwächen bei der Handhabung von Information durch zentral geführte Institutionen auf: Zum einen die absolute Kontrolle über die Information und damit zum anderen deren Macht, die Information nach ihren Bedürfnissen zu verändern. Weitere strukturelle Schwachstellen und Risiken in diesem Langzeit-Relaisystem lassen sich schon heute erkennen, z. B. Defizite bei der Strukturanpassung: Wie heutige Strukturanpassungen zeigen, werden Organisationsstrukturen laufend überprüft und neu konfiguriert. Die Wahrscheinlichkeit, dass wichtige Aufgaben, welche für die Aufrechterhaltung der Sicherheit über lange Zeiträume erforderlich sind, über die verschiedenen Stationen eines Relaisystems verzerrt werden oder verloren gehen, ist dabei sehr gross. Jeder Umstrukturierungsprozess beinhaltet veränderte Organisationen und Abläufe, teils neue Zielvorgaben und Aufgabenteilungen usw. Als direkte Folge solcher Strukturanpassungen ergibt sich eine höhere Störfallanfälligkeit des Transmitters (siehe Figur 3b): z. B. könnte eine Relaisstation entscheiden, die Information über das Tiefenlager «auszudünnen» und nur noch als «wesentlich» erachtete Erkenntnisse weiter zu leiten; umgekehrt könnte eine Relaisstation auch versucht sein, Information neu zu interpretieren. Wesentliche Informationsgrundlagen könnten dadurch verfälscht oder überinterpretiert werden oder in einem ungünstigen Fall verloren gehen. Hinzu kommen Risiken, die durch ein anfänglich gut funktionierendes System entstehen: Nachlassen der Aufsicht, Routine, Bequemlichkeit von verantwortlichen Wissensträgerinnen und Wissensträgern usw. Hinzu kommen auch die Risiken der bewussten Manipulation, sei es um Fehler zu verbergen, sei es um schwer erfüllbare Vorgaben einzuhalten oder schlichtweg der Bequemlichkeit willen (siehe z. B. die kürzlich in der BRD aufgebrochenen Debatten um die Endlager Asse und Gorleben). Schliesslich ist auf die grossen Risiken des Informationsverlustes bei tiefgreifenden Systemkrisen mit Strukturreformen hinzuweisen. Wie diese kurze Übersicht möglicher Fehlerquellen zeigt: Die Störfallanfälligkeit eines Langzeit-Relaisystems ist sehr viel grösser, nur sind diese Fragestellungen in der Literatur eher selten.

	Bauliche Markierungstechniken	Zweck	Erwiesene Dauerhaftigkeit (durability)	Risikoszenarien	Anforderungen an Markierung
1	Bauwerke an der Oberfläche	Markierung der Oberfläche über dem Tiefenlager als Warn- und Gedenkstätte	Unterhalten bis > 2000 Jahre (Pont du Gard, Pantheon Rom, Porta nigra Trier usw.) Nicht unterhalten: < 250 Jahre	Rückbau von Wertstoffen (z. B. Quader, Platten)	Keine Monumentalbauten, keine Verwendung von Steinquadern, Mauerwerke aus wertlosen Materialien
2	Bauwerke unter der Oberfläche	Doppel von Lagerkammern (Info-Lager) an oder unter der Erdoberfläche für künftige Archäologen	Unterhalten bis > 2000 Jahre (Katakomben Rom, Wassertunnel des Eupalinus, Pythagorion Samos usw.) Nicht unterhalten: < 250 Jahre, mit Ausnahmen bis > 2000 Jahre Asphaltichtung bis > 2000 Jahre	Einbruch mangels Unterhalt	Stabile Mauerwerke aus wertlosen Materialien, sorgfältige Realisierung von Dichtungen usw.
3	Vergrabene Gegenstände unter der Oberfläche (< 2 m)	Warnsignale	Stein/Silex: > 1 Mio. Jahre Gebrannter Ton: > 10000 Jahre Glas: > 1000de von Jahren Metall: < 1000 Jahre (ausser gediegene Metalle)	Interesse an antikem Wertgegenstand	Konfektionierung von unattraktiven, identischen Gegenständen (z. B. gebrannter Ton, Spezial-Keramik) in sehr grossen Mengen mit identischen Warnzeichen und Vorkehrungen (Warn- oder Radio-Tokens)
4	Markierungs-Gegenstände im Schachtbereich sowie in den Zugangsgalerien (z. B. Ringgalerien)	Leitdienste bei Rückbau, Warnfunktion	Spezial-Keramik / gebrannter Ton: > Zehntausend Jahre Glas: > 1000de von Jahren Andere Materialien (Metalle): < 1000 Jahre (ausser gediegene Metalle)	Interesse an antikem Wertgegenstand	Konfektionierung von unattraktiven, identischen Gegenständen (z. B. Spezial-Keramik) in sehr grossen Mengen (z. B. ringförmige Markierung mit Radio-Tokens alle 2 m) mit identischen Warnzeichen und Vorkehrungen
5	Lagerkammern oder -stollen (nach Konzept)	Leitdienste bei Rückbau, Warnfunktion	Spezial-Keramik / gebrannter Ton: > Zehntausend Jahre Glas: > 1000de von Jahren Andere Materialien (Metalle): < 1000 Jahre (ausser gediegene Metalle)	Interesse an antikem Wertgegenstand	Identisch mit Markierungsgegenständen im Schacht-Bereich, spezifisch ausgelegt nach Einlagerungstechnik
6	Lagerbehälter und mögliche Reflektoren	Warnfunktion	Lagerbehälter Stahl: < 10000 Jahre? Lagerbehälter Kupfer: > 100000 Jahre? Andere Materialien? unbekannt	Interesse an Res-source / Rückbau von Werstoffen	Konfektionierung der Lagerbehälter aus Spezialkeramik oder anderen wertlosen Materialien
7	Chemische Marker (z. B. Farbstoffe)	Warnfunktion		Interesse an Resourcen unwahrscheinlich	Klärung der Dauerhaftigkeit, Konfektionierung von chemischen Warnmarkern

Tabelle 4-3: Markierungstechniken aus der Optik einer Langzeit-Risikobetrachtung. Je unattraktiver die Markierung, desto grösser ist ihre Wahrscheinlichkeit, über lange Zeiträume zu bestehen. Eine Anzahl von Materialien, die für die Markierung im Lagerbereich vorgeschlagen wurden (Gummimatten, Schutt siehe z. B. Tolan 1993, NST 2007), wird in dieser Studie aus Sicherheitsgründen verworfen

4.4 Markieren oder nicht markieren?

Wichtige Erkenntnisse aus der bisherigen Analyse

Was beim Studium der Markierungs-Literatur auffällt, ist der hohe Detaillierungsgrad der Vorschläge, wie «Markierung» im weitesten Sinne für künftige Generationen gewährleistet werden könnte. In diesem Sinne ist zu erkennen, dass die technischen Möglichkeiten für solche Unterfangen breit ausgeleuchtet und laufend ergänzt werden, auch wenn dies häufig nicht in wirklich systematisch angelegten Analysen erfolgt. In diesem Sinne scheint die Forschung und Entwicklung, trotz gewisser Mängel, auf gutem Wege zu sein.

Was ebenfalls auffällt, ist aber, dass die Frage, was es letztlich zu «markieren» gilt, vielfach nicht in aller Klarheit gestellt und beantwortet wird. Anders gesagt geht bei vielen Betrachtungen das Objekt, von dem Gefahr ausgeht, etwas vergessen. Das Tiefenlager wird in diesen Markierungsarbeiten bezüglich seines Inhalts selten spezifiziert. So tritt eine der Kernfragen in den Hintergrund, die bei archäologischen oder historischen Betrachtungen immer wieder angetroffen wird, nämlich warum eine Gesellschaft oder einzelne Interessengruppen und Individuen etwas tun oder nicht tun. Die möglichen Antworten auf diese Frage könnten dazu beitragen, den Zweck von Markierung schärfer herauszuschälen und mögliche Strategien für die Umsetzung von Markierungsprogrammen zu entwickeln.

Wie Risikoszenarien für die Intrusion in ein künftiges Tiefenlager aufzeigen (Tabelle 4-2, S. 41), gibt es keine klare Antwort darauf, ob die Markierung eines Tiefenlagers von künftigen Generationen als zweckmässig erachtet wird oder nicht. In gewissen Szenarien dürfte sich die Markierung als sinnvoll herausstellen, in anderen wiederum wird sie sich als unzweckmässig erweisen. Was bei der weiteren Behandlung der Markierungsfrage von Tiefenlagern bedacht werden sollte, sind die Erkenntnisse, die sich aus der Jahrtausende alten Kultur- und Technikgeschichte des Menschen ableiten lassen. Dabei sollten grundsätzliche gesellschaftlich verbreitete Haltungen des Homo sapiens bei der Planung von Tiefenlagern und potentiellen Markierungsprogrammen in Erinnerung behalten werden (siehe auch Tabelle 4-3, S. 56):

- Was wir auch denken und machen, die Entscheidungen über die Zukunft können wir den künftigen Generationen weder abnehmen noch aufzwingen. Wertvorstellungen sind an das Gedankengut einer Zeit gebunden und lassen sich nur sehr beschränkt darüber hinaus transportieren. Informationsvehikel verändern sich darum auch in der Zeit, wie dies der Wandel von Sprache anschaulich zeigt. Für Markierungsprogramme bedeutet dies auch ein nicht zu prognostizierender möglicher Wandel in der künftigen Dekodierung der von uns enkodierten Information, aber auch eine mögliche Wiederverwendung der Materialien. Die Zufälligkeit dessen, was erhalten oder nicht erhalten wird, ist etwa am Beispiel von Tontafelarchiven in Mesopotamien nachvollziehbar, welche häufig dank Feuerbrünsten, die anlässlich von Eroberungen gelegt wurden, keramisiert und damit erhalten blieben (McCall 1993, S. 38; siehe Keilschrifttafeln von Qatna, Syrien, www.archaeologie-online.de/magazin/fundpunkt/ausgrabungen/2002/keilschriftarchiv_entdeckt).
- Wenn Material oder Gegenstände wieder genutzt oder verwertet werden können, wird sie der künftige Mensch auch nutzen und verwerten, wie es die Geschichte an unzähligen Beispielen zu allen Zeiten zeigt (siehe z. B. Spolien, Poeschke 1996). Beispiele sind die Wiederverwertung von Bauteilen²⁴ oder die Verwertung von Metallen²⁵. Eine eindruckliche Beschreibung dieses Phänomens anhand der Hauptmoschee von Kairouan verdanken wir Guy de Maupassant anlässlich seiner Tunesienreise von

²⁴ Z. B. Moschee Córdoba (Spanien), Moschee Mértola (Portugal), Dom Pisa (Italien), Haras Cluny (Frankreich), Moschee Kairouan (Tunesien) usw.

²⁵ Von etruskisch-römischen Schlacken im Golf von Baratti bis zur modernen Verwertung von Schlacken aus Kehrlichtverbrennungsanlagen, vgl. www.bafu.admin.ch/dokumentation.

1889²⁶. Diese Erkenntnis sollten sich die Planenden von Tiefenlagern vor Augen halten, wenn das Intrusionsrisiko der Zukunft abgeschätzt werden soll. Markierungen – namentlich grössere Bauwerke – könnten sehr wohl Bauprojekten künftiger Generationen zum Opfer fallen. Grosse Wahrscheinlichkeiten erhalten zu bleiben haben hingegen Tonscherben oder kleine Tonobjekte aus gebranntem Ton wie Tokens und Tonbullen, wie sie in Teilen Mesopotamiens in grösster Anzahl gefunden wurden (Schmandt-Besserat 1996, S. 15 ff., 32 ff., 39 ff.; Watson 2005, S. 142 ff.; McCall 1993, S. 33). Tokens dienten etwa als Zählmarken und fanden weite Verbreitung. Im Gegensatz zu Ton haben sich Metallgegenstände in sehr viel geringerem Umfang erhalten, weil sie relativ einfach wieder verwertbar sind (selbst der nach Überlieferung rückgebaute, nach einem Erdbeben eingeknickte Koloss von Rhodos) oder teils auch korrodieren (Eisen). Wertlosigkeit des Gegenstandes, die Dauerhaftigkeit eines Materials gegen Verwitterung oder chemischem Angriff und dessen nicht-universelle Verwendung sind also wesentliche Voraussetzungen für den Erhalt der überlieferten Information. Je unattraktiver eine Stätte, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass sie in der Zeit überdauert. Diese Erkenntnis sollte bei der Planung von Tiefenlagern und der Umsetzung von Markierungsstrategien Beachtung finden, insbesondere zu einem Zeitpunkt, wo die konkrete inhaltliche und technische Umsetzung eines Markierungsprogramms ansteht.

- Wiederverwertung ist aber nicht allein auf materielle Güter beschränkt. Kunstobjekte, Kunst und Ideen generell lassen sich in der Zeit ebenso gut verwerten und verwandeln. Die Schriftentwicklung im Altertum steht beispielhaft da für einen Prozess der Ausbeutung und Wiederverwertung von älteren Schriftsystemen (Haarmann 2002; Haarmann 2006). In ähnlicher Art und Weise lässt sich die Wiederverwertung von Ideen belegen (Watson 2005), auch von religiösen Inhalten (siehe Eliade 1978). Auch die Interpretation von Beobachtungen und Ideen ist Gegenstand von Wandlungsprozessen, wie die Betrachtung der Wissenschafts- oder Ideenentwicklung unter konstruktivistischem und dekonstruktivistischem Blickwinkel zeigt. Auf diesen speziellen Punkt machen im Kontext der Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen Semiotikerinnen und Semiotiker aufmerksam, wenn sie auf Veränderungen des kontextuellen Rahmens hinweisen. Für die Planung von Tiefenlagern soll damit vor Augen geführt werden, dass nicht nur technische Disziplinen bei der Entwicklung und Markierung von Tiefenlagern von ausschlaggebender Bedeutung sind. Zudem sollte auch das Bewusstsein dafür geschärft werden, dass kein vom Menschen je gedachtes oder entwickeltes Kultursystem «in Stein gemeisselt» ist. Geschichte ist das, was wir erinnern, was also im kollektiven Gedächtnis verbleibt (siehe dazu Assmann 2007, S. 34).
- Die Entwicklungsgeschichte des Menschen ist – aller Krisen zum Trotz – bisher stetig in eine Richtung gegangen. Bei diesem Prozess wurden zwar reihenweise Kulturen, Kulturgüter und Sprachen vernichtet, doch entwickelten sich aus den «siegreichen» Völkern immer wieder neue Impulse, die schliesslich auch zu einer Erneuerung von Technik führten. Während des europäischen Mittelalters begann sich die Forschung in Klöstern zu entwickeln, und wurde durch die Kolonialgeschichte und die darauffolgende Aufklärung zu einem Werkzeug weitergeformt, das einmalig in der Geschichte der Menschheit ist. Es ist schwierig, sich vorzustellen, dass dieses gesamte Wissen in einer derart vernetzten Welt durch eine globale Katastrophe vollständig ausgelöscht werden könnte. Wie dem auch sei: Die Fähigkeit des Menschen zu Abstraktion und Logik lässt erwarten, dass auch nach einer extremen Krisenzeit Gesellschaften in der Lage sind, Tiefenlager durch Anwendung gezielter Erkundung zu einem späteren Zeitpunkt aufzufinden, auch wenn sie über längere Perioden in Vergessenheit geraten waren. Die Frage dürfte also weniger «Markierung?» oder «Nicht-Markierung?» lauten, sondern sich am «wie» und «wo» eines Markierungsprogramms orientieren.

²⁶ «Ich kenne auf der ganzen Welt nur drei religiöse Gebäude, die mir einen so überraschenden und überwältigenden Eindruck gemacht haben wie dieses barbarische, verblüffende Bauwerk: der Mont-Saint-Michel, San Marco in Venedig und die Palatinische Kapelle in Palermo. [...] Hier ist es ganz anders. Ein umherirrendes Volk von Fanatikern, das kaum fähig ist, Mauern zu bauen, das in ein mit Ruinen der Vorgänger bedecktes Land gekommen ist, hat hier alles zusammengeschleppt, was ihm am schönsten erschien und – von einer sublimen Eingebung getrieben – nun seinerseits aus diesen Trümmern in gleichem Stil und gleicher Anordnung eine Wohnung für seinen Gott errichtet, eine Behausung aus Stücken zusammengebaut, die einstürzenden Städten entrissen wurden, aber genauso vollkommen und prächtig wie die reinsten Entwürfe der größten Steinmetze.» Guy de Maupassant: Unterwegs nach Kairouan Nordafrikanische Impressionen. Aus dem Reisebuch *La vie errante* ausgewählt und übertragen von Erik Maschat. E. Piper & Co Verlag, München 1957. S. 56, zitiert nach www.de.wikipedia.org/wiki/Kairouan.

- Schliesslich sei noch einmal auf Eigenheiten der Kommunikation durch die Zeit hingewiesen. Austausch und Weitergabe von Informationen und Werthaltungen durch die Zeit wurden im historischen Prozess immer wieder von Verzerrungen und Fälschungen am Informationsobjekt begleitet. Das semiotische Modell hat dem Informationstransfer zwischen Enkodierenden und Dekodierenden zu Recht wesentliche Rolle beigemessen und ihm nicht nur eine «technische» Übertragungskomponente zugewiesen, sondern eben auch eine wichtige soziale Funktion (Verón 2004, S. 134 f.). Die Herstellung von Information und deren Aufnahme sind Prozesse, die von subjektiven Komponenten geleitet werden und bei denen Ideologie und Macht eine wesentliche Rolle spielen. Nur so lässt sich erklären, dass der Informationstransfer über Ketten von Informationsträgern signifikant verändert und verfälscht werden kann.

5 Zum Stand der Markierungsprojekte in Kernenergie nutzenden Ländern: ein Überblick

Der Stand von Markierungsprojekten in Kernenergie nutzenden Ländern ist unterschiedlich. Soweit aus der Literatur ersichtlich, sind Entwicklungen im Bereich des Wissenserhaltes über Tiefenlager und zu Fragen der Markierung in erster Linie von amerikanischen Projekten ausgegangen. Internationale Gremien wie die Internationale Atomenergie-Agentur (IAEA) und die Atomenergie-Agentur NEA (OECD) sowie weitere Akteurinnen und Akteure aus Kernenergie nutzenden Ländern haben sich im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte mit Intrusionsstudien und konkreten Projekten zur Informationsübertragung in der Zeit auseinandergesetzt, die auch Bestandteil eines Langzeit-Wissensmanagements sind. Generell ist der Kenntnisstand hoch, vielfach aber noch nicht für die spezifische Anwendung umsetzbar.

Internationale Gremien: IAEA und NEA

Internationale Gremien haben sich bereits seit langer Zeit mit Sicherheitsprinzipien und grundlegenden Fragen der Ethik auseinandergesetzt (IAEA 2006, IAEA1995). Solche Überlegungen förderten die Auseinandersetzung mit Fragen zur Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen (NEA 2001). Umfangreiche Studien zur menschlichen Intrusion in Tiefenlager gehen auf die 90er-Jahre zurück (NEA 1995). In den letzten Jahren wurden grosse Anstrengungen in diesem Bereich unternommen (Pescatore et al. 2007, NEA 2007a, NEA 2008, NEA 2009a), namentlich was auch Wissenserhaltungsstrategien auf sozialer Ebene angeht.

Stand der Arbeiten: Grundlagenarbeiten zu Intrusionsszenarien und Markierungstechniken, Vorgaben für den künftigen Umgang mit dem Problem der Intrusion.

Vereinigte Staaten von Amerika (USA)

Rechtliche Grundlage sind die von der Umweltbehörde EPA publizierten Gesetzestexte 40 CFR 191/194 (1998). Die erste Phase mit einer Anzahl wichtiger Grundlagenarbeiten erfolgte in den frühen 80er-Jahren über die Human Interference Task Force (HITF 1984, S. 7), die durch das Department of Energy beauftragt worden war, Intrusionsszenarien und Schutzmassnahmen dagegen aufzuzeigen. Verschiedene Grundlagenarbeiten wurden vom Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI, Battelle Memorial Institute) im Rahmen dieses Programms ausgeführt (Kaplan 1982, Tannenbaum 1984, Sebeok 1984). Die zweite Phase mit konkreten Projekten erfolgte ab dem Jahr 2000.

Stand der Arbeiten: Grundlagenarbeiten der 80er- und 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts zu Intrusionsszenarien und Markierungstechniken (HITF 1984, Kaplan 1982, Tannenbaum 1984, Sebeok 1984), standortspezifische Projekte insbesondere für Waste Isolation Pilot Plant (WIPP 2000, 2004a, 2004b), Hanford (Adams et al. 1986) und Yucca Mountain (Gaus et al. 2009)

Schweiz

Die Empfehlungen zur Markierung von Tiefenlagern erfolgten durch die Expertengruppe «Entsorgungskonzepte radioaktive Abfälle EKRA» (EKRA 2000, S. 50 ff., 57). Die Rechtsgrundlage ist das Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, Artikel 40 Absatz 7, der festhält, dass der Bundesrat die dauerhafte Markierung vorschreibt. Die Kernenergieverordnung, Artikel 69 Absatz 3 Buchstabe c, überträgt dem Eigentümer des geologischen Tiefenlagers die Pflicht dafür zu sorgen, dass die Markierung dauerhaft ist. Die Arbeitsgruppe des Bundes für nukleare Entsorgung (Agneb) hat im Jahr 2009 ein Forschungsprogramm verabschiedet, zu dem auch die vorliegende Arbeit über Markierungsstrategien gehört. Seitens der Nagra erfolgten ebenfalls erste Überlegungen zur Markierung (Gaus et al. 2009).

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zur Frage der Markierung, Synthese des Forschungsstandes.

Frankreich

In Frankreich ist die Rückholbarkeit per Gesetz (loi Bataille 1991) festgeschrieben. Die französische Strategie ist auf die Erhaltung des Wissens fokussiert, namentlich auf die Entwicklung von dauerhaftem Papier und resistenter Tinte (papier «permanent», encre résistante, vgl. [www.andra.fr/les solutions de gestion/se souvenir/le papier permanent](http://www.andra.fr/les_solutions_de_gestion/se_souvenir/le_papier_permanent)). In der Literatur finden sich Hinweise auf die Notwendigkeit von Markierprogrammen für Tiefenlager oder radioaktiv verseuchte Gebiete (Mururoa, Fangataufa).

In den «Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires» (Punkt 3.1, Intrusion humaine, siehe www.asn.fr/rfs-iii2f-abrogee-par-le-guide-de-surete-relatif-au-stockage-definitif-des-dechets-radioactifs-en-fo), wird auch die Notwendigkeit einer Markierung an der Oberfläche («marquage de surface») angesprochen. Raimbault et al. (1993, S. 212) verweisen auf einen vom französischen Industrieministerium 1987 publizierten Bericht (rapport Goguel), der empfahl, Vor- und Nachteile von Markierungsprogrammen darzulegen.

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zum Wissenserhalt, Forschung zur Entwicklung des «dauerhaften Papiers» für SMA-Lager, für HAA-Lager werden die Fragen noch analysiert.

Deutschland

In Deutschland hat das Bundesministerium für Umwelt (BMU) den Themenkreis der ethischen Aspekte in einem Rapport unter Einbezug der Politik in anderen Ländern evaluiert (Boetsch 2003). Ein Arbeitskreis der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2008) hat sich der Frage der menschlichen Intrusion und der Markierung von Tiefenlagern angenommen.

Stand der Arbeiten: Analyse der Fragen der Intrusion und der Markierung.

Grossbritannien

Nirex evaluierte 1995 Intrusions-Szenarien durch den Menschen (Nirex 1995) und legte Zielgrößen für die Markierung fest (Nirex 2000, S. 73, 80, 83), die sich auf internationale Empfehlungen (NEA 1995) abstützen. Eine projektspezifische Weiterentwicklung von Markierungsprogrammen steht aus.

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zur Frage der Intrusion und der Markierung.

Kanada

Wie in Grossbritannien untersuchte Atomic Energy Canada Limited (AECL, heute NWMO) in den 90er-Jahren mögliche Intrusionsszenarien in ein Endlager (Wuschke 1991; Wuschke 1996). Eine projektspezifische Weiterentwicklung von Markierungsprogrammen steht aus.

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zur Frage der Intrusion und der Markierung.

Japan

Rechtliche Grundlage für den Wissenserhalt von Daten über Tiefenlager ist der «Specified Radioactive Waste Disposal Act» aus dem Jahre 2000 (Sugiyama et al. 2003, S. [i]). Verschiedene Arbeiten mit detaillierten Szenarien untersuchen die Wirksamkeit von Wissenserhalt unter Einbezug von historischen und technischen Erkenntnissen sowie von konkreten Markierungsstrategien (Obuchi et al. 2003; Sugiyama et al. 2003).

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zum Erhalt des Wissensstandes über Tiefenlager.

Nordische Länder

In nordischen Ländern sind ethische Erwägungen seit Jahrzehnten Bestandteil der Debatte um Tiefenlager (Kasam 1988). Wesentliche Fragen der Rückholbarkeit und des Wissensmanagements wurden bereits vor mehr als einem Jahrzehnt aufgearbeitet (Eng et al. 1996).

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zum Erhalt des Wissensstandes über Tiefenlager.

Spanien

Spanien hat in den 90er-Jahren Analysen zu Intrusions-Szenarien vorgelegt (Carboneras 1995), soweit feststellbar aber nicht weiterverfolgt, auch was die Fragen der Markierungen angeht.

Stand der Arbeiten: Analyse des Kenntnisstandes zum Erhalt des Wissensstandes über Tiefenlager.

Gesamteindruck

Verschiedene Länder entwickelten in der Vergangenheit entsprechend ihrer individuellen Bedürfnisse Strategien für den Langzeit-Wissenserhalt von Information über Tiefenlager und konkrete Markierungsstrategien an Standorten. Viel Wissen ist inzwischen zusammengetragen worden und verfügbar. Allerdings wird der Eindruck bestärkt, dass eine systematische Ausleuchtung des Themas auf internationaler Ebene erst in den Anfängen steckt. Die Einbindung von Interdisziplinarität wird die Qualität der erzielten Ergebnisse in diesem Sinne entscheidend beeinflussen.

Folgerungen

Die vorliegende Literaturstudie ermöglichte es, die Fragen der Markierung grundsätzlich und systematisch auszuleuchten. Die Erhebung des Wissensstandes zur Markierungsfrage zeigte, dass mit vernünftigem Aufwand wesentliche Erkenntnisse aus der verfügbaren Literatur gewonnen werden können. Natürlich würde eine weitergehende Bearbeitung der Literatur weitere Erkenntnisse liefern und so das Bild über das, was Markierung leisten oder nicht leisten kann und soll, schärfer und vor allem detailreicher fassen. Wesentliche und grundsätzliche offene Fragestellungen dürften sich aber selbst bei einer sehr viel umfassenderen Ausleuchtung des Themas kaum mehr ergeben. Dies zeigt allein schon der Befund der vorliegenden Studie, die in vielen Punkten an die Erkenntnisse der umfangreichen Arbeiten der 80er- und 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts anknüpft. Dennoch konnten einige neue Erkenntnisse gewonnen werden und die Markierungsstrategien in einen umfassenden technischen und gesellschaftlichen Kontext gestellt werden. Als besonders zentral oder interessant erscheinen folgende Erkenntnisse:

- **Notwendigkeit von Synthesen:** Zum einen ist die Notwendigkeit von Synthesen hervorzuheben. Synthesen ermöglichen die Gesamtschau eines Problems, indem sie Informationen eines bestimmten Wissensgebiets zusammentragen, sortieren und verdichten. Synthesen legen auf diese Weise auch die Schwierigkeiten und Widersprüche im betrachteten Wissensgebiet offen und ermöglichen eine periodische Prüfung des Wissensstandes und der konkreten Projektentwicklungen. Zudem können neue Sichtweisen und Werthaltungen in Synthesen einfließen, sodass bei Bedarf auch Korrekturen in konkreten Projekten möglich sind. Der Nutzen von periodischen Überprüfungen ist generell anerkannt.
- **Widersprüchlichkeit:** Die Ziele der Markierung und die konkreten Umsetzungsstrategien von Projekten sind nicht widerspruchsfrei. Wo Markierung erfolgt, wird ein «Abdruck» («fingerprint») hinterlassen, wo bei einem Tiefenlager nicht markiert wird, ist dieser «fingerprint» schwieriger nachzuweisen. Allerdings ermöglicht moderne Technik ein Auffinden der Zugangsbauwerke eines sorgfältig kaschierten Lagers auch ohne allzu grosse Schwierigkeiten (z. B. über Luftbildarchäologie, mittels Georadar für oberflächennahe Bauwerke wie Ansatz Schächte und Rampe). Widersprüche tauchen in manchen konkreten Punkten der Markierung auf und lassen sich nicht abschliessend ausräumen. Allerdings sind in diesem Zusammenhang auch Entwicklungen in einem System mit einzubeziehen, die unabhängig vom Projekt erfolgen (siehe unten).
- **Ganzheitlichkeit:** Die ganzheitliche Betrachtung eines Konzeptes – ob Oberflächenmarkierung oder nicht – sollte unbedingt und mit aller Konsequenz verfolgt werden, und zwar unter Einbezug aller technischen und nicht-technischen Faktoren. Technische Disziplinen etwa müssen sich öffnen für die Anliegen von Semiotik und den Erkenntnissen aus Archäologie und Geschichte. Umgekehrt hat die Planung von Markierungsstrategien auch Fragen wie Korrosion von Metallen und Gasbildung mit einzubeziehen. So muss, um ein Beispiel zu nennen, der Einbau von grossen magnetischen Eisenmarkern im Tiefenlager aus Überlegungen zur Korrosion und Gasbildung verworfen werden. Der ganzheitliche Ansatz soll sicherstellen, dass die möglichen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten des Markierungssystems, dem Sicherheitssystem und den diversen Fachdisziplinen erkannt und bewertet werden können.
- **Systemische Entwicklung²⁷:** Die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft ist eng an Veränderungen innerhalb seines Lebensumfeldes gekoppelt. Entwicklungen einer bestimmten Gruppe werden von anderen Gruppen übernommen und finden auf diese Weise rasche Verbreitung. Die Technik liefert hierzu zahlreiche Beispiele, beginnend mit der Herstellung von Silexwerkzeugen in der Steinzeit über die Megalithkultur der Jungsteinzeit, den Bau von romanischen und später gotischen Kirchen, bis hin zur Elektrifizierung und zur Entwicklung von Bahn, Auto, Flugzeug und Computer. Für Tiefenlager ist abzusehen, dass unter solchen Voraussetzungen die Tendenz besteht, ähnliche Strategien der Markierung umzusetzen. Ein einzelnes Projekt wird selten vollständig quer zu einer allgemeinen Entwicklungstendenz stehen.

²⁷ Systemisch: siehe Glossar

Wesentlich ist schliesslich die Erkenntnis, dass Kommunikation durch die Zeit besonderer Voraussetzungen bedarf. Für den Wissenstransfer eines Tiefenlagers über die langen Zeiträume und die formale Ausstattung mit semiotischen Techniken und Objekten sind dies Herausforderungen besonderer Art. Semiotikerinnen und Semiotiker haben das Missdeutungspotential von Informationen über ein Tiefenlager durch konventionelle Zeichensätze sehr wohl erkannt. Dass der Diskurs über die Endlagerung schon heute ideologisch geprägt ist und Machtpositionen widerspiegelt zeigt die Herausforderung der semiotischen Bewältigung von Markierungsprogrammen auf.

In diesem Sinne könnte der Ansatz, das Thema «radioaktive Abfälle» auch durch mythologische Erzählungen zu tradieren – trotz aller Kritik²⁸ – interessant sein, da der Kern der Botschaft in Geschichten verpackt und weitergegeben werden kann, die grundlegende existentielle Themen (Schöpfung, Tod, Grösse, Freiheit usw.) beinhalten und weniger tägliche politische oder weltanschauliche Fragestellungen. Alle grossen Mythen von Völkern dieser Erde haben eine gewaltige Aufnahme in der Zeit erfahren, seien es alte babylonische Mythen, wie jene des Gilgamesch und des Atrahasis, die biblische Schöpfungsgeschichte, mittelalterliche Mythen wie die Graals-Sage bis hin zu den modernen Mythen der Nationalstaaten, die – wie die Beispiele Wilhelm Tells oder Jean d'Arc zeigen – Heldengeschichten mit klassischer Kraft und Ausstrahlung darstellen.

²⁸ siehe Blonsky (1990, S. 169 ff.); Sprenger (2007, S. 60 ff.).

Literatur

- Adams M.R., Kaplan M.F. (1986): Marker Development for Hanford Waste Site Disposal, Waste Management 86, Proceedings of the Symposium on Waste Management at Tucson, Arizona, March 2-6, 1986
- AEN (2002): La réversibilité et la récupérabilité dans la gestion des déchets radioactifs, une réflexion à l'échelle internationale, Agence pour l'Energie Nucléaire, www.oecdnea.org/html/rwm/reports/2001/nea3448.pdf
- Agricola Georg (1557/1928): Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. In denen die Ämter, Instrumente, Maschinen und alle Dinge, die zum Berg- und Hüttenwesen gehören, nicht nur aufs deutlichste beschrieben, sondern auch durch Abbildungen ... aufs klarste vor Augen gestellt werden, In neuer dt. Übers. bearb. v. Carl Schiffner, Berlin: VDI-Verlag, 1928
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd); Abschlussbericht, Langfassung, Dezember 2002
- Anderson D.R., Hunter R.L., Bertram-Howery S.G. and Lappin A.R. (1989): WIPP Performance Assessment: Impacts of Human Intrusion, Proc. NEA Workshop on Risks associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites, Paris, June 1989, pp. 68–84, OECD, 1989
- Andra (o. J.): Disposal Facilities: Preserving a Collective Memory, Essential Series
- Arbeitsgruppe Forschungsprogramm radioaktive Abfälle (2008): Forschungsprogramm radioaktive Abfälle zuhanden Bundesamt für Energie, 28. August 2008
- Assmann J. (1997/2007): Moses der Ägypter, Entzifferung einer Gedächtnisspur, Fischer
- Bastide Françoise, Fabbri Paolo (1990): Lebende Detektoren und komplementäre Zeichen: Strahlenkatze, brechendes Auge und Atomsirene, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Balakian Peter (2003): The burning Tigris: The Armenian Genocide and America's Response, New York, Perennial, 2003
- Baltés B., Beuth T. (2005): Behandlung des Szenariums «Menschliches Eindringen» in ein Endlager für radioaktive Abfälle, Vorschlag der GRS, GRS - A - 3259, 2005
- Benford Gregory, Kirkwood Craig, Otway Harry, Pasqualetti Martin (1991): Ten Thousands Years of Solitude? On Inadvertent Intrusion into the Waste Isolation Pilot Project Repository, Los Alamos LA-12048-MS / DE 91 010299
- Benford Gregory (1999): From Deep Time, How Humanity Communicates Across Millenia, Harper Collins
- Berger Peter (1966): Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit. Eine Theorie der Wissenssoziologie. Fischer Verlag, Frankfurt am Main 1966
- Berger Ruth (2008): Warum der Mensch spricht, eine Naturgeschichte der Sprache, Eichborn
- Berry Warren E. (1983): Durability of Marker Materials for Nuclear Waste Isolation Sites, Batelle Columbus Labs, ONWI-474, Aug. 1983

- BGR (2008): Position des Arbeitskreises «Szenarienentwicklung»: Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen, http://www.bgr.bund.de/nn_322852/DE/Themen/Geotechnik/Aktuelles/2008__12__03__positionspapier.html
- Blonsky Marshall (1990): *Wes Geistes Kind ist die Atomsemiotik*, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): *Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem*, Raben-Verlag, München
- Bloxham Donald (2003): *Genocide on Trial: War Crime Trials and the Formation of Holocaust History and Memory*, Oxford University Press, 2003
- Boetsch W. (2003): *Ethische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle*, Bundesministerium für Umwelt, BMU-2003-619
- Boia Lucian (1989): *La fin du monde, une histoire sans fin*, Editions La Découverte, Paris
- Buja H.O. (2003): *Die Bohrtechnik im Wandel der Zeiten - vom Löffelbohrer der Steinzeit bis zum vollhydraulischen Großdrehbohrgerät*, Bautechnik 80, Nr. 9, Seite 651–662
- Buser M., Wildi W. (1981): *Wege aus der Entsorgungsfalle*, Schweizerische Energie-Stiftung, Januar 1981
- Buser M. (1998): *«Hüte»-Konzept versus Endlagerung radioaktiver Abfälle: Argumente, Diskurse und Ausblick*, Expertenbericht HSK, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, Januar 1998
- Cadwell L.L., Link S.O., Gee G.W. (1993): *Hanford Site Permanent Isolation Surface Barrier Development Program: Fiscal Year 1992 und 1993 Highlights*, Pacific Northwest Laboratory, DOE, PNL-8741
- Cameron Francis X. (1981): *Human Intrusion into Geologic Repositories for High-Level Waste: Potential and Prevention*, Radioactive Waste Management, Vol. 2, December 1981
- Carboneras P. (2002): *The Definition of Commonly Agreed Stylized Human Intrusion Scenarios For the Use in the Long-Term Safety Assessments on Radioactive Waste Disposal Systems*, IAEA-TEC-DOC-1282, S. 169–181
- CFR (o. J.): *Code of Federal Regulations, Title 40 – Protection of Environment, Chapter I – Environmental Protection Agency, Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes*, 40 CFR 191/194
- Chandler David (2007): *A History of Cambodia*, Westview Press, 2007
- Channell James K., Chaturvedi Lokesh, Neil Robert H. (1991): *High Level Radioactive Waste Management, Human Intrusion Scenarios in Nuclear Waste Repository Evaluations*, Proceedings of the Second Annual International Conference held in Las Vegas, Nevada, April 28–May 3, 1991
- Chapman N., McCombie Charles (2003): *Principles and standards for the disposal of long-lived radioactive wastes*, Elsevier, Waste Management Series, Volume 3, 2003
- Cioran Emile (1979): *Mechanismus der Utopie in Geschichte und Utopie*, Klett-Cotta
- Cohen Daniel (2005): *The Future of Preserving the Past*, CRM Journal Summer 2005, S. 6–17
- Cohn Norman (1961): *Das Ringen um das tausendjährige Reich, Revolutionärer Messianismus im Mittelalter und sein Fortleben in den modernen totalitären Bewegungen*, Francke Verlag Bern und München

- Cooper J. R. (2002): Human Intrusion: New Ideas? In: IAEA – International Atomic Energy Agency: Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste. Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18–22 June 2001, IAEA-TECDOC-1282, S. 163–168
- Courtois Stéphane, Hrsg. (1998): Das Schwarzbuch des Kommunismus, Unterdrückung, Verbrechen und Terror, Piper, München u. Zürich 1998
- Darnay Arsen, Franklin William E. (1969): The Role of Packaging in Solid Waste Management 1966 to 1976, US Department of Health, Education and Welfare, Consumer Protection and Environmental Health Service, Bureau of Solid Waste Management, Rockville, Maryland
- De Cannière P., Aoki K., Arcos D., Bath A. et al. (2008): Geochemistry and microbiological experiments in Bossart P./Thury M. (editors), Mont-Terri Rock Laboratory Project, Programme 1996 to 2007 and results, Reports of the Swiss Geological Survey
- de la Ferté J. (1992): L'art au service des déchets radioactifs, Bulletin de AEN (Nuclear energy association NEA), printemps 1992
- Diamond Jared (2005): Kollaps. Warum Gesellschaften überleben oder untergehen. Fischer Frankfurt
- Doblhofer Ernst (1993/1957): Die Entzifferung alter Schriften und Sprachen, reclam, neubearbeitete Auflage 1993
- DOE (2007): Environmental Remediation Sciences Program Strategic Plan (providing the scientific basis to solve DOE's intractable problems in environmental remediation and long-term stewardship), Office of Science, September 2007
- Edzard Dietz-Otto (2004): Geschichte Mesopotamiens, Von den Sumerern bis zu Alexander dem Grossen, C.H. Beck
- EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle; Schlussbericht. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Bundesamt für Energie, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 31. Januar 2000
- EKRA (2002): Beitrag zur Entsorgungsstrategie für radioaktive Abfälle in der Schweiz, Schlussbericht. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Bundesamt für Energie, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Oktober 2002
- Eliade Mircea (1978/1994): Geschichte der religiösen Ideen, Herder, 4 Bände
- Eng Torsten, Norberg Erik, Torbacke Jarl, Jensen Mikael (1996): Information, conservation and retrieval, SKB Technical Report 96-18
- Esselborn Hans (2003): Utopie, Anti-Utopie und Science-Fiction im deutschsprachigen Roman des 20. Jahrhunderts, Königshausen&Neumann
- Fairbridge R.W. (1980): Prediction of Long-Term Geologic and Climatic Changes That Might Affect the Isolation of Radioactive Waste, IAEA-SM-243/43
- Forinash B. (2002): U.S. Environmental Protection Agency's Policies on Consideration of Human Intrusion for Geologic Disposal of Radioactive Waste. In: IAEA – International Atomic Energy Agency: Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste. Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18–22 June 2001, IAEA-TECDOC-1282, S. 183–188

- Freeman H.D., Romine R.A. (1994): Hanford Permanent Isolation Barrier Program: Asphalt Technology Test Plan, Pacific Northwest Laboratory, DOE, PNL-9336
- Galbraith J.K. (1992): Finanzgenies, eine kurze Geschichte der Spekulation, Eichborn Verlag
- Galbraith J.K. (2005a): Der große Crash 1929. Ursache, Verlauf, Folgen. Finanzbuchverlag, München
- Galbraith J.K. (2005b): Die Ökonomie des unschuldigen Betrugs. Vom Realitätsverlust der heutigen Wirtschaft, Siedler, München
- Garfield Susan (1994): «Atomic Priesthood» is Not Nuclear Guardianship, A Critique of Thomas Sebeok's Vision of the Future, Nuclear Guardianship Forum, Issue 3, On the Responsible Care of Radioactive Waste Materials, Spring 1994, <http://www.ratical.org/radiation/NGP/AtomPriesthd.html>
- Gaus I., Claudel A. (2009): Markers, State-of-the-Art and Recommendations for the Development on Nagra's Strategy, Nagra, Arbeitsnotizen, unveröffentlicht, September 2009
- Geotechnical Engineers (1980a): State-of-the-Art for Evaluating the Potential Effects of Erosion and Deposition on a Radioactive Waste Repository, Lawrence Livermore Laboratory Livermore, July 16. 1980
- Geotechnical Engineers (1980b): State-of-the-Art for Evaluating the Potential Impact of Flooding on a Radioactive Waste Repository, Lawrence Livermore Laboratory Livermore, July 16. 1980
- Gera F., Jacobs D.G. (1972): Considerations in the Long-Term Management of High-Level Wastes, Oak Ridge National Laboratory, ORNL 4762
- Givens David (1990): Was wir aus der Menschheitsgeschichte lernen können, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Glacken Clarence (1988): Zum Wandel der Vorstellungen über den menschlichen Lebensraum, in Sieferle Rolf Peter, Fortschritte der Naturzerstörung, suhrkamp Frankfurt a. M.
- Grinsell Leslie (1975): Barrow, Pyramid and Tomb. Ancient burial customs in Egypt, the Mediterranean and the British Isles, 1st Edition London, Thames + Hudson, 1975
- Greenpeace (o. J.): HLW management in Finland, Lauri Myllyvirta, energy campaigner, Folie Nr. 63 in www.greenpeace.org/raw/content/finland/fi/dokumentit/nuclear-waste-presentation
- Haarmann Harald (2002): Geschichte der Schrift, C.H. Beck, Nördlingen
- Haarmann Harald (2006): Weltgeschichte der Sprachen, Von der Frühzeit des Menschen bis zur Gegenwart, Becksche Reihe 1703
- Halliday Jon, Chang Jun (2005): Mao, das Leben eines Mannes, das Schicksal eines Volkes, Karl Blessing Verlag, München, 2005
- Hammond R.P. (1979): Nuclear Waste and Public Acceptation, American Scientist, Vol 67.
- Häring Markus (2007): Geothermische Stromproduktion aus Enhanced Geothermal Systems (EGS), Elektrizitätswerk Stadt Zürich, 7. November 2007

- Hartmann B., Hillebrecht G., Kuntosch S., Rüger G. et al. (2008): Möglichkeit einer Rückholung der MAW-Abfälle aus der Schachanlage Asse, EWN GmbH und TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, 28. November 2008, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)
- Hauser Susanne (1990a): Problematisch sind nicht nur die Antworten, sondern bereits die Voraussetzungen, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Hauser Susanne (1990b): Bisherige Erfahrungen mit der Kommunikation über radioaktiven Abfall, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- HITF (1984): Reducing the Likelihood of Future Human Activities That Could Affect Geologic High-Level Waste Repositories, Technical Report, Human Interference Task Force, prepared for Office of Nuclear Waste Isolation (Battelle Memorial Institute), BMI/ONWI-537, May 1984
- Hora Stephen, von Winterfeldt Detlof, Trauth Kathleen (1991): Expert Judgment on Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Pilot Plant, Sandia Report SAND 90-363 / UC-721
- HSK (2005): Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Würenlingen, August 2005
- Hugon M., McMenamin T. (1993): Characterisation of Nuclear Waste Packages and Their Environment, Safewaste 93, International Conference on Safe Management and Disposal of Nuclear Waste, Avignon 13–18 June 1993
- IAEA (1971): Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 6–16 September 1971, Vol. 11, Vienna
- IAEA (1972): Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 6–16 September 1971, Vienna 1972, Vol. 11, S. 465–471
- IAEA (1988): the Radiological Accident in Goiania, STI/PUB/815, ISBN 92-0-129088-8, IAEA, Vienna, 1988
- IAEA (1995): Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F
- IAEA (1999): Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1097, July 1999
- IAEA (2001): Waste inventory record keeping systems (WIRKS) for the management and disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC-1222, June 2001
- IAEA (2001): IAEA's Radiation Events Database (RADEV) - (<http://ean.cepn.asso.fr/pdf/program5/session%204/poster%20S4/Wheatley.PDF>) - John Wheatley, 2001
- IAEA (2002): The Radiological Accident in Samut Prakarn, STI/PUB/1024, ISBN 92-0-110902-4, Vienna 2002
- IAEA (2004): Records for radioactive waste management up to repository closure: managing the primary level information (PLI) set, IAEA-TECDOC-1398, July 2004
- IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards, Safety Requirements No. WS-R-4, Vienna, 2006

- Jablkowska Joanna (2003): Die Tradition der Schauerliteratur in den apokalyptischen Visionen der Nachkriegszeit, in Esselborn Hans, Utopie, Anti-Utopie und Science-Fiction im deutschsprachigen Roman des 20. Jahrhunderts, Königshausen&Neumann
- Jungk Robert (1963): Heller als tausend Sonnen, Scherz Bern München Wien
- Kaplan Maureen (1982): Archeological Data as a Basis for Repository Marker Design, prepared for Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, ONWI-354, October 1982
- Kasam (1988): Ethical Aspects on Nuclear Waste, SKN Report 29, April 2009
- Käss Werner (2004): Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 9, Geohydrologische Markierungstechnik, Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart, 2004
- Kiernan Ben (2007): Blood and Soil: Genocide and Extermination from Carthage to Darfur, Yale University Press, New Haven Connect., London
- Kowalski Emil (2002): Technology Assessment, vdf Hochschulverlag, 2002
- K+S (o. J.): Wiederauslagerung aus Untertage-Deponien, Abfälle als Rohstoffe von morgen, Informationsbroschüre
- KSA (2005): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Kommission für die Sicherheit von Atomanlagen, KSA 23/170, August 2005
- Leakey Richard (1999): Die ersten Spuren – über den Ursprung des Menschen (The Origin of Humankind), Goldmann
- Lem Stanislaw (1990): Mathematische Kodierung auf lebendem Trägermaterial, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atom Müll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Link S.O., Thiede M.E., Downs J.L., Lettau D.J, Waugh W.J. (1992): Evapotranspiration Studies for Protective Barriers: FY 1989 Status Report, DOE, PNL—8033 May 1992
- Linsley Gordon, Vovk Ivan (1989): Safety standards for high-level waste disposal, IAEA Bulletin 4/1989
- Macy Joanna (1992): Projekt Verantwortung vor der Zukunft, Spuren, Heft 23
- McCall Henrietta (1993): Mesopotamische Mythen, Mythen alter Kulturen, Reclam Stuttgart
- McCombie Charles, Chapman Neil (2002): Regional and Interregional Repositories: Not If, but How and When, World Nuclear Association, 4–6 September 2002, London
- Melchior St. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 22
- Merz E. (1996) Multibarriers: Their Efficacy Against Intentional Intrusion Into a Geological Repository to Retrieve Disposed Plutonium, in Merz E., Walter Carl (1996): Disposal of Weapon Plutonium, Approaches and Prospects, NATO-ASI-Series, 1 Disarmament Technologies, Vol. 4
- Milnes Alan G., Buser Marcos, Wildi Walter (1980): Endlagerungskonzepte für radioaktive Abfälle im Überblick. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Band 131

- Milnes A.G. (1985): *Geology and Radwaste*, Academic Press Geology Series
- Minois Georges (2002): *Die Geschichte der Prophezeiungen*, Patmos Verlag / Albatros Verlag Düsseldorf
- Nagra (1998): *Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg – Etappen auf dem Weg zum Verschluss; präzisierende Darstellung der Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit*. Nagra Technischer Bericht, NTB 98-04
- Nagra (1999a): *Endlager HAA/LMA – Opalinuston, Konzeptstudie Anlagen und Betrieb, Technischer Lösungsvorschlag zur Rückholung eingelagerter Brennelement-Behälter*, Dezember 1999, NIB 99-57
- Nagra (1999b): *Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland*. Nagra Technischer Bericht, NTB 99-08
- Nagra (2002a): *Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Nagra Technischer Bericht, NTB 02-02
- Nagra (2002b): *Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Nagra Technischer Bericht, NTB 02-03
- Nagra (2002c): *Project Opalinus Clay – Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*. Nagra Technical Report, NTB 02-05
- Nagra (2008a): *Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie (Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit)*. Nagra Technischer Bericht NTB 08-05
- Nagra (2008b): *Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager*, Technischer Bericht NTB 08-03, Oktober 2008
- NEA (1988): *Feasibility of Disposal of High-Level Radioactive Waste into Seabed, Volume 4, Engineering*, OECD 1988
- NEA (1995): *Future Human Actions at Disposal Sites, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories*, OECD 1995
- NEA (2001): *Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, Reflections at International Level*, NEA/RWCM 2001
- NEA (2002): *Radioactive Waste Management Committee, Topical Session on Overall Waste Management Approaches, Paris, 14th March 2002*, NEA/RWM (2002)
- NEA (2005): *Geological Repositories: Political and Technical Progress Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 8–10 December 2003*, Nuclear Energy Agency OECD 2005, ISBN: 92-64-00830-6
- NEA (2006): *Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management*, Nuclear Energy Agency NEA OECD no. 5990

- NEA (2007): *Regulating the Long-term Safety of Geological Disposal Towards a Common Understanding of the Main Objectives and Bases of Safety Criteria*, No. 6182, Nuclear Energy Agency OECD 2007, ISBN-978-92-64-99031-9
- NEA (2007a): *Fostering a Durable Relationship Between a Waste Management Facility and its Host Community, Adding Value Through Design and Process*, Nuclear Energy Agency OECD 2007, NEA No. 6176, ISBN 978-92-64-99015-9
- NEA (2008): *Towards Waste Management Facilities That Become a Durable and Attractive Part of the Fabric of Local Communities – Relevant Design Features*, www.nea/html/rwm/fsc.html, September 2008
- NEA (2009a): *The Symbolic Dimension of Radioactive Waste Management, Topical Session of the 9th FSC Meeting, June 2008, and Related Desk Research*
- NEA (2009b): *Main Findings From The 1st RWCM Regulators Forum Workshop, Radioactive Waste Management Committee Regulator's Forum (RWCM-RF), Tokyo, 20–22 January 2009*
- Neill H., Neill R. (2003): *Perspectives on Radioactive Waste Disposal: A Consideration of Economic Efficiency and Intergenerational Equity*, WM 03 Conference, February 23–27, 2003, Tucson Arizona
- Nirex (1995): *Post-Closure Performance Assessment: Human Intrusion and Natural Disruptive Events*, Nirex Report No. S/95/004
- Nirex (2000): *The Nirex Repository Concept: Evaluating Performance*, Nirex, October 2000, Report No. N/011
- Nolin J. (1993): *Communication with the Future: Implications for Nuclear Waste Disposal*, *Futures* 1993, Vol. 25, No. 7
- Noyes Robert (1995) *Nuclear Waste Cleanup Technology and Opportunities*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ
- NST (2007): *Passive Barriers to Inadvertent Human Intrusion for Use at the Nevada Test Site*, National Security Technologies, Las Vegas, June 2007
- Ohuchi Jin, Sugiyama Kazutoshi, Asano Hidekazu, Tsuboya Takao (2003): *Conceptual System of Robust Record Preservation on Geological Disposal*, IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30–April 2, 2003
- ONWI (1987): *Conceptual Designs for Waste Packages for Horizontal or Vertical Emplacement in a Repository in Salt*, Technical Report, Batelle Memorial Institute, Office of Nuclear Waste Isolation, BMI/ONWI/C-145
- Pastina Barbara (2004): *Implementing Long-Term Stewardship: a National Challenge*; Board on Radioactive Management, The National Academies, 16 March 2004
- Pauly - Der kleine Pauly (1979): *Lexikon der Antike*, DTV München
- Pescatore Claudio, Mays Claire (2007): *Geological Disposal of Radioactive Wastes: Records, Markers, and People – an Integration Challenge to Be Met over Millenia*, colloque «La mémoire industrielle au service de générations futures », 11 décembre 2007, Paris, initiative en partenariat AFITE et AN-DRA
- Poeschke Joachim, Hrsg. (1996): *Antike Spolien in der Architektur des Mittelalters und der Renaissance*, Hirmer Verlag München

- Pierce Charles Sanders (o. J.), siehe de.wikipedia.org/wiki/Charles_Sanders_Peirce
- Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Posner Roland (1990b): Mitteilungen an die ferne Zukunft, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Raimbault C., Valentin-Ranc C. (1993): How to Mark Repositories in Geologic Formation, Safewaste 93, International Conference on Safe Management and Disposal of Nuclear Waste, Avignon 13–18 June 1993
- Rehder Wulf (1990): Sicherung gegen Codebrecher durch Randomisierung, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Rhodes Richard (1988): Die Atombombe, Greno Verlagsgesellschaft Nördlingen
- ROWA (1999): Endlager HAA/LMA – Opalinuston Konzeptstudie Anlagen und Betrieb, Technischer Lösungsvorschlag zur Rückholung eingelagerter Brennelement-Behälter. Nagra Interner Bericht.
- Saint-Simon C.H. (1813/1973): Mémoires sur la science de l'homme, Œuvres Choiesies, Georges Olms Verlag, 1973
- Schmandt-Besserat Denise (1999): The History of Counting, Morrow junior
- Schmandt-Besserat Denise (1996): How Writing Came About, University of Texas Press
- Schneider Wolf (2008): Der Mensch – eine Karriere, Rowohlt
- Schüring Hendrik (1995): Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Endlagerung radioaktiver Abfälle, in IPPNW. Die Endlagerung radioaktiver Abfälle, S. Hirzel Stuttgart
- Sebeok Thomas (1984): Communication Measures to Bridge Ten Millenia, prepared for Office of Nuclear Waste Isolation (Battelle Memorial Institute), BMI/ONWI-532, April 1984
- Sebeok Thomas (1990): Die Büchse der Pandora und ihre Sicherung: Ein Relaisystem in der Obhut einer Atompriesterschaft, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Sonntag Philippe (1990): Künstlicher Mond am Himmel und Datenbank im Keller, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem, Raben-Verlag, München
- Sprenger Florian (2007): Atommülllager: Medien, Zeit und Raum eines Kommunikationsproblems, Schriftliche Hausarbeit für die Masterprüfung der Fakultät für Philologie an der Ruhr-Universität Bochum
- Strieder Jacob (1971): Studien zur Geschichte kapitalistischer Organisationsformen, Burt Franklin research & source works series, 754
- Sugiyama Kazutoshi, Takao Hajime, Obuchi Jin, Tsuboya Takao (2003): Record Preservation Study on Geological Disposal – Significance and Technical Feasibility, Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC), March 2003

- Tannenbaum Percy (1984): *Communication Across 300 Generations: Detering Human Interference With Waste Deposit Sites*, Technical Report, prepared for Office on Nuclear Waste Isolation (Battelle Memorial Institute), BMI/ONWI-535, April 1984
- Tannenbaum Percy (1990): *Staffelung der Informationsstellen nach Inhalt und Entfernung von Lagerstätten*, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): *Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem*, Raben-Verlag, München
- Tolan T.L. (1993): *The Use of Protective Barriers to Deter Inadvertent Human Intrusion into a Mined Geologic Facility for the Disposal of Radioactive Waste*, SAND91-7097, Sandia National Labs, June 1993
- Tonn Bruce (2001): *Institutional Design for Long-Term Stewardship of Nuclear and Hazardous Waste Sites*, *Technological Forecasting and Social Change* 68
- Trauth Kathleen, Hora Stephen, Guzowski Robert (1993): *Expert Judgment on Markers to Deter Inadvertent Human Intrusion into the Waste Isolation Plant*, Sandia Report, SAND92-1382, UC-721, November 1993
- US EPA (1993): *40 CFR 191, Environmental Radiation Protection Standards for the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes*, Final Rule, Federal Register 50/182, 38066-38089, US Environmental Protection Agency EPA, Washington D.C.
- Verón Eliseo (2004): *La semiosis social, fragmentos de una teoría de la discursividad*, gedisa editorialBarcelona, agosto 2004
- Voigt Vilmos (1990): *Konzentrisch angeordnete Warntafeln in zunehmend neueren Sprachformen*, in Posner Roland, Herausgeber (1990a): *Warnungen an die Zukunft, Atommüll als Kommunikationsproblem*, Raben-Verlag, München
- Von Choltitz Dietrich (1950): *... brennt Paris? Adolf Hitler ... Tatsachenbericht des letzten deutschen Befehlshabers in Paris. Una-Weltbücherei*, Mannheim 1950
- Watson Peter (2005) *Ideen, eine Kulturgeschichte von der Entdeckung des Feuers bis zur Moderne*, C. Bertelsmann, München
- Watzlawick Paul (1976): *Wie wirklich ist die Wirklichkeit – Wahn, Täuschung, Verstehen*. Piper, München 1976
- Weinberg Alvin (1972): *Social Institutions and Nuclear Energy*, *Science*, Vol. 177, 7 July 1972
- Weinberg Alvin (1999): *Scientific Millenarism*, www.aps-pub.com/proceedings/1434/Weinberg.pdf
- Weitzberg Abraham (1982): *Building on Existing Institutions to Perpetuate Knowledge of Waste Repositories*, ONWI-379, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio
- Westerlind M. (2002): *Some Reflexions on Human Intrusion into a Nuclear Waste Repository*: In: IAEA – International Atomic Energy Agency: *Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste. Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18–22 June 2001*, IAEA-TECDOC-1282, S. 189–192
- Weiß Ludger (1989): *Die Träume der Genetik, Gentechnische Utopien von sozialem Fortschritt*, Schriften der Hamburger Stiftung für Sozialgeschichte des 20. Jahrhunderts, Delphi-Politik/Greno
- WIPP (2000): *Permanent Markers Testing Program Plan*, US Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, DOE/WIPP 00-3175, September 28

- WIPP (2004a): Permanent Markers Implementation Plan, US Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, DOE/WIPP 04-3302, August 19
- WIPP (2004b): Passive Institutional Controls Implementation Plan, US Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, DOE/WIPP 04-2301, August 19
- Wuschke, D.M. (1996): Assessment of the long-term risks of inadvertent human intrusion into a proposed Canadian nuclear fuel waste disposal vault in deep plutonic rock - Revision 1. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10279 Rev. 1, COG-92-151
- Zahn Ralph (1955): Atom, Tod oder Segen, Kongress Verlag Berlin

Glossar wichtiger im Text verwendeter Begriffe

- Algorithmus..... Lösungsverfahren oder -anleitung in klar definierten Schritten
- Analoge..... Gegenstände, die im historischen Kontext Aufschluss über die vergangenen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse geben. Analoga gehen vom Aktualismusprinzip von James Hutton und Charles Lyell aus, das besagt, das alle heutigen Prozesse auch in der Vergangenheit gewirkt haben, womit eine historische Deutung und Rekonstruktion möglich wird
- Chiliasmus siehe Millenarismus
- Code Anleitung zur Verschlüsselung einer Nachricht in Zeichen
- Dauerhaftigkeit..... Begriff, der die Haltbarkeit eines Trägermaterials gegen physikalische, chemische und biologische Zersetzung oder Angriffe bezeichnet
- Dekodierung..... Entschlüsselung einer (Zeichen-) Nachricht
- Dekonstruktion..... ein von dem französischen Philosophen Jacques Derrida geprägter Begriff zur Kennzeichnung einer Methode zur Interpretation von Werken
- Denudation..... flächenhafte Abtragung der Landoberfläche; die Erosion folgt der linienhaften Abtragung (z. B. Fluss, Talung)
- EKRA..... Expertengruppe «Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle» des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (1999–2001)
- Enkodierung Verschlüsselung einer (Zeichen-) Nachricht
- EPA..... Environmental Protection Agency. Eine unabhängige Behörde der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika zum Schutz der Umwelt und zum Schutz der menschlichen Gesundheit.
- Eschatologie Katholische Lehre von der Zielgerichtetheit der göttlichen Schöpfung, insbesondere verwendet in Zusammenhang mit dem Ende der Welt und dem Aufbruch in das angekündigte Gotteszeitalter
- Exhumierung Öffnen eines Tiefenlagers (siehe «human intrusion» oder Rückholbarkeit); ursprünglich das Ausgraben einer bereits bestatteten Leiche
- Fluvio-terrestrisch..... Bezeichnung eines Gebietes, das durch den Wirkungsbereich eines Flusses definiert ist; der Begriff ist aus der Sedimentologie (der Wissenschaft über die Ablagerungen) entlehnt und steht im Gegensatz zu den marinen, also in Meeren abgelagerten Schichten
- Geomorphologisch die Form der Erdoberfläche betreffend
- Georadar eine Technik der Boden- und Untergrunderkundung mit Hilfe von elektromagnetischen Impulsen; Georadarkampagnen sind im Wesentlichen auf die obersten 10 m des Untergrunds beschränkt
- Haltbarkeit..... siehe Dauerhaftigkeit
- Hermeneutik..... Theorie über das Verstehen und Auslegen von Werken

- Hieroglyphen eingravierte Zeichen; im Zusammenhang mit den ägyptischen Zeichenschriften verwendeter Begriff, der die ursprünglich als «heilig» (hieros) angesehenen Zeichen umschreibt
- Human Intrusion Oberbegriff für das beabsichtigte oder unbeabsichtigte Eindringen in ein Tiefenlager nach dessen definitivem Verschluss; nicht identisch mit dem Begriff Rückholbarkeit
- Humin-Fulvin-Säuren saure organische Zersetzungsprodukte in Böden; entstehen durch den Abbau toter Lebewesen
- Hydrosphäre Gesamtheit der oberirdischen und unterirdischen Wasservorkommen
- IAEA International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergieorganisation). Autonome Agentur der Vereinten Nationen, die sich für die sichere und friedliche Nutzung der Atomenergie einsetzt
- Icon Zeichen innerhalb der Semiose oder abstraktes bildliches oder klangliches Zeichen, das Bezüge zum bezeichneten Gegenstand herstellt; siehe auch Piktogramm
- Ideogramme begriffliche übersprachliche abstrakte Zeichen, z. B. ? für «Fragezeichen», & für «und» oder \$ für «Dollar»
- Lithosphäre feste Gesteinshülle, Gesamtheit aller Gesteine und Schichten
- Kanal zentraler Begriff innerhalb einer Semiose, welcher ausdrückt, wie Zeichen einer Nachricht oder Botschaft übermittelt werden können. Der Kanal drückt die «Leistungsfähigkeit» eines Pfades aus, Information zu transportieren
- Keilschrift Sammelbegriff für Zeichenschriften, die durch Federeindrücke in eine weiche Tonmasse entstanden. Das bekannteste Verbreitungsgebiet von Keilschriften ist Mesopotamien
- Kontext Umgebungsbedingungen, zentraler Begriff zur Charakterisierung der Semiose
- Konstruktivismus Sammelbegriff für Wissenschafts- und Kunsttheorien, welche davon ausgehen, dass Idee, Wissen und Erkenntnis konstruiert sind und nicht eine allgemein gültige Wahrheit widerspiegeln
- Marker Sammelbegriff für Gegenstände, die entlang von Grenzflächen für die Kennzeichnung eines Einfluss-, Macht- oder Gefahrenbereichs platziert werden
- Markierung Sammelbegriff für ein Projekt für die Kennzeichnung eines Bereichs
- Millenarismus im christlichen Kulturkreis Sammelbegriff für den Glauben an die Wiederkunft Jesu Christi gemäss den Prophezeiungen der Apokalypse Johannii; meistens wird der Begriff auch mit dem eschatologischen Messianismus verwendet, also dem Weltenende und dem Jüngsten Gericht nach einer tausendjährigen Herrschaft des Bösen. Die gesamte christliche Geschichte, insbesondere das Mittelalter, ist ganz wesentlich von dieser millenaristischen Welterfahrung geprägt. Auch die jüdische und islamische Tradition kennt den Millenarismus. Es wird auf grundlegende Werke für das Verständnis von Inhalt und Geschichte der Eschatologie und des Millenarismus verwiesen

- NEA..... Nuclear Energy Agency. Eine halb-autonome Institution innerhalb der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zur Förderung einer sicheren, umweltschonenden und wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie
- Neolithikum..... Revolutionäre Entwicklung der Kultur des homo sapiens am Übergang der Mittel- zur Jungsteinzeit vor ca. 10 000 Jahren (Übergang vom jagenden und sammelnden zum sesshaften Menschen)
- Oxido-Reduktion..... chemische Reaktion, bei der zwischen den verschiedenen chemischen Reaktionspartnern Elektronen ausgetauscht werden. Wesentliche Reaktion beim Stoffwechsel oder bei Verbrennungs-Reaktionen
- Piktogramm..... Symbol, welches Information über bildliche Darstellung vermittelt
- Relais..... Relaiskette, Relaisstation und ähnliche Begriffe werden verwendet, um die Übermittlungsfunktionen zu charakterisieren. Ein Relaispunkt ist ein bestimmter Punkt in einer Zeitkette, an welchem Information wieder bearbeitet und der nächsten Generation übergeben wird. Relaisysteme haben die Erneuerung und Weitergabe von Information zum Ziel und sollen den Informationsverlust durch die Zeit vermindern
- Rotary-Bohrung..... Bohrverfahren, ursprünglich in der Erdöl- und Erdgasindustrie entwickelt, mit breiter Anwendung in der Erkundung des Untergrundes; der rotierende Bohrmeißel frisst sich in das Gestein, indem es dieses zerkleinert; das Bohrgut wird mit einer Suspension ausgespült
- Rückholbarkeit..... bewusste Wiederöffnung eines Tiefenlagers zum Zweck der Extraktion bereits eingelagerter Abfälle; nicht zu verwechseln mit dem Begriff «human intrusion»
- Run-off..... Oberflächenentwässerung (Niederschlag, Schnee- und Gletscherwässer usw.)
- Semiose..... generelles Modell eines Informationstransfers in der Zeit, welches die Beziehungen zwischen der Informationsquelle und dem Empfangenden der Information untersucht. Der Informationstransfer erfolgt durch Zeichen, Objekt (Gegenstand, auf den sich ein Zeichen bezieht) und Bedeutung des Zeichens. Semiose ist ein dehnbarer Begriff. Er umfasst in neueren Interpretationen auch den Kontext, also die Rahmenbedingungen, unter denen die Information transferiert wird.
- Spindletop..... erste, 1901 ausgeführte Erdölbohrung mit der Rotary-Technik in Beaumont, Texas
- Stakeholder/in..... englische Bezeichnung für eine/n an einem Prozess beteiligte/n Handlungsträger/in
- Systemisch..... Begriff, der sich aus dem Substantiv «System» ableitet und in vielen Fachdisziplinen verwendet wird. Systemisch wird dann verwendet, wenn auf Komplexität und Wandel innerhalb eines bestimmten Systems hingewiesen werden soll
- Synthese..... Zusammenfassung und Verdichtung von Information, die als wesentlich erachtet wird und die eine Gesamtschau über ein Gebiet und seine Probleme ermöglichen soll

- Toponyme..... Namen von Örtlichkeiten (Orts- und Flurnamen)
- Tradierung (tradieren)..... Überlieferung (überliefern), Weitergabe von Kulturwerten (Glaubens-, Wert- und Handlungsvorstellungen) zwischen Generationen
- Trägermaterial..... der Grundstoff, auf dem eine Markierung angebracht wird, z. B. Ton, Glas, Stein
- Transmitter der mit der Aufgabe der Informationsübermittlung Beauftragte
- Transmutation..... Wissenschaft und Technik der Umwandlung von spaltbaren Kernelementen in weniger langlebige Elemente
- WIPP..... Waste Isolation Pilot Plant (Tiefenlager für militärische radioaktive Abfälle) bei Carlsbad, New Mexico, USA

