

eine Mischung aus ehemaligem Wirtsgestein und den verbleibenden, noch nicht zerfallenen radioaktiven Substanzen. Sollte sich aus irgendeinem Grund ein Zugang zum Grundwasser bilden, so kann eine großflächige Kontamination nicht ausgeschlossen werden. Das Wirtsgestein eines Endlagers muss also möglichst eine absolute Zutrittssicherheit gegen Wasser bieten, denn nicht die Behälter, sondern das Gestein sorgt langfristig für die Isolierung gegenüber der Biosphäre. Aus diesem Grund ist eine möglichst langfristige Stabilität des Wirtsgesteins von allerhöchster Bedeutung. Erdbeben- und Vulkangebiete sind also von vornherein auszuschließen; ebenso alle sonstwie tektonisch aktiven Gesteinsformationen. Man geht heute so vor, dass man analysiert, welche Gesteine in den letzten Millionen Jahren möglichst wenige Veränderungen durchgemacht haben und insbesondere nicht wasserdurchlässig waren. So finden sich unter Tongesteinen unter anderem Jahrmillionen alte Gas- und Öllagerstätten.

Auch Salz hat die Eigenschaft der Undurchlässigkeit. Kritiker der Endlagerung führen aber an, dass durch die radioaktive Strahlung das Kristallgitter des Salzes aufgebrochen werden könnte. Dieser Prozess heißt Radiolyse und führt zu den chemisch hochreaktiven Substanzen Natrium und Chlorgas. Dieser Prozess ist vor allem in den ersten paar Hundert Jahren gefährlich, wenn die radioaktive Strahlung noch am stärksten ist. Es gibt Befürchtungen, dass diese Prozesse lokal den Salzstock beschädigen könnten. Ob es langfristig für eine großflächige Beschädigung reicht, lässt sich im Labor nicht simulieren.

Generell kann aufgrund der extrem langen Zeiträume nicht ausgeschlossen werden, dass durch langsame Diffusionsprozesse von höchstens einigen Millimetern pro Jahr doch kleine Mengen langlebiger Radionuklide den Weg in die Biosphäre finden. Nach heutigen Modellrechnungen sollte sich dadurch die natürliche Radioaktivität im Bereich des Endlagers aber nur leicht erhöhen. Bei Zutritt von Wasser ins Endlager kann sich die Situation jedoch dramatisch verändern, denn dann steigt die Transportgeschwindigkeit auf ein Vielfaches, wodurch langfristig Grundwasser kontaminiert werden kann und radioaktive Substanzen in die Biosphäre gelangen können.

### ***Offene Fragen und ethische Probleme der Endlagerung***

Angesichts von Jahrzehnten ergebnisloser Erforschung von Endlagern und von vielen Milliarden, die diese Forschungsarbeiten über und unter Tage inzwischen gekostet haben, wird die große Schwierigkeit dieses Unterfangens deutlich. Zwar sind die Konzepte mittlerweile ausgereifter als früher, und es hat sich auch eine wesentlich verantwortungsbewusstere Umgangsweise mit Radioakti-

vität durchgesetzt als in den Anfangsjahren der Kernenergie; doch existiert immer noch kein einziges Endlager auf der Welt. Die Gründe hierfür liegen nicht nur an politischen Widerständen, sondern auch an vielen offenen Fragen, die durch die unglaublich langen Zeiträume bedingt sind. Einige der wichtigsten Fragen, die im politischen Diskurs bislang kaum auftauchen, die aber für Fachleute große Relevanz haben, sollen hier vorgestellt werden. Diese Fragen sind zu einem Teil wissenschaftlich-technischer, zum anderen Teil vor allem ethischer Natur.

Die notwendigen Zeiträume sprengen das Maß des menschlich Vorstellbaren. Der moderne Mensch lebt seit weniger als 200 000 Jahren auf der Erde. Die letzte Eiszeit endete vor knapp 12 000 Jahren. Ackerbau und Viehzucht sind gerade einmal etwas über 10 000 Jahre alt, die Pyramiden 5000 Jahre. Wir müssten also kurzfristig innerhalb von ein oder zwei Generationen Entscheidungen treffen, die über einen längeren Zeitraum hinausgehen werden, als es bereits Menschen gibt! Dies ist eine ungeheure moralische Verantwortung, bei der der winzigste Fehler ungeheure Konsequenzen haben kann. Dabei reicht unser natürlicher moralischer Kompass gar nicht so weit in die Zukunft, sondern ist bestenfalls auf eine oder zwei weitere Generationen angelegt (und oft reicht er nicht einmal für die Gegenwart). Deshalb müssen wir auf diesem Gebiet stets unseren eigenen besten Überzeugungen mit großer Skepsis gegenüberstehen und grundsätzlich mit unserer eigenen Hybris rechnen.

Es ist allen Beteiligten klar, dass bei derart langen Zeiträumen und bei derart großen Mengen hochradioaktiven Materials möglicherweise eine sehr große Anzahl von Menschen betroffen sein könnte, falls bei unseren Kalkulationen und Erprobungen etwas schief läuft. Nur mit größtmöglicher Vorsicht lässt sich die Wahrscheinlichkeit minimieren, dass solche Schäden viele Menschen betreffen. Aus Gründen des geringeren politischen Widerstands untersucht man heute vor allem dünn besiedelte Gebiete. Aber niemand kann vorhersehen, ob diese Gebiete auch noch in Zehntausenden von Jahren dünn besiedelt sein werden. Und diese Frage ist insbesondere von Bedeutung, da ein geringer Teil der radioaktiven Abfälle auch bei günstigen Voraussetzungen an die Oberfläche diffundieren wird. Anreicherungsprozesse in der Nahrungskette oder geologische Aufkonzentrierungen, die wir heute nicht abschätzen können, könnten das Problem verschärfen.

Es ist auch schwer abzuschätzen, wie sicher unsere geologischen und kernphysikalischen Theorien sind. Zwar ist die Naturwissenschaft mittlerweile durchaus fortgeschritten und grundlegende Umwälzungen innerhalb gut erforschter Disziplinen sind nicht mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten

– eher an den Rändern unseres Wissens –, es ist aber nicht auszuschließen, dass sich irgendwann vielleicht bislang noch unbekannte Effekte akkumulieren, die in ihrer Summe all unseren Planungen zuwiderlaufen. Auch ist das Erdinnere noch viel zu schlecht erforscht und verstanden, als dass langfristige geologische Prognosen wirklich theoretisch abgesichert sein könnten. Solche Prognosen sind vielmehr Extrapolationen aus vergangener Gesteinsgeschichte. Man muss nicht das extrem unwahrscheinliche Restrisiko eines größeren Asteroideneinschlags im Endlagergebiet bemühen, um festzustellen, dass durchaus einiges anders laufen könnte als geplant. Und selbst wenn alle geologischen und kernphysikalischen Berechnungen stimmen sollten, darf der Faktor Mensch in all seinen heute noch kaum vorstellbaren Möglichkeiten nie außer Acht gelassen werden.

Sollten künftige Generationen herausfinden, dass entweder unsere Wahl des Endlagers alles andere als optimal war oder dass es andererseits sehr viel intelligenter ist, Atommüll mit fortschrittlichen Methoden zu transmutieren und anschließend im flüssigen Erdmantel zu versenken – was mit zukünftiger Technologie vielleicht durchaus wirtschaftlich sein könnte –, so werden sie mit einem zugänglichen und ordentlich gewarteten Endlager keine großen Probleme haben, mit einem zugeschütteten und korrodierten jedoch schon. Der Nachteil eines zugänglichen Endlagers besteht allerdings darin, dass Terroristen ebenfalls Zugang dazu finden könnten – ganz gleich ob diese Terroristen in erpresserischer oder in apokalyptischer Mission unterwegs sind. Während ein Terrorist, der sich Zugang zu einem noch jungen und erst teilweise korrodierten Endlager verschafft, relativ schnell tot umfallen würde, so wird er in gut 1000 Jahren, wenn die meisten Spaltprodukte ausgestrahlt haben, noch genug Zeit haben, großes Unheil anzurichten. Vielleicht ist aber auch die Robotertechnik schon in 100 Jahren so weit entwickelt, dass er gar keinen persönlichen Zugang mehr braucht, weil ihm selbstprogrammierte Maschinen alle gefährliche Arbeit abnehmen.

Ein Endlager müsste also sehr gut bewacht werden. Ein Problem hierbei sind die Kosten, denn über solch enorme Zeiträume akkumulieren sich auch geringe Personalkosten zu gigantischen Summen. Auf der anderen Seite ist aber auch selbst dann, wenn wir alle Zugänge zum Endlager zuschütten, mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass künftige Generationen allein schon aus Sorge um ihre Gesundheit umfangreiche Messapparate installieren werden, um sicherzustellen, dass sie keiner schleichenden Kontamination ausgesetzt sind. Auch dies sind Folgekosten von Endlagern, die in heutigen Kalkulationen nicht berücksichtigt werden.

Wir können heute nicht vorhersehen, wie kommende Generationen dieses Problem und den Umgang ihrer Vorfahren mit diesem Problem beurteilen werden. Das, was wir heute für richtig, geboten und notwendig halten, mögen künftige Generationen mit anderen technischen Möglichkeiten, mit anderen ethischen Prinzipien und mit anderen Bedürfnissen als hochgradig falsche und gefährliche Entscheidungen ansehen.

Es besteht nicht einmal Einigkeit darüber, ob man Endlagerstätten möglichst geheim halten sollte oder irgendwie kennzeichnen sollte zur Warnung für künftige Generationen. Wenn man sie geheim hält, könnte sich das für viele Menschen als böse Überraschung herausstellen – sei es, weil eine besiedelte Region bereits kontaminiert wurde oder weil die Menschen dort bei der Suche nach Rohstoffen das Endlager versehentlich angebohrt haben, wodurch ihr Grundwasser großflächig verseucht wurde. Will man hingegen warnen, so stellt sich die Frage, wie diese Warnung aussehen sollte und wie sie dauerhaft sein könnte. Geradezu phantastische Vorschläge wurden hierzu gemacht.

Wir können aber nicht einmal abschätzen, auf welchem technologischen Stand sich die Menschheit in Zehntausenden von Jahren bewegen wird und ob sie unsere Zeichen noch verstehen werden. Die bisherige Menschheitsentwicklung legt eine kulturelle Evolution hin zu höherer technischer Fertigkeit und sozialer Komplexität nahe. In der Menschheitsgeschichte hat es aber auch immer wieder Rückschritte und dunkle Zeitalter gegeben. Selbst wenn es in einer globalisierten Welt unwahrscheinlich scheint, dass die Menschheit eines fernen Tages auf einem technologisch niedrigeren Niveau leben wird als wir in unserer Zeit, so ist dies doch nicht völlig ausgeschlossen. Menschen auf dem technologischen Niveau des Mittelalters würden im schlimmsten Fall in großer Zahl etwa an verseuchtem Grundwasser sterben.

Eine wichtige und nicht logisch entscheidbare Frage ist also die, ob man ein Endlager vor kommenden Generation verstecken oder sie im Gegensatz darauf hinweisen will. Von der US-Regierung wurde deshalb in einem großen interdisziplinären Forschungsprojekt untersucht, ob es überhaupt möglich ist, ferne Generationen mit Hilfe universeller Symbole davor zu warnen, in einem Endlagergebiet zu bohren oder zu wohnen. Das vorläufige Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass menschliche Sprache zu komplex und zu stark kulturgebunden ist und sich zu stark verändert, als dass eine verlässliche Warnung über einen solch langen Zeitraum gewährleistet werden könnte.

Es könnte sogar sein, dass künftige Generationen, vielleicht weil sie das meiste leicht abbaubare Uran schon verbraucht haben, ein Endlager als ökonomisch nutzbare Ressource ansehen. Mit fortschrittlicher Technologie könnten

das Uran und das Plutonium oder andere Elemente von wirtschaftlichem Interesse sein. Auch in diesem Fall wäre ein gut dokumentiertes und gewartetes Endlager von großem Vorteil.

Andere schwierige Fragen betreffen die Haftung und die moralische Verantwortung. Wie lange werden die Energiekonzerne oder gar die Staaten, die heute Kernenergie betreiben und damit Geld verdienen, bestehen können und vor allem hinreichend solvent bleiben, um in Zukunft für unvorhersehbare Folgeschäden haften zu können? Wie groß müssen Risikorücklagen sein für Generationen, von denen wir nicht einmal wissen können, wie zahlreich sie sein werden? Vielleicht wird die Weltbevölkerung eines Tages so weit schrumpfen, dass es den Menschen in Zukunft problemlos möglich sein wird, gewisse Areale als atomare Müllkippe zu benutzen und einen großen Bogen darum zu machen. Vielleicht wird Land aber eines Tages so wertvoll, dass jeder Quadratkilometer verseuchten Terrains einen unglaublichen Verlust darstellt. Nur dann, wenn die Menschheit vorher aussterben sollte, könnten uns diese Fragen gleichgültig lassen. Diese Annahme führt allerdings nie zu ethisch sinnvollen Handlungsmaximen.

Auch wenn die geologischen Formationen, in denen wir Endlagerung betreiben wollen, stabil bleiben und kaum Radioaktivität an die Biosphäre freigesetzt wird, bleiben Fragen bestehen. Woher können wir heute wissen, ob diese geologischen Formationen nicht späteren Generationen aus welchen Gründen auch immer als Rohstoffquelle dienen werden? Durch die radioaktive Belastung könnten wir ihnen deutliche Mehrkosten verursachen, wohingegen die Menschen der Zukunft bei einem dauerhaft gesicherten und rückholbaren Lager vielleicht einfach eine wirtschaftlich rentable Umlagerung der radioaktiven Abfälle vorziehen würden. Der Faktor Mensch kann über Jahrhunderttausende in unterschiedlichster Form in die Natur eingreifen, wie ja die gesamte Menschheitsgeschichte zeigt.

Eine andere Frage wiederum berührt den Komplex der staatlichen Rechtsnachfolge. Welche Organisationsstrukturen werden sich in menschlichen Gesellschaften in Zukunft durchsetzen? Werden Nationalstaaten in 100 oder 1000 Jahren vielleicht die Bedeutung verlieren, die sie in den letzten 300 Jahren Menschheitsgeschichte besaßen? Wer wird dann Rechtsnachfolger sein? Wird eine Weltregierung oder werden lokale Autoritäten ihre Stelle einnehmen? Ist unsere Gesellschaft, sind die Generationen, die von der Bereitstellung nuklear erzeugter Elektrizität profitiert haben, nicht dazu verpflichtet, den hierbei erzeugten, enorm gefährlichen Abfall wieder möglichst unschädlich zu machen? Auch wenn hiermit enorme Kosten verbunden sind und große tech-

nologische und wissenschaftliche Herausforderungen gemeistert werden wollen; wenn der Einsatz von vielen der besten Köpfe, die unsere Universitäten hervorbringen, gefragt ist und wenn groß angelegte, konzentrierte Forschungsprogramme durchgeführt werden müssen? – Nicht zu vergessen der politische Wille, dem Wähler reinen Wein bezüglich der Entsorgungsproblematik einzuschenken.

Es könnte auch so sein, dass schon der politisch leicht zu instrumentalisierende Begriff der Endlagerung eine sinnvolle Herangehensweise an die Atom-müll-Entsorgung erschwert. Der Begriff der Endlagerung impliziert ja, dass Stoffe so gelagert werden, dass die Menschheit sie vergessen kann und sich um sie keine Sorgen mehr machen muss. Es steht aber nicht in unserem Wissenshorizont und auch nicht in unserem Ermessen, absehen zu können, ob künftige Generationen sich zu Recht oder zu Unrecht Sorgen um ihre Sicherheit machen werden und eventuell dazu gezwungen sein werden, sehr teure und aufwendige Dekontaminierungsprogramme zu finanzieren oder gar ganze Landstriche extrem langfristig sperren zu müssen – und sei es aus Unkenntnis, übersteigter Angst oder aber aufgrund größerer Vorsicht und einer weiterentwickelten Ethik. So gesehen kann der Begriff der Endlagerung zu einem irreführenden Begriff werden, da er unsere Maßstäbe – oder zumindest die einiger Experten unserer Zeit – an Zeiträume anlegt, die außerhalb jeglichen menschlichen Ermessens liegen.

Vielleicht ist der Begriff der Endlagerung aber auch zu betriebswirtschaftlich gedacht. Wir sind es gewohnt, mit Zivilisationsabfällen so umzugehen, dass wir sie irgendwo deponieren und hierfür irgendeinen Preis anzugeben haben. Man versucht, für die Folgen einer Technologie Kosten anzugeben, die man aber gar nicht kennen kann; und weil man unter verschiedenen unklaren Möglichkeiten wählen muss, wählt man diejenige, die kurzfristig am ehesten kalkulierbar erscheint, auch wenn sie langfristig mit enormen Risiken behaftet ist. Vielleicht ist es weiser, sich einzugestehen, dass wir für dieses Problem zur Zeit keine akzeptable Lösung parat haben und dass eventuell der geostrategisch gewünschte Betrieb von Kernkraftwerken nicht wirtschaftlich ist, wenn alle volkswirtschaftlichen Kosten einer verantwortungsbewussten Abfallbeseitigung mitberücksichtigt würden. Die Vermeidung von Kohlendioxid-Emissionen wäre dann zwar immer noch ein triftiger Grund für den Betrieb von Kernkraftwerken; die Konkurrenzfähigkeit zu regenerativen Energien würde sich aber verschieben. In jedem Fall müssten wir dann Forschungsgelder in Projekte investieren, die sich nicht allein mit der bisher avisierten Endlagerung, sondern auch mit alternativen Entsorgungskonzepten auseinandersetzen.

Aus all diesen Gründen und ungeklärten Fragen heraus ist international in den letzten Jahren eine zunehmende Abkehr vom Prinzip der unkontrollierten Endlagerung auszumachen. Sowohl die Berücksichtigung einer längerfristigen Rückholbarkeit als auch intensivierete Anstrengungen auf dem Gebiet der Transmutation deuten ein begrüßenswertes Umdenken einiger Verantwortlicher an und zeigen Wege auf, wie man die Entsorgungsproblematik besser in den Griff bekommen könnte, als es die teilweise höchst fragwürdigen Ansätze der 50er bis 80er Jahre noch befürchten ließen.

### ***Wie könnte ein verantwortungsbewusstes Entsorgungskonzept aussehen?***

In diesem letzten Kapitel sollen die bisher vorgestellten Konzepte noch einen Schritt weiter in die Zukunft gedacht werden. Sehr viel stärker als die anderen Kapitel gibt dieses deshalb die persönliche Einschätzung des Autors wieder. Der Inhalt dieses Kapitels ist zwar durchaus spekulativ, er erscheint aber zumindest dem Autor deutlich weniger spekulativ als die derzeitigen Endlagerpläne und zugleich auch ethisch sehr viel weniger fragwürdig. Die wichtigsten Fragen zu dieser Problematik sind, wie viel und welche Art von Verantwortung wir selbst zu tragen bereit sind, wie wir die Grenzen unseres Wissens einschätzen und welche Art von Lasten wir an kommende Generationen delegieren wollen. Die Wahl eines verantwortungsbewussten Entsorgungskonzeptes ergibt sich dann aus den folgenden Punkten.

Angesichts der Ungewissheit allen menschlichen Handelns sollte es ein leitendes ethisches Prinzip sein, künftigen Generationen *Entscheidungsfreiheit* zu gewährleisten. Denn wir können nicht wissen, wie künftige Generationen denken und werten werden. Nicht nur wissenschaftliche Kenntnisse und technische Fertigkeiten ändern sich, sondern auch Wertvorstellungen und Weltbilder können sich weiterentwickeln. In nichttotalitären Gesellschaften kann nicht immer ein Konsens erzielt werden; auch nicht darüber, was man unter Verantwortung gegenüber kommenden Generationen verstehen kann. Die Meinung hierüber kann sich verschieben – auch und gerade in Hinsicht auf solch brisante Entscheidungen wie die Entsorgung von Atommüll. Man sollte künftigen Generationen also zumindest die Möglichkeit geben, unsere Entscheidungen rückgängig zu machen. Ganz allgemein gesprochen kann man dies als das Prinzip bezeichnen, kommenden Generationen eine möglichst weitgehende Autonomie bezüglich ihrer Lebensweise zu ermöglichen.

Wir können die Risiken eines Endlagers über die erforderlichen Zeiträume nicht im Geringsten abschätzen. Wir haben keine Chance zu überprüfen, ob unsere Annahmen zu optimistisch oder eher pessimistisch sind. Das Risiko für

eine unvorhersehbare negative Entwicklung könnte bei 0,1% oder bei 99,9% liegen, es könnte über den gesamten Zeitraum einen zusätzlichen Todesfall in einer Million Jahre bedeuten oder insgesamt 1000 oder 1 000 000 oder vielleicht noch viel mehr Menschen beeinträchtigen, schwer schädigen oder gar umbringen. Die hierzu beitragenden Faktoren sind auf dem heutigen Stand unseres Wissens weder vorhersehbar noch vorstellbar noch berechenbar. Ebenso wenig sind es die Handlungen und Sichtweisen künftiger Generationen. Das Ziel einer verantwortungsvollen Politik muss es deshalb sein, künftigen Generationen bessere Instrumente zur Behandlung radioaktiver Abfälle zur Verfügung zu stellen als diejenigen, über welche wir heute verfügen. Wir müssen deshalb *entsorgungsorientierte Forschungsprojekte* anstoßen, die genau darauf abzielen, neue und bessere Technologien der nuklearen Abfallbehandlung zu ermöglichen.

Angesichts der technischen Entwicklung der letzten Jahrhunderte ist es geradezu naiv zu glauben, die kommenden Generationen würden keine besseren Methoden und Techniken entwickeln können, als wir sie heute zur Verfügung haben. Keine vor uns lebende Generation hätte unseren technologischen Stand vorhersehen können. Noch vor gerade einmal 100 Jahren hätte die Vorstellung absurd geklungen, ernsthaft zum Mond fliegen zu wollen. Vor einigen Tausend Jahren war der Mond nicht einmal etwas, wohin man hätte fliegen können oder wollen. Ein zugeschüttetes Endlager würden kommende Generationen vielleicht nicht nur als außerordentliche Belastung, sondern auch als Beleidigung ihrer Problemlösungskompetenz auffassen. Was auch immer die Menschen des Mittelalters an Müll und Unrat produziert haben und womit sie große hygienische Probleme hatten, ist für heutige Entsorgungstechnologien ein Kinderspiel.

Sollten trotz aller Bemühungen keine Fortschritte erzielbar sein, können künftige Generationen immer noch den Weg der direkten Endlagerung wählen. Eventuell werden sie auch durch kriegerische Konflikte hierzu gezwungen, denn Zwischenlager und Kernkraftwerke stellen im Kriegsfall große Ziele mit gigantischer Schadenswirkung dar. Die dann lebenden Menschen werden ihrerseits zukünftigen Generationen aber nur dann eine weitere Entscheidungsfreiheit nicht verbauen, wenn auch sie die Endlager rückholbar gestalten. Zum Schutz vor Naturkatastrophen, Terrorismus, Flugzeugunfällen oder einer Bombardierung im Krieg sollten hochgefährliche Substanzen am besten weit unter der Erde in trockenen und vom Grundwasser unerreichbaren Stollen gelagert werden. So lässt sich auch bei einem Unfall der Austritt von Radioaktivität besser eindämmen. In jedem Fall aber ist eine *langfristige Rückholbarkeit*